



Petrology, Geochemistry and tectonic setting of basalts from Bojan area, Northeast of Neyshabur

Hamid Hafezi Moghadas¹, Seyed Masoud Homam^{2*}

¹ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 08 September 2020
 Revised: 25 October 2021
 Accepted: 06 November 2021

Keywords

Mineralogy
 Geochemistry
 Basalt
 Alkaline
 Bojan
 Binaloud

*Corresponding author

Seyed Masoud Homam
 ✉ homam@um.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Geological events from Precambrian to Quaternary have played a very important role in producing magmatic rocks in Iran. However, magmatic rocks with the ages of Precambrian, early Cambrian and specially Tertiary are much more frequent (Aghanabati, 2004). In contrast, magmatism and plutonism in Iran with Paleozoic age considered to be very rare. Volcanic rocks with the age of Ordovician-Silurian have been reported from some restricted areas of Iran such as Soltan Meydan near Shahroud (Derakhshi and Ghasemi, 2015) and Abyaneh near Kashan (Ayati et al., 2011). Volcanic and volcanoclastic rocks from the North of Neyshabour extend with a linear trend from Garineh to Bojan. In the lack of geochronological data and on the basis of stratigraphical evidence, the age of Ordovician-Silurian has been suggested for these rocks. A detailed study on petrology and geochemistry of north Neyshabour volcanic and volcanoclastic rocks can help us reconstruct the evolution of Iran bed rock during the early Paleozoic Era. The aim of this study includes petrology and major and trace element geochemistry to present critical keys to obtain some knowledge about tectono-magmatic situation of Iran during the early Paleozoic Era, especially in the Binaloud structural zone.

Material and methods

This study was carried out in two parts including field and laboratory works. Sampling and structural studies were carried out during field work.

How to cite this article

Hafezi Moghadas, H. and Homam, S.M., 2022. Petrology, Geochemistry and tectonic setting of basalts from Bojan area, Northeast of Neyshabur. *Journal of Economic Geology*, 14(2): 93–113. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.52120.88571>



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

The petrographic studies were performed on 45 thin and polished thin sections. Geological map for the study area was also prepared. Whole-rock chemical analysis of 7 samples for major, minor, trace and rare earth elements were performed at the ACME Laboratory in Canada, by using the 4AB1 method using ICP-MS and the major oxides of six basalt samples were analyzed by X-ray fluorescence (XRF) at the Zarazma Laboratory.

Results and discussion

The study area is located in the Northeast of Iran 15 Km NE of Neyshabour city and 7 Km NE of Bojan village. The Bojan area consists of Paleozoic sedimentary rocks (Limestone, sandstone, Dolomite) and volcanic-volcanoclastic rocks (basalts, andesit-basalts, andesite, trachyte, agglomerate and tuff). Petrographic studies showed that major minerals in Bojan basalts are plagioclase, pyroxene and olivine and secondary and accessory minerals are apatite, ilmenite, magnetite, chlorite, calcite and epidote. The texture of the Basalts is porphyritic, glomeroporphyritic and trachytic.

Based on geochemical data, the TAS diagram shows that the Basalts fall within the fields of tephrite to trachyte and belong to alkaline series with sodic nature. MgO# is varied from 20.13 to 38.62 which can be interpreted on the basis of crystal differentiation in magma chamber. The low value of compatible elements such as nickel and descending trend of MgO versus SiO₂ can clearly be explained in terms of olivine fractionation. In addition, the nearly constant ratios of incompatible elements such as Nb/Zr, Ce/Zr, La/Zr, and Rb/Zr in rocks with


different SiO₂ content can reveal the importance of primitive magma differentiation. In contrast, these ratios suggest that crustal assimilation plays no important role in changing primitive magma composition. Enrichment of LREE compared with HREE in the studied basalts can be explained by low degrees of partial melting. Chondrite-normalized REE patterns for basalts from the Bojan area show a very similar pattern with those from transitional - mildly alkalic basalts from the Eastern branch of the East African Rift. Spider diagram patterns for Bojan basalts normalized according to [Thompson \(1982\)](#) and [Sun and Mc Donough \(1989\)](#) show a clear enrichment of all trace elements compared with those from chondrite and primitive mantle. On the basis of *tectonic setting* discrimination diagrams the study area basalts fall in within plate alkaline domain. According to petrographical and geochemical data of Bojan volcanic rocks it can be concluded that magmatism in the Bojan area has been formed as a result of a cycle of within plate rifting when the Palaeo-Tethys Ocean started to open during the Ordovician-Silurian time.

Acknowledgments

The Research Foundation of Ferdowsi university of Mashhad, Iran, supported this study (Project 3/50860, 08/09/ 2019). We thank the university authorities for funding. The authors also would like to thank Professor Gültekin Topuz at the Eurasian Institute of Earth Sciences, Istanbul Technical University (Turkey) for his kind support and valuable comments.



سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی بازالت‌های بوژان، شمال شرق نیشابور

حمید حافظی مقدس^۱، سید مسعود همام^{۲*} ^۱ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

منطقه بوژان در شمال شرق ایران و در ۲۲ کیلومتری شمال شرق نیشابور واقع شده است. این محدوده شامل برون‌زدهایی از واحدهای رسوبی پالئوزوئیک (سیلت، کنگلومرا، آهک ماسه‌ای) و سنگ‌های آتشفشانی بازالت، آندزیتی بازالتی، آندزیت، تراکیت و آذرآواری (سیلورین) است. بافت غالب واحدهای آتشفشانی پورفیری، گلوپورفیری و جریانی بوده و شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، پیروکسن و به مقدار کم الیون و کانی فرعی آپاتیت هستند. بازالت‌های بوژان سرشت آلکالن با گرایش سدیک دارند. این سنگ‌ها دارای ویژگی‌های بازالت‌های درون صفحه‌ای (مانند نبود آنومالی منفی عناصر Nb، P و Ti و دارا بودن روند کاهشی در نمودار چند عنصری بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه) هستند. همچنین بر اساس نمودارهای گوناگون برای محیط زمین‌ساختی، در محدوده بازالت‌های درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند. ماگمای اولیه بر اساس نسبت‌های Nb/Zr، Ce/Zr، La/Zr و Rb/Zr شواهدی از آغستگی پوسته‌ای نشان نمی‌دهد. سنگ‌های بوژان در طول چرخه‌ای از کافت درون قاره در هنگام باز شدگی پالئوتیس در اردوئیسین تا سیلورین شکل گرفته‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

