

Lithological sequence, geochemistry, and Sr, Nd, and Pb isotopic data of Marshoun volcanic rocks, North Abhar (Tarom-Hashtjin subzone)

Farzad Asgari¹, Mir Ali Asghar Mokhtari² , Hossein Kouhestani³ 

¹ M.Sc. Student, Geology Department, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran, farzadasg72@gmail.com

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran, amokhtari@znu.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran, kouhestani@znu.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 13 May 2021

Accepted: 23 November 2021

Keywords

Geochemistry
volcanic rocks
Sr, Nd, and Pb isotopes
Marshoun
Tarom- Hashtjin
Abhar



 20.1001.1.22285210.1402.14.1.4.9

 10.22108/ijp.2021.128687.1231

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Marshoun area located 120 km Southeast of Zanjan, is a part of the Tarom-Hashtjin metallogenic-magmatic subzone within the Alborz-Azarbaijan zone. Similar to most parts of the Alborz-Azarbaijan zone, the Eocene-Oligocene volcanic and the intrusive rocks of this subzone were formed as a result of the Alpine orogenic phase, which has a close spatial and temporal relationship with metallic mineralization (Kouhestani et al., 2019). Several studies have been conducted on metallic mineralizations in different parts of the Tarom-Hashtjin subzone. The petrological studies carried out in this subzone are mainly focused on intrusive rocks (e.g., Seyed Qaraeini et al., 2020) and volcanic rocks' geochemical and petrological characteristics have been less considered. Marshoun area is composed of volcanic-sedimentary sequences which are hosts for Pb-Zn-Cu mineralization (Kouhestani et al., 2019). A detailed scientific study has not been done on the lithological sequence and their geochemical and petrological characteristics in the Marshoun area so far. In the present study, the lithological and geochemical characteristics including Sr, Nd, and Pb isotopic data, as well as the tectonomagmatic environment of the volcanic rocks of the area have been investigated.

 Corresponding Author

To cite this article: Asgari, F., Mokhtari, M. A. A., and Kouhestani, H. (2023) Lithological sequence, geochemistry and Sr, Nd and Pb isotopic data of Marshoun volcanic rocks, north Abhar (Tarom-Hashtjin subzone). *Petrological Journal*, 14(1), 81-108.

Materials and methods

During fieldwork, a 1:25000 geological map was prepared from different lithological units of the area, and over 30 samples were taken. Also, 17 thin sections for petrographical studies, 10 samples for chemical, and 4 samples (2 andesites and 2 dacites) for isotopic analyses. Chemical analyses (XRF and ICP-MS methods) were carried out at Zarazma Laboratory, Tehran, Iran., and isotopic studies (i.e. Nd, Sr, and Pb isotope studies at Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing, China).

Results

The predominant rock units in the Marshoun area are Eocene acidic tuffs, dacitic-rhyodacitic lava, and occasionally ignimbrite at the base and alternation of intermediate tuff with minor andesite and basaltic andesite intercalation in the top, along with some intrusive rocks with (Zajkan intrusion), and some gabbroic dykes.

Zajkan intrusion including pyroxene quartz monzodiorite, quartz monzodiorite, and granodiorite composition intruded acidic volcano-sedimentary rocks with a total thickness of 930 meters can be divided into 9 parts.

Volcanic rocks of the Marshoun area are classified as rhyolite, rhyodacite, dacite, andesite, basaltic andesite, and trachy-andesite with high-K calc-alkaline affinity. Dacitic-rhyodacitic rocks have porphyritic, flow, and spherulitic textures, composed of plagioclase, quartz, alkali feldspar, and mafic minerals (amphibole and biotite) set in a quartz-felspathic groundmass whereas, andesitic rocks show porphyritic, glomeroporphyritic, and amygdaloidal textures, composed of plagioclase and mafic minerals (amphibole and some pyroxene) set in a fine-grained and occasionally microlithic groundmass.

All samples under study on primitive mantle normalized spider diagrams, have similar patterns indicative of their genetic relations. LILEs and HFSEs. negative anomalies are remarkable features of these rocks. Chondrite-normalized REE patterns demonstrate a relatively steep to low slope pattern with LREE enrichment and a high ratio of LREE/HREE, $(La/Yb)_N$, and $(La/Sm)_N$ ratio between 3.8-30.1 and 1.2-8.25, respectively. On tectonomagmatic setting discrimination diagrams, volcanic rocks of the Marshoun area have been formed in an active continental margin tectonic setting. Isotopic data of Sr (0.70485-0.70622), Nd (0.512695-0.712733), and Pb ($^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, and $^{208}Pb/^{204}Pb$ between 18.743-18.803, 15.5938-15.6112 and 38.8138-18.0721, respectively) point to dominant role of mantle in the formation of the investigated rocks. According to the Pb isotopes, the area's acidic rocks originated either from a more enriched mantle or were contaminated by crustal materials during ascending magma.

Discussion and Conclusion

As the geochemical data indicate the primary magma of Marshoun volcanic rocks is generated by the partial melting of subcontinental metasomatized mantle lithosphere as a result of the subduction process within the continental margin environment. According to data obtained from the present study as well as the previous research, it can be concluded that the result of the subduction of the active continental margin and the shortening of the crust in Alborz during the Eocene gave rise to the thickening of continental crust and further led to the separation and subsidence of the lower part of the subcontinental lithospheric mantle (delamination).

As a result of this event, the ascending of asthenosphere currents has led to an increase in the thermal gradient and partial melting of the subcontinental lithosphere and generation of basic magma which during ascending contaminated by crustal materials. Finally, the differentiation process led to the formation of intermediate and acidic rocks.

Acknowledgment

This research study was made possible by a grant from the office of the vice-chancellor of research and technology, University of Zanjan. We hereby acknowledge their generous support. The Journal of Petrology reviewers and editor are also thanked for their constructive comments

توالی سنگی، زمین‌شیمی و داده‌های ایزوتوپی Sr، Nd و Pb سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون، شمال ابهر (زیرپهنه طارم - هشتجین)

فرزاد عسگری^۱، میرعلی اصغر مختاری^۲، حسین کوهستانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد پتروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، farzadasg72@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، amokhtari@znu.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، kouhestani@znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

منطقه مرشون بخشی از زیرپهنه ماگمایی طارم- هشتجین در پهنه البرز باختری- آذربایجان به‌شمار می‌رود. این منطقه دربرگیرنده توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن، شامل تناوب توف و گدازه‌های اسیدی و حد واسط است که توده‌های گرانیتوئیدی ائوسن بالایی آنها را قطع کرده‌اند. بررسی‌های سنگ‌شناسی و رده‌بندی شیمیایی گدازه‌های این مجموعه نشان‌دهنده ترکیب بازالت‌اندزیتی، آندزیت، داسیت، ریوداسیت و ریولیت برای این سنگ‌هاست. این سنگ‌ها سرشت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا دارند. در نمودارهای بهنجار شده عنصرهای کمیاب نسبت به ترکیب گوشته اولیه، این سنگ‌ها الگوی مشابهی دارند که می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط زایشی آنها باشد. این نمودارها آنومالی مثبت LILE را همراه با بی‌هنجاری منفی عنصرهای HFSE نشان می‌دهند. الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت الگویی نسبتاً پرشیب تا کم‌شیب و غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE را نشان می‌دهد که در آن نسبت‌های $(La/Sm)_N$ و $(La/Yb)_N$ به ترتیب برابر با $3.0/1 - 3.8/1$ و $1.2/1 - 1.25/1$ هستند. داده‌های ایزوتوپی Sr $(^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70485 - 0.70622)$ ، Nd $(^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512695 - 0.512733)$ و Pb $(^{206}Pb/^{204}Pb, ^{207}Pb/^{204}Pb, ^{208}Pb/^{204}Pb)$ به ترتیب برابر با $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ ، $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ و $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ و $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ و $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ و $1.8/10^3 - 1.8/10^3$ نشان‌دهنده نقش غالب گوشته در پیدایش این سنگ‌های حد واسط هستند. مجموعه اطلاعات به‌دست‌آمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌شناختی، زمین‌شیمی، ایزوتوپی و نمودارهای تمایز محیط‌های زمین‌ساختی نشان می‌دهند گدازه‌های حد واسط- اسیدی منطقه مرشون در ارتباط با گوشته سنگ‌کره‌ای غنی شده زیرقاره‌ای مرتبط با فرورانش و احتمالاً در ارتباط با فرایند جدایش و فرورفتن بخش زیرین سنگ‌کره پدید آمده‌اند.

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

کلید واژه‌ها

زمین‌شیمی
سنگ‌های آتشفشانی
ایزوتوپی‌های Sr، Nd و Pb
مرشون
طارم- هشتجین
ابهر



20.1001.1.22285210.1402.14.1.4.9
10.22108/ijp.2021.128687.1231

✉ نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: عسگری، ف.، مختاری، م. ع. ا.، کوهستانی، ح. (۱۴۰۲) توالی سنگی، زمین‌شیمی و داده‌های ایزوتوپی Sr، Nd و Pb سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون، شمال ابهر (زیرپهنه طارم- هشتجین). پتروژئولوژی، ۱۴(۱)، ۸۱-۱۰۸.



مقدمه

منطقه مرشون در فاصله نزدیک به ۲۵ کیلومتری شمال ابهر و ۱۲۰ کیلومتری جنوب خاوری زنجان جای دارد و بخشی از پهنه البرز- آذربایجان (Nabavi, 1976) در زیرپهنه ماگمایی- فلززایی طارم- هشتجین (Ghorbani, 2013) به شمار می‌رود. همانند بسیاری از بخش‌های پهنه البرز- آذربایجان، در این منطقه نیز در پی فرایند کوهزایی آلپی، سنگ‌های آذرین بیرونی، نیمه‌درونی و درونی فراوانی از ائوسن تا الیگوسن پدید آمده‌اند که ارتباط فضایی و مکانی نزدیکی با کانه‌زایی‌های فلزی آهن، مس، سرب- روی و طلا نشان می‌دهند (Kouhestani et al., 2019a, 2019b, 2020; Ghasemi Siani et al., 2020). تا کنون بررسی‌های بسیاری روی کانه‌زایی‌های فلزی در بخش‌های مختلف زیرپهنه طارم- هشتجین انجام شده‌اند (Ghasemi Siani, 2014; Nabatian et al., 2014a; Hosseinzadeh et al., 2015; Esmali et al., 2015; Mokhtari et al., 2016; Hosseinzadeh et al., 2016; Mehrabi et al., 2016; Kouhestani et al., 2018, 2019a, 2019b, 2020). بیشتر بررسی‌های سنگ‌شناسی انجام‌شده در این زیرپهنه روی توده‌های آذرین درونی متمرکز شده‌اند (Naderi, 2011; Rashidnejhad Omran et al., 2014; Nabatian et al., 2014a, 2014b; Aghazadeh et al., 2015; Nabatian et al., 2016a, 2016b; Saiedi et al., 2018; Yasami et al., 2018; Seyedqaraeini et al., 2020; Ghasemi Siani et al., 2020) و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناسی سنگ‌های آتشفشانی کمتر مد نظر قرار گرفته‌اند. در برخی بررسی‌های مربوط به سنگ‌شناسی توده‌های آذرین درونی، از نقش این توده‌ها در پیدایش کانی‌سازی‌های منطقه یاد شده است. برای نمونه، به باور قاسمی‌سیانی و همکاران (Ghasemi Siani et al., 2020)، توده‌های آذرین درونی طارم در فراهم‌کردن گرمای لازم برای گرم‌شدن سیال‌ها و ترکیب شیمیایی سیال‌های گرمایی پدیدآورنده کانه‌زایی‌های اپی‌ترمال نقش داشته‌اند. منطقه مرشون در بخش انتهایی جنوب‌خاوری پهنه طارم- هشتجین (شکل ۱- A)، متشکل از توالی آتشفشانی- رسوبی ائوسن (معادل سازند کرج) است که توده‌های آذرین درونی به سن ائوسن بالایی (Castro et

