

Petrography, geochemistry, tectonic setting and petrogenesis of volcanic rocks in Robaie area (South of Damghan)

Mehdi Mahdavi Akerdi ¹, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi ^{1*},
Mohammad Hassan Karimpour ¹, Behnam Rahimi ¹
and Jose Francisco Santos ²

¹ Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Department of Geology, University of Aveiro, Aveiro, Portugal

Abstract

The rocks of the Robaie area located in the Torud-Chahshirin belt and south of Damghan, includes the Eocene andesite and trachyandesite rocks in which subvolcanic igneous rocks as stoke and dyke with diorite, monzonite and monzodiorite porphyry composition are intruded. The main textures of volcanic rocks are porphyritic characterized by plagioclase, hornblende and biotite phenocrysts as well as apatite and zircon as minor minerals. The rocks studied are mainly of shoshonitic nature and only one sample is considered as high-K calc-alkaline. Several line of evidence including LILE and LREE enrichment, HREE and HFSE depletion, high Th/Yb with negative anomalies of Ti, Nb and the position of the samples on the tectonic discrimination diagrams indicate that the volcanic rocks in discussion were emplaced into the subduction zone related to an active continental margin setting. The initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios and (εNd)_i value of andesite are 0.704445, 0.512691 and 2.29, respectively. All of these evidences confirm that the studied volcanic rocks were generated from partial melting of the mantle wedge above the subduction zone. Petrographic observations along with geochemistry of rare earth and trace elements suggest that the calc-alkaline affinity of the rocks studied and their parent magma from a subducted-related environment as well as crustal assimilation and fractional crystallization.

Key words: petrography, geochemistry, subduction zone, Nd- Sr isotopes, Robaie, Central Iran

* shafaroudi@um.ac.ir

سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، جایگاه زمین‌ساختی و سنگ‌زایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی (جنوب دامغان)

مهدی مهدوی‌آکردی^۱، آزاده ملک‌زاده‌شفارودی^{۱*}، محمدحسن کریم‌پور^۱
 بهنام رحیمی^۱ و ژوزه فرانسیسکو سانتوس^۲
^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آویرو، آویرو، پرتغال

چکیده

سنگ‌های منطقه رباعی، در کمربند ترو-چاه‌شیرین در جنوب دامغان، شامل واحدهای آتشفشانی ائوسن با ترکیب آندزیت و تراکی آندزیت هستند. سنگ‌های آذرین نیمه‌ژرف به‌صورت استوک و دایک با ترکیب دیوریت، مونزونیت و مونزودیوریت پورفیری در این واحدها نفوذ کرده‌اند. بافت اصلی سنگ‌های آتشفشانی پورفیریتیک است و درشت‌بلورهایی از کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند و بیوتیت دارند. آپاتیت و زیرکن کانی فرعی این واحدها هستند. این سنگ‌ها بیشتر سرشت شوشونیتی و یک نمونه نیز سرشت کالک‌آلکان پتاسیم بالا دارند. غنی‌شدگی از LILE و LREE، به‌همراه تهی‌شدگی از HREE و HFSE و ناهنجاری منفی عنصرهای Ti و Nb همراه با شواهد دیگر، مانند نسبت بالای Th/Yb در این سنگ‌های آتشفشانی، نشان‌دهنده پیدایش آنها در یک محیط مرتبط با فرورانش در مرز فعال قاره‌ای هستند. مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه و $\epsilon(\text{Nd})$ آندزیت به‌ترتیب برابر با ۰/۷۰۴۴۴۵، ۰/۵۱۲۶۹۱ و ۲/۲۹ است. همه این ویژگی‌ها پیدایش سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی را از ذوب‌بخشی گوه‌گوشته‌ای در بالای پهنه فرورانش تأیید می‌کنند. یافته‌های سنگ‌شناسی همراه با داده‌های زمین‌شیمیایی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب نشان‌دهنده گرایش کالک‌آلکان، آلیش و هضم مواد پوسته‌ای، جدایش بلورین و پیدایش ماگما سازنده آنها در پهنه‌های فرورانشی است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، پهنه فرورانش، ایزوتوپ‌های Nd-Sr، رباعی، ایران مرکزی

مقدمه

طول جغرافیایی خاوری ۵۴°۲۸'۱۱" تا
 ۵۴°۳۰'۴۳" و عرض جغرافیایی شمالی
 ۳۵°۲۲'۳۰" تا ۳۵°۴۸'۲۳" در نقشه زمین‌شناسی
 ۱:۱۰۰۰۰۰ کلاته- رشم جای گرفته است (Nogol)

منطقه رباعی در ۹۵ کیلومتری جنوب شهر
 دامغان و ۵ کیلومتری جنوب‌خاوری روستای دیان
 در استان سمنان جای دارد. این منطقه در میان

* shafaroudi@um.ac.ir

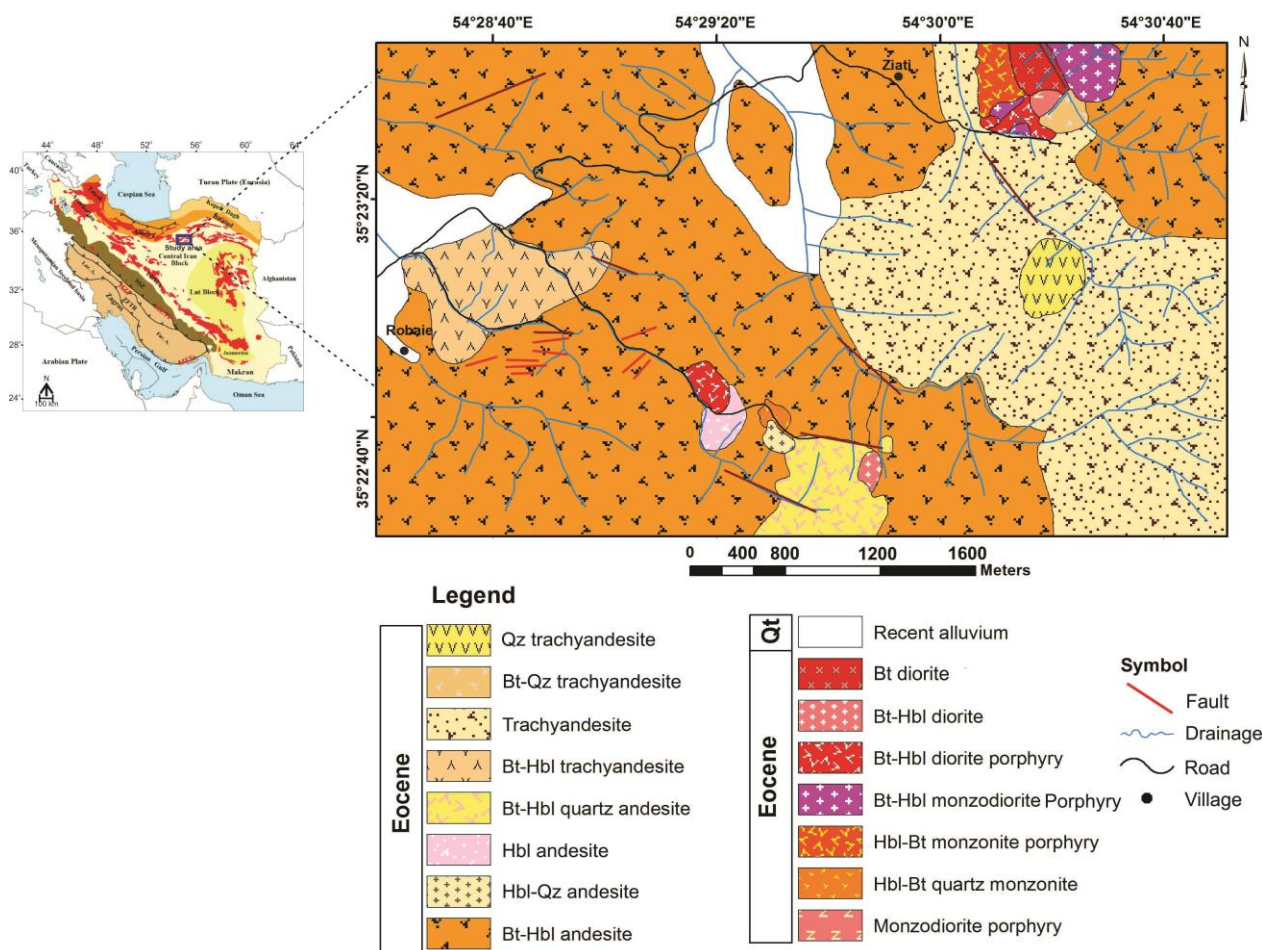
Copyright©2020, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

DOI: <https://doi.org/10.22108/ijp.2020.119892.1152>

آتشفشانی با ترکیب بیشتر آندزیتی و توده‌های آذرین نیمه‌ژرف با ترکیب بیشتر دیوریتی است (Fard and Rastad, 2001). این کمربند با درازای ۱۰۰ تا ۱۱۰ و پهنای ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر در میان دو گسل راستالغز با راستای شمال‌خاوری- جنوب‌باختری تروود و انجیلو جای دارد و بخشی از ماگماتیسم کمان پشتی ائوسن شمال ایران است.

(Sadat and Alavi, 1993) (شکل ۱).

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری ایران، این منطقه در پهنه ایران مرکزی و در بخش شمالی آن در کمربند آتشفشانی- نفوذی تروود- چاه‌شیرین جای گرفته است (Houshmandzadeh et al., 1978). کمربند آتشفشانی- نفوذی تروود- چاه‌شیرین پیامد ماگماتیسم ترشیاری در پهنه ایران مرکزی است و دربردارنده سنگ‌های



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه رباعی (مقیاس ۱:۵۰۰۰) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰): Hbl: هورنبلند؛ Bt: بیوتیت؛ Qz: کوارتز)