واژه‌های کلیدی

کانی‌شناسی

زمین‌شیمی

بازالت

آلکالن

بوژان

بینالود

نویسنده مسئول

سید مسعود همام

homam@um.ac.ir 

استناد به این مقاله

حافظی مقدس، حمید و همام، سید مسعود، ۱۴۰۱. سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی و جایگاه زمین‌ساختی بازالت‌های بوژان، شمال شرق نیشابور. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۲):

۹۳-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22067/ECONG.2021.52120.88571>

مقدمه

سنگ‌های ماگمایی ایران پیوندهای بسیار نزدیکی به رخداد‌های زمین‌ساختی پرکامبرین تا کواترنری دارند. از این‌رو، این‌گونه سنگ‌ها با دیرینگی‌های مختلفی بوده که از میان آنها سنگ‌های ماگمایی پرکامبرین پسین، کامبرین پیشین و به ویژه انواع ترشیری در بیشترین مقدار خود هستند؛ به گونه‌ای که ترشیری ایران به عنوان عصر ماگماتیسیم نام‌گذاری شده است (Aghanabati, 2004). با این وجود در مقایسه با سایر زمان‌های زمین‌شناسی ماگماتیسیم و پلوتونیسیم پالئوزوئیک ایران در کمترین مقدار خود بوده است. سنگ‌های آتشفشانی اردویسین - سیلورین مهم‌ترین تکاپوهای ماگمایی پالئوزوئیک محسوب می‌شوند که تاکنون در مناطق محدودی نظیر سلطان میدان در شاهرود (Derakhshi and Ghasemi, 2015) و ایبانه در کاشان (Ayati et al., 2011) گزارش شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

رشته‌کوه‌های بینالود با روند تقریبی شمال‌غرب-جنوب‌شرق، بین صفحه مستحکم توران و خرده قاره ایران مرکزی احاطه شده است. مرز جنوبی آن گسل میامی یا گسل شاهرود و حد شمال‌غربی آن را گسل سمنان می‌دانند. گسترش واقعی این زون در ایران بین نواحی شمال سبزوار و نیشابور تا مشهد است. این زون بخشی از البرز را شامل است که از نظر زمین‌شناسی، ویژگی‌های خاصی دارد. واحد زمین‌شناسی بینالود را زون تدریجی بین ایران مرکزی و البرز در نظر می‌گیرند؛ زیرا رسوبات و رخساره‌های پالئوزوئیک این زون شبیه البرز هستند. مجموعه آذرین و دگرگونی این زون که به ویژه در جنوب و غرب مشهد بیرون‌زدگی دارند، شامل سه فاز دگرگونی ناحیه‌ای و دو مرحله گرانیت‌زایی است و در آن توده‌های اولترابازیک نیز وجود دارد. در مورد سن مجموعه‌های دگرگونی و آذرین اتفاق نظر وجود ندارد. برخی آن را پرکامبرین و بعضی به ژوراسیک نسبت داده‌اند؛ ولی شواهد زمین‌شناسی و تعیین سن مطلق نشان‌دهنده است که فازهای دگرگونی و گرانیت‌زایی اولیه آن به فاز کوه‌زایی هرسی نین و بعدها در تریاس میانی نیز در مجموع تحت‌تأثیر

دگرگونی‌های سیمبرین پیشین قرار گرفته‌اند.