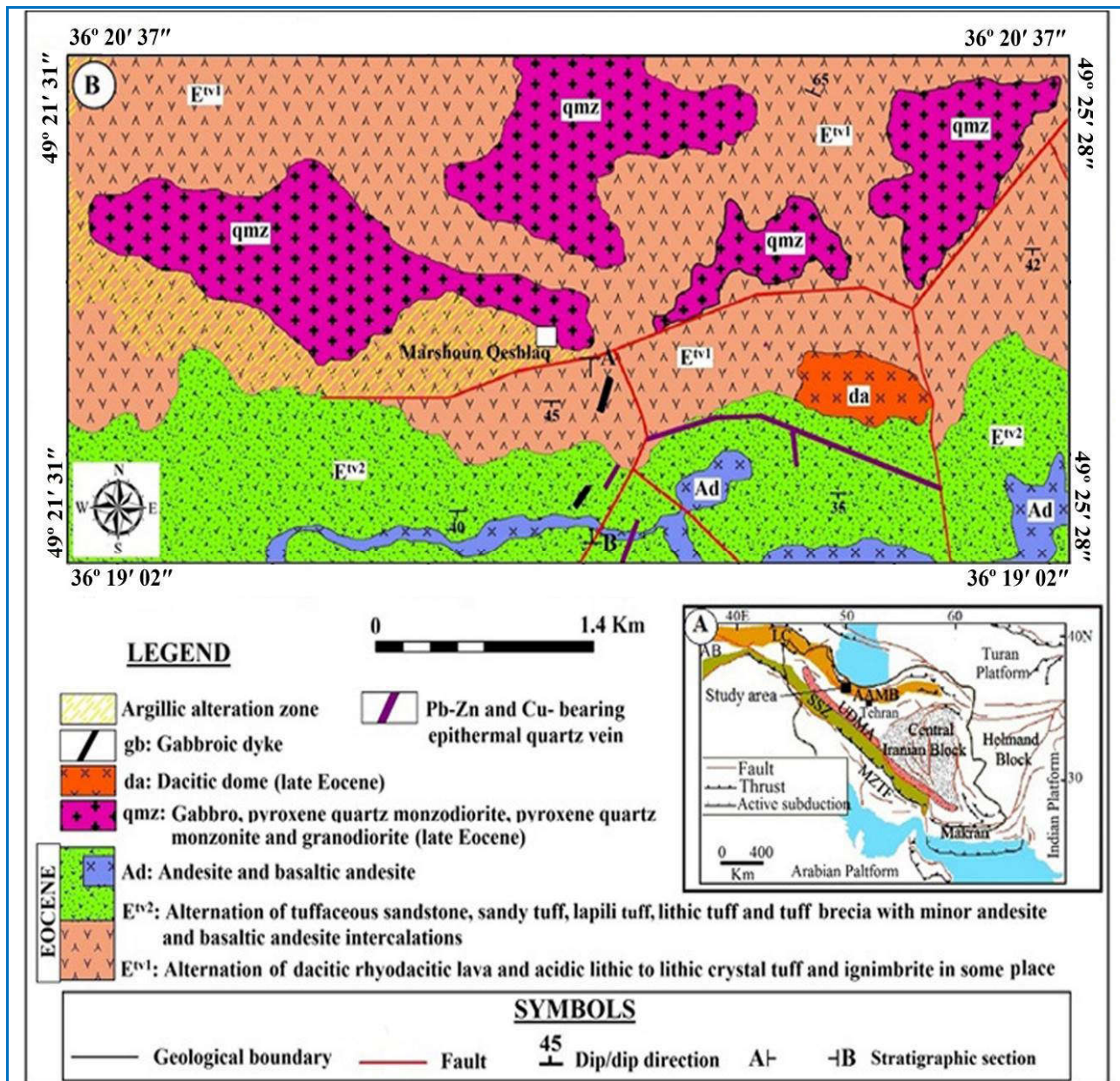
al., 2013; Nabatian et al., 2014a; Hosseiny et al., 2016; Nabatian et al., 2016a) آنها را قطع کرده‌اند. برپایه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی ابهر (Hosseiny et al., 2016)، توالی آتشفشانی- رسوبی یادشده شامل تناوب گدازه‌ها و توف‌های ریوداسیتی، آندزیت‌داسیتی، ایگنیمبریت، کریستال‌توف‌های اسیدی همراه با مقادیر کم آندزیت، بازالت و تراکی آندزیت، میکروکنگلومرای نومولیت‌دار و توف ماسه‌ای (واحد E₂^{dig})، تناوب ماسه‌سنگ‌های توفی، توف ماسه‌ای، لاپیلی توف، کنگلومرا و برش توفی به‌همراه گدازه‌های آندزیتی، تراکی آندزیتی و بازالت‌های آندزیتی و الیوین‌بازالت (واحد E₂- 3^{tsi}) هستند. توالی آتشفشانی- رسوبی یادشده، میزبان کانه‌زایی‌های سرب- روی- مس منطقه (Kouhestani et al., 2019a, 2019b, 2020) است. تا کنون بررسی علمی دقیقی روی توالی سنگ‌شناسی، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناسی آنها انجام نشده است. از این‌رو، در این نوشتار ویژگی‌های سنگ‌شناختی، زمین‌شیمیایی، داده‌های ایزوتوپی Sr، Nd و Pb و محیط تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون بررسی شده‌اند.

روش انجام پژوهش

این پژوهش شامل دو بخش بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی است. بررسی‌های صحرایی شامل شناسایی واحدهای آتشفشانی- رسوبی گوناگون منطقه و نمونه‌گیری از آنها برای بررسی‌های آزمایشگاهی بوده‌اند. در این راستا، افزون‌بر انجام بررسی‌های صحرایی، ستون سنگ‌شناسی منطقه رسم و نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از منطقه تهیه شد. در این راستا بیش از ۳۰ نمونه برداشت شد که از میان آنها شمار ۱۷ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌شناختی تهیه شد. انتخاب نمونه‌های صحرایی برپایه تغییرات رنگ، بافت و ترکیب سنگ‌شناسی واحدهای مختلف بوده و تا جایی که شدنی بود تلاش شد نمونه‌های با کمترین نشانه‌های دگرسانی برگزیده شوند. پس از بررسی‌های میکروسکوپی، شمار ۱۰ نمونه از سالم‌ترین نمونه‌های واحدهای سنگی منطقه برگزیده و برای اندازه‌گیری فراوانی عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی

نمونه پیشین به نمونه بعدی به کمترین اندازه برسد. سپس، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای بررسی میزان عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب به آزمایشگاه‌های مربوطه فرستاده و تجزیه شد. مقدار LOI نمونه‌ها با نگهداری پودر سنگ‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت به‌دست آمد.

کمیاب به روش‌های XRF و ICP-MS در شرکت زرآزما در تهران تجزیه شدند. برای این کار، نخست نمونه‌ها با خردکننده فولادی تا اندازه نزدیک به ۵ میلی‌متر خردایش شدند و سپس با آسیاب تنگستن کاربرد به مدت ۲ دقیقه تا اندازه نزدیک به ۲۰۰ مش پودر شدند. پس از پودر کردن هر نمونه، ماسه‌های کوارتزی آسیاب شدند تا انتقال آلودگی



شکل ۱. A) جایگاه منطقه مرشون روی نقشه ساختاری ساده‌شده ایران (Ramezani and Tucker, 2003); B) نقشه زمین‌شناسی منطقه مرشون با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰

Figure 1. A) Location of the Marshoun area on the simplified structural map of Iran (Ramezani and Tucker, 2003); B) Geological map of the Marshoun area in 1:25000 scale.

مونزودیوریت و گرانودیوریت (qmz) و دایک‌های گابرویی (gb) و گنبد داسیتی (da) است.

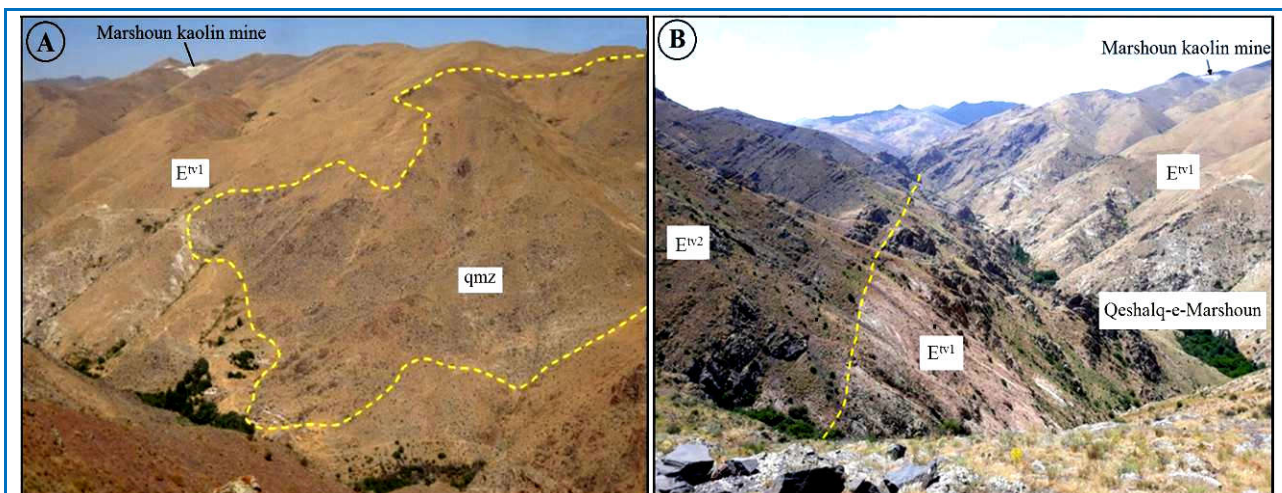
واحد E^{IV1} : این واحد شامل تناوب لایه‌های توفی اسیدی (کریستال توف، لیتیک کریستال توف و لیتیک توف) و گدازه‌های داسیتی- ریوداسیتی و گاه ایگنیمبریت است که بخش‌های شمالی و مرکزی محدوده بررسی شده را دربر گرفته است (شکل ۲). روند کلی این واحد، باختری- خاوری و شیب آن به سوی جنوب است. توده گرانیتوئیدی (qmz) درون این واحد نفوذ کرده و در مرز همبری با آن، دگرسانی گسترده گرمابی به صورت آرژیلیکی شدن رخ داده است (شکل ۲- A). این دگرسانی در بخش‌های باختری شدیدتر است و پهنه دگرسانی یادشده به عنوان خاک صنعتی (کائولن) در حال بهره‌برداری است (شکل ۲- B). این واحد سنگی به سمت بالا با واحد E^{IV2} به صورت هم‌شیب پوشیده شده است (شکل ۲- B). در بخش‌های جنوبی این واحد و در مجاورت با واحد E^{IV2} ، رگه سیلیسی با کانی‌زایی سرب- روی مرشون با امتداد N60E/70-80SE دیده می‌شود (شکل ۱- B). گدازه‌های داسیتی بافت پورفیری و گاه بافت جریانی مشخصی دارند.

برای تجزیه به روش XRF برای عنصرهای اصلی، قرصی از نمونه‌های پودر شده تهیه شد. برای بررسی میزان عنصرهای خاکی کمیاب نزدیک به ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم‌متابورات/تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد. میزان دقت برای عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب برابر با ۳ تا ۵ درصد بوده است. افزون بر این، شمار ۴ نمونه از واحدهای گدازه‌ای منطقه (۲ نمونه از آندزیت‌ها و ۲ نمونه از داسیت‌ها) برای بررسی‌های ایزوتوپی Nd، Sr و Pb برگزیده و در انستیتوی زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم زمین چین تجزیه شد.

در این نوشتار، نام اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

زمین‌شناسی

بر پایه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده از منطقه مرشون (شکل ۱- B)، واحدهای سنگی موجود در این منطقه شامل واحدهای آتشفشانی- رسوبی (E^{IV1} ، E^{IV2} و Ad) به همراه چندین رخنمون توده نفوذی با ترکیب کلی پیروکسن کوارتز مونزودیوریت و کوارتز



شکل ۲. A) دورنمایی از نفوذ توده گرانیتوئیدی (qmz) درون واحد E^{IV1} و پیدایش پهنه دگرسانی آرژیلیکی در واحد E^{IV1} (دید رو به شمال باختری); **B)** دورنمایی از توالی واحدهای E^{IV1} و E^{IV2} در منطقه مرشون (دید رو به شمال باختری) (در هر دو تصویر، معدن خاک صنعتی مرشون دیده می‌شود).

Figure 2. A) A view of the granitoid (qmz) intrusion in the E^{IV1} unit and formation of argillic alteration within the E^{IV1} unit (view to the northwest); **B)** A view from the alternation of E^{IV1} and E^{IV2} units in the study area (view to the northwest) (The Marshoun industrial soil mine is visible in both figures).

توف ماسه‌ای از بخش‌های با قطعات سنگی درشت به سمت ریز و برعکس دیده می‌شود.

واحد Ad: بخش‌های گدازه‌ای واحد E^{tv2} در برخی نقاط ضخامت بالایی دارند و می‌توان آنها را واحد جداگانه‌ای دانست (شکل ۴). بیشتر این سنگ‌ها ترکیب آندزیت، پورفیریتیک آندزیت و بازالت آندزیتی دارند. ضخامت این واحدها گاهی تا نزدیک به ۲۰ متر نیز می‌رسد.

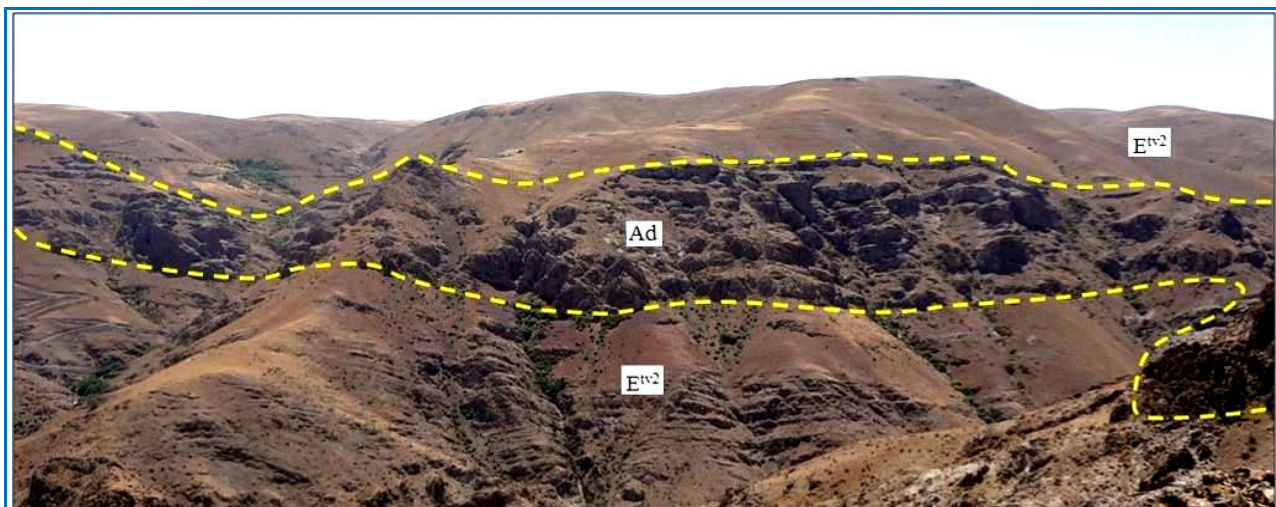
گنبد داسیتی (da): در بخش خاوری منطقه مرشون، یک گنبد داسیتی در مرز میان واحدهای E^{tv1} و E^{tv2} دیده می‌شود (شکل‌های ۱-B و ۵). گنبد داسیتی بیضوی شکل است و محور طولی آن روند خاوری-باختری دارد.