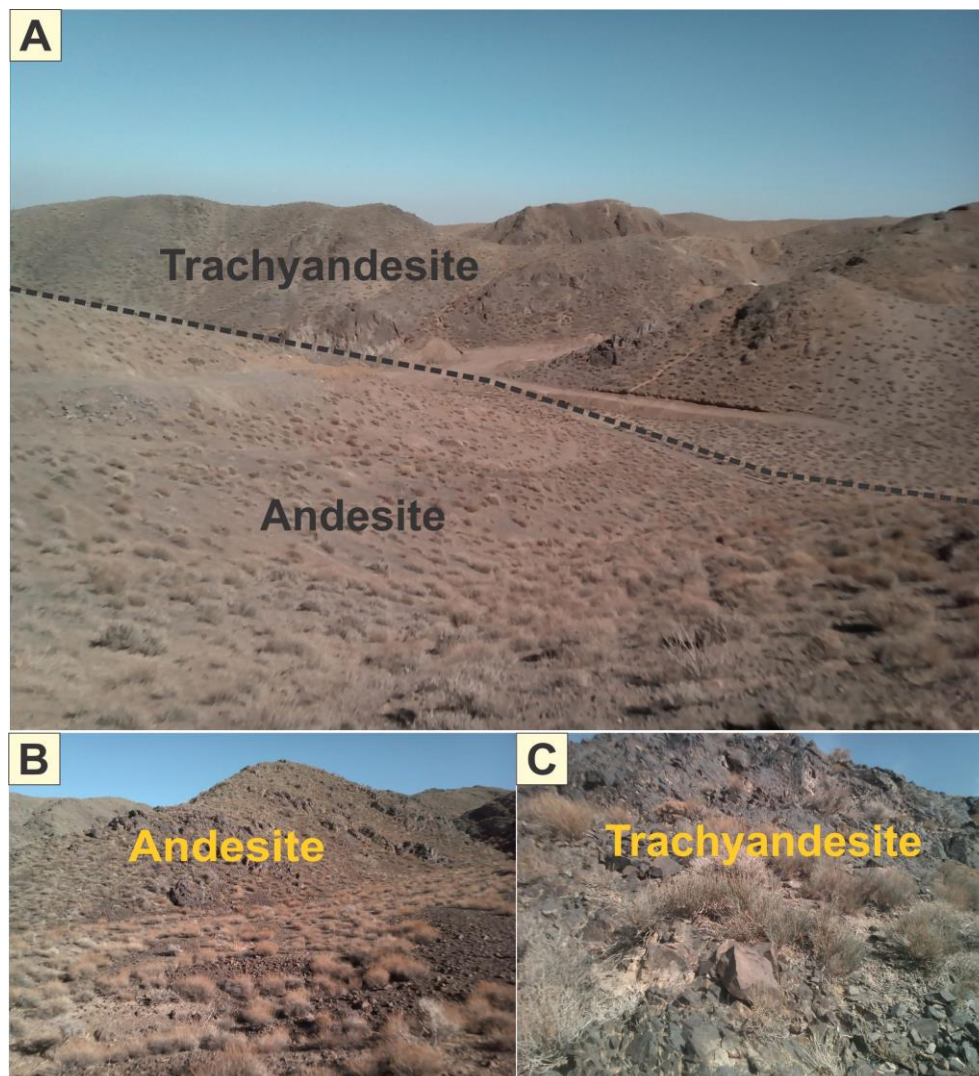
برپایه تازه‌ترین سن به‌دست‌آمده، ماگماتیسم در این کمربند از ۳۹ تا ۴۹ میلیون سال پیش (ائوسن زیرین تا ائوسن پایانی) ادامه داشته است (Niroomand et al., 2018). اوج فعالیت‌های

ماگمایی در این کمربند مربوط به ائوسن میانی تا پایانی است که از قدیم به جدید شامل: ۱- توف‌های با ترکیب ریولیتی تا ریوداسیتی و به‌طور محلی جریان‌های گدازه‌ای آندزیتی؛

محلی جریان‌های گدازه‌ای آندزیتی؛

کوچک در شمال خاوری منطقه رخنمون دارند (شکل ۱). این سنگ‌ها به رنگ سفید تا خاکستری روشن با بافت پورفیرویدی هستند و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت و هورنبلند در نمونه دستی دیده می‌شود. این توده‌ها با شدت‌های مختلف دچار دگرسانی‌های آرژیلیک، سریسیتی، پروپلیتیک و کربناتی شده‌اند. واحدهای کواترنری دربردارنده رسوب‌های آبرفتی عهد حاضر هستند که در بخش باختری و شمالی منطقه دید می‌شوند (شکل ۱).

توده‌های آذرین نیمه‌ژرف به صورت استوک و دایک درون سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (شکل ۱). این واحدها در شمال خاوری و جنوب منطقه رخنمون دارند و شامل دیوریت، مونزودیوریت و مونزونیت پورفیری هستند. دیوریت‌ها به رنگ سیاه تا خاکستری با بافت پورفیرویدی در نمونه دستی دیده می‌شوند و درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز، بیوتیت و هورنبلند در زمینه دانه‌ریزی از همین کانی‌ها دارند (شکل ۱). مونزونیت و مونزودیوریت پورفیری به صورت استوک‌های



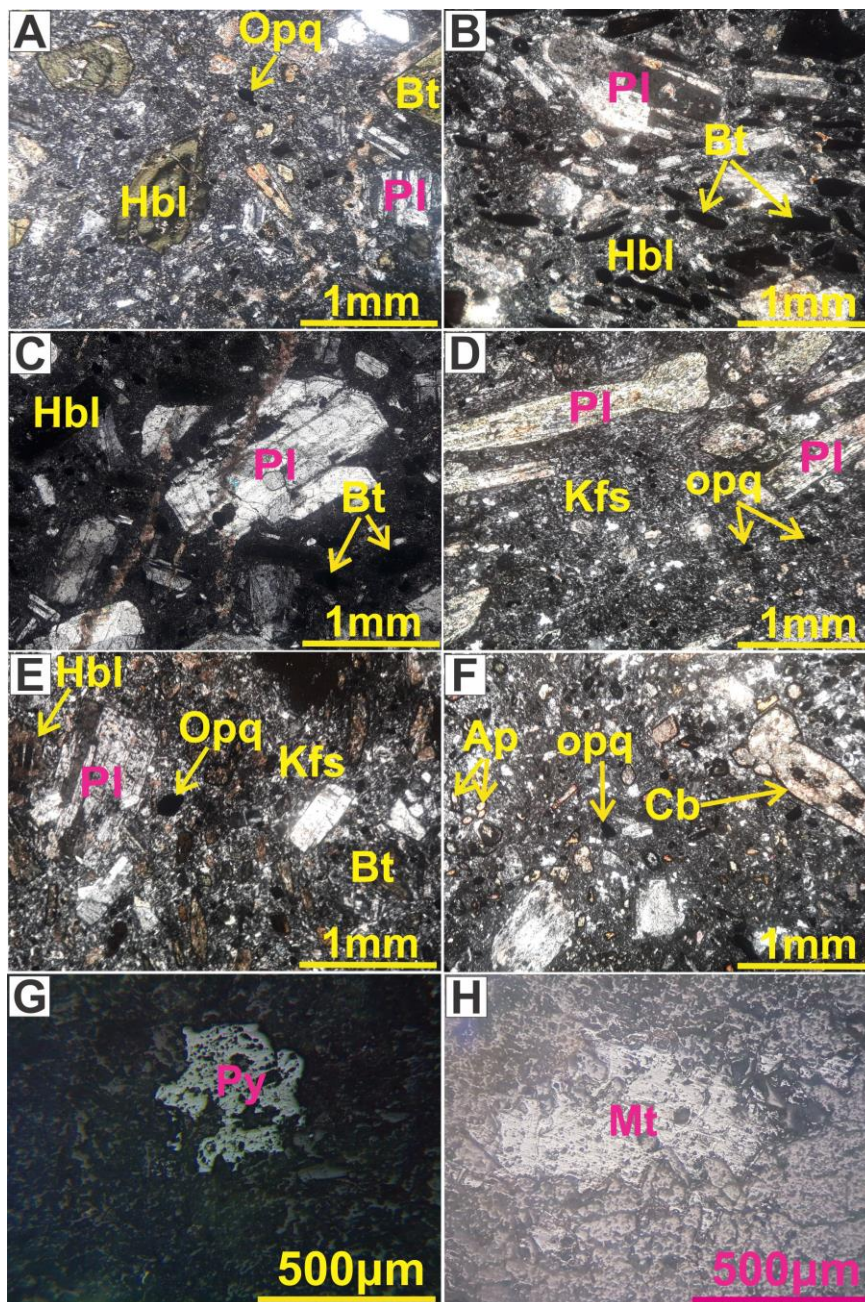
شکل ۲- تصویر صحرایی از رخنمون سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی. (A) مرز میان آندزیت و تراکی‌آندزیت در صحرا (نگاه رو به شمال)؛ (B) رخنمون آندزیت در بخش شمال خاوری منطقه (نگاه رو به شمال خاوری)؛ (C) رخنمون تراکی‌آندزیت همراه با اکسیدهای آهن ثانویه در سطح سنگ (نگاه رو به شمال خاوری)

روش انجام پژوهش

برای تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از همه واحدهای سنگی منطقه نمونه‌برداری شد. در کل، شمار ۱۰۰ مقطع نازک برای بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری و دگرسانی ساخته شد. از میان آن، نزدیک به ۳۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی هستند. شمار ۷ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی با کمترین دگرسانی از مناطق بررسی شده برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی به روش XRF در شرکت کانساران بینالود تهران (دستگاه فیلیپس، مدل PW 1480) تجزیه شد. همچنین، این ۷ نمونه برای تجزیه عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب به روش محلول‌سازی ذوب قلیایی با حلال متابورات/تتراپورات و اسیدنیتريك آماده‌سازی شدند و سپس با روش پلاسمای جفت‌شده القایی ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا تجزیه شد. شمار یک نمونه از آندزیت کمتر دگرسان شده منطقه نیز برای بررسی ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd تجزیه شد. تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd در دانشگاه آویرو پرتغال روی نمونه سنگ کل و با دستگاه Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54 انجام شد. نسبت‌های ایزوتوپی Sr و Nd برای تفکیک جرمی نسبی به $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/1194$ و $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0/7219$ تصحیح شدند. در استاندارد SRM-988، مقدار میانگین (N=12; conf. lim = 95%) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0/16\pm 710279$ و در استاندارد JNdi-1 مقدار میانگین (N=13; conf. lim = 95%) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0/78\pm 5120984$ است. در پایان نقشه زمین‌شناسی منطقه با نرم‌افزار Arc map رسم شد. همچنین، برای تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای CorelDraw و GCDkit بهره گرفته شد.

سنگ‌نگاری واحدهای آتشفشانی

آندزیت: این واحد بافت پورفیری‌تیک با زمینه دانه‌ریز تا متوسط دارد و از ۲۰ تا ۲۵ درصد درشت‌بلور ساخته شده است. ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی پلاژیوکلاز (۰/۵ تا ۲ میلی‌متر)، ۳ تا ۵ درصد حجمی هورنبلند (۰/۲ تا ۱ میلی‌متر) و ۲ تا ۵ درصد حجمی بیوتیت (۰/۳ تا ۱ میلی‌متر) از درشت‌بلورهای این گروه سنگی به‌شمار می‌روند (شکل‌های ۳-A، ۳-B و ۳-C). پلاژیوکلازها به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار فراوان‌ترین درشت‌بلورهای آندزیت‌ها هستند. برپایه زاویه خاموشی، پلاژیوکلازها از نوع الیگوکلاز تا آندزین هستند (شکل ۳-C). در برخی پلاژیوکلازها، منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی دیده می‌شود. ویژگی‌های بافتی در درشت‌بلورها، مانند منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی، همگی نشان‌دهنده نبود تعادل شیمیایی و سریع بال‌آمدن ماگما و کاهش ناگهانی فشار در آن هستند و نقش آرایش پوسته‌ای را نشان می‌دهند (Raymond, 2002; Javidi, 2016). زمینه این گروه سنگی دانه‌ریز و دربردارنده ترکیبات مشابه درشت‌بلورها و کانی‌های کدر است. این سنگ‌ها با شدت‌های گوناگون دچار دگرسانی‌های آرژیلیک، سریسیتی، پروپلیتیک و کربناتی شده‌اند. آپاتیت و زیرکن از کانی‌های فرعی این سنگ هستند (شکل ۳-F). در کل، ۱۰ تا ۱۵ درصد پلاژیوکلازها به سرسیت و کانی‌های رسی دگرسان شده است. در برخی مقاطع ۶۰ تا ۷۰ درصد حجمی از هورنبلند و بیوتیت با کلریت جایگزین شده است (شکل ۳-A). کانی‌های کدر در این آندزیت‌ها، مگنتیت و به مقدار کمتر پیریت است (شکل‌های ۳-G و ۳-H).