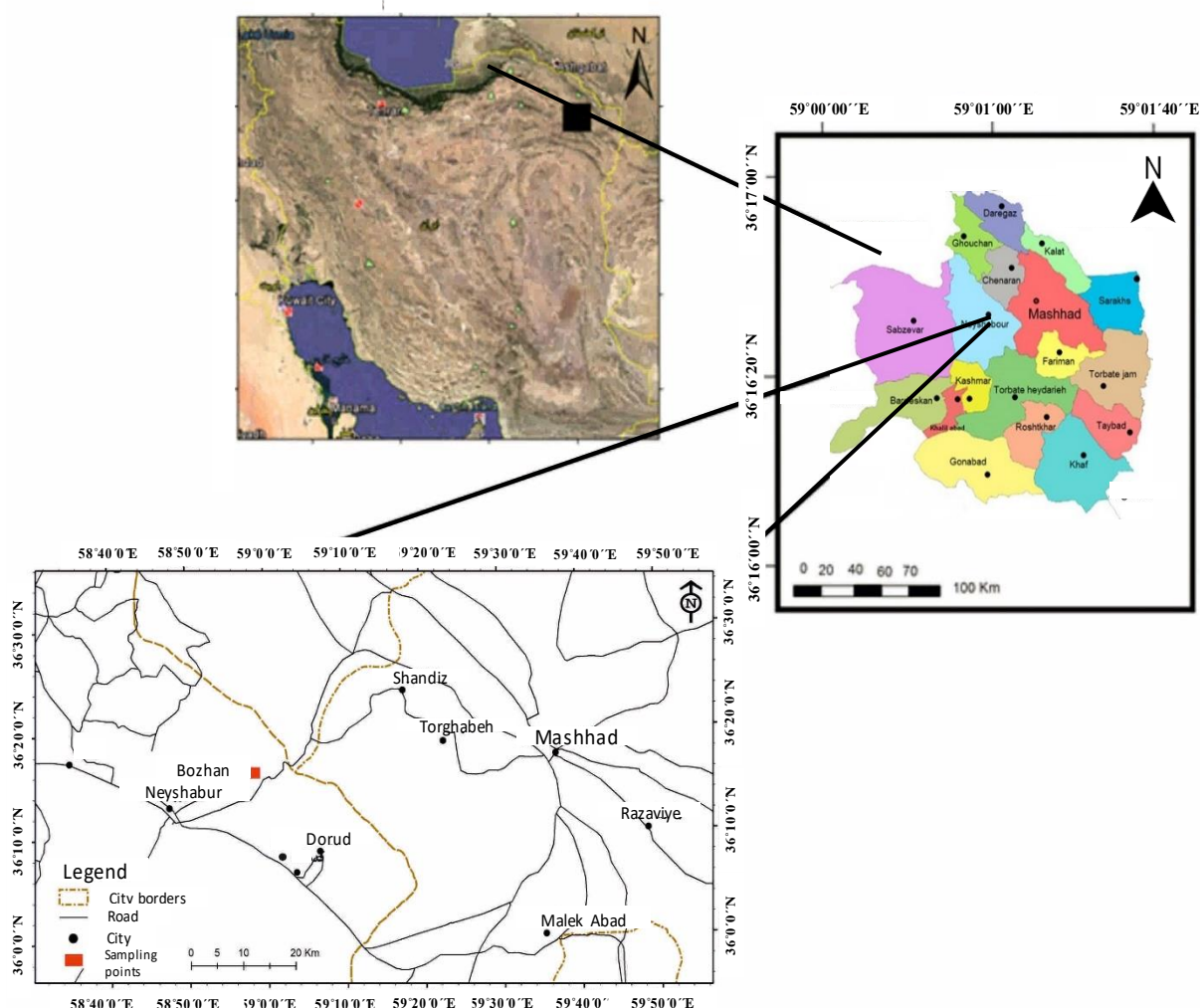
یکی از ویژگی‌های مهم زون بینالود که کمتر به آن پرداخته شده است سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری هستند که با یک روند خطی از دره گرینه تا دره بوژان واقع در شمال نیشابور گسترش یافته‌اند. در نبود اطلاعات سن‌سنجی برای این سنگ‌ها، بر اساس شواهد چینه‌شناسی می‌توان سن این مجموعه آتشفشانی - آذرآواری را اردویسین - سیلورین در نظر گرفت. با وجود اهمیت بسیار زیادی که بررسی ویژگی‌های این سنگ‌ها می‌تواند در ارائه تصویری دقیق از وضعیت پی‌سنگ ایران در اوائل پالئوزوئیک ارائه کند، تاکنون بررسی‌های زیادی بر روی پترولوژی و زمین‌شیمی مجموعه آتشفشانی بینالود انجام نشده است. محدوده بوژان، در شمال‌شرق ایران و در گستره‌ای بین طول‌های جغرافیایی $58^{\circ}59'01''$ تا $59^{\circ}01'19''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}17'02''$ تا $36^{\circ}15'59''$ شمالی و در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال‌شرق نیشابور و ۷ کیلومتری شمال‌شرق روستای بوژان در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱). در این پژوهش، سعی شده است تا با بررسی دقیق پتروژنز سنگ‌های منطقه بوژان به درکی بهتر از شرایط تکتون-ماگمایی ایران در اوائل پالئوزوئیک و به ویژه در زون ساختاری بینالود دست‌یابیم.

زمین‌شناسی

کوه‌های البرز در شمال ایران مشخص‌کننده محدوده برخورد در کمربند کوه‌زایی آلپ-همیالیا محسوب می‌شوند که به مانند پلی بین هندوکش و همیالیا در خاوردرور و خاورمیانه و لسر کاکاسوس و آلپ در مدیترانه و اروپا عمل می‌کنند (Ghazi et al., 2003). تحول زمین‌ساختی کمربند کوه‌زایی البرز به فروانش به سمت شمال پالتوتیس به زیر اوراسیا در نظر گرفته شده که در نهایت به برخورد بین خرد قاره ایران و صفحه اوراسیا منجر شده است (Alavi, 1991). تاکنون پژوهش‌های زیادی بر روی مجموعه افیولیتی مشهد صورت گرفته است (Alberti et al., 1973; Majidi, 1978; Lammerer et al, 1983; Samadi, 2001;

مجموعه ضخیمی از فیلیت، اسلیت، شیست، مرمر، متاکنگلومراهای کربناته و اولیستوسترم‌ها که ویژگی‌های رسوبی نهشته‌های توریدیتی عمیق را به نمایش می‌گذارند. (۳) رخنمون‌های اندکی از سنگ‌های آذرآواری دگرگون‌شده نظیر متاتوف و متالایی توف که به عقیده علوی (Alavi, 1991) احتمالاً حاصل فرایندهای آتشفشانی در شرایط خشکی است و نشانه‌ای از حضور یک کمان ماگمایی در مجاورت مکان تشکیل سنگ‌های دگرگونی است.

Esmaeili et al., 2003; Hatefi, 2003; Baharifar et al., 2005; Homam and Ghaemi, 2008). بر اساس این پژوهش‌ها، بقایای این پوسته اقیانوسی قدیمی را به بهترین وجه می‌توان در مجموعه افیولیتی مشهد مشاهده کرد. علوی (Alavi, 1991)، سه گروه سنگی را در مجموعه افیولیتی مشهد تشخیص داد که شامل ۱) سنگ‌های افیولیتی متشکل از پریدوتیت (با ترکیب ورلیت و لرزولیت)، پیروکسنیت، گابرو و بازالت با ساخت بالشی که اغلب در جنوب- جنوب غرب مشهد و شمال غرب آن در دهکده ویرانی مشاهده می‌شوند. (۲) رسوبات دگرگون‌شده شامل