واحد E^{tv2} : این واحد متشکل از تناوب ماسه‌سنگ توفی، توف ماسه‌ای، لاپیلی توف، لیتیک‌توف و توف برش با میان‌لایه‌های محدودی از گدازه‌های آندزیتی و بازالت‌آندزیتی است و بخش‌های جنوبی منطقه را دربر گرفته است (شکل ۱-B). این واحد روند عمومی باختری-خاوری با شیب حدود ۳۵-۵۰ درجه به سوی جنوب دارد و به صورت هم‌شیب روی واحد E^{tv1} جای گرفته است (شکل‌های ۲-B و ۳). رگه‌های سیلیسی مس‌دار در دو نقطه با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری درون این واحد پدید آمده‌اند (شکل ۱-B). لایه‌بندی مشخص در لایه‌های لیتیک‌توف، لیتیک‌کریستال توف و



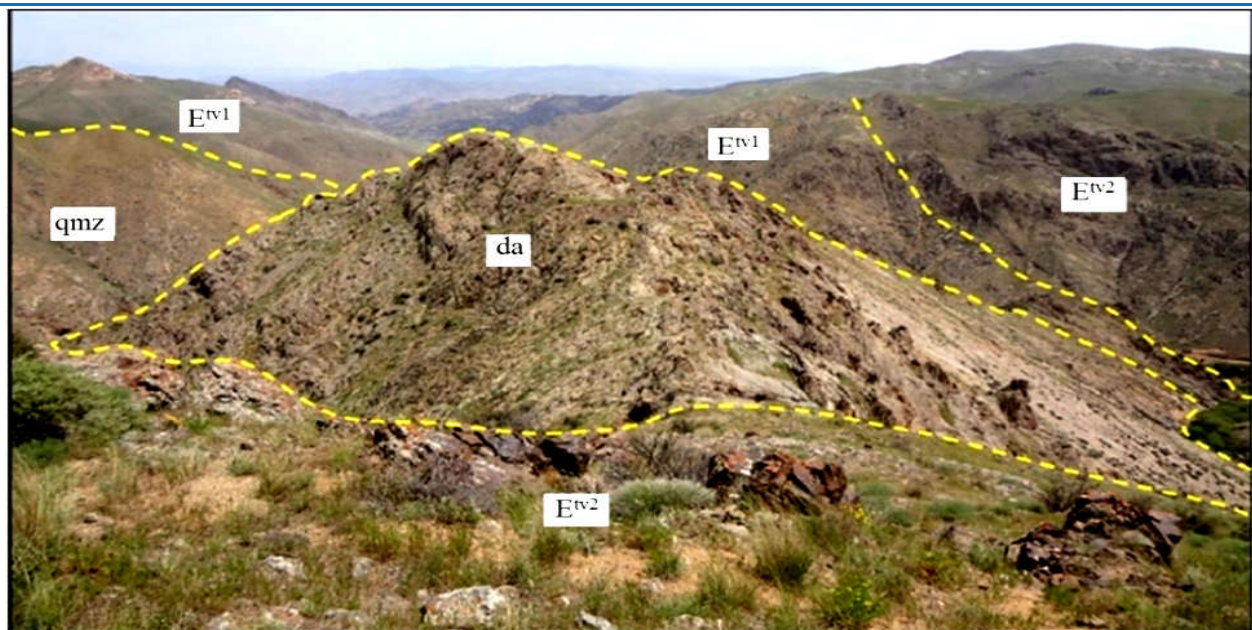
شکل ۳. نمایی از واحد E^{tv2} که به صورت هم‌شیب روی واحد E^{tv1} جای گرفته است. (A) دید رو به شمال؛ (B) دید رو به باختری.

Figure 3. Field views of the E^{tv2} unit, which is located on the E^{tv1} unit with concordant conformity. (A) northward view; (B) westward view.



شکل ۴. نمایی از واحد Ad که درون توالی واحد E^{tv2} جای گرفته است (دید رو به جنوب).

Figure 4. View from the Ad unit which is located within the E^{tv2} unit (view to the south).



شکل ۵. نمایی از گنبد داسیتی (da) در مرز میان واحدهای E^{tv1} و E^{tv2} (دید رو به خاور) (تصویر از سید قراعینی و همکاران (Seyedqaraeini et al., 2020) برگرفته شده است).

Figure 5. View from the dacitic dome (da) between Etv1 and Etv2 units (view to east) (Figure is from Seyedqaraeini et al. (2020)).

پایین به بالا به ترتیب عبارتند از:

- ۱- گدازه داسیتی با ضخامت ۷۵ متر؛
 - ۲- لیتیک توف اسیدی با ضخامت ۱۵۰ متر؛
 - ۳- گدازه داسیتی با ساخت جریان با ضخامت ۹۰ متر؛
 - ۴- لیتیک توف و لیتیک کریستال توف اسیدی با ضخامت ۴۵ متر؛
 - ۵- گدازه داسیتی با ضخامت ۷۵ متر؛
 - ۶- گدازه داسیتی با ساختار جریان و ایگنمبریت با ضخامت ۱۱۰ متر؛
 - ۷- لیتیک توف، لیتیک کریستال توف و توف ماسه‌ای حد واسط با ضخامت ۳۴۰ متر؛
 - ۸- گدازه آندزیتی با ضخامت ۲۵ متر؛
 - ۹- لیتیک کریستال توف حد واسط با ضخامت ۲۰ متر.
- گفتنی است که بخش‌های ۱ تا ۶ به واحد E^{tv1} ، بخش‌های ۷ و ۹ به واحد E^{tv2} و بخش ۸ به واحد Ad مربوط هستند. همچنین، همه بخش‌ها به صورت هم‌شیب و پیوسته روی یکدیگر جای گرفته‌اند و توده آذرین درونی زاجکان با ترکیب پیروکسن کوارتز مونوزدیوریت درون بخش‌های زیرین توالی یادشده نفوذ کرده است.

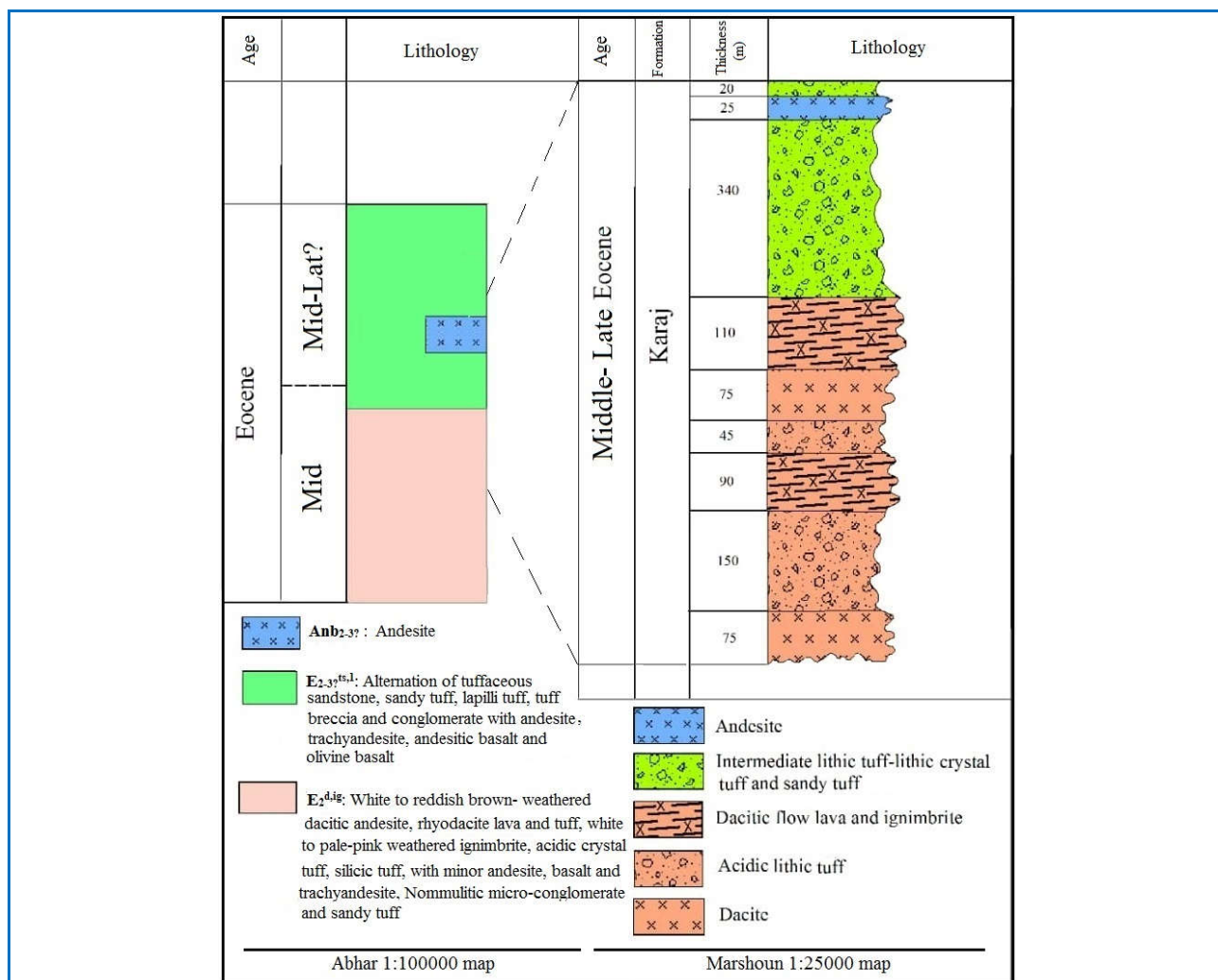
توده گرانیتوییدی زاجکان (qms): در شمال محدوده مرشون،

توده گرانیتوییدی درون توالی آتشفشانی- رسوبی واحد E^{tv1} رخمون دارد (شکل‌های ۱-B، ۲-A، ۳-A و ۵). این توده گرانیتوییدی به شکل چندین رخمون جداگانه در منطقه دیده می‌شود (شکل ۱-B)؛ اما در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر (Hosseiny et al., 2016)، به شکل یک توده واحد نشان داده شده است. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهند این توده ترکیب سنگ‌شناسی متنوع دارد؛ به گونه‌ای که از باختر به خاور ترکیب کوارتز مونوزدیوریت تا کوارتز مونزونیت و گرانودیوریت آن را می‌توان شناسایی کرد (Seyedqaraeini et al., 2020).

دایک‌های گابرویی: در منطقه مرشون، دایک‌های گابرویی در

چند نقطه درون واحدهای E^{tv1} و E^{tv2} دیده می‌شوند (شکل ۱-B). روند بیشتر دایک‌های یادشده شمال خاوری- جنوب‌باختری (N40- 50E) با شیب به سمت شمال‌باختر است و ضخامت آنها تا ۵ متر می‌رسد.

بر پایه ستون سنگ‌چینه‌ای تهیه‌شده از منطقه مرشون (شکل ۶)، توالی آتشفشانی- رسوبی بررسی‌شده در مجموع ۹۳۰ متر ضخامت دارد و به ۹ بخش تقسیم می‌شود که از



شکل ۶. ستون سنگ‌چینه‌ای توالی آتشفشانی- رسوبی منطقه مرشون و مقایسه آن با نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ابهر.

Figure 6. Lithostratigraphic column of the volcano-sedimentary succession in the study area and its comparison with Abhar 1:100000 geological map.

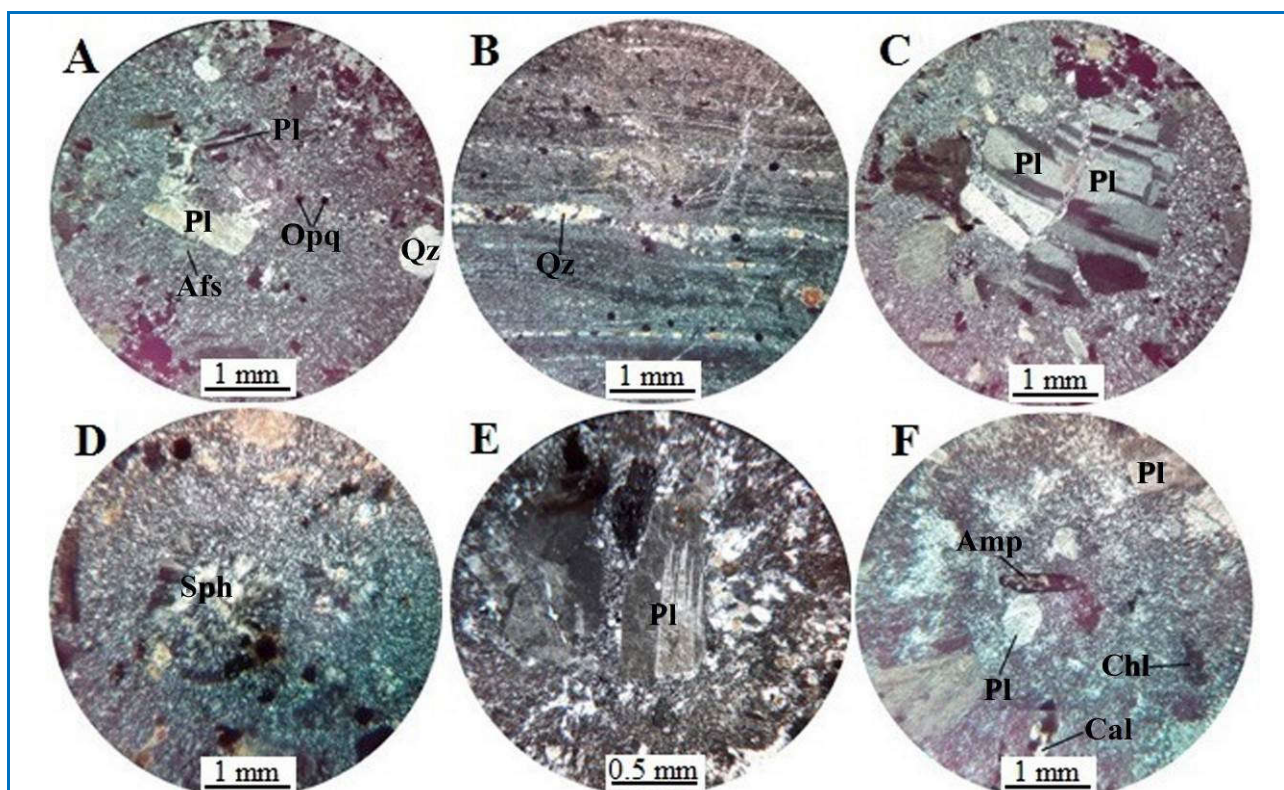
می‌دهند (شکل ۷- E). ماکل نیزه‌ای نشان‌دهنده این است که بلورهای پلاژیوکلاز هنگام تبلور دچار تنش زمین‌ساختی بوده‌اند (Shelley, 1993). پلاژیوکلازها با درجات مختلفی به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. کوارتز هم به صورت اولیه و هم به صورت ثانویه در این سنگ‌ها دیده می‌شود. کوارتزهای اولیه به صورت بلورهای گرد تا بی‌شکل و گاه با حاشیه‌های خلیجی در ابعاد تا ۲ میلی‌متر دیده می‌شوند. کوارتزهای ثانویه یا به صورت رگچه‌های کوارتزی هستند که گاه به همراه کلسیت این سنگ‌ها را قطع می‌کنند و یا در محل حفره‌ها سنگ پدید آمده‌اند. در گدازه‌های داسیتی با ساختار جریان‌ی، باندهای ساخته‌شده از بلورهای کوارتز ریزبلور در مسیر جریان