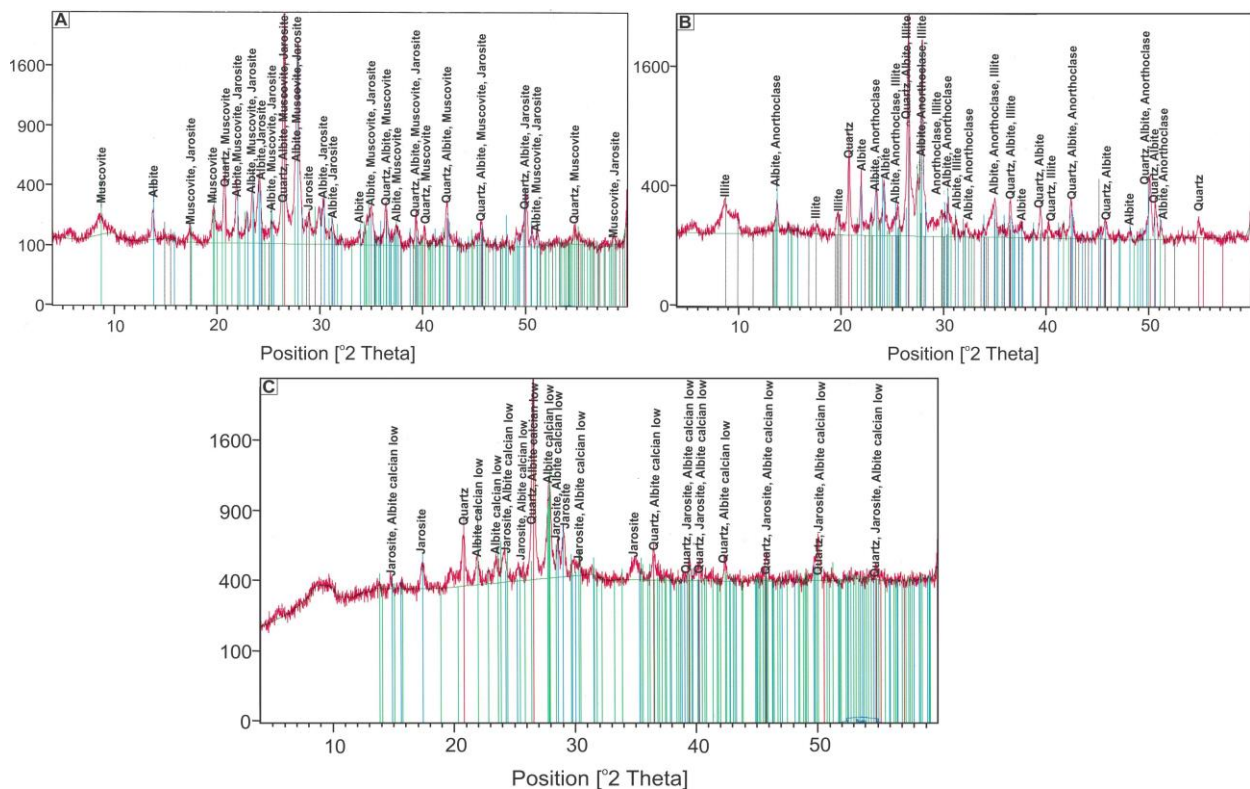
شکل ۳- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های آتشفشانی منطقه رابعی (در XPL): (A) جانشینی بیوتیت و هورنبلند با کلریت در واحد بیوتیت-هورنبلند آندزیت؛ (B) بلورهای بیوتیت و هورنبلند اپاکی شده در بیوتیت-هورنبلند آندزیت؛ (C) بیوتیت-هورنبلند آندزیت با بافت پورفیریتیک؛ (D) تراکی آندزیت با بافت پورفیریتیک و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز با حالت جریان در زمینه دانه‌ریز از پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار؛ (E) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز از پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، هورنبلند و بیوتیت در تراکی آندزیت؛ (F) جانشینی کلسیت در هورنبلند و بلورهای ریز آپاتیت در آندزیت؛ (G, H) کانی‌سازی پیریت و مگنتیت در آندزیت و تراکی آندزیت (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Whitney و Evans (۲۰۱۰): PI: پلاژیوکلاز؛ Hbl: هورنبلند؛ Bt: بیوتیت؛ Kfs: آلکالی‌فلدسپار؛ Py: پیریت؛ Mt: مگنتیت)

درصدجمی درشت‌بلور است. ۱۵ تا ۲۰ درصدجمی پلاژیوکلاز (۰/۵ تا ۲/۵ میلیمتر)، ۳ تا ۵ درصدجمی

تراکی آندزیت: این واحد بافت پورفیریتیک و میکرولیتی جریانی با زمینه دانه‌ریز و ۲۵ تا ۳۰

بیوتیت و هورنبلند به کلریت دگرسان شده‌اند. فرایند اپاسیتی‌شدن روی این بلورها تأثیر بسیاری گذاشته است و در بیشتر مقطع‌ها، کمابیش یا به‌طور کامل، اپاکی شده‌اند (شکل‌های ۳-B و ۳-E). در آندزیت و تراکی‌آندزیت، درشت‌بلورهای هورنبلند و بیوتیتِ اپاسیتی‌شده نشان‌دهندهٔ واکنش اکسیداسیون هستند که به نبود تعادل این کانی در محیط‌های آبدار و پر دما بستگی دارد (Rozebahani and Arvin, 2010, Amirteymoori *et al.*, 2019). مگنتیت و به مقدار کمتر پیریت از کانی‌های کدر در واحد تراکی‌آندزیت، هستند. شدت دگرسانی آرژیلیک سنگ‌های آتشفشانی در بخش شمال‌خاوری منطقه بسیار بالاست و به‌دنبال آن، در این بخش کانی‌سازی غیر فلزی (کائولن) روی داده است. کوارتز، آلبیت، مسکوویت، ایلیت، ژاروسیت و آنورتوکلاز از کانی‌های این دگرسانی به‌شمار می‌روند (شکل‌های ۴-A، ۴-B و ۴-C).

آلکالی‌فلدسپار (۰/۵ تا ۱ میلی‌متر)، ۴ تا ۵ درصد حجمی هورنبلند (۰/۴ تا ۱ میلی‌متر) و ۳ تا ۵ درصد حجمی بیوتیت (۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر) از درشت‌بلورهای سازندهٔ این گروه سنگی هستند (شکل‌های ۳-D، ۳-E و ۳-F). در تراکی‌آندزیت‌های منطقه، آلکالی‌فلدسپار بیشتر به‌صورت سائیدین با ماکل کارلسباد و به‌صورت فنوکریست تا میکرولیت دیده می‌شود. میکرولیت‌های پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار به‌همراه بیوتیت و هورنبلند سازندهٔ زمینهٔ سنگ هستند. آپاتیت و زیرکن نیز از کانی‌های فرعی به‌شمار می‌روند. ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی پلاژیوکلازها و پتاسیم‌فلدسپارها با سرسیت و کانی‌های رسی جایگزین شده‌اند (شکل ۳-D). هورنبلند و بیوتیت با کانی کدر جایگزین شده‌اند (شکل‌های ۳-E و ۳-F). در برخی نمونه‌ها، هورنبلند تا ۸۰ درصد حجمی با کلسیت (شکل ۳-F) و در برخی دیگر از نمونه‌ها، ۵ تا ۱۰ درصد حجمی



شکل ۴- نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) دگرسانی آرژیلیک در سنگ‌های آتشفشانی منطقهٔ رباعی

زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی

داده‌های تجزیه عنصرهای اصلی و فرعی و خاکی کمیاب سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در جدول ۱ آورده شده‌اند. با توجه به دگرسانی شدید منطقه، به‌ویژه از نوع آرژیلیک، سرسیتی و پروپلیتیک، انتخاب

نمونه‌هایی که هیچ‌گونه دگرسانی نداشته باشند بسیار دشوار بود. از این‌رو، برپایه بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری و برگزیدن بهترین نمونه‌ها، باز هم مقدار L.O.I. (۲/۶۸) تا ۴/۴۸ درصدوزنی) نشان می‌دهد دگرسانی‌هایی در این سنگ‌ها رخ داده‌اند.

جدول ۱- تجزیه عنصرهای اصلی (برپایه درصدوزنی)، فرعی و خاکی کمیاب (برپایه ppm) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی

Rock type	Andesite		Trachy-andesite					
	Sample No.	C2	C1	I26	I23	P12	P5	P21
Longitude	E54°29'10"	E54°29'02"	E54°29'41"	E54°29'38"	E54°30'35"	E54°30'30"	E54°30'25"	E54°30'25"
Latitude	N35°22'58"	N35°23'03"	N35°22'42"	N35°22'42"	N35°23'25"	N35°23'09"	N35°23'27"	N35°23'27"
SiO ₂	53.48	55.03	59.05	58.12	55.87	60.47	55.18	55.18
TiO ₂	0.8	0.62	0.9	0.58	0.85	0.69	0.75	0.75
Al ₂ O ₃	14.68	14.13	15.87	16.88	15.41	15.51	14.93	14.93
FeO _t	8.98	7.45	8.22	8.84	8.08	6.70	11.08	11.08
MnO	0.14	0.14	0.18	0.15	0.23	0.14	0.2	0.2
MgO	3.61	3.98	3.31	4.07	2.98	0.99	2.63	2.63
CaO	7.38	6.51	0.76	1.44	6.42	2.77	2.85	2.85
Na ₂ O	3.59	3.62	3.86	2.29	4	4.01	2.73	2.73
K ₂ O	3.28	3.39	4.17	3.31	2.64	4.38	5.02	5.02
P ₂ O ₅	0.48	0.32	0.35	0.18	0.49	0.17	0.26	0.26
L.O.I.	3.21	4.48	3.24	3.98	2.68	3.94	4.09	4.09
Total	99.61	99.67	99.91	99.84	99.65	99.77	99.72	99.72
Ba	633	576	1085	365	664	602	952	952
Rb	62.5	70.1	97.1	98.2	59.4	105	108.8	108.8
Sr	1167.9	970.9	368.9	116.6	1005	96.5	166.4	166.4
Zr	171	127.7	225.4	209.2	227.9	251	245.6	245.6
Nb	7.1	5.6	17.8	14.2	17.6	19.7	17.9	17.9
Ni	58	30	7	29	25	18	43	43
Co	20.6	15.7	6.1	4.5	13.7	2.3	8	8
Cr	67	49	19	42	45	30	93	93
V	205	152	101	64	135	13	110	110
Ta	0.4	0.3	1.1	0.9	1.1	1.4	1	1
Th	8.7	5.8	10.1	7.5	8.9	7.6	13	13
U	2.1	1.9	2.8	2.6	2.7	2.6	3.2	3.2
Ga	17.5	16.3	19.2	19.7	19.4	19.2	19.2	19.2
La	41.7	27.6	41.9	38.5	48.8	36.5	56.2	56.2
Cs	2.1	3.8	1	1.2	1.4	0.4	0.9	0.9
Hf	4.7	3.5	5.7	5.1	5.6	8.1	6.2	6.2
Ce	79.2	53	82.5	68.9	92.7	72.6	105.4	105.4
Pr	9.59	6.13	9.1	7.61	10.74	8.72	11.91	11.91
Nd	37.9	24.1	35.1	27.6	43	34.6	46.4	46.4
Sm	7.26	4.56	7.04	4.6	8.03	7.24	8.42	8.42
Eu	2.11	1.3	1.99	1.02	2.29	1.94	2.24	2.24
Gd	5.99	4.1	5.92	3.6	6.84	6.97	6.46	6.46
Tb	0.76	0.55	0.81	0.47	0.91	1.14	0.78	0.78
Dy	4	3.08	4.51	2.39	4.85	6.93	3.93	3.93
Ho	0.73	0.62	0.81	0.43	0.83	1.53	0.76	0.76
Er	1.99	1.75	2.3	1.33	2.4	4.7	2.06	2.06
Tm	0.29	0.26	0.33	0.19	0.35	0.66	0.27	0.27
Yb	1.9	1.74	2.22	1.13	2.21	4.69	1.8	1.8
Lu	0.3	0.28	0.34	0.19	0.35	0.7	0.25	0.25
Y	19.4	17	20.4	12.6	23.8	40.2	20.9	20.9
(La/Yb) _N	14.8	10.69	12.72	22.97	14.89	5.25	21.05	21.05
Eu/Eu*	0.98	0.92	0.94	0.77	0.94	0.84	0.93	0.93
(Ce/Yb) _N	10.78	7.88	9.61	15.77	10.84	4	15.15	15.15