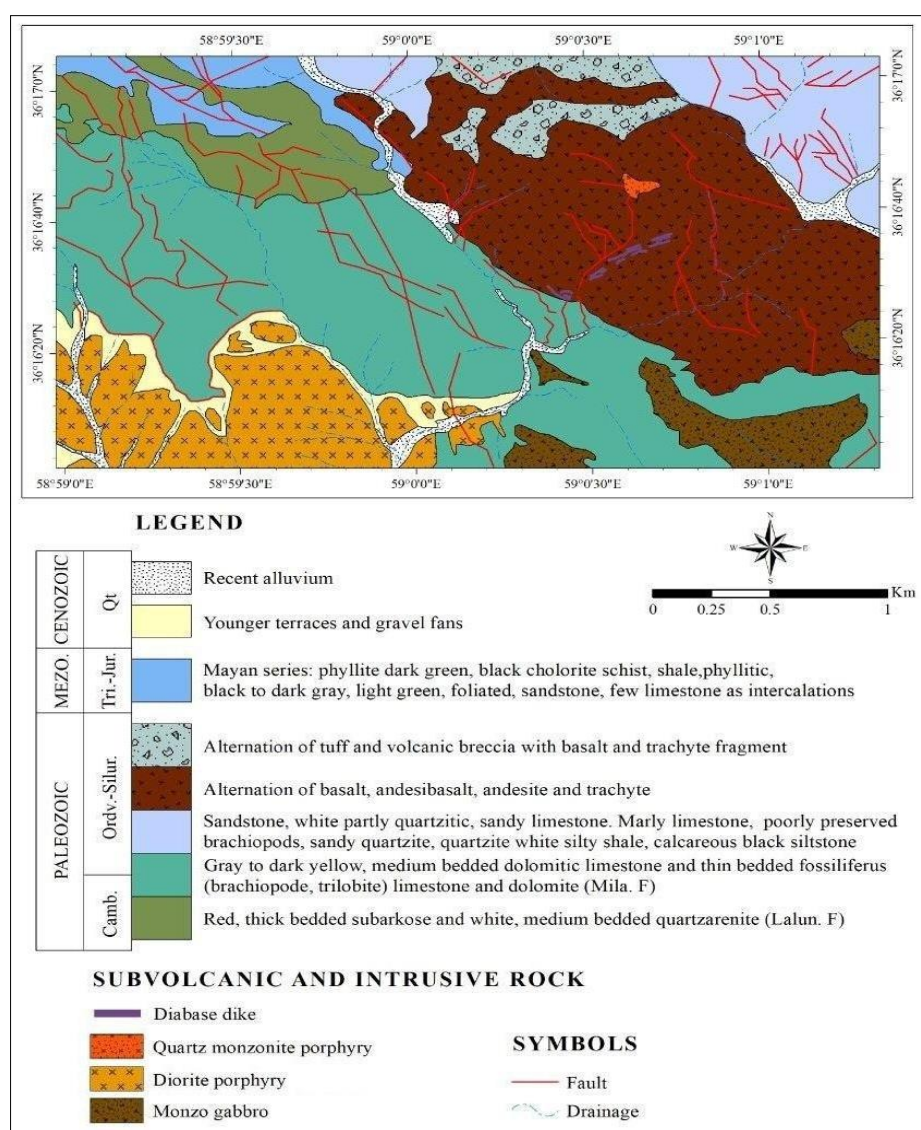


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه بوژان در شمال‌شرق ایران، شمال‌شرق نیشابور و راه‌های دسترسی به آن

Fig. 1. Geographical location and road map of the Bojan area in the northeastern Iran and northeast of Neyshabur

سنگ های گرانیتوئیدی زون دگرگونی مشهد پرداختند و سن ± 4 میلیون سال را برای گرانودیوریت های کوهسنگی و سن ± 4 میلیون سال را برای دیوریت های ده نو معرفی کردند. منطقه بوژان در جنوب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ طرجه (Pour Latifi, 2001) واقع شده است. به طور کلی، واحدهای شناسایی شده در منطقه شامل واحدهای رسوبی، سنگ های آتشفشانی، دایک های دیابازی و توده های نفوذی است (شکل ۲).

قاضی و همکاران (Ghazi et al., 2003) بر اساس سن سنجی به روش آرگون-آرگون بر روی گابروهای زون دگرگونی مشهد، سنی معادل اواخر پنسیلوانین تا اوائل پرمین ($277/4$ تا $281/4$ میلیون سال) را برای آنها تعیین کردند. توده های گرانیتوئیدی مشهد با ترکیبی از دیوریت تا پگماتیت و آپلیت، در سنگ های مجموعه دگرگونی جنوب مشهد نفوذ کرده اند. کریم پور و همکاران (Karimpour et al., 2010) به بررسی زمین شیمی و سن سنجی



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده بوژان

Fig. 2. Geological map of the Bojan area

تا جنوب‌غرب منطقه گسترش یافته‌اند (شکل ۲).

روش مطالعه

در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی از منطقه بوژان، ابتدا برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای آتشفشانی در منطقه انجام شد. بیش از ۶۰ نمونه از منطقه مورد بررسی جمع‌آوری شد و از این میان حدود ۵۰ نمونه مقطع نازک از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. سپس نقشه زمین‌شناسی منطقه با نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد.