سنگ‌شناسی

گدازه‌های داسیتی- ریوداسیتی: این سنگ‌ها در مقیاس میکروسکوپی بافت پورفیری (شکل ۷- A)، جریان‌ی (شکل ۷- B)، گلمروفیری (شکل ۷- C) و اسفرولیتی (شکل ۷- D) دارند و متشکل از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و کانی‌های مافیک (آمفیبول و بیوتیت) در زمینه‌ای دانه‌ریز از کوارتز و فلدسپار هستند. کانی‌های رسی، رگه‌های کوارتزی، کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر به صورت ثانویه در این سنگ‌ها پدید آمده‌اند. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شوند و ابعاد آنها تا ۳ میلی‌متر می‌رسد. بلورهای پلاژیوکلاز گاه منطقه‌بندی دارند و برخی بلورها ماکل ناقص و نیزه‌ای نشان

کانی‌های مافیک با شکل ظاهری منشوری و صفحه‌ای به کانی‌های کلریت، کلسیت و کوارتز دگرسان شده‌اند. کانی‌های مافیک منشوری از نوع آمفیبول (شکل ۷- F) و کانی‌های مافیک صفحه‌ای از نوع بیوتیت هستند.

دیده می‌شوند (شکل ۷- B). شمار اندکی از آلکالی‌فلدسپارها به صورت بلورهای گردشده و گاه با حاشیه‌های خلیجی هستند. ابعاد بلورهای آلکالی‌فلدسپار از ۱ میلی‌متر کمتر است. کانی‌های مافیک با ابعاد ۱ تا ۲ میلی‌متر در این سنگ‌ها یافت می‌شوند و بیشتر آنها حاشیه‌های اوپاسیته‌شده دارند.



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از سنگ‌های داسیتی-ریوداسیتی منطقه مرشون. **A** بافت پورفیری متشکل از تجمع درشت‌بلورها در یک زمینه دانه‌ریز کوارتز-فلدسپار؛ **B** بافت جریان‌ی در مقیاس میکروسکوپی و لامینه کوارتزی؛ **C** بافت گلومروفیری و دگرسانی پلاژیوکلازها به کانی رسی؛ **D** بافت اسفرولیتی؛ **E** پلاژیوکلازهای دارای ماکل نیزه‌ای؛ **F** آمفیبول اوپاسیته‌شده و دگرسان‌شده به کلریت و کلسیت (Sph: بافت اسفرولیتی).

Figure 7. Microphotographs from dacitic-rhyodacitic rocks of the Marshoun area (in the XPL). **A**) Porphyritic texture composed of phenocrysts in a fine-grained quartz-feldspar matrix; **B**) Flow texture in microscopic scale and quartz laminate; **C**) Glomerophyric texture and alteration of plagioclases to clay minerals; **D**) Spherulitic texture; **E**) Plagioclase with spear twinning; **F**) Opacitic amphibole and alteration to chlorite and calcite (Sph: spherulitic texture).

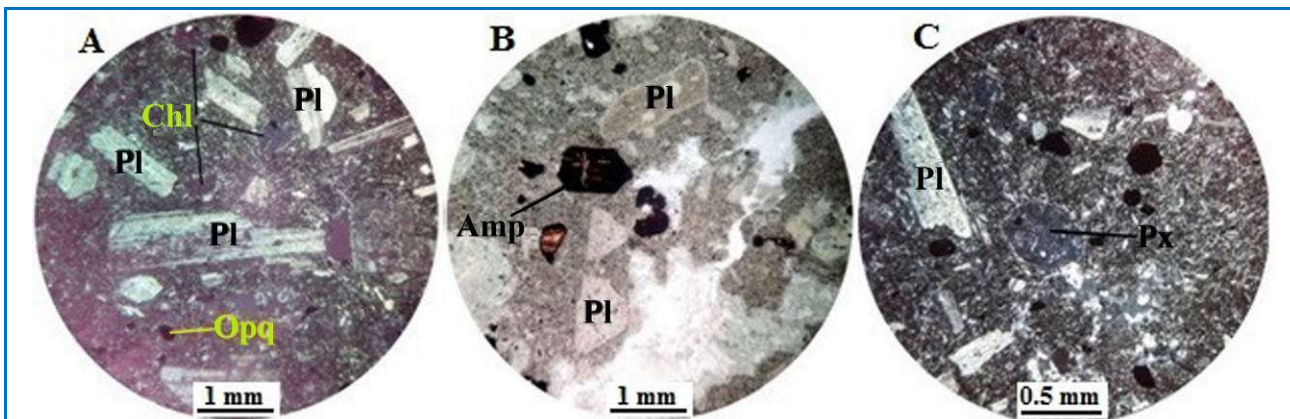
¹ Cross Polarized Light

بادامکی حاصل پُردن حفره‌ها با کوارتز، کلریت و کلسیت است. پلاژیوکلازها فراوان‌ترین درشت‌بلور این سنگ‌ها به‌شمار می‌روند که به صورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شوند (شکل‌های ۸- A و ۸- C). پلاژیوکلازها با درجات مختلفی به کانی‌های رسی و

گدازه‌های آندزیتی: این سنگ‌ها در مقیاس میکروسکوپی بافت پورفیری (شکل ۸) و گاه بافت گلومروفیری و بادامکی دارند. بافت پورفیری متشکل از بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک (آمفیبول و پیروکسن) در زمینه‌ای دانه‌ریز و در برخی نمونه‌ها زمینه میکروولیتی است. بافت

می‌دهند (شکل ۸- B). پیروکسن‌ها به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار با ابعاد تا ۲ میلی‌متر هستند و معمولاً به طور کامل با کلریت جانشین شده‌اند (شکل ۸- C). کانی‌های کدر هم به صورت اولیه از تبلور ماگما و هم به صورت ثانویه از دگرسانی کانی‌های مافیک پدید آمده‌اند. در برخی بخش‌ها، رگچه‌هایی از کوارتز و کلسیت این سنگ‌ها را قطع کرده‌اند.

سریسیت دگرسان شده‌اند. پلاژیوکلازها از نظر ابعاد به دو دسته تقسیم می‌شوند. بلورهای دانه‌درشت که ابعاد آنها تا ۳ میلی‌متر می‌رسد و بلورهای دانه‌ریز زمینه که ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر دارند. کانی‌های مافیک شامل آمفیبول و پیروکسن هستند. آمفیبول‌ها به صورت بلورهای شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار حضور داشته و ابعاد آنها تا ۱ میلی‌متر می‌رسد. این کانی‌ها عموماً حاشیه‌های اوپاسیته نشان



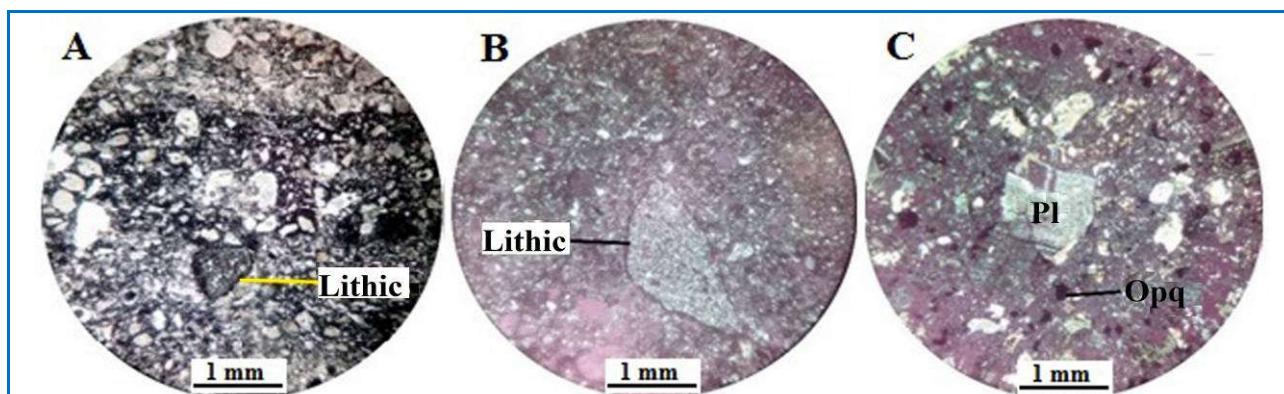
شکل ۸. تصویرهای میکروسکوپی (تصویر B در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای (PPL)^۲ و دیگر تصویرها در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL) از سنگ‌های آندزیتی منطقه مرشون. A) بافت پورفیری متشکل از بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های جانشین شده با کلریت در زمینه دانه‌ریز سنگ؛ B) اوپاسیته شدن کامل آمفیبول و دگرسانی بلورهای پلاژیوکلاز به کانی‌های رسی؛ C) بلور خودشکل پیروکسن جانشین شده با کلریت به همراه پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز سنگ.

Figure 8. Microphotographs from andesitic rocks of the Marshoun area (Fig. B in PPL and others in the XPL). A) Porphyritic texture composed of plagioclase and minerals replaced with chlorite in a fine-grained matrix; B) Totally opacity amphibole and alteration of plagioclase crystals to clay minerals; C) Euhedral pyroxene crystal replaced by chlorite along with plagioclase in a fine-grained matrix.

² Plane Polarized Light

می‌رسد. بیشتر قطعات سنگی یادشده بافت پورفیری دارند و از بلورهای درشت پلاژیوکلاز در زمینه‌ای دانه‌ریز ساخته شده‌اند. پلاژیوکلازهای این سنگ‌ها به صورت بلورهای ریز شکسته شده و زاویه‌دار بیشتر با ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی‌متر هستند (شکل ۹- C) که این ویژگی نشان‌دهنده تنش انفجاری است. در مواردی ابعاد بلورهای پلاژیوکلاز تا نزدیک به ۱/۵ میلی‌متر نیز می‌رسد. بلورهای پلاژیوکلاز معمولاً به کانی‌های رسی دگرسان شده‌اند. حفره‌های فراوانی در این سنگ‌ها دیده می‌شود که با کلسیت و کلریت و گاه کوارتز پر شده‌اند. کلسیت و کلریت در این سنگ‌ها در پی دگرسانی کانی‌های مافیک اولیه نیز پدید آمده‌اند.

لیتیک توف حد واسط: این سنگ‌ها در مقیاس میکروسکوپی لایه‌بندی ظریفی دارند و متشکل از باندهای ریزدانه و درشت‌دانه هستند. همچنین، بخش‌های غنی از کانی‌های کدر و هیدروکسید آهن نیز باعث ایجاد لایه‌بندی شده‌اند (شکل ۹- A). این سنگ‌ها بافت پورفیروکلاستیک دارند (شکل ۹) و سازنده اصلی آنها قطعات سنگی به همراه بلورهای ریز پلاژیوکلاز است. کانی‌های رسی، کلریت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های کدر به صورت ثانویه در این سنگ‌ها پدید آمده‌اند. قطعات سنگی سازنده اصلی این سنگ‌ها هستند و به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل دیده می‌شوند (شکل‌های ۹- A و ۹- B). ابعاد آنها در بیشتر موارد کمتر از ۱ میلی‌متر است و گاه تا ۲ میلی‌متر نیز

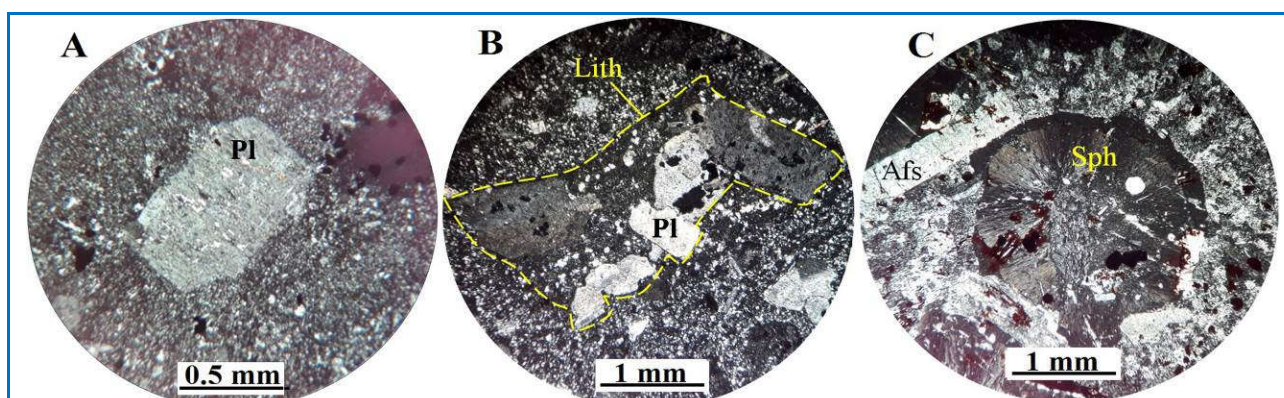


شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی (تصویر A در نور عبوری پلاریزه صفحه‌ای (PPL) و تصویرهای B و C در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL) از لیتیک‌توف‌های حد واسط منطقه مرشون. A) لایه‌بندی لیتیک‌توف در مقیاس میکروسکوپی (باند‌های غنی از هیدروکسید آهن در نمونه دیده می‌شوند)؛ B) بافت پورفیروکلستیک؛ C) بلورهای شکسته‌شده و زاویه‌دار پلاژیوکلاز که نشان‌دهنده شدت انفجار هستند (Lithic: خُرده‌سنگ).