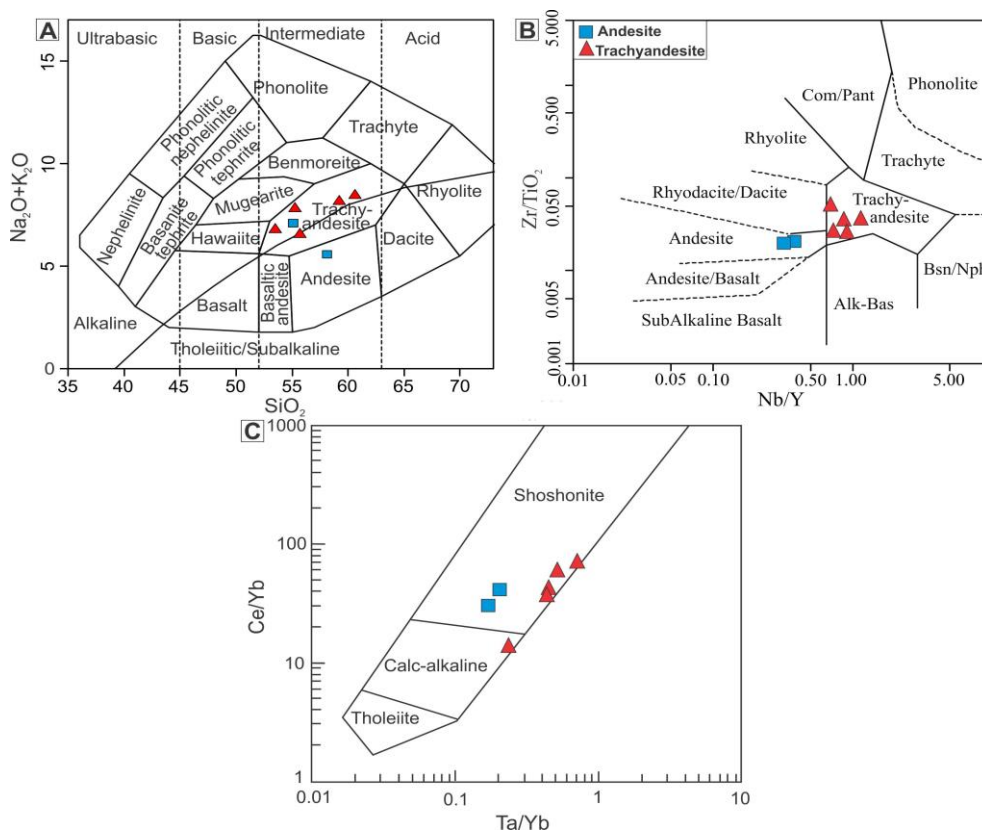
عنصرهای اصلی

در این بررسی، از عنصرهای اصلی، کمیاب و خاکی کمیاب برای نامگذاری واحدهای آتشفشانی، شناخت

سرشت و سری ماگمایی بهره گرفته شد. در این سنگ‌ها، مقدار SiO₂ برابر با ۵۳/۴۸ تا ۶۰/۴۷ درصدوزنی و مقدار K₂O+Na₂O برابر با ۶/۶۴ تا ۸/۳۹ است. رده‌بندی سنگ‌های

تراکی‌اندزیت رده‌بندی می‌شوند (شکل ۵- B). این یافته‌ها با بررسی‌های صحرایی نیز همخوانی دارد. در نمونه‌های تجزیه‌شده، نسبت Ce/Yb و Ta/Yb در سنگ‌های آتشفشانی به ترتیب برابر با $۱۵/۴۷$ تا $۶۰/۹۷$ و $۰/۱۷$ تا $۰/۷۹$ است. در نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb (شکل ۵- C)، بیشتر نمونه‌های آندزیت و تراکی‌اندزیت در گستره سری شوشونیتی جای گرفته‌اند و یک نمونه از تراکی‌اندزیت‌ها سرشت کالک‌آلکالن پتاسیم‌بالا نشان می‌دهد (شکل ۵- C).

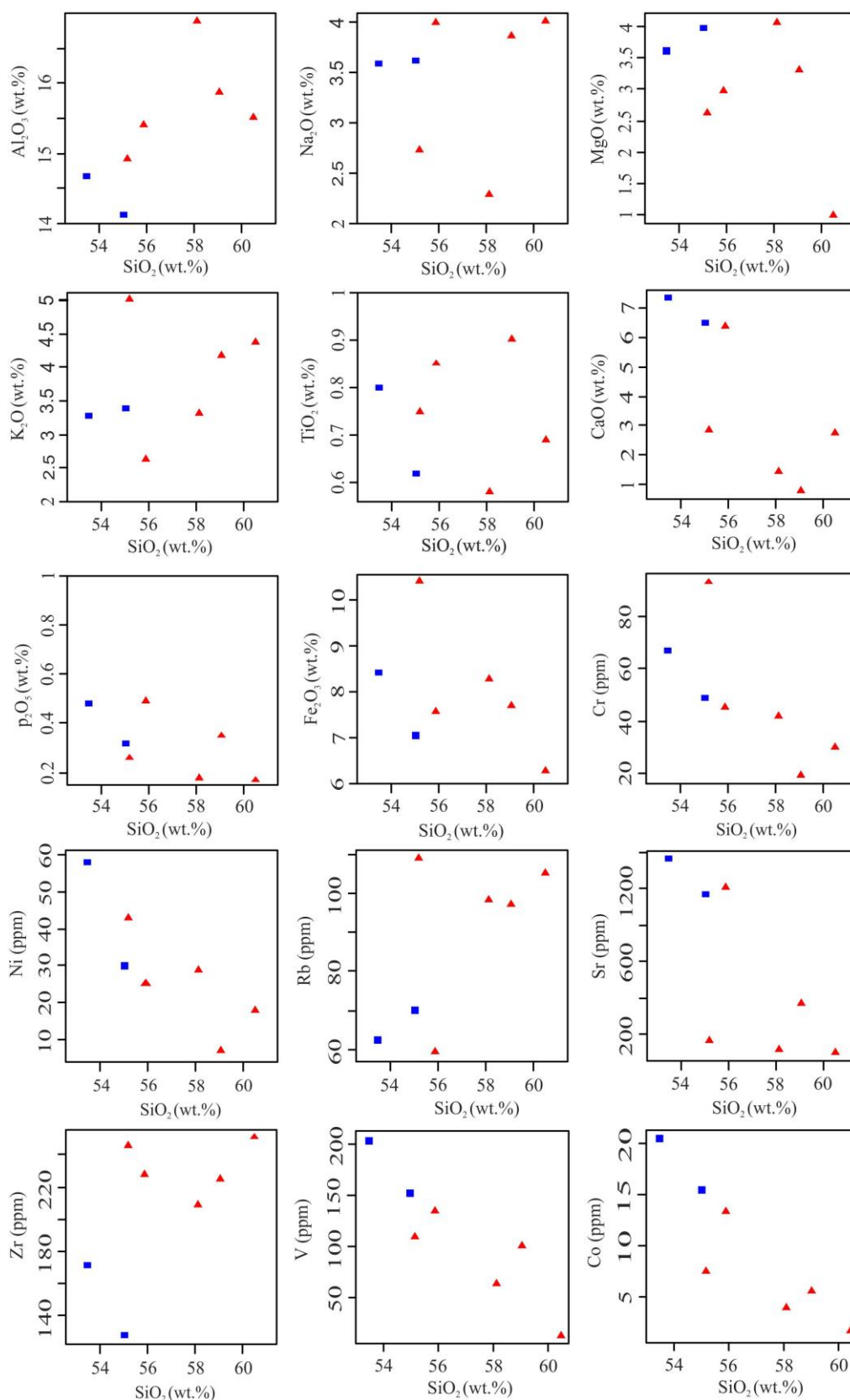
آتشفشانی برپایه اکسیدهای اصلی SiO_2 در برابر K_2O+Na_2O (شکل ۵- A) نشان می‌دهد سنگ‌های آتشفشانی منطقه در دو گروه آندزیت و تراکی‌اندزیت جای دارند (شکل ۵- A). از آنجایی که عنصرهای کمیاب و فرعی کمتر دستخوش فرایندهای دگرسانی و هوازگی می‌شوند، برای نامگذاری دقیق‌تر واحدهای آتشفشانی از نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 (شکل ۵- B) بهره گرفته شد. برپایه این نمودار نیز سنگ‌های آتشفشانی منطقه به دو گروه آندزیت و



شکل ۵- نامگذاری و شناسایی سری ماگمایی واحدهای آتشفشانی منطقه رباعی. A) نامگذاری واحدهای آتشفشانی برپایه نمودار SiO_2 در برابر K_2O+Na_2O (Cox et al., 1979)؛ B) رده‌بندی واحدهای آتشفشانی برپایه نمودار Nb/Y در برابر Zr/TiO_2 (Winchester and Floyd, 1977)؛ C) شناسایی سری ماگمایی واحدهای آتشفشانی برپایه نمودار Ta/Yb در برابر Ce/Yb (Pearce, 1982)

پتاسیم‌بالا و شوشونیتی نشان می‌دهند. این ویژگی از ویژگی‌های آشکار فعالیت ماگمایی در کمر بند ترود-چاه شیرین است. برای بررسی روند جدایش بلورین (تبلور تفریقی) در سنگ‌های آتشفشانی، تغییرات اکسیدهای عنصرهای اصلی و کمیاب در برابر SiO_2 (Harker, 1909) به کار برده شدند (شکل ۶).

پژوهش‌های پیشین درباره کمر بند ترود-چاه شیرین (Rashidnejad Omran, 1992; Tajeddin, 1999; Shaykhi, 2013; Niroomand et al., 2018) نشان می‌دهند ماگمای سازنده واحدهای سنگی در این کمر بند مقدار K_2O و Na_2O بالایی دارند و بیشتر سرشت ماگمایی کالک‌آلکالن



شکل ۶- ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقهٔ رباعی در نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی (برپایهٔ درصدوزنی) و برخی عنصرهای کمیاب (برپایهٔ ppm) در برابر درصدوزنی SiO_2 (Harker, 1909) (نمادها همانند شکل ۵ هستند)

پلاژیوکلازها آسان‌تر از کانی‌های کلسیم‌دار دیگر، جانشین Ca می‌شود (Mason and Moore, 1982; Teimouri *et al.*, 2018). با افزایش SiO_2 ، عنصر Zr روند افزایشی نشان می‌دهد؛ زیرا زیرکیم در محصول پایانی جدایش به فراوانی یافت می‌شود و به علت شعاع یونی بزرگ به ساختار کانی‌های سنگ‌ساز رایج افزوده نمی‌شود (Ahmadi Khalaji *et al.*, 2015). روند افزایشی Rb پیامد آلاینش مواد پوسته‌ای دانسته می‌شود. در برخی از این نمودارها، ترکیب برخی نمونه‌ها از روند تحولی انحراف دارد که چه‌بسا پیامد تغییرات این عنصرها در هنگام فرایندهایی مانند دگرسانی یا آلاینش و آلودگی ماگمایی سازنده سنگ‌های آتشفشانی منطقه با مواد پوسته‌ای باشد (Delavari *et al.*, 2017).