برای بررسی‌های سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی، تعداد ۱۳ نمونه از سنگ‌های بازالتی دره بوژان با کمترین میزان دگرسانی برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی انتخاب شد. از این تعداد، ۷ نمونه برای آنالیز اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب و نادر خاکی با استفاده از دستگاه ICP-MS و بر اساس روش 4AB1 به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد. ۶ نمونه نیز برای آنالیز اکسیدهای اصلی به روش XRF به شرکت زرآرما ارسال شد. نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی (wt. %) و عناصر فرعی و کمیاب بر حسب (ppm) برای بازالت‌های منطقه مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

واحدهای رسوبی در منطقه مورد بررسی شامل سیلت، کنگلومرا و آهک ماسه‌ای بوده (شکل ۲) که اغلب کوه‌های بلند بینالود را ساخته‌اند. این واحدها بیشترین گسترش را در منطقه مورد بررسی دارند. بر اساس شواهد چینه‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی به سیلورین و واحدهای کربناتی-کنگلومرایی به دونین تعلق دارند. آغاز فعالیت آتشفشانی در سنگ‌های سیلورین-دونین در محیط دریایی کم‌عمق (دارای فسیل مرجان) بوده است. اواخر پالئوزوئیک پسین، حوضه‌ای کم‌عمق متعلق به حاشیه قاره، منطقه را در بر گرفته و به تدریج عمق این حوضه افزایش یافته است. به دلیل موقعیت ویژه زمین‌شناسی، زون ستبری از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آتشفشانی در زون بینالود وجود دارند (Nabavi, 1976).

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی، واحدهای آتشفشانی این منطقه، به طور کلی شامل بازالت، آندزیت بازالت، آندزیت و تراکیت بوده که اغلب در شمال تا شرق و مرکز منطقه گسترش یافته‌اند (شکل ۲). این واحدها اغلب دارای بافت‌های پورفیری، گلومروپورفیری تا جریان‌ی هستند. دایک‌های دیابازی و واحدهای نفوذی کوارتز مونزونیت پورفیری، دیوریت پورفیری و مونزوگابرو کمترین گسترش را در منطقه داشته و اغلب در جنوب

جدول ۱. تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی سنگ‌های آتشفشانی در منطقه بوژان

Table 1. Whole-rock major and trace element compositions of the volcanic rocks in the Bojan area

Sample	Ha15a	Ha5	BZ11	Bz6	Bz9	Ha4	M101	M103	M104	M108A	M109A	M109c	M110A
X	59°03'11"	59°01'01"	59°02'17"	59°03'18"	59°02'28"	59°07'13"	59°06'05"	59°08'26"	59°09'56"	59°10'53"	59°06'75"	59°01'65"	59°10'32"
Y	36°16'07"	36°16'56"	36°17'23"	36°16'37"	36°16'22"	36°17'43"	36°17'57"	36°16'06"	36°16'08"	36°17'03"	36°16'25"	36°17'37"	36°17'41"
	Wt. %												
SiO ₂	48.43	42.48	42.85	43.26	52.98	54.93	49.00	48.87	49.29	47.81	51.69	52.62	48.49
TiO ₂	2.51	2.91	3.18	3.08	1.55	2.89	1.52	1.54	1.56	2.60	2.65	2.86	3.21
Al ₂ O ₃	13.76	10.78	11.49	12.13	13.44	13.2	17.69	16.54	17.15	17.15	15.03	13.89	14.52
FeO _t	15.87	20.71	20.41	23.31	16.23	12.84	11.62	12.32	11.56	10.21	11.87	12.43	13.58
MnO	0.22	0.33	0.31	0.14	0.17	0.15	0.11	0.14	0.15	0.13	0.13	0.14	0.18
MgO	6.52	7.56	7.08	6.45	4.24	3.06	4.95	4.60	5.17	3.20	6.35	3.01	6.62
CaO	2.48	5.47	5.89	2.35	1.1	2.68	2.36	3.11	2.66	7.02	3.14	6.45	4.30
Na ₂ O	5.85	4.03	3.32	5.32	5.92	7.48	5.13	5.76	6.06	6.58	5.04	6.72	5.23
K ₂ O	0.95	0	1.21	0.11	0.94	0.63	2.96	1.35	0.36	0.39	0.08	0.10	0.26
P ₂ O ₅	0.39	0.4	0.37	0.33	0.23	0.35	1.00	1.01	1.03	0.26	0.39	0.42	0.45
LOI	2.8	5.15	3.66	3.35	2.89	1.64	3.3	4.4	4.7	4.4	3.3	1.1	2.8
Total	99.78	99.82	99.77	99.83	99.69	99.85	99.64	99.74	99.69	99.75	99.69	99.74	99.64

ادامه جدول ۱. تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی سنگ‌های آتشفشانی در منطقه بوژان

Table 1 (Continued). Whole-rock major and trace element compositions of the volcanic rocks in the Bojan area

Sample	M101	M103	M104	M108A	M109A	M109c	M110A
X	59°06'05"	59°08'26"	59°09'56"	59°10'53"	59°06'75"	59°01'65"	59°10'32"
Y	36°17'57"	36°16'06"	36°16'08"	36°17'03"	36°16'25"	36°17'37"	36°17'41"
ppm							
Ba	1071	459	301	96	61	69	118
Ni	47	57	42	155	105	233	95
Co	18.2	19.3	18.5	28.3	46.9	24.5	40.4
Cr	0.014	0.016	0.011	0.038	0.022	0.043	0.020
Hf	8.4	7.4	8.1	4.1	5.2	5.7	5.8
Nb	75.2	73.9	77.4	18.9	28.4	30.5	34.4
Rb	138.2	37.7	10.6	8.7	1.3	1.0	9.3
Zn	59	28	97	26	72	17	145
Sr	499.6	368.5	283.5	376.9	352.8	392.6	376.1
Ta	4.9	4.5	4.6	1.1	1.7	1.8	2.0
Th	9.7	8.4	9.2	1.8	3.2	3.4	3.5
Cs	9.3	3.4	1.7	<0.1	0.1	<0.1	2.2
Ce	127.3	144.1	130.4	35.7	51.4	73.8	61.6
Zr	398.3	351.8	377.8	147.5	205.9	224.7	233.6
Y	24.1	26.1	27.4	19.8	23.2	26.9	27.0
La	66.6	79.7	66.3	17.1	22.8	35.2	30.3
Pr	13.89	15.76	14.26	4.85	6.53	8.83	7.57
Nd	50.4	56.1	54.7	21.7	26.3	34.8	31.3
Sm	8.65	9.59	9.67	5.11	5.64	7.20	6.70
Eu	2.42	2.94	2.67	2.19	1.57	2.43	2.24
Gd	7.43	8.19	8.52	5.56	5.89	7.05	7.14
Tb	1.02	1.09	1.12	0.78	0.89	1.00	1.03
Dy	5.54	5.44	5.81	4.72	5.01	5.68	5.94
Ho	0.96	1.01	0.98	0.79	0.93	1.10	0.96
Er	2.47	2.75	2.69	2.05	2.45	2.69	2.61
Tm	0.34	0.31	0.33	0.27	0.31	0.34	0.34
Yb	1.96	2.00	2.05	1.78	2.03	2.07	2.33
Lu	0.28	0.27	0.28	0.25	0.27	0.32	0.32
Ratios							
Nb/Zr	0.31	0.4	0.34	0.24	0.24	0.32	0.26
Ce/Zr	0.18	0.21	0.2	0.12	0.13	0.13	0.14