Figure 9. Microphotographs from intermediate lithic tuffs of the Marshoun area (Fig. A in PPL and others in the XPL). A) Layering of lithic tuff on a microscopic scale. Layers enriched from Fe hydroxides present in the sample; B) Porphyroclastic texture; C) Broken and angled plagioclase crystals indicating the intensity of the explosion (Lithic: rock fragment).

سنگی توف‌های اسیدی بیشتر از جنس داسیت با بافت پورفیری درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (شکل ۱۰- B) و یا بافت میکروگرانولار در زمینه‌ای دانه‌ریز از جنس کوارتز و فلدسپار هستند. در برخی بخش‌ها، درشت‌بلورهای آلکالی‌فلدسپار نیز دیده می‌شود (شکل ۱۰- C). تجمعات اسفرولیتی در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۱۰- C).

لیتیک‌توف تا کریستال‌لیتیک‌توف اسیدی: این سنگ‌ها در مقیاس میکروسکوپی از درشت‌بلورهای شکسته‌شده کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و مقدار کمی بیوتیت همراه با قطعات خُرده‌سنگی در زمینه‌ای ریزبلور ساخته شده‌اند (شکل ۱۰). بلورهای پلاژیوکلاز عموماً سریسیتی (شکل ۱۰- A) و بیوتیت‌ها اوپاسیته شده‌اند و در بیشتر موارد، رگچه‌های کوارتزی این سنگ‌ها را قطع کرده است. قطعات



شکل ۱۰. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از توف‌های اسیدی منطقه مرشون. A) درشت‌بلور پلاژیوکلاز با دگرسانی سریسیتی؛ B) قطعه‌سنگ داسیتی با بافت پورفیری و دارای پلاژیوکلازهای درشت؛ C) بافت اسفرولیتی در کنار درشت‌بلور آلکالی‌فلدسپار (Lith: قطعات خُرده‌سنگی، Sph: بافت اسفرولیتی).

Figure 10. Microphotographs from acidic tuffs of Marshoun area (in the XPL). A) Plagioclase phenocrysts with sericitic alteration; B) Dacitic rock fragment with porphyritic texture containing plagioclase phenocryst; C) Spherulitic texture long with alkali feldspar phenocryst (Lithic: rock fragment, Sph: spherulitic texture).

زمین‌شیمی

داسیتی- ریوداسیتی به روش‌های XRF و ICP-MS در آزمایشگاه شرکت زراژما در تهران تجزیه شدند (جدول ۱).

برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی واحدهای گدازه‌های منطقه مرشون، شمار ۱۰ نمونه شامل ۵ نمونه از واحدهای آندزیتی و ۵ نمونه از واحدهای

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون. عنصرهای اصلی بر حسب درصد وزنی (wt.%) و عنصرهای کمیاب بر پایه گرم در تن (ppm) هستند.

Table 1. Analytical results for the volcanic rocks in the Marshoun area. Major elements are in weight percent (wt.%) and trace elements in ppm.

Sample No.	Ma-06	Ma-10	Ma-04	Ma-05	Ma-01	Ma-07	Ma-03	Ma-09	Ma-08	Ma-02
Rock Type	andesite					dacite	rhyodacite		dacite	
SiO ₂	52.42	52.97	54.14	55.26	56.54	66.83	69.47	69.77	72.15	74.73
TiO ₂	1.11	0.92	0.76	0.73	0.92	0.59	0.4	0.4	0.33	0.36
Al ₂ O ₃	15.43	15.21	15.6	15.1	15.72	16.73	15.43	15.58	14.12	14.49
Fe ₂ O ₃	8.05	12.33	7.89	7.66	8.68	3.33	3.02	3.12	1.52	0.67
MnO	0.2	0.16	0.17	0.18	0.16	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05
MgO	7.18	8.18	5.71	5.63	7.27	1.12	0.99	0.99	0.54	1.19
CaO	6.51	0.68	2.82	3.35	1.74	1.53	0.33	0.33	2.77	0.81
Na ₂ O	2.42	3.6	4.73	4.5	3.6	7.36	4.48	4.45	6.37	6.07
K ₂ O	2.67	1.3	2.29	2.27	1.3	0.24	4.54	4.35	0.26	0.53
P ₂ O ₅	0.58	0.37	0.31	0.31	0.37	0.28	0.14	0.14	0.34	0.12
LOI	3.23	4.25	5.62	5.02	3.63	1.9	0.97	0.77	1.55	1.03
Total	99.80	99.97	100.04	100.01	99.93	99.91	99.77	99.9	100	100
As	7.1	3.6	4.21	4.74	3.8	3.7	0.9	3.5	2.8	4.3
Ba	502	123	303	423	324	308	764	750	342	103
Ce	28	42	26	30	38	40	109	53	54	123
Co	16.6	2.3	22.15	20.65	12.3	31.2	21.02	1.8	1.2	1
Cr	101	2	114	101	82	52	88	3	3	3
Cs	1	0.5	0.35	0.3	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
Cu	8	1	6	9	4	6	27	2	6	6
Dy	3.38	4.38	3.01	3.05	4.22	3.81	3.85	3.3	3.58	3.27
Er	2.19	2.78	1.87	1.87	2.56	2.33	1.85	2.24	2.16	2.17
Eu	0.97	1.12	1.11	1.09	1.12	1.25	2.15	1.05	1.1	1.45
Gd	3.12	3.61	3.5	3.62	3.41	3.85	6.98	3.22	3.62	4.45
Hf	3.96	4.88	3.49	3.41	4.22	4.34	2.05	4.88	3.86	1.83
La	12	19	12	14	17	18	54	27	25	71
Lu	0.35	0.43	0.27	0.28	0.33	0.36	0.2	0.4	0.32	0.36

جدول ۱. ادامه.

Table 1. Continued.

Sample No.	Ma-06	Ma-10	Ma-04	Ma-05	Ma-01	Ma-07	Ma-03	Ma-09	Ma-08	Ma-02
Rock Type	andesite				dacite		rhyodacite		dacite	
Nb	14.1	16.6	11.7	11.7	12.6	15.2	10.9	15.6	13.1	16.4
Nd	14.6	15.9	15.9	16.2	14.9	22.3	47.2	21.5	21.3	41
Pb	12	4	11	14	8	12	15	6	14	10
Pr	3.3	3.96	3.65	3.76	3.24	5.05	11.78	5.91	5.21	13.03
Rb	55	7	16	12	11	21	46	62	26	5
Sc	18	4.5	12.9	12.5	6.5	18.6	14	1.4	0.5	1.1
Sm	3.64	3.66	3.57	3.6	3.48	5.03	8.48	4.04	4.92	5.37
Sr	74.5	105.4	102.8	105	112.4	92.9	454.8	113.9	84.2	263.4
Ta	0.86	1.23	0.7	0.76	0.81	1.07	0.87	1.15	0.92	0.96
Tb	0.58	0.64	0.49	0.5	0.53	0.62	0.76	0.56	0.58	0.61
Th	8.65	15.25	4.6	7.98	11.34	8.84	8.67	17.26	12.71	20
Tm	0.3	0.4	0.25	0.26	0.32	0.32	0.23	0.32	0.29	0.31
U	3.6	3.7	1.5	2.45	2.7	2.6	2.92	4.2	3.7	3.11
V	144	60	174	161	87	203	157	35	25	39
Y	16.7	26	17.7	17.1	18.3	17.8	18.6	17.2	16.7	17.2
Yb	2.1	2.6	1.8	1.9	2.2	2.6	1.5	1.8	2.4	1.6
Zn	123	15	257	258	85	116	93	52	8	9
Zr	111	187	162	151	145	117	79	136	98	75
Eu/Eu*	0.88	0.94	0.95	0.92	0.99	0.86	0.85	0.89	0.79	0.90
(La/Sm) _N	2.06	3.24	2.10	2.43	3.05	2.23	3.97	4.17	3.17	8.25
(La/Yb) _N	3.88	4.96	4.53	5.00	5.25	4.70	24.45	10.19	7.07	30.14

کم تحرک (مانند: Zr و Ti) تأثیر کمتری دارد، پس کاربرد داده‌های این عنصرها برای نام‌گذاری سنگ‌ها قابل اعتمادتر است (Winchester and Floyd, 1977; Rollinson, 1993; Hastie et al., 2007). برپایه نمودار پیشنهادی وینچستر و فلویید (Winchester and Floyd, 1977)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون در محدوده ریولیت، داسیت-ریوداسیت، آندزیت و تراکی آندزیت جای

برپایه نمودار Na_2O+K_2O در برابر SiO_2 (Le Bas et al., 1986)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون در محدوده ریولیت، داسیت، تراکی آندزیت بازالت و آندزیت بازالتی واقع می‌شوند (شکل ۱۱-A). از سوی دیگر، این نمودار نشان می‌دهد همه نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون، در قلمرو ساب‌آلکالن جای می‌گیرند. از آنجایی که فرایند دگرسانی روی عنصرهای

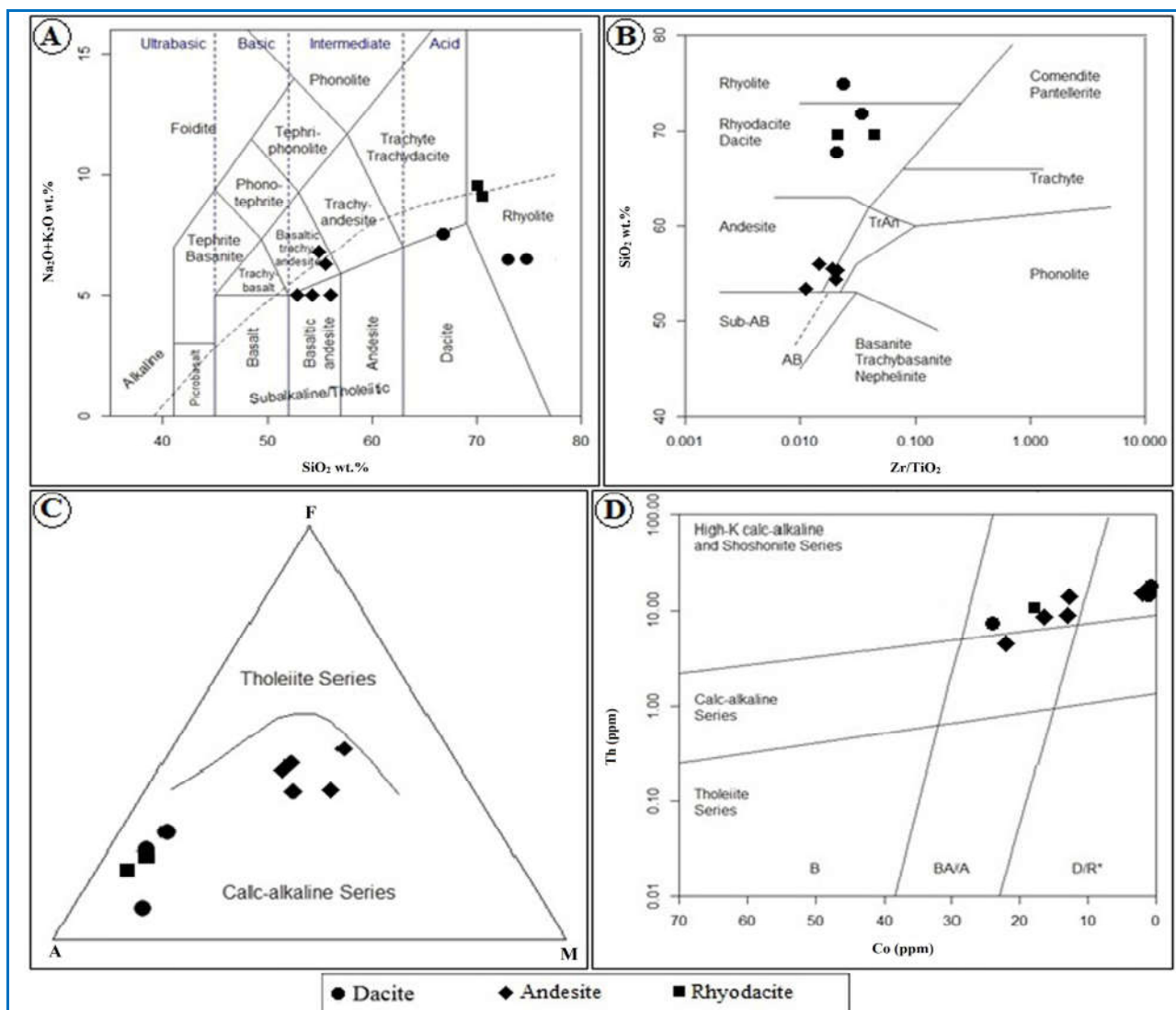
به گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) برای سنگ‌های آتشفشانی، تقریباً همه گروه‌های سنگی الگوی مشابهی دارند (شکل ۱۲- A). در این نمودار، غنی‌شدگی عنصرهای LILE^۳ (Th، Pb و U)، همراه با آنومالی منفی عنصرهای HFSE^۴ (Ta، Nb و Ti) دیده می‌شود (شکل ۱۲- A).