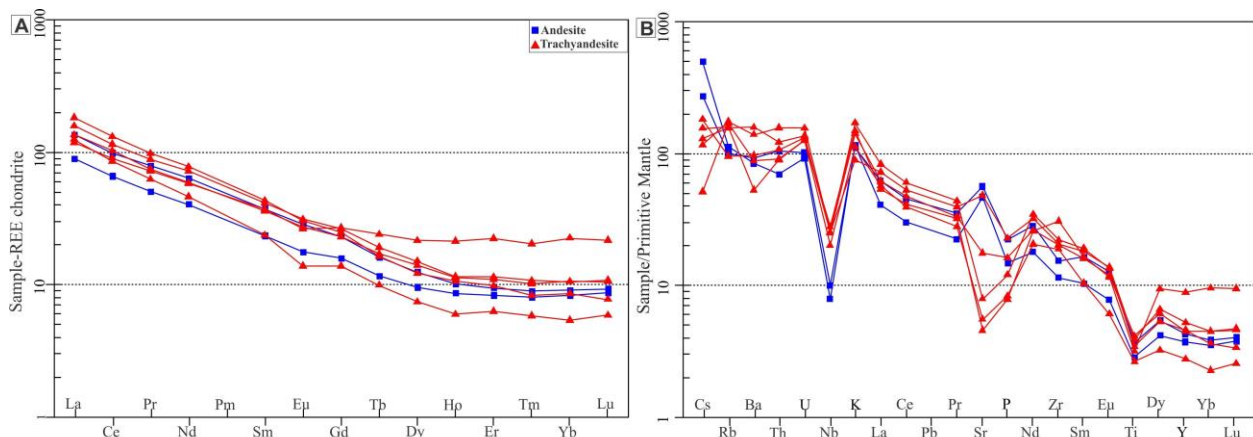
عنصرهای فرعی و خاکی کمیاب

عنصرهای خاکی کمیاب (REE) کمتر از دیگر عنصرها دچار هوازگی و دگرسانی گرمایی می‌شوند. از این رو، الگوی فراوانی آنها خاستگاه سنگ‌ها را نشان می‌دهد (Rollinson, 1993; Boynton, 1985). شکل‌های A- γ و B- γ به ترتیب نمودار عنکبوتی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (Boynton, 1985) و همچنین، نمودار عنکبوتی عنصرهای کمیاب بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی را نشان می‌دهند. در نمودار عنصرهای خاکی کمیاب برای سنگ‌های آتشفشانی بهنجار شده به ترکیب کندریت (شکل A- γ)، عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) در برابر عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. همچنین، HREE یک روند کمابیش هموار دارند (شکل A- γ). این روند غنی‌شدگی عنصرهای خاکی کمیاب سبک (LREE) در برابر عنصرهای خاکی کمیاب سنگین (HREE) نشان‌دهنده ماگماهای پهنه

با افزایش میزان SiO_2 (افزایش روند جدایش ماگمایی)، از مقدار اکسیدهای کلسیم، آهن و فسفر و همچنین، عنصرهای کروم، نیکل، کبالت، وانادیم و استرانسیم کاسته می‌شود و بر میزان اکسیدهای پتاسیم، آلومینیم و عنصرهای روبیدیم و زیرکن افزوده می‌شود. این روندها چه‌بسا نشان‌دهنده جدایش بلورین هستند. Na_2O و K_2O از اکسیدهای ناسازگاری هستند که با پیشرفت فرایند جدایش، مقدار آنها در مذاب به‌جامانده افزایش می‌یابد و در پایان به ساختار فلدسپارها افزوده می‌شوند (Khajeh *et al.*, 2014). در نمودار SiO_2 در برابر Na_2O روند روشنی دیده نمی‌شود؛ اما در نمودار SiO_2 در برابر K_2O روند افزایشی به‌خوبی دیده می‌شود. روند کاهش CaO در سنگ‌های آتشفشانی پیامد تحول ترکیب پلاژیوکلازها (از کلسیک به سدیک) در هنگام تبلور ماگما دانسته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در پی آن با تبلور پلاژیوکلازهای کلسیک در مراحل آغازین تبلور، میزان کلسیم ماگما کاهش یافته است و با ادامه روند تبلور، بلورهای آلبیت متبلور شده‌اند (Morata and Aguirre, 2003; Zarasvandi *et al.*, 2013, Khajeh *et al.*, 2014). در نمودار SiO_2 در برابر MgO روند روشنی دیده نمی‌شود. دلیل روند کاهش Fe_2O_3 نیز سازگار بودن عنصر آهن هنگام جدایش ماگمایی است که در کانی‌های مافیک جای می‌گیرند. همچنین، روند کاهش P_2O_5 شاید پیامد پیدایش کانی‌های فرعی مانند آپاتیت باشد (Hermann, 2002). همخوانی منفی عنصرهای سازگار کروم، نیکل و کبالت نیز نشانه تمرکز و افزوده شدن این عنصرها به ساختار کانی‌های الیوین و پیروکسن در هنگام روند جدایش ماگمایی است. به‌علت ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، عنصر وانادیم معمولاً در ساختار کانی‌های آهن و منگنزدار (مانند: هورنبلند، بیوتیت و مگنتیت) جای می‌گیرد. غلظت عنصر استرانسیم بیشتر با بلورهای پلاژیوکلاز، کنترل می‌شود؛ زیرا Sr در

۱۴/۸ و ۵/۲۵ تا ۲۲/۹۷ است (جدول ۱). این مقادیرهای کم در همه نمونه‌ها، به همراه الگوی عنصرهای REE پیامد نبود گارنت در خاستگاه ماگماست. نسبت $(Ce/Yb)_N$ نشان‌دهنده ژرفا و میزان ذوب سنگ مادر است. این نسبت در آندزیت‌ها و تراکی‌آندزیت‌ها منطقه رباعی به ترتیب برابر با ۷/۷۸ تا ۱۰/۷۸ و ۴ تا ۱۵/۷۷ است (جدول ۱). این مقدار گویای اینست که ماگما از بخش‌های بالایی گوشته خاستگاه گرفته و از محدوده پایداری گارنت دور بوده است (Cotton *et al.*, 1995).

فرورانش است (Wilson, 1989; Gill, 1981; Asiabanha *et al.*, 2012). مقدار نسبت Eu/Eu^* در آندزیت‌ها و تراکی‌آندزیت‌های منطقه رباعی به ترتیب برابر با ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ و ۰/۷۷ تا ۰/۹۴ است. وجود ناهنجاری‌های منفی اندک در Eu نشان‌دهنده حضور کم پلاژیوکلاز در خاستگاه ماگما و شرایط اکسیدان ماگما (آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای) است (Tepper *et al.*, 1993). نسبت $(La/Yb)_N$ در آندزیت‌ها و تراکی‌آندزیت‌های منطقه رباعی به ترتیب برابر با ۱۰/۶۹ تا



شکل ۷- ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در: (A) نمودار عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده در برابر ترکیب کندریت (Sun and McDonough, 1989)؛ (B) نمودار عنصرهای کمیاب بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه (Boynnton, 1985)

ماگما و جایگزینی آن در پهنه‌های فرورانش مربوط است (Kaygusuz and Aydınçakır, 2009; Lin *et al.*, 2012; Mirnejad *et al.*, 2013).

ایزوتوپ‌های Rb- Sr و Sm- Nd

داده‌های به دست آمده از تجزیه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک Rb-Sr و Sm-Nd سنگ آتشفشانی (آندزیت) در جدول ۲ آورده شده‌اند. مقادیرهای $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{143}Nd/^{144}Nd$ اولیه نمونه‌ها برای سن ۵۰ میلیون سال پیش (که بر پایه داده‌های سن‌سنجی U-Pb زیرکن در آزمایشگاه آریزونا آمریکا به دست آمده است) به دست آورده شدند.

در نمودار بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (شکل ۷-B) برای سنگ‌های آتشفشانی منطقه با ترکیب حد واسطه، غنی‌شدگی از عنصرهای لیتوفیل بزرگ یون (LILE؛ مانند: Cs, K, Rb و Ba) و تهی‌شدگی از عنصرهای با شدت میدان بالا (HFSE؛ مانند: Nb و Ti) دیده می‌شوند (شکل ۷-B). این تغییرات در مقدار عنصرهای خاکی کمیاب سبک و سنگین از ویژگی‌های شناخته شده ماگماهای پهنه فرورانش است (Wilson, 1989). بی‌هنجاری منفی Ti ، P و Nb به جدایش آپاتیت، تیتانومگنتیت، روتیل، ایلمنیت و پرووسکیت (Reagan and Gill, 1989) و آغشتگی ماگما با مواد پوسته‌ای (Zhou *et al.*, 2009) هنگام بالا آمدن

ایزوتوپ‌های اولیه $\epsilon(\text{Nd})_i$ در نمونه یادشده برابر با ۲/۲۹ است (جدول ۲).

این مقادارها برای آندزیت به ترتیب برابر با ۰/۷۰۴۴۴۵ و ۰/۵۱۲۶۹۱ است. می‌توان

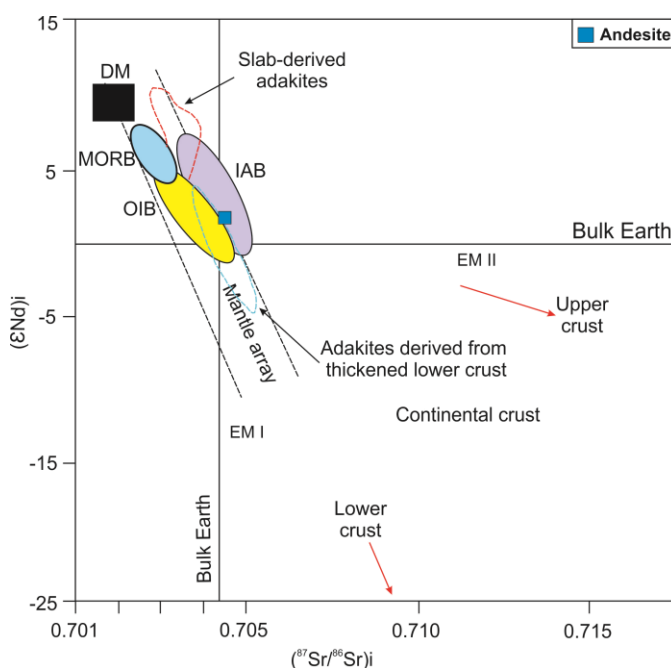
جدول ۲- داده‌های ایزوتوپ‌های Rb- Sr و Sm- Nd آندزیت در منطقه رباعی (خطای ۲ سیکما)

Sample No.	Sr ppm	Rb ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ initial	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	Erro (2s)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Measured	Erro (2s)
Andesite	1168	62.5	0.144	0.155	0.004	0.7044	0.7045	0.000024
Sample No.	Sm ppm	Nd ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	Erro (2s)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Measured	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ initial	Erro (2s)	$\epsilon(\text{Nd})_i$
Andesite	7.26	39.7	0.116	0.006	0.51272	0.512691	0.000015	2.29

(شکل ۸) نمونه آندزیت در منطقه گوشته و مرز میان بازالت جزیره‌های کمانی و بازالت جزیره‌های اقیانوسی مایل به بازالت جزیره‌های کمانی جای گرفته است (شکل ۸). خاستگاه ماگما از گوه گوشته‌های بالای صفحه فرورانده است. برپایه داده‌های ایزوتوپی، ماگمای مادر آندزیت از گوشته تهی شده پدید آمده و دچار کمترین آلودگی پوسته‌ای در هنگام تبلوربخشی شده است.

مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه و میزان ایزوتوپ‌های اولیه $\epsilon(\text{Nd})_i$ آندزیت نشان‌دهنده خاستگاه گوشته‌ای در پهنه‌های فرورانش است. نسبت‌های ایزوتوپی $\epsilon(\text{Nd})_i$ منفی نشان‌دهنده ویژگی‌های مذاب پوسته‌ای و $\epsilon(\text{Nd})_i$ مثبت نشان‌دهنده ویژگی‌های مذاب گوشته‌ای است (Kemp et al., 2007; Yang et al., 2007; Li et al., 2011). در نمودار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در برابر $\epsilon(\text{Nd})_i$

شکل ۸- ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در نمودار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اولیه در برابر $\epsilon(\text{Nd})_i$. منابع: آداکیت‌های جداشده از ذوب صفحه فرورو (Defant et al., 1992; Kay and Kay, 1993; Sajona et al., 2000; Aguilón-Robles et al., 2001; Atherton and Petford, 1993; Zindler and Hart, 1986)؛ آداکیت‌های جداشده از پوسته ضخیم زیرین (Muir et al., 1995; Petford and Atherton, 1996)؛ MORB؛ بازالت‌های پشته‌های میان‌اقیانوسی؛ DM یا گوشته تهی شده؛ OIB یا بازالت‌های جزیره‌های اقیانوسی؛ IAB یا بازالت‌های جزیره‌های کمانی (EM I و EM II)؛ که دو نوع از سازنده‌های پایانی گوشته هستند (Hou et al., 2011)



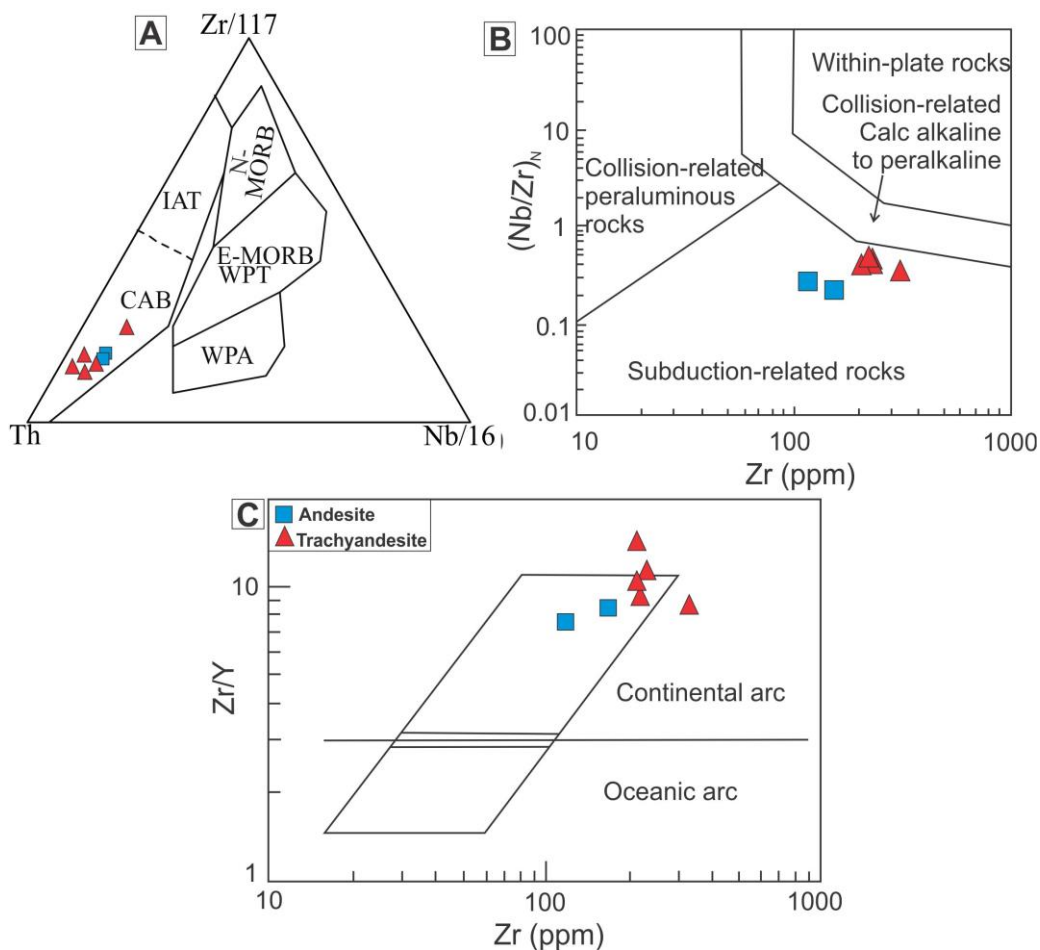
آنها در پهنه‌های فرورانش (جزیره‌های کمانی و مرز فعال قاره‌ای) هستند و ترکیب آنها در این‌گونه پهنه‌ها با فرایندهای درون مرزهای همگرا بستگی دارد (Gill, 2010). برپایه مقدار عنصرهای Hf، Nb و Th در نمودار

بحث

جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی: معمولاً آندزیت‌ها، تراکی آندزیت‌ها، داسیت‌ها و ریولیت‌ها در پهنه‌های زمین‌ساختی گوناگونی یافت می‌شوند؛ اما بیشتر

این نمودار، همه واحدهای آتشفشانی در بخش کمان‌های قاره‌ای جای گرفته‌اند (شکل ۹- C). کمان‌های قاره‌ای در برابر کمان‌های اقیانوسی از SiO_2 سرشارتر هستند و ناهنجاری مثبت‌تری از عنصرهای K، Rb و U نشان می‌دهند (Stern, 2002). این شرایط در سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی دیده می‌شود و سرشت آنها با کمان قاره‌ای همخوانی دارد.

سه تایی، جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی منطقه، پهنه آتشفشانی مرز قاره‌ای (CBA) است (شکل ۹- A). در نمودار Zr در برابر $(Nb/Zr)_N$ ، سنگ‌های آتشفشانی منطقه در پهنه فرورانش جای گرفته‌اند (شکل ۹- B). نشانه‌هایی مانند ناهنجاری منفی Nb و غنی‌شدگی عنصرهای LILE در برابر HFSE نیز درستی این نکته را نشان می‌دهد. برای شناسایی نوع کمان آتشفشانی نمودار Zr در برابر Zr/Y (شکل ۹- C) به کار برده شد. برپایه



شکل ۹- ترکیب سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در: (A) نمودار سه تایی Hf-Th-Nb (Wood, 1980)؛ (B) نمودار شناسایی جایگاه زمین‌ساختی برپایه نمودار Zr در برابر $(Nb/Zr)_N$ (Thieblemont and Tegyey, 1994)؛ (C) نمودار تعیین نوع کمان آتشفشانی برپایه Zr در برابر Zr/Y (Pearce, 1983) (CBA: بازالت‌های مرز قاره‌ای؛ IAT: توله‌ایت جزیره‌های کمانی؛ WPA: آندزیت‌های درون‌صفحه‌ای؛ WPT: توله‌ایت‌های درون‌صفحه‌ای؛ MORB: بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی)

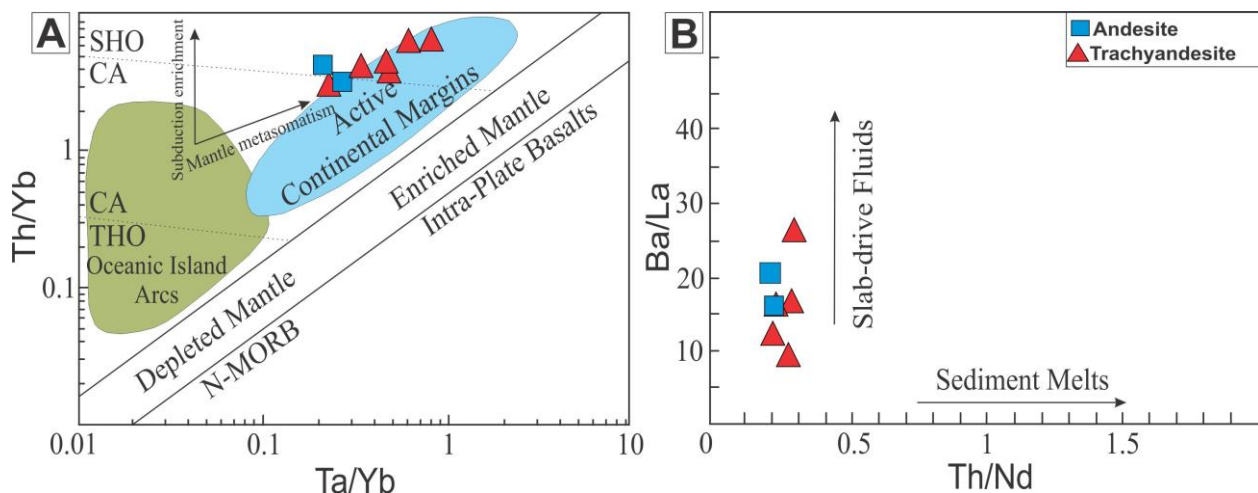
ورقه اقیانوسی فرورو، رسوب‌های روی ورقه اقیانوسی فرورو، پوسته‌ای قاره‌ای یا ترکیبی از

خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی: در پهنه‌های فرورانش، ماگماها چه‌بسا از ذوب گوه گشته‌ای،

شده است (Kuscu and Geneli, 2010).

درباره سنگ‌های این منطقه، برای شناخت نقش سیال‌های برخاسته از پهنه فرورانش و دگرنهادشده وابسته به رسوب‌های فرورو از نمودار دوتایی Th/Nd در برابر Ba/La بهره گرفته شد (Shaw, 1970). نسبت Ba/La برای بازالت‌های پشته میان اقیانوسی نوع مورب غنی‌شده (E-MORB) برابر با ۱۰ تا ۱۵، برای نوع تهی‌شده (N-MORB) نزدیک به ۴ تا ۱۰ و برای مرزهای واگرا بیشتر از ۱۵ است (Wood, 1980). این نسبت در سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی برابر با ۱۰ تا ۲۱ است. این مقدار نشانه غنی‌شدگی گوشته با سیال‌های برآمده از پهنه فرورانش است (شکل ۱۰- B).