بازالت: کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، الیون و پیروکسن است که دارای بافت پورفیری، گلومروپورفیری، آمیگدال با درصد درشت‌بلور بین ۳۵ تا ۴۰ درصد است. درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلاز از نوع بایتونیت (۱۸ تا ۲۰ درصد)، اوژیت (۸ تا ۱۰ درصد) و الیون (۸ تا ۱۰ درصد) است. این واحد دارای کانی

پetroگرافی واحدهای آتشفشانی

سنگ‌های آتشفشانی در منطقه بوژان، بر اساس بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی (فراوانی و نوع درشت‌بلور، زمینه، نوع و میزان کانی‌های مافیک) به چهار نوع بازالت، آندزیت بازالتی، آندزیت و تراکیت قابل تفکیک هستند.

دگرسانی فراوان‌ترین کانی کلریت بوده و کربنات به صورت جزئی داخل حفره‌ها را پر کرده است. کلریت زمینه سنگ و داخل حفره‌ها را پر کرده است. همچنین تعداد بسیار کمی رگچه‌های کربنات، کلریت و اپیدوت در این واحد وجود دارد.

بحث

زمین‌شیمی

پس از بررسی‌های سنگ‌شناختی، برای بررسی رفتار زمین‌شیمیایی سنگ‌های بازالتی از نمودارهای مناسب برای بررسی سرشت زمین‌شیمیایی و تعیین موقعیت زمین‌ساختی آنها استفاده شد. همچنین سعی شد تا با توجه به رفتار اکسیدهای اصلی، عناصر کمیاب و نادر خاکی در این بازالت‌ها به اهمیت فرایندهای اولیه و نقش فرایندهای بعد از تولید ماگما نظیر تبلوربخشی و آلودگی با پوسته قاره‌ای پرداخته شود.

در نمودار SiO_2 در برابر Zr/TiO_2 از فلوید و وینچستر (Floyd and Winchester, 1977)، سنگ‌های آتشفشانی در محدوده بازالت تا آندزیت بازالت قرار می‌گیرند (شکل ۴). در نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007)، نمونه‌های مورد بررسی اغلب در محدوده کالک‌آلکان و به میزان کمتر در محدوده شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۵)؛ در حالی که در نمودار Na_2O در برابر SiO_2 (Middlemost, 1975) کلیه نمونه‌ها به خوبی در محدوده آلکان واقع می‌شوند (شکل ۶). دلیل این امر را می‌توان در بررسی نتایج نمودار Na_2O در برابر K_2O (Middlemost, 1975) مشاهده کرد. زیرا بر اساس این نمودار کلیه سنگ‌های مورد بررسی کم پتاسیم و متعلق به سری سدیم هستند (شکل ۷). میزان اندک عناصر سازگار در سنگ‌های مورد بررسی نظیر نیکل می‌تواند بیانگر درجه‌هایی از تبلور تفریقی الیون در مسیر حرکت ماگمای تشکیل‌دهنده آنها به سمت سطح زمین باشد. روند نزولی تغییرات MgO در مقابل SiO_2 (شکل ۸) نیز بیانگر این امر است. میزان Mg\# برای بازالت‌های مناطق مورد بررسی از ۲۰/۱۳ تا ۳۸/۶۲ متغیر است که نشان‌دهنده مقادیر متفاوتی از تفریق بلوری در مخزن ماگمایی است.

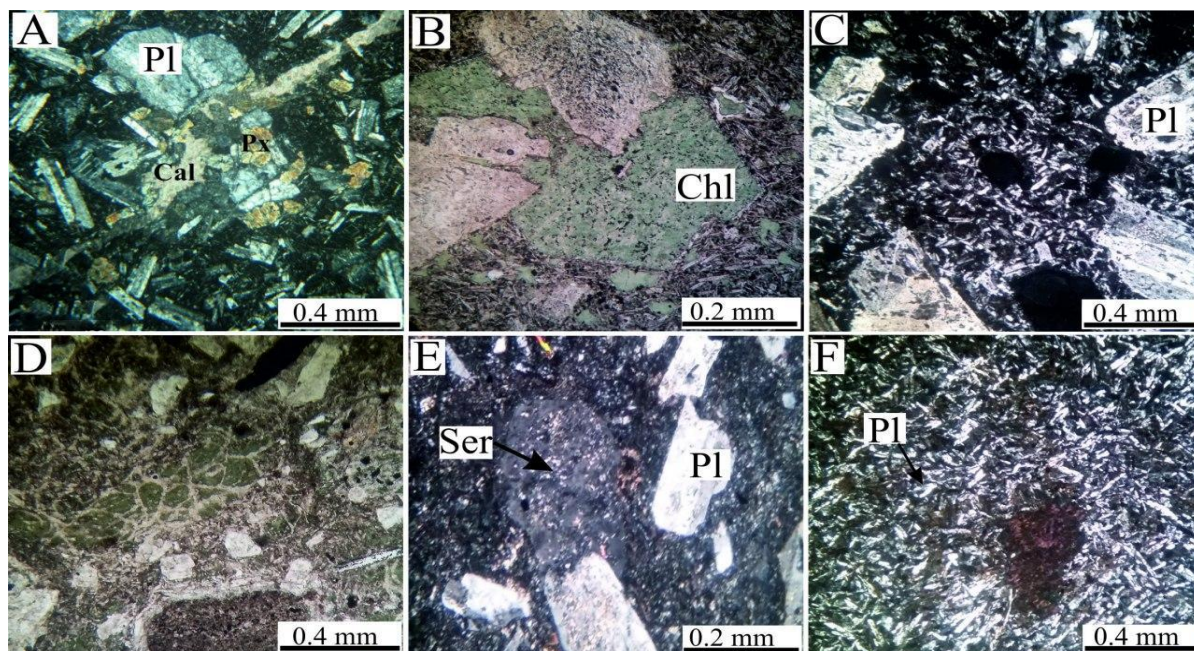
فرعی آپاتیت و کانی فلزی (حدود ۱ درصد) است (شکل ۳-A). این واحد تحت تأثیر دگرسانی پروپلیتیک شدید قرار گرفته و کانی ثانویه کلریت، کلسیت و مقدار جزئی اپیدوت شکل گرفته‌اند. پلاژیوکلازها به کلریت (۱۰ تا ۱۲ درصد) تبدیل شده‌اند.