^۳ Large-Ion Lithophile Elements

^۴ High Field Strength Elements

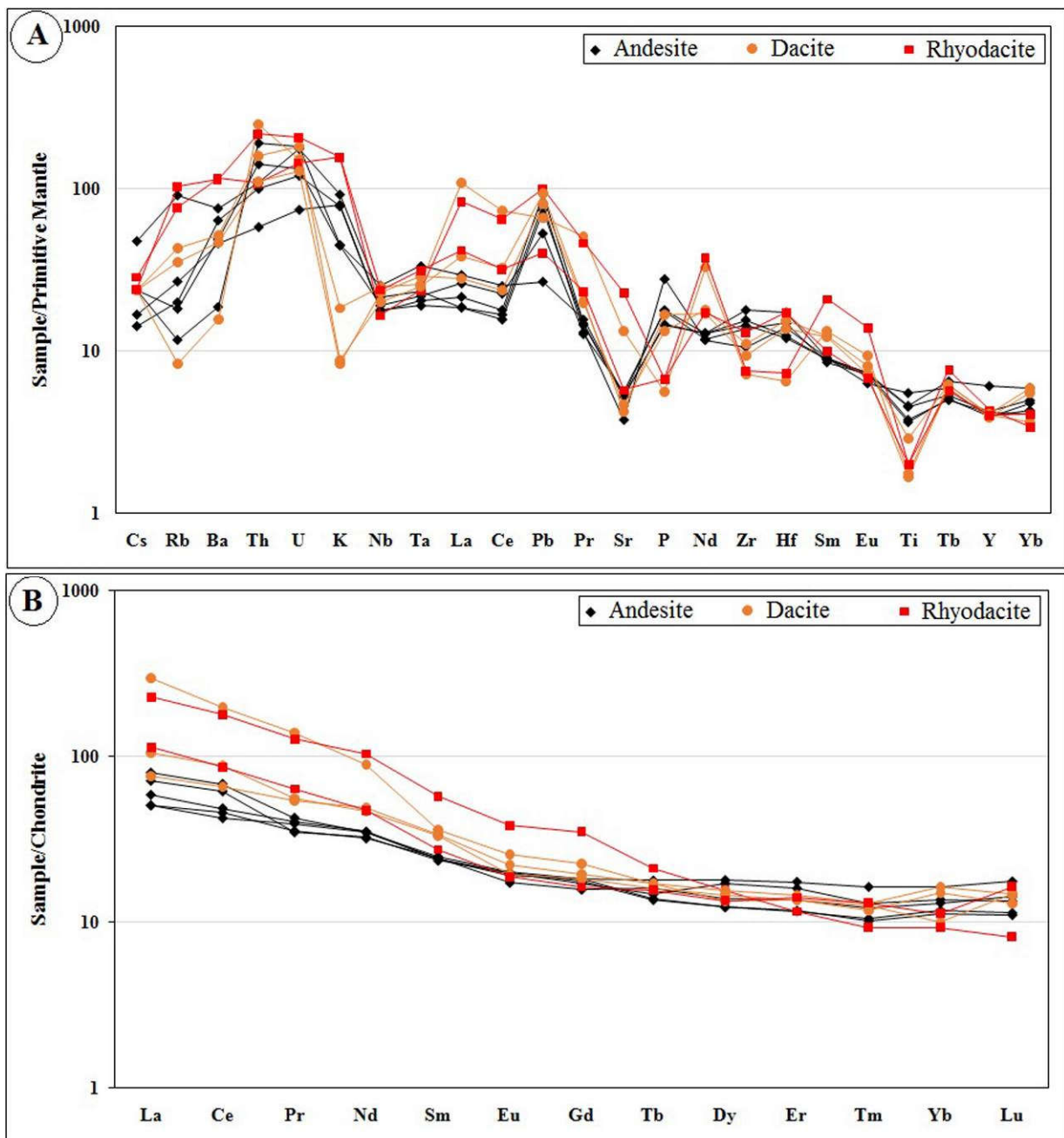
می‌گیرند (شکل ۱۱- B). برپایه نمودار AFM (M=MgO و F=FeO_۱، A=Na_۲O+K_۲O) نمونه‌های بررسی‌شده در قلمروی کالک‌آلکان جای می‌گیرند (شکل ۱۱- C). همچنین، برپایه نمودار Co در برابر Th (Hastie et al., 2007)، نمونه‌های بررسی‌شده در محدوده کالک‌آلکان پتاسیم بالا جای می‌گیرند (شکل ۱۱- D).

در الگوی تغییرات عنصرهای کمیاب بهنجار شده



شکل ۱۱. ترکیب نمونه‌های مربوط به واحدهای آتشفشانی منطقه مرشون روی: (A) نمودار SiO_2 در برابر $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986); (B) نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 (Winchester and Floyd, 1977); (C) نمودار AFM (Irvine and Baragar, 1971); (D) نمودار Co در برابر Th (Hastie et al., 2007).

Figure 11. Composition of the samples from volcanic units of Marshoun area on the: **A)** SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ diagram (Le Bas et al., 1986); **B)** Zr/TiO_2 versus SiO_2 diagram (Winchester and Floyd, 1977); **C)** AFM diagram (Irvine and Baragar, 1971); **D)** Co versus Th diagram (Hastie et al., 2007).



شکل ۱۲. سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون در: (A) الگوی عنصرهای کمیاب بهنجارشده به ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995)؛ (B) الگوی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت (McDonough and Sun, 1995).

Figure 12. Volcanic rocks of the Marshoun area in **A)** Primitive mantle- normalized (McDonough and Sun, 1995) trace element pattern; **B)** Chondrite- normalized (McDonough and Sun, 1995) rare earth element pattern.

عنصرهای LREE^۵ نسبت به HREE^۶ را با نسبت متوسط تا بالای LREE/HREE، نسبت (La/Yb)_n

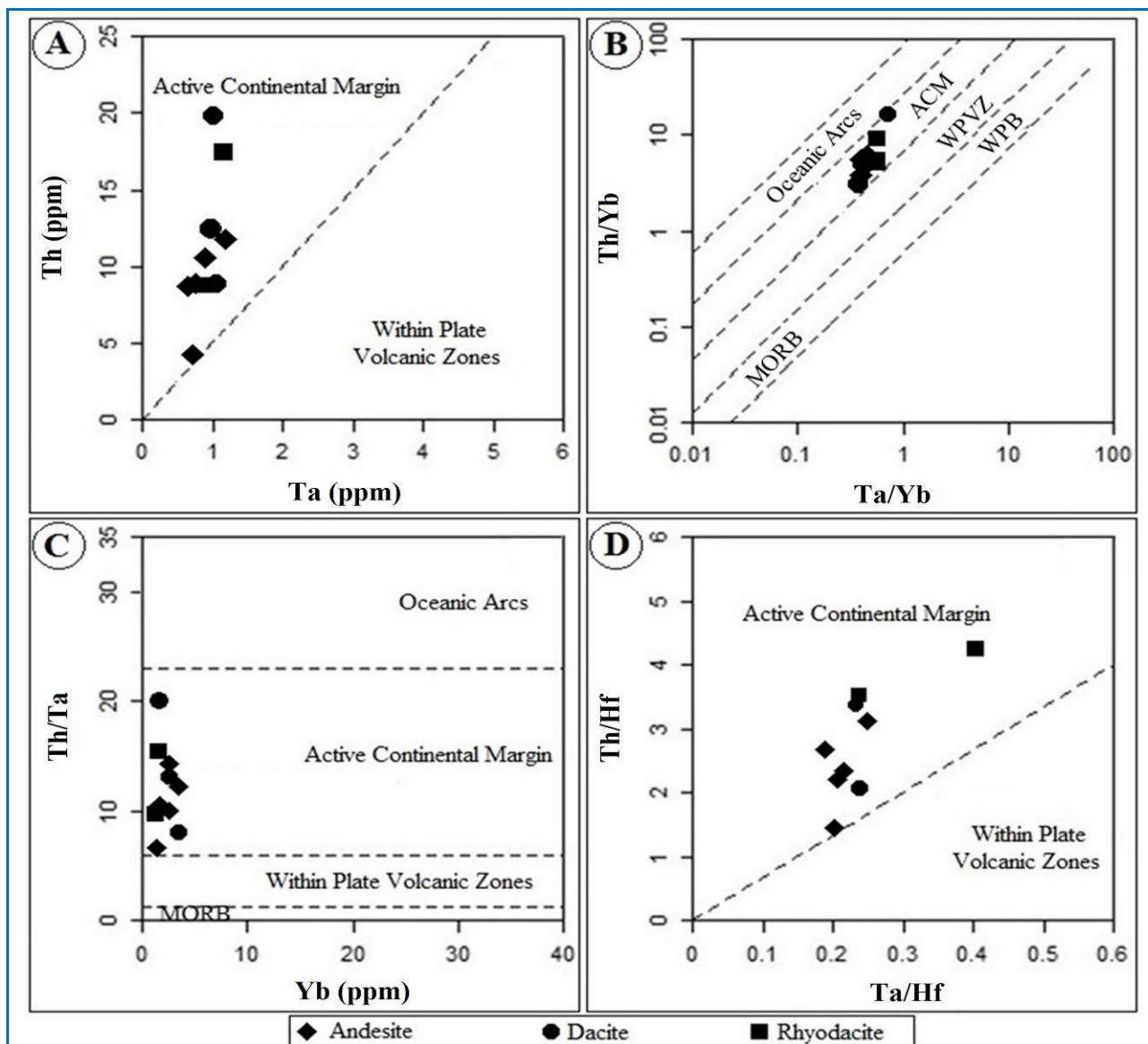
در نمودار عنصرهای خاکی کمیاب بهنجارشده به ترکیب کندریت (McDonough and Sun, 1995)، سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده الگوی غنی از

⁵ Light Rare Earth Elements

⁶ Heavy Rare Earth Elements

(Gorton and Schandle, 2002) به کار برده شد. در نمودارهای Ta در برابر Th، Ta/Yb در برابر Th/Yb، Yb در برابر Th/Ta و Ta/Hf در برابر Th/Hf، همه نمونه‌های بررسی شده محدوده حاشیه فعال قاره‌ای را نشان می‌دهند (شکل ۱۳).

برابر با ۳۰/۱ - ۳/۸، (La/Sm)_n برابر با ۸/۲۵ - ۲/۱ و الگوی مسطح در عنصرهای HREE نشان می‌دهند (شکل ۱۲-B). همچنین، این نمونه‌ها آنومالی منفی بسیار ضعیف Eu دارند (شکل ۱۲-B). برای تفکیک محیط تکتونوماگمایی سنگ‌های آتشفشانی بررسی شده نمودارهای گورتن و شاندل



شکل ۱۳. ترکیب نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون در: (A) نمودار Ta در برابر Th (Gorton and Schandle, 2002); (B) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Gorton and Schandle, 2002); (C) نمودار Yb در برابر Th/Ta (Gorton and Schandle, 2002); (D) نمودار Th/Hf در برابر Ta/Hf (Gorton and Schandle, 2002).

Figure 13. Composition of the volcanic rocks of the Marshoun area on the: **A)** Ta versus Th diagram (Gorton and Schandle, 2002); **B)** Ta/Yb versus Th/Yb diagram (Gorton and Schandle, 2002); **C)** Yb versus Th/Ta diagram (Gorton and Schandle, 2002); **D)** Th/Hf versus Ta/Hf diagram (Gorton and Schandle, 2002).

ایزوتوپ‌های Sr، Nd و Pb برگزیده و در آزمایشگاه‌های انستیتوی زمین‌شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم زمین چین تجزیه شدند (جدول ۲).

ایزوتوپ‌های Sr، Nd و Pb: شمار ۴ نمونه از گدازه‌های منطقه مرشون (۲ نمونه آندزیتی و ۲ نمونه داسیتی) با کمترین دگرسانی و محتوای ^{70}LOI برای اندازه‌گیری

⁷ Loss on Ignition

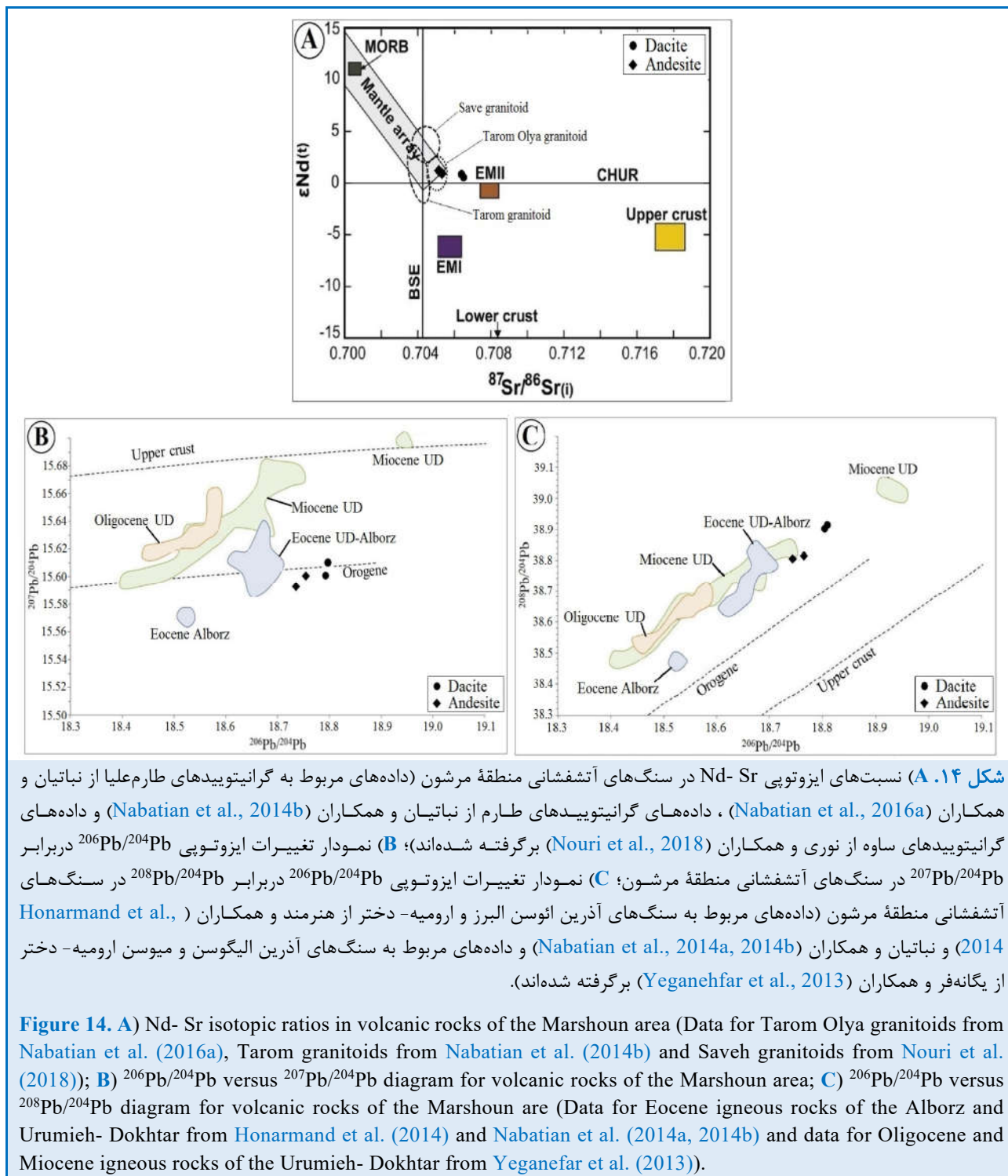
جدول ۲. داده‌های ایزوتوپی Sr، Nd و Pb برای سنگ‌های داسیتی (da) و آندزیتی (an) منطقه مرشون.