روش‌های یادشده، به‌همراه فرایندهای جان‌شینی، هضم و آرایش پدید می‌آیند (Martin et al., 2005). برپایه نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (شکل ۱۰- B)، سنگ‌های آتشفشانی منطقه در مرز فعال قاره‌ای پدید آمده‌اند. بیشتر نمونه‌ها در محدوده شوشونیتی و یک نمونه در محدوده کالک آلکانی پیشنهادی McCulloch و Gamble (۱۹۹۱) جای گرفته‌اند. این ویژگی با خاستگاهی با ترکیب گوشته دگرنهادشده همخوانی دارد (شکل ۱۰- A). نسبت بالای Th/Yb چه‌بسا ویژگی خاستگاهی باشد که در پی غنی‌شدگی هنگام فرورانش و یا غنی‌شدگی وابسته به آرایش پوسته، یا هر دو فرایند، دگرنهاد



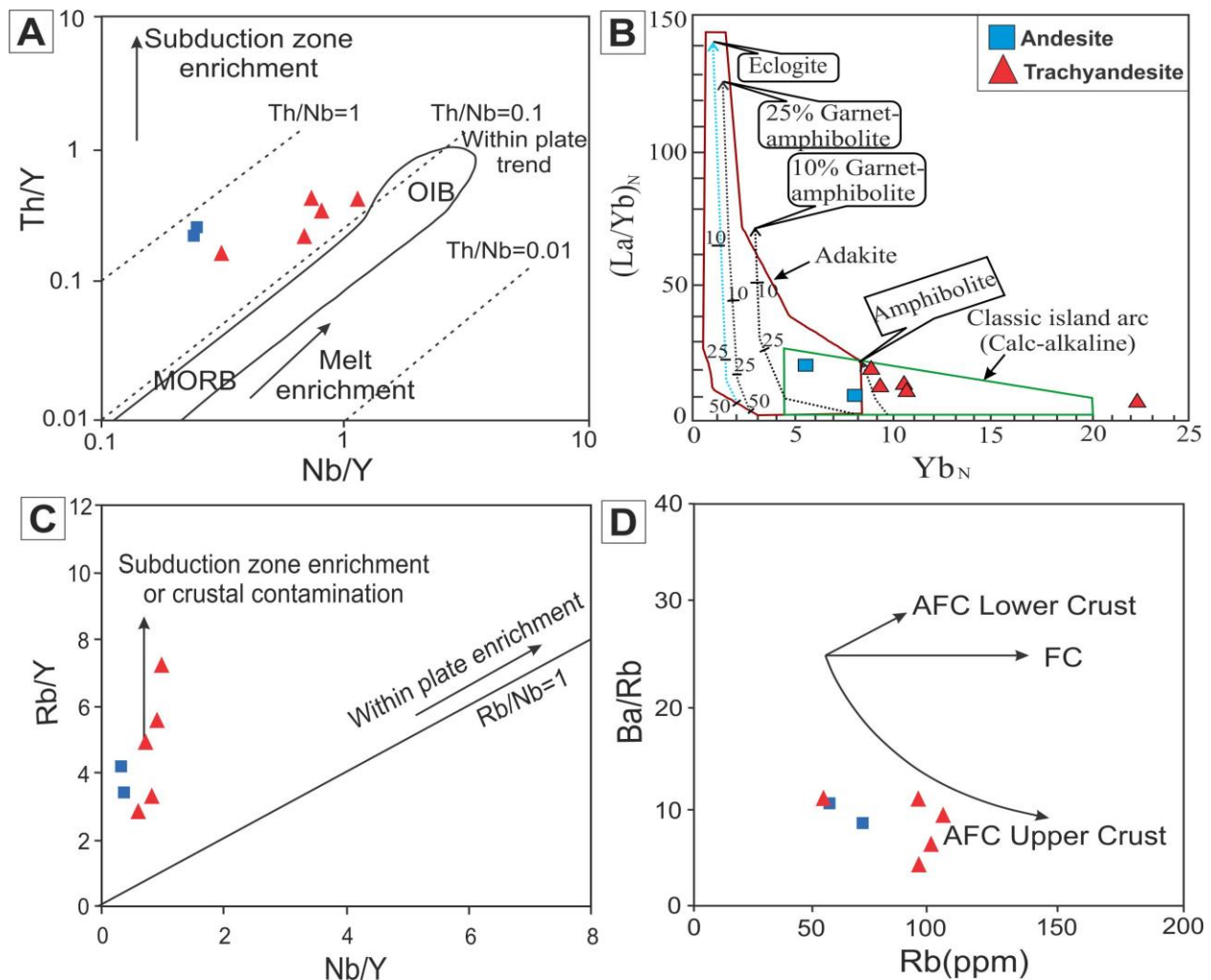
شکل ۱۰- سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در: (A) نمودار Ta/Yb در برابر Th/Yb (Pearce, 1983)؛ (B) نمودار Th/Nd در برابر Ba/La (Shaw, 1970)

کالک‌آلکان در پهنه فرورانش، معمولاً در پی ذوب‌بخشی پریدوتیت گوه گوشته‌ای پدید می‌آیند که دچار سیال‌های آزادشده از صفحه اقیانوسی فرورو باشد؛ اما ماگماهای آداکیتی از ذوب‌بخشی خود صفحه اقیانوسی فرورو پدید می‌آیند (Tatsumi and Takahashi, 2006). برای شناخت روند غنی‌شدگی عنصری سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در ارتباط با پهنه‌های زمین‌ساختی از نمودار Nb/Y در برابر Rb/Y بهره گرفته شد (شکل ۱۱- C).

برپایه نمودار Nb/Y در برابر Th/Y، نمونه‌ها روند غنی‌شدگی در پهنه‌های فرورانشی را نشان می‌دهند (شکل ۱۱- A). هر اندازه نسبت Th/Y در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیشتر باشد نشان‌دهنده اینست که گوشته به مقدار بیشتری تحت‌تأثیر تیغه فرورو بوده است (Kuscu and Geneli, 2010). همچنین، در نمودار Yb_N در برابر $(La/Yb)_N$ ، بیشتر نمونه‌ها سرشت کالک‌آلکان نشان می‌دهند و سرشت آداکیتی ندارند (شکل ۱۱- B). ماگماهای

برای آشکارتر کردن نقش آرایش پوسته‌ای در پیدایش سنگ‌های منطقه، نمودار Rb در برابر Ba/Rb به کار برده شد (Askren *et al.*, 1999). همان گونه که در شکل ۱۱-D دیده می‌شود، سنگ‌های منطقه رباعی روند آرایش با پوسته بالایی را نشان می‌دهند.

همان گونه که در این نمودار دیده می‌شود تغییرات Rb و Nb در سنگ‌های این منطقه پیامد غنی‌شدگی در پهنه فرورانش یا آرایش پوسته‌ای هستند (شکل ۱۱-C). گفتنی است در پهنه‌های درون‌صفحه‌ای، روند غنی‌شدگی متفاوت است و از روند خط Rb/Nb=1 پیروی می‌کند (Edwards *et al.*, 1991).



شکل ۱۱- شناسایی خاستگاه و غنی‌شدگی سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی در: (A) نمودار Nb/Y در برابر Th/Y (Alici *et al.*, 2002)؛ (B) نمودار Yb_N در برابر (La/Yb)_N (Defant and Drummond, 1990)؛ (C) نمودار Nb/Y در برابر Rb/Y (Edwards *et al.*, 1991)؛ (D) نمودار Rb در برابر Ba/Rb در برابر Rb (Askren *et al.*, 1999)

سنگ‌ها مستقیماً از گوشته پدید نمی‌آیند. همچنین، میزان دامنه SiO₂ آنها با پیدایش آنها از خاستگاه تنها پوسته‌ای همخوانی ندارد.

سنگ‌های آندزیت و تراکی‌آندزیت ویژگی‌های ماگماهای فرورانشی را نشان می‌دهند. دامنه فراوانی عنصرهای سازگار این سنگ‌ها نشان می‌دهد این

سنگ‌ها بیشتر شوشونیتی است و یک نمونه نیز کالک‌آلکانل پتاسیم بالاست (که شاید پیامد فرایند دگرسانی در منطقه باشد). غنی‌شدگی از عنصرهای LREE نسبت به HREE و عنصرهای LILE نسبت به HFSE و نیز مقدار عنصرهای Nb، Yb، Th، Rb و Y نشان می‌دهند جایگاه زمین‌ساختی پیدایش مذاب آنها، پهنه فرورانش است. برپایه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی یادشده برای این سنگ‌ها، ماگمای مادر آنها از گوشته دگرنهادشده، همراه با فرایندهای فرورانش وابسته به مرز فعال قاره‌ای پدید آمده است. ماگمای پدیدآمده، در پوسته زیرین و هنگام گذر از پوسته بالایی، دچار فرایندهای جدایش بلورین و آلیش و شاید آمیختگی ماگمایی شده است. مقدار $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ، $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ اولیه و $\epsilon(\text{Nd})_i$ در آندزیت نشان‌دهنده خاستگاه گوشته تهی‌شده در پهنه‌های فرورانش است. ماگماتیسم کالک‌آلکانل تا آلکانل کمر بند ترود-چاه شیرین در آغاز ائوسن تا الیگوسن پایانی رخ داده است. این رویداد به فرورانش شمال تا شمال‌خاوری خردقاره ایران مرکزی به زیر صفحه اوراسیا (صفحه توران) مربوط است.

سپاس‌گزاری

این پروژه با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۴۲۸۴۲/۳، به تاریخ ۱۳۹۶/۳/۱۰، انجام شده است. نگارندگان از مهندس احسان عزیزیان و از شرکت زمین‌پویان فراز آسیا برای همکاری در انجام بازدید صحرایی و در اختیار گذاشتن داده‌های منطقه سپاس‌گزارند.

در پهنه‌های فرورانشی، سنگ‌های آندزیتی و تراکی‌آندزیتی از خاستگاه‌های گوناگونی مانند ذوب پوسته اقیانوسی فرورو، ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای زیرین، تحول ماگماهای مافیک جدایش‌یافته از گوشته دگرنهادشده هنگام رویداد فرایندهای AFC (Assimilation Fractionation contamination) و MASH (Melting- Assimilation- Storage- Homogenization) پدید می‌آیند (Gill, 1981).

دامنه SiO_2 در سنگ‌های آندزیتی و تراکی‌آندزیتی برابر با ۵۲ تا ۶۱ درصدوزنی است. ماگماهای با این میزان دامنه SiO_2 از خاستگاه پوسته قاره‌ای زیرین و پوسته اقیانوسی فرورو پدید نمی‌آیند. همچنین، ماگماهای با خاستگاه پوسته اقیانوسی فرورو ویژگی‌های آداکیتی نشان می‌دهند؛ اما سنگ‌های این منطقه این ویژگی را ندارند. از این‌رو، سنگ‌های آندزیتی و تراکی‌آندزیتی بررسی شده چه‌بسا از تحول ماگماهای گوشته‌ای هنگام رویداد فرایندهای AFC و MASH پدید آمده‌اند. این چنین خاستگاهی برای بیشتر سنگ‌های آندزیتی در پهنه‌های فرورانشی پیشنهاد شده است (Kelemen *et al.*, 1993; Ginibre and Worner, 2007).

برداشت

سنگ‌های آتشفشانی منطقه رباعی شامل دو گروه آندزیت و تراکی‌آندزیت هستند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند سرشت ماگمای این

منابع

- Aguillón-Robles, A., Caimus, T., Bellon, H., Maury, R. C., Cotton, J., Bourgois, J. and Michaud, F. (2001) Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. *Geology* 29(6): 531–534.