آندزیت بازالتی: بافت غالب در این واحد پورفیری است. همچنین بافت میکروولیتی در بعضی قسمت‌ها دیده می‌شود. حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد درشت‌بلور دارد که شامل پلاژیوکلازها (۲۰ تا ۲۵ درصد) از نوع الیگوکلاز، پیروکسن از نوع اوژیت (۵ تا ۷ درصد) دارای ماکل کارلسباد و هورنبلند (۱ تا ۳ درصد) نیز دیده می‌شوند. زمینه سنگ شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند و کانی‌های کدر می‌شوند. اوژیت کاملاً کلریتی شده و به مقدار جزئی نیز به اپیدوت دگرسان شده است (شکل ۳-B).

آندزیت: بافت غالب در این واحد پورفیری با زمینه دانه ریز تا دانه متوسط بوده و میزان درشت‌بلورها بین ۲۰ تا ۳۰ درصد است. پلاژیوکلاز (آندزین) با فراوانی ۱۰ تا ۱۵ درصد، فراوان‌ترین کانی اصلی تشکیل‌دهنده این واحد است. پلاژیوکلازها به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند. از دیگر درشت‌بلورها می‌توان به کانی‌های مافیک شامل الیون (۲ تا ۳ درصد) و پیروکسن (۵ تا ۷ درصد) از نوع اوژیت است (شکل ۳-C). فراوانی کانی‌های کدر در این واحد حدود ۳ تا ۵ درصد است که گاه توسط اکسیدهای آهن جایگزین شده‌اند.

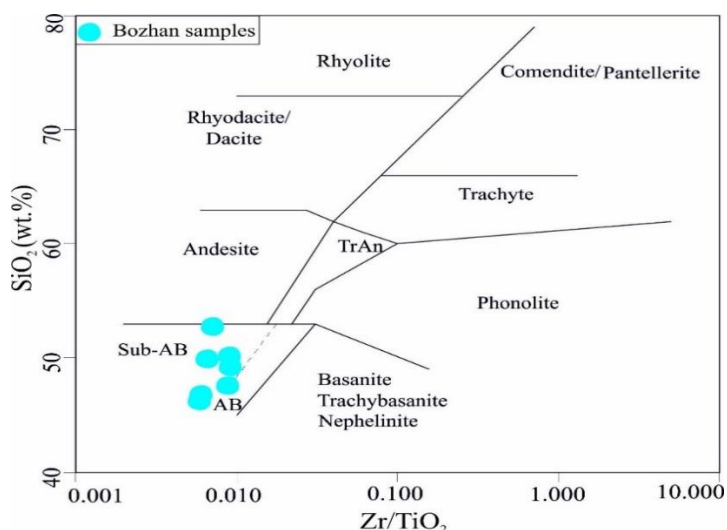
این واحد تحت تأثیر دگرسانی کلریتی شدید قرار گرفته است که کلریت داخل حفره‌ها و به صورت فراگیر زمینه را پر کرده است و الیون و پیروکسن به طور کامل کلریتی شده‌اند (شکل ۳-D). بلورهای پلاژیوکلاز دارای سطوح بلوری سالم هستند و کمتر از ۵ درصد سریستی شده‌اند (شکل ۳-E).

ترواکیت: بافت این واحد نیز پورفیری تا جریان‌ی است. درشت‌بلورهای (۲۵ تا ۳۰ درصد) آن شامل پلاژیوکلاز (۵ تا ۸ درصد)، سانیدین (با ماکل کارلسباد) (۱۵ تا ۱۷ درصد) و پیروکسن (۲ تا ۵ درصد) هستند (شکل ۳-F). این واحد تحت تأثیر دگرسانی پروپلیتیک متوسط تا شدید قرار گرفته است. در این