Table 2. Isotopic data of Sr, Nd, and Pb for dacitic (da) and andesitic (an) rocks of the Marshoun area.

Sample type	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵNd	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
da (Ma- 03)	0.706177	0.512716	1.5215415	18.8030	15.6046	39.0680
da (Ma- 09)	0.706221	0.512695	1.1118957	18.8007	15.6112	39.0721
an (Ma- 06)	0.705290	0.512719	1.5800623	18.7435	15.5938	38.8138
an (Ma- 10)	0.704851	0.512733	1.8531595	18.7678	15.5976	38.8193

دختر جای گرفته‌اند؛ هرچند در مقایسه با آنها مقدار $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ بیشتری نشان می‌دهند (شکل ۱۴-B). افزون‌بر این، در نمودار $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در برابر $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ نیز نمونه‌های بررسی‌شده در بالای منحنی تحول ایزوتوپ‌های سرب کوهزایی و در مجاورت و ادامه محدوده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و الیگوسن ارومیه-دختر و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن البرز جای می‌گیرند؛ هرچند نمونه‌های داسیتی در مقایسه با آنها مقادیر $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ بیشتری نشان می‌دهند (شکل ۱۴-C). ویژگی بارز هر دو نمودار، محتوای بیشتر $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در سنگ‌های بررسی‌شده (به‌ویژه نمونه‌های اسیدی) در مقایسه با داده‌های منتشرشده برای سنگ‌های آتشفشانی کمان ماگمایی ارومیه-دختر و البرز است. محتوای بالاتر $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در سنگ‌های منطقه مرشون چه‌بسا نشان‌دهنده نقش بیشتر پوسته قاره‌ای در پیدایش این سنگ‌هاست. به‌طور کلی، این نمودارها نشان‌دهنده نقش غالب گوشته (مشابه با ایزوتوپ‌های Sr و Nd) در پیدایش سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون است؛ اما برپایه ایزوتوپ‌های Pb گمان می‌رود سنگ‌های اسیدی یا از گوشته‌ای غنی‌شده‌تر خاستگاه گرفته‌اند و یا در مسیر صعود، با مواد پوسته‌ای آلاینش بیشتری پیدا کرده‌اند.

نسبت ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون نشان‌دهنده اینست که نسبت ایزوتوپی یادشده از گدازه‌های آندزیتی (۰/۷۰۴۸۵۱ - ۰/۷۰۵۲۹۰) به‌سوی گدازه‌های داسیتی (۰/۷۰۶۲۲۱ - ۰/۷۰۶۱۷۷) افزایش نشان می‌دهد (جدول ۲). مقادیر ϵNd در سنگ‌های یادشده از ۱/۸۵ تا ۱/۱۱ متغیر است و از سنگ‌های آندزیتی (۵۸/۸۵ - ۱/۱) به‌سوی سنگ‌های داسیتی (۱/۱۱ - ۱/۵۲) کاهش نشان می‌دهد (جدول ۲). روی نمودار ϵNd در برابر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های آندزیتی در مسیر گوشته‌ای و در محدوده گرانیتوئیدهای طارم‌علیا (Nabatian et al., 2016) جای می‌گیرند در حالی که نمونه‌های داسیتی، گرایش به سمت گوشته غنی‌شده (EMII) نشان می‌دهند (شکل ۱۴-A). نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های سرب نشان می‌دهند نسبت‌های ایزوتوپی $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ و $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ از نمونه‌های آندزیتی به سمت نمونه‌های داسیتی افزایش نشان می‌دهد (به‌ترتیب از ۱۸/۷۴۳۵ تا ۱۸/۸۰۳۰، ۱۵/۵۹۳۸ تا ۱۵/۶۱۱۲ و ۳۸/۸۱۳۸ تا ۳۹/۰۷۲۱؛ جدول ۲). برپایه نمودار $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ در برابر $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ، نمونه‌های سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده در زیر منحنی تحول ایزوتوپ‌های سرب کوهزایی و تا اندازه‌ای در مجاورت با محدوده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن البرز و ارومیه-



ماگمایی کالک‌آلکانل پتاسیم بالا در کمان‌های ماگمایی و محیط‌های زمین‌ساختی پسابروردی پدید آمده‌اند (Foley and Peccerillo, 1992; Turner et al., 1996) و به‌ندرت در محیط‌های درون‌صفحه‌ای دیده می‌شوند (Muller and Groves, 1997; Bonin, 1996).

بحث

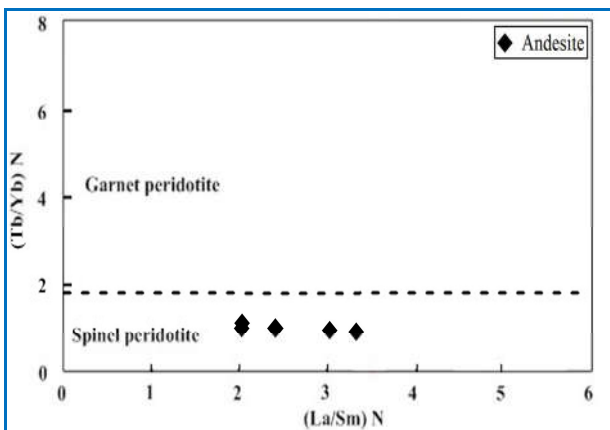
در بخش‌های پیشین گفته شد سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون از نوع آندزیت، بازالت‌آندزیتی، داسیت، ریوداسیت و ریولیت با سرشت کالک‌آلکانل پتاسیم بالا هستند. باور بر اینست که بیشتر سنگ‌های

غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE همراه با الگوی مسطح عنصرهای خاکی کمیاب سنگین در سنگ‌های بررسی‌شده نشان‌دهندهٔ ماگماهای با سرشت کالک‌آلکان (Machado et al., 2005) هستند. به باور جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2012)، سنگ‌های کالک‌آلکان پتاسیم بالا و شوشونیتی از ذوب‌بخشی گوشتهٔ سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسم‌شده در پی فرایند فرورانش و با رگه‌های آمفیبول و فلوگوپیت پدید می‌آیند. از آنجایی که سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده در مجموع از عنصرهای LILE، U، Th، Pb و LREE غنی‌شدگی دارند و آنومالی منفی HFSE نشان می‌دهند (شکل ۱۲)، پس ماگمای اولیه سنگ‌های آتشفشانی منطقه از ذوب‌بخشی گوشتهٔ گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده در پی فرورانش پدید آمده و در مسیر صعود به سوی بالا، دچار تفریق و آلیش با پوستهٔ قاره‌ای شده است.

به باور موراتا و همکاران (Morata et al., 2005) نسبت‌های پایین Zr/Nb (۶/۷ - ۳/۴)، Th/Nb (۰/۱۵ - ۰/۱۱)، La/Nb (۱/۰۳ - ۰/۷۶) و Th/La (۰/۱۱ - ۰/۱۵) نشان‌دهندهٔ فعالیت‌های ماگمایی مرتبط با گوشتهٔ غنی‌شده هستند؛ اما این نسبت‌ها در ماگماهای جداشده از پوسته به صورت Zr/Nb (۱۶/۲)، Th/Nb (۰/۴۴)، La/Nb (۲/۲) و Th/La (۰/۲۷) گزارش شده‌اند (Weaver and Tarney, 1984; Plank, 2005). مقایسه این نسبت‌ها برای سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده (Zr/Nb برابر با ۱۳/۸ - ۴/۵، Th/Nb برابر با ۱/۱ - ۰/۳۹، La/Nb برابر با ۴/۹ - ۰/۸۵ و Th/La برابر با ۰/۷۲ - ۰/۲۸) نشان‌دهندهٔ تمایل آنها به ترکیب حد واسط مذاب‌های جداشده از گوشته غنی‌شده و پوسته است. به باور دی پائولو و دالی (DePaolo and Daley, 2000)، نسبت La/Nb در ماگماهای جداشده از گوشتهٔ سنگ‌کره‌ای از یک بیشتر است؛ ام این نسبت در ماگماهای جداشده از سست‌کره عموماً نزدیک به ۰/۷ است. در نمونه‌های بررسی‌شده، این نسبت از ۴/۹۵ تا ۰/۸۵ در تغییر است و نشان می‌دهد ماگمای اولیه از ذوب‌بخشی گوشتهٔ سنگ‌کره‌ای پدید آمده است. برپایهٔ

2004). غنی‌شدگی از عنصرهای LILE در نمودارهای عنصرهای کمیاب به‌هنجارشده به ترکیب گوشتهٔ اولیه با ذوب‌بخشی گوشتهٔ گوشته‌ای و ترکیب‌های برخاسته از تختهٔ فرورونده توجیه‌شدنی است (Green, 2006; Pang et al., 2013). تهی‌شدگی از Ta، Nb و Ti نیز از ویژگی‌های ماگماهای محیط‌های مرتبط با فرورانش است که می‌تواند پیامد ذوب‌بخشی درجه بالای خاستگاه گوشته‌ای (Saccani, 2015)، پایداری فازهای حاوی این عنصرها (مانند روتیل و اسفن) در ناحیهٔ خاستگاه گوشته‌ای (Wallin and Metcalf, 1998) و ذوب دوبارهٔ گوشتهٔ تهی‌شدهٔ پیشین (Koepke et al., 2009) باشد. غنی‌شدگی در LILE و LREE به همراه بی‌هنجاری منفی Ta، Nb و Ti، شاخص ماگماهای مرتبط با فرورانش هستند (Wilson, 1989; Foley and Wheler, 1990; Cameron et al., 2003; Wang and Chung, 2004; Vetrin and Rodionov, 2008).

عنصرهایی مانند K، Rb و Ba در محیط‌های دگرسانی به‌سادگی از زمینهٔ سنگ رها می‌شوند و تهی‌شدگی نشان می‌دهند (Wilson, 1989). بر این اساس، تهی‌شدگی عنصرهای یادشده در برخی نمونه‌های داسیتی-ریوداسیتی را می‌توان در ارتباط با تأثیر دگرسانی گرمایی در منطقهٔ مرشون و خروج این عنصرها دانست. در شدت‌های بالای دگرسانی، عنصرهای خاکی کمیاب سبک مانند La و Ce نیز ممکن است دچار جابه‌جایی و خروج از محیط سنگ شوند. از سوی دیگر، در پی دگرسانی آرژیلیک که در منطقه نیز دیده می‌شود، شاید عنصرهای LREE جذب سطحی کانی‌های رسی شوند و محتوای آنها در سنگ یادشده افزایش یابد. بر این اساس، تغییرات در الگوی عنصرهایی مانند La و Ce را می‌توان به دگرسانی آرژیلیک منطقه مرتبط دانست. آنومالی مثبت Pb به متاسوماتیسم گوشتهٔ گوشته‌ای با سیال‌های ناشی از پوستهٔ اقیانوسی فرورو و یا آلیش ماگما با پوستهٔ قاره‌ای اشاره دارد (Kamber et al., 2002; Wayer et al., 2003; Varekamp et al., 2010). از سوی دیگر، الگوهای با



شکل ۱۵. ترکیب نمونه‌های آندزیتی منطقه مرشون در نمودار $(La/Sm)_N$ در برابر $(Tb/Yb)_N$ (Wang et al., 2002). داده‌ها نسبت به ترکیب کندریت بهنجار شده‌اند (داده‌های بهنجارسازی از مک‌دوناف و سان (McDonough and Sun, 1995) برگرفته شده‌اند).

Figure 15. Composition of the andesitic samples in the Marshoun area on the $(La/Sm)_N$ versus $(Tb/Yb)_N$ diagram (Wang et al., 2002). Data normalized to chondrite values (Normalizing values are from McDonough and Sun (1995)).

برداشت

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرشون متشکل از آندزیت بازالت‌آندزیتی، آندزیت، داسیت، ریوداسیت و ریولیت با سرشت کالک‌آلکان پتاسیم بالا هستند. ماگمای اولیه سنگ‌های آتشفشانی یادشده از ذوب‌بخشی سنگ‌کره گوشته‌ای متاسوماتیسم‌شده زیرقاره‌ای و در پی فرایند فرورانش در محیط حاشیه قاره‌ای پدید آمده است. با توجه به یافته‌های این بررسی و پژوهش‌های پیشین (مانند Khalatbari Jafari et al., 2016) می‌توان گفت در پی فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای و کوتاه‌شدگی پوسته در البرز در ائوسن ضخیم‌شدگی پوسته روی داده است و در ادامه بخش زیرین گوشته سنگ‌کره‌ای زیرقاره‌ای دچار جدایش و فرورفتن^۹ شده‌اند. به دنبال این رخداد، افزایش گرادیان گرمایی ناشی از صعود جریان‌های سست‌کره‌ای ذوب‌بخشی سنگ‌کره

آنچه گفته شد، ماگمای اولیه سنگ‌های آندزیتی بررسی‌شده مرشون از ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره‌ای متاسوماتیسم‌شده پدید آمده و در مسیر صعود دچار جدایش بلورین ماگمایی و آلیش با پوسته قاره‌ای شده است.