- Ahmadi Khalaji, A., Tahmasbi, Z., Rahmani, S. and Basiri, S. (2015) The geochemical and tectonic characteristics of the volcanic rocks in the east of Nahavand area (Sanandaj-Sirjan zone). *Iranian Journal of Petrology* 6(23): 1-26 (in Persian).
- Alavi, M. and Houshmandzadeh, A. (1977) Geological map of Trud region, Scale 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Alici, P., Temel, A. and Gourgaud, A. (2002) Pb-Nd-Sr isotope and trace element geochemistry of Quaternary extension-related alkaline volcanism: A case study of Kula region (western Anatolia, Turkey). *Volcanology and Geothermal Research* 115: 487- 510.
- Amirteymoori, N., Mohammadi, S. S. and Nakhaei, M. (2019) Petrography, Geochemistry and tectonomagmatic setting of Tertiary volcanic rocks in Ebrahim Abad area (southwest of Gazik, Southern Khorasan). *Iranian Journal of Petrology* 10(37): 53-74 (in Persian).
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and Rahimi, G. (2012) Post-Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Asian Earth Sciences* 45(1): 79–94.
- Askren, D. R., Roden, M. F. and Whitney, J. A. (1999) Petrogenesis of Tertiary andesite lava flows interlayered with large-volume felsic ash-flow tuffs of the Western USA. *Petrology* 38: 1021-1046.
- Atherton, M. P. and Petford, N. (1993) Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature* 362(6423): 144–146.
- Badozadeh Kanish, H. (2011) Investigation of ore mineralization Robaie-Fe Damaghan based on Petrography and Geochemistry studies. M.Sc. thesis, University of Damghan, Damghan, Iran (in Persian).
- Boynton, W. V. (1985) Cosmochemistry of the rareearth elements: Meteorite studies, In *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam.
- Cotton, J., Le Dez, A., Bau, M., Caroff, M., Maury, R. C., Dulski, P., Fourcade, S., Bohn, M. and Brousse, R. (1995) Origin of anomalous rare earth element and yttrium enrichments in subaerially exposed basalts, evidence from French Polynesia. *Chemical Geology* 119(1-4): 115-138.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) *The interpretation of igneous rocks*, Allen and Unwin, London, UK.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347(6294): 662–665.
- Defant, M. J., Jackson, T. E., Drummond, M. S., De Boer, J. Z., Bellon, H., Feigenson, M. D., Maury, R. C. and Stewart, R. H. (1992) The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *Geological Society* 149 (4): 569-579.
- Delavari, M., Dolati, A. and Alipoorian, E. (2017) Geochemistry of volcanic rocks from the south of Gazik (east of Birjand): implications for the evolution of Sistan Ocean (eastern Iran). *Iranian Journal of Petrology* 8(31): 21-42 (in Persian).
- Edwards, C., Menzies, M. and Thirwall, M. (1991) Evidence from Muriah, Indonesia, for the interplay of supra- subduction zone and intraplate processes in the genesis of potassic alkaline magmas. *Petrology* 32: 555-592.
- Fard, M. and Rastad, E. (2001) Characteristics of rhyolites in the southern part of Torud-Chahshirin volcano-plutonic complex and their relation to epithermal gold-base metal mineralization at Gandy mining area. 20th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).
- Gill, J. B. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, Berlin.
- Gill, R. (2010) *igneous rocks and processes*. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey.

- Ginibre, C. and Worner, G. (2007) Variable parent magmas and recharge regimes of the Parinacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase. *Lithos* 98: 118-140.
- Harker, A. (1909) *The natural history of igneous rocks*. Methuen, London, UK.
- Hermann, J. (2002) Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chemical Geology* 192: 289-306.
- Hou, Z. Q., Zhang, H., Pan, X. and Yang, Z. (2011) Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Review* 39(1-2): 21-45.
- Houshmandzadeh, A. R., Alavi Naini, M. and Haghypour, A. A. (1978) Evolution of geological phenomenon in Torud area. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Imamjome, A., Rastad, E., Bouzari, F. and Rashidnezhad, N. (2009) An introduction to individual disseminated veinlet and vein mineralization system of Cu (Pb-Zn) in the Chah Messi and Ghole Kaftaran mining district, eastern part of the Troude-Chah Shirin magmatic arc. *Geoscience* 18: 112-125.
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Haidarian Shahri, M.R. (2016) Petrology and geochemistry of volcanic rocks of Cheshmeh Khuri and Shekasteh Sabz areas, Khur, northwest of Birjand. *Iranian Journal of Petrology* 7(27): 125-146 (in Persian).
- Kay, R. W. and Kay, S. M. (1993) Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics* 219(1-3): 177-189.
- Kaygusuz, A. and Aydınçakır, E. (2009) Mineralogy, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of mafic microgranular enclaves in Cretaceous Dagbasi granitoids, Eastern Pontides, NE Turkey: Evidence of magma mixing, mingling and chemical equilibration. *Chemie der Erde-Geochemistry* 69(3): 247-277.
- Kelemen, P. B., Shimizu, N. and Dunn J. T. (1993) Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: Partitioning of K, Nb, La and Ce during melt/rock reaction in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 120(1993): 111-133.
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Foster, G. L., Paterson, B. A., Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Gray, C. M. and Whitehouse, M.J. (2007) Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Science* 315(5811): 980-983.
- Khajeh, A., Pourmoafi, S.M. and Mohammadi, S.S. (2014) Geochemistry and Tectonic setting of Tertiary volcanic rocks in north of Khusf (East of Iran). *Iranian Journal of Petrology* 5(19): 107-122 (in Persian).
- Kuscu, G. G. and Geneli, F. (2010) Review of post- collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey) with special reference to the Tepekoy volcanic complex. *Earth Sciences* 99(3): 593- 621.
- Li, J. X., Qin, K. Zh., Li, G. M., Xiao, B., Chen, L. and Zhao, J. X. (2011) Post-collisional orebearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust. *Lithos* 126(3-4): 265-277.
- Lin, I. J., Chung, S. L., Chu, C. H., Lee, H. Y., Gallet, S., Wu, G., Ji, J. and Zhang, Y. (2012) Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Cretaceous to Paleocene granitoids and volcanic rocks, SE Tibet: petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 53: 131-150.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite- granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79: 1- 24.
- Mason, B. H. and Moore, C. B. (1982) *Principles of geochemistry*. 4th edition, Wiley Publication, New York, US.

- McCulloch, M. T. and Gamble, J. A. (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters* 102(3): 358-374.
- Mehrabi, B. and Ghasemi, M. S. (2012) Intermediate sulfidation epithermal Pb-Zn-Cu (\pm Ag-Au) mineralization at Cheshmeh Hafez deposit, Semnan province, Iran. *Geology Society India* 80: 563-578.
- Mirnejad, H., Lalonde, A. E., Obeid, M. and Hassanzadeh, J. (2013) Geochemistry and petrogenesis of Mashhad granitoids: An insight into the geodynamic history of the Paleo-Tethys in northeast of Iran. *Lithos* 170-171: 105-116.
- Moradi, S. (2010) Investigation of Gold mineralization in the Baghu area, southeast of Damghan. M.Sc. thesis, University of Damghan, Damghan, Iran (in Persian).
- Morata, D. and Aguirre, L. (2003) Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20'-30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *South American Earth Sciences* 16: 459-476.
- Muir, R. J., Weaver, S. D., Bradshaw, J. D., Eby, G. N. and Evans, J. A. (1995) Geochemistry of the Cretaceous separation point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Geology* 152(4): 689-701.
- Nahidifar, L., Fardoot, F. A. and Rezai, M. (2014) Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Dian Copper Deposit (South Damghan). M.Sc. thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (in Persian).
- Niroomand, S., Hassanzadeh, J., Tajeddin, H. A. and Asadi, S. (2018) Hydrothermal evolution and isotope studies of the Baghu intrusion- related gold deposit, Semnan province, north- central Iran. *Ore Geology Reviews* 95: 1028-1048.
- Nogol Sadat, M. and Alavi, A. (1993) Geological map of Moalleman 1: 100000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Pearce J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental basalts and mantle xenoliths* (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J. L.) Shiva Publications: 230-249. Nantwich, Cheshire, UK.
- Pearce, J. A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: *Andesites* (Ed. Thorpe, R. S.) 525-548. John Wiley and Sons, New York.
- Petford, N. and Atherton, A. (1996) Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru. *Petrology* 37(6): 1491-1521.
- Rashidnejad-Omran, N. (1992) Petrology and magmatic evolution of igneous rocks in the Baghou and its relation to gold mineralization. M.Sc. Thesis, University of Tarbiat Moalem, Tarbiat Moalem, Iran (in Persian).
- Raymond, L. A. (2002) *The study of igneous sedimentary and metamorphic rocks*. 2nd edition, McGrawHill, New York.
- Reagan, M. K. and Gill, J. B. (1989) Coexisting calcalkaline and high niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implication for residual titanates in arc magma source. *Geophysical Research* 94(B4): 4619-4633.
- Rohbakhsh, P., Karimpour, M. H. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2018) Geology, mineralization, geochemistry and petrology of intrusive bodies In Kuh-Zar CU-Au deposit, Damghan. *Economic Geology* 10(1): 1-23.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, Wiley, New York.
- Roobahani, L. and Arvin, M. (2010) Petrography, geochemistry and petrogenesis of rhyolitic and andesitic rocks of Nasir- Abad area, SW of Rayen, Kerman. *Iranian Journal of Petrology* 1(2): 1-16 (in Persian).

- Sajona, F. G., Naury, R. C., Pubellier, M., Leterrier, J., Bellon, H. and Cotton, J. (2000) Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos* 54(3): 173-206.
- Shamanian, G. H., Hedenquist, J. W., Hattori, K. H. and Hassanzadeh, J. (2004) The Gandy and Abolhassani Epithermal Prospects in the Alborz Magmatic Arc, Semnan Province, Northern Iran. *Economic Geology* 99: 691-712.
- Shaw, D. M. (1970) Trace element fractionation during anataxis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34(2): 237-243.
- Shaykhi, H. (2013) Geology, alteration and gold genesis in Baghu deposit, Damghan. M.Sc. thesis, University of Damghan, Damghan, Iran (in Persian).
- Shiri, Z. (2013) Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Anaru Zinc (Lead), south of Damghan. M.Sc. Theses, University of Damghan, Damghan, Iran (in Persian).
- Stern, R. J. (2002) Subduction zones. *Reviews of Geophysics* 40(4): 1-38.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins* (Eds. Saunders, A.D. and Norry, M.J.) Special Publications 42: 313-345. Geological Society, London.
- Tajeddin, H. (1999) Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Darestan gold occurrences, South Damghan. M.Sc. thesis, University of Tarbiat Modarres, Tehran, Iran (in Persian).
- Tatsumi, Y. and Takahashi, T. (2006) Operation of subduction factory and production of andesite. *Mineralogical and Petrological Sciences* 101(1): 145-153.
- Teimouri, S.S., Ghasemi, H. and Asiabanha, A. (2018) The role of crustal contamination and differentiation in the formation of the Eocene volcanic rocks in Jirande area (Northwest of Qazvin). *Iranian Journal of Petrology* 9(33): 71-90 (in Persian).
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W. and Irving, A. J. (1993) Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113(3): 333-351.
- Thieblemont, D., Tegye, M., (1994) Geochemical discrimination of differentiated magmatic rocks attesting for the variable origin and tectonic setting of calc-alkaline magmas, *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II* 319: 87-94
- Whitney, D. L. and Evans, B. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95(1): 185-187.
- Wilson, M. (1989) *Igneous Petrogenesis*. Chapman and Hall, London.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A. (1997) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation protextures and setting of VMS mineralisation in the Pilbara ducts using immobile elements. *Chemical Geology* 20 (1977): 325 -344.
- Wood, D. A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planetary Science Letter* 50: 11- 30.
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., Xie, L. W., Yang, Y. H. and Liu, X. M. (2007) Tracing magma mixing in granite genesis, in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 153(2): 177-190.

- Zarasvandi, A., Pourkaseb, H., Saki, A. and Karevani, M. (2013) Investigation of petrology and geochemistry of volcanic rocks in the Kasian area, northeast of Khorramabad. *Iranian Journal of Petrology* 4(14): 39-50 (in Persian).
- Zhou, M. F., Zhao, J. H., Jiang, C. Y., Gao, J. F., Wang, W. and Yang, S. H. (2009) OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: implications for a possible Permian large igneous province. *Lithos* 113(3-4): 583–594.
- Zindler, A. and Hart, S. (1986) Chemical geodynamics. *Review of Earth and Planetary Science* 14: 493-571.
- Zolfaghari, S. (1998) Petrology of Eocene volcanic rocks of Moaleman region, Damghan. M.Sc. Thesis, University of Islamic Azad, Tehran, Iran (in Persian).