در محیط‌های فرورانشی، میزان Th افزایش می‌یابد و نسبت Th/Ta در سنگ‌های مرتبط با فرورانش در حاشیه فعال قاره‌ها بین ۶-۲۰ متغیر است (Gorton and Schandle, 2002). این نسبت برای سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده برابر با ۶/۵-۲۰/۸۳ است. این نکته چه‌بسا نشان‌دهنده پیدایش سنگ‌های منطقه مرشون در محیط فرورانشی حاشیه فعال قاره‌ای است. نسبت‌های Nb/Y ($۱/۷۲-۰/۳۲$) از ویژگی سنگ‌هایی است که در کمان‌های ماگمایی مرتبط با فرورانش پدید می‌آیند (Temel et al., 1998). سنگ‌های آتشفشانی بررسی‌شده از عنصرهای HFSE تهی هستند و نسبت Nb/Y در آنها برابر با ۰/۹۵-۰/۵۸ (میانگین: ۰/۷۶) است. بررسی‌های ایزوتوپی Sr، Nd و Pb سنگ‌های آتشفشانی مرشون نشان‌دهنده یک خاستگاه گوشته سنگ‌کره‌ای غنی‌شده برای این سنگ‌هاست. گدازه‌های آندزیتی منطقه مرشون با نسبت $(La/Sm)_N$ بیشتر از ۲/۵۲ و نسبت $(Tb/Yb)_N$ کمتر از ۱/۲۳ شناخته می‌شوند که نشان‌دهنده پیدایش ماگمای مادر آنها از خاستگاهی گوشته‌ای با ترکیب اسپینل پریدوتیت است (شکل ۱۵).

در بررسی‌های انجام‌شده روی سنگ‌های آتشفشانی منطقه آق‌داغ در شمال‌خاور ابهر و مجاور با منطقه مرشون (Khalatbari Jafari et al., 2016) نیز سنگ‌های آتشفشانی بازیک-حد واسط منطقه به ذوب‌بخشی گوشته سنگ‌کره‌ای زیرقاره‌ای^۸ نسبت داده شده‌اند که با مواد پوسته آلودگی یافته‌اند.

^۸ SCLM = Sub-continental lithospheric mantle

^۹ delamination

سیاس‌گذاری

نگارندگان از پشتیبانی‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش سپاس‌گزارند. همچنین، از راهنمایی‌های علمی ارزنده داوران گرامی مقاله که منجر به غنای بیشتر این مقاله شد، بسیار سپاس‌گزارند.

زیرقاره‌ای را در پی داشته است. ماگمای بازیگ پدیدآمده از ذوب‌بخشی گوشته متاسوماتیسم‌شده سنگ‌کره‌ای زیرقاره‌ای به سمت ترازهای بالاتر و پوسته قاره‌ای صعود کرده و در مسیر با مواد پوسته‌ای نیز آغشته شده است. در پایان، جدایش بلورین ماگمای یادشده سنگ‌های حد واسط و اسیدی منطقه مرشون را پدید آورده است.

References

- Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., and Castro, A. (2015) Petrogenesis and U- Pb dating (SHRIMP) of Tarom intrusions. *Geosciences, Scientific Quarterly Journal*, 95(1), 3-20 (in Persian).
- Bonin, B. (2004) Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2), 1-24.
- Cameron, B.I., Walker, J.A., Carr, M.J., Patino, L.C., Matias, O., and Feigenson, M.D. (2003) Flux versus decompression melting at stratovolcanoes in southeastern Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119(1-4), 21-50.
- Castro, A., Aghazadeh, M., Badrzadeh, Z., and Chichorro, M. (2013) Late Eocene- Oligocene post-collisional monzonitic intrusions from the Alborz magmatic belt, NW Iran. An example of monzonite magma generation from a metasomatized mantle source. *Lithos*, 180-181, 109-127.
- DePaolo, D.J., and Daley, E.E. (2000) Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology*, 169(1-2), 157- 185.
- Esmaeli, M., Lotfi, M., and Nezafati, N. (2015) Fluid inclusion and stable isotope study of the Khalyfchlou copper deposit, Southeast Zanjan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9625- 9633.
- Foley, S., and Peccerillo, A. (1992) Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28(3- 6), 181-185.
- Foley, S.F., and Wheler, G.E. (1990) Parallels in the origin of the geochemical signature of island arc volcanic rocks and continental potassic igneous rocks: The role of titanites. *Chemical Geology*, 85(1- 2), 1- 18.
- Ghasemi Siani, M., Lentz, D.R., and Nazarian, M. (2020) Geochemistry of igneous rocks associated with mineral deposits in the Tarom- Hashtjin metallogenic province, NW Iran: An analysis of the controls on epithermal and related porphyry- style mineralization. *Ore Geology Reviews*, 126, 103753.
- Ghasemi Syani, M. (2014) Timing and origin of the epithermal veins and geochemical zoning in the Glojeh district, Iran. Ph.D. thesis, Geosciences Department, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Persian).
- Ghorbani, M. (2013) The economic geology of Iran: Mineral deposits and natural resources. Springer Dordrecht Heidelberg.
- Gorton, M.P., and Schandle, E.S. (2002) From continental to island arc: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineralogist*, 38(5), 1065- 1073.

- 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.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F. (2007) Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341- 2357.
- Honarmand, M., Rashidnejhad Omran, N., Neubauer, N., Emami, M.H., Nabatian, G., Liu, X., Donge, Y., Von Quadt, A., and Chen, B. (2014) Laser-ICP-MS U-Pb zircon ages and geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Niyasar plutonic complex, Iran: constraints on petrogenesis and tectonic evolution. *International Geology Review*, 56(1), 104-132.
- Hosseiny, M., Mousavi, E., and Rasouli Jomadi, F. (2016) Explanatory text of Abhar. Geological Quadrangle Map 1:100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Hosseinzadeh, M.R., Maghfouri, S., Moayyed, M., Lotfeghnia, M., and Hajalilou, B. (2015) Petrology, geochemistry and alteration at the polymetallic (Cu- Pb- Zn) vein and veinlet mineralization in the Luin- Zardeh area, NE Zanzan. *Geosciences, Scientific Quarterly Journal*, 96, 41-52 (in Persian).
- Hosseinzadeh, M.R., Maghfouri, S., Moayyed, M., and Rahmani, A. (2016) Khalifehlou deposit: high sulfidation epithermal Cu- Au mineralization in the Tarom magmatic zone, north Khoram Dareh. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 99(1), 179-194 (in Persian).
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8(5), 523-276.
- Jiang, Y.H., Liu, Z., Jia, R.Y., Liao, S.Y., Zhou, Q., and Zhao, P. (2012) Miocene potassic granite-syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba- Sr granite genesis. *Lithos*, 134-135, 146- 162.
- 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 Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144, 38- 56.
- Khalatbari Jafari, M., Akbari, M., and Ghalamgash, J. (2016) Geology, Petrology and magmatic evolution of the Eocene volcanic rocks in Aqdagh area, NE Abhar. *Kharazmi Journal of Geosciences*, 2(1), 33- 60 (in Persian).
- Koepke, J., Schoenborn, S., Oelze, M., Wittmann, H., Feig, S.T., Hellebrand, E., Boudier, F., and Schoenberg, R. (2009) Petrogenesis of crustal wehrlites in the Oman ophiolite: Experiments and natural rocks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10(10).
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Chang, Z., and Johnson, C.A. (2018) Intermediate sulfidation type base metal mineralization at Aliabad- Khanchy, Tarom- Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 93, 1- 18.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K., and Zhao, J. (2019a) Fluid inclusion and stable isotope constraints on ore genesis of the Zajkan epithermal base metal deposit, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 109, 564-584.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K., and Zhao, J. (2019b) Origin and evolution of hydrothermal fluids in the Marshoun epithermal Pb-Zn-Cu (Ag) deposit, Tarom-Hashtjin metallogenic belt, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 113, 87-103.
- Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A., Qin, K., and Zhao, J. (2020) Genesis of the Abbasabad epithermal base metal deposit, NW Iran: Evidence from ore geology, fluid inclusion and O-S isotopes. *Ore Geology Reviews*, 126, 1-21.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., and Zanttin B. (1986) A chemical of volcanic rocks

- classification based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745-750.
- Machado, A.T., Chemale, J.F., Conceicao, R.V., Kawaskita, K., Morata, D., Oteiza, O., and Schmus, W.R.V. (2005) Modeling of subduction components in the Genesis of the Mesozoic igneous rocks from the South Shetland Arc, Antarctica. *Lithos*, 82(3-4), 435-453.
- McDonough, W.F., and Sun, S.S. (1995) Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223- 253.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Goldfarb, R., Azizi, H., Ganerod, M and Marsh, E.E. (2016) Mineral assemblages, fluid evolution and genesis of polymetallic epithermal veins, Glojeh district, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 78, 41- 56.
- Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H., and Saiedi, A. (2016) Investigation on type and origin of copper mineralization at Aliabad Mousavi- Khanchy occurrence, east of Zanjan, using petrological, mineralogical and geochemical data. *Geosciences, Scientific Quarterly Journal*, 100(2), 259-270 (in Persian).
- Morata, D., Oliva, C., Cruz, R., and Suarz, M. (2005) The Bandurrias Gabbro: Late Oligocene alkaline magmatism in the Patagonian Cordillera. *Journal of South American Earth Sciences*, 18(2), 147-162.
- Muller, D., and Groves, D.I. (1997) Potassic igneous rocks and associated gold copper mineralization. 2nd edition, Springer, Verlag, Berlin.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., and Honarmand, M. (2016b) Petrography and mineral chemistry of Tarom plutonic complex, NE Zanjan. *Petrological Journal*, 26(2), 99-116 (in Persian with English Abstract).
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V., and Honarmand, M. (2014a) Geology, alteration, age and origin of iron oxide-apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 49, 217-234.
- Nabatian, G., Ghaderi, M., Neubauer, F., Honarmand, M., Xiaoming, L., Dong, Y, Jiang, S.H., Quadt, A., and Bernroider, M. (2014b) Petrogenesis of Tarom high- potassic granitoids in the Alborz-Azarbaijan belt, Iran: Geochemical, U-Pb zircon and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Lithos*, 184-187, 324- 345.
- Nabatian, G., Jiang, S.Y., Honarmand, M., Neubauer, F. (2016a) Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Tarom-Olya pluton, Alborz magmatic belt, NW Iran. *Lithos*, 244, 43-58.
- Nabavi, M.H. (1976) Introduction to geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Naderi, M. (2011) Petrology of quartz monzonitic intrusion at the southern range of Tarom sub-zone, east of Zanjan. MSc. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (in Persian).
- Nouri, F., Azizi, H., Stern, R.J., 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, 274-292.
- Pang K.N., Chung S.L., Zarrinkoub M.H., Khatib M.M., Mohammadi S.S., Chiu H. Y., Chu C.H., Lee H.Y., Lo C.H. (2013) Eocene- Oligocene post-collisional magmatism in the Lut Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180-181, 234-251.
- Plank, T. (2005) Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5), 921-944.
- Ramezani, J., and Tucker, R.D. (2003) The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7), 622- 665.

- Rashidnejhad Omran, N., Aghazadeh, M., Arvin, M., and Nazari Nia, A. (2014) Petrology and geochemistry of quartz monzonite intrusion at the Tarom sub-zone, NE Zanzan. *Petrological Journal*, 20(4), 91-106 (in Persian with English Abstract).
- Rollinson, H.R. (1993) *Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific and Technical, England.
- 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. *Geoscience Frontiers*, 6(4), 481- 501.
- Saiedi, A., Mokhtari, M.A.A., and Kouhestani, H. (2018) Petrology and geochemistry of intrusive rocks at Khanchay- Aliabad region (Tarom sub-zone, East of Zanzan). *Petrological Journal*, 33(1), 207- 229 (in Persian with English Abstract).
- Seyedqaraeini, A., Mokhtari, M.A.A., and Kouhestani, H. (2020) Petrology, geochemistry and tectonomagmatic setting of Zajkan granitoid (Tarom-Hashtjin sub-zone, West of Qazvin). *Petrological Journal*, 39(3), 79-100 (in Persian with English Abstract).
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, London.
- Temel, A., Gondogdu, M.N., and Gourgaud, A. (1998) Petrological and geochemical characteristics of Cenozoic high K- calc alkaline volcanism in Konya, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1), 327-357.
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., Rogers, N., Hawkesworth, C., Harris, N., Kelley, S., Van Calsteren, P., and Deng, W. (1996) Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan, Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and source of ocean island basalts. *Journal of Petrology*, 37(1), 45- 71.
- Varekamp, J.C., Hesse, A., and Mandeville, C.W. (2010) Back-arc basalts from the Loncopuegraben (province of Neuquen, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1), 313- 328.
- Vetrin, V.R., and Rodionov, N.V. (2008) Sm-Nd Systematics and petrology of post-orogenic Granitoids in the Northern Baltic Shield. *Geochemistry International*, 46(11), 1090-1106.
- Wallin, E.T., and Metcalf, R.V. (1998) Supra-subduction zone ophiolite formed in an extensional forearc: Trinity Terrane, Klamath Mountains, California. *The Journal of Geology*, 106(5), 591- 608.
- Wang, K., Plank, T., Walker, J.D., and Smith, E.I. (2002) A mantle melting profile across the basin and range, SWUSA. *Journal of Geophysical Research*, 107(B1), 1-21.
- Wang, K.L., and Chung, S.L. (2004) Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region. *Journal of Petrology*, 45(5), 975- 1011.
- Wayer, S., Munker, C., and Mezgar, K. (2003) Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: implications for the differentiation history of the crust-mantle system. *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4), 306-324.
- Weaver B.L., and Tarney J. (1984) Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, 310, 575- 577.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W. (2010) Abbreviation for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1), 185- 187.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis*. Chapman and Hall, London.
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A. (1977) Geochemical classification of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.

- Yasami, N., Ghaderi, M., Mokhtari, M.A.A., and Mousavi Motlagh, S.H. (2018) Petrogenesis of the two phases of intrusive rocks at Chodarchay, NW Iran: using trace and rare earth elements. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 605.
- 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(6), 67-786.