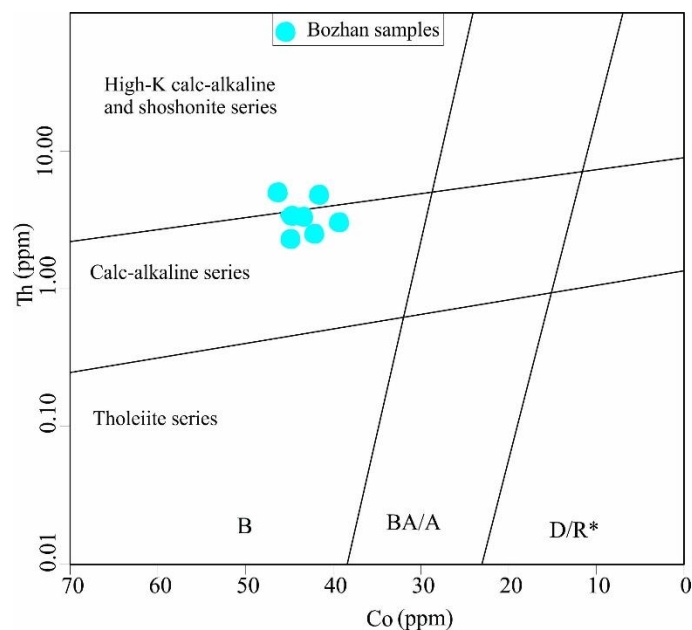
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از واحدهای آذرین و دگرسانی آنها در منطقه بوژان (در نور XPL)، A: بازالت، B: دگرسانی پروپلیتیک در واحد آندزیت بازالتی، C: آندزیت، D: کلریت در زمینه واحد آندزیت، E: تبدیل فلدسپارها به سریسیت در واحد آندزیت و F: واحد تراکیت. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Pl: پلاژیوکلاز، Chl: کلریت، Cal: کلسیت، Px: پیروکسن، Ser: سریسیت).

Fig. 3. Photomicrographs of volcanic rocks and hydrothermal alteration assemblages in the Bojan area. A: Basalt (XPL), B: Propylitic alteration in basaltic andesite (XPL), C: andesite (XPL), D: Chlorite mineral in matrix of andesite unit, E: feldspar altered to sericite in andesite unit, and F: Trachyte (XPL). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: Plagioclase, Chl: Chlorite, Cal: Calcite, Px: Pyroxene, Ser: sericite).



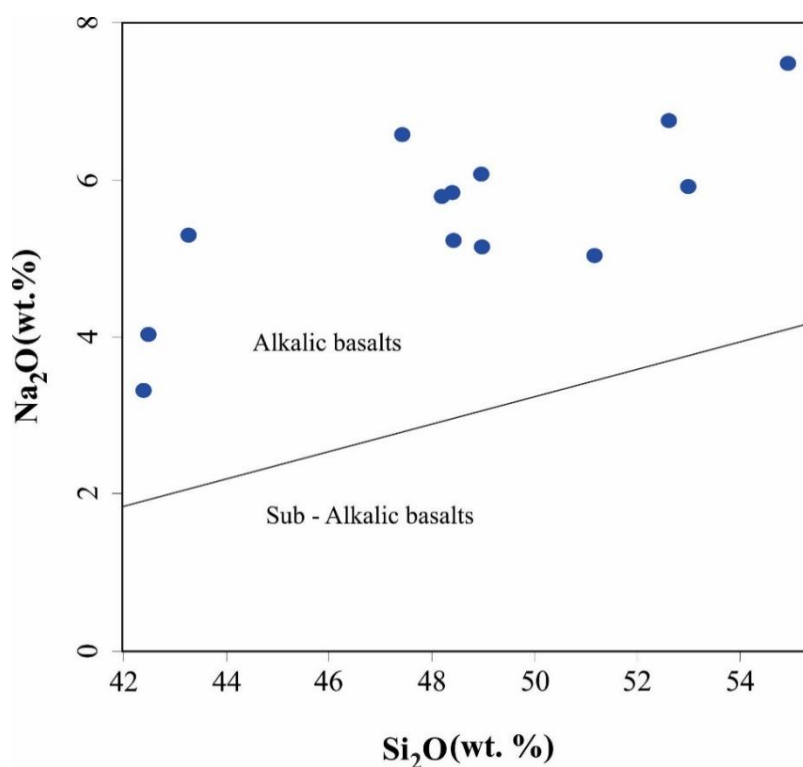
شکل ۴. نمودار نام‌گذاری (Winchester and Floyd, 1977) برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان

Fig. 4. Classification diagram (Winchester and Floyd, 1977) for Bozhan volcanic rocks



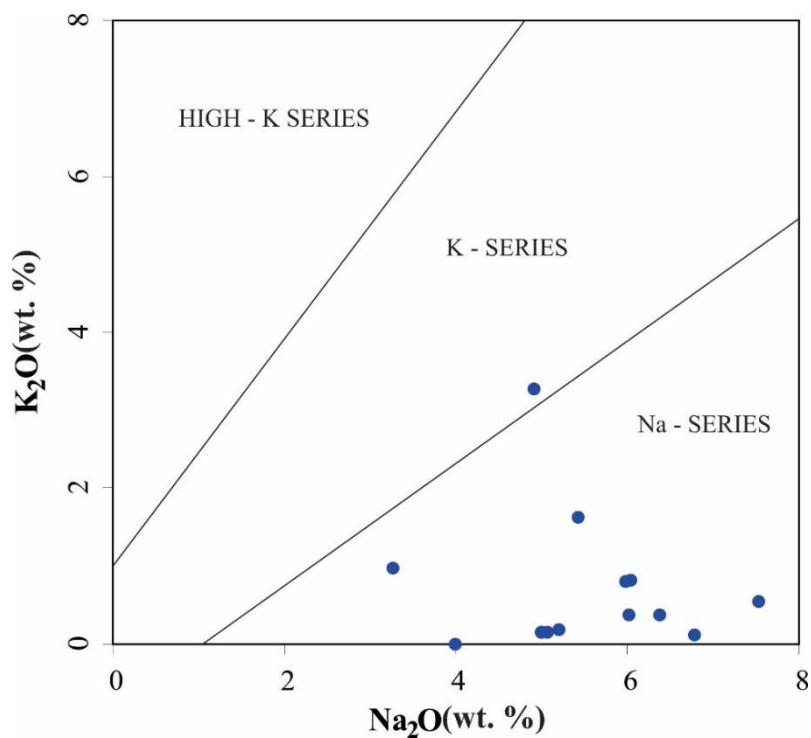
شکل ۵. نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007) برای نمونه‌های منطقه بوژان

Fig. 5. Th vs. Co diagram (Hastie et al., 2007) for the Bojan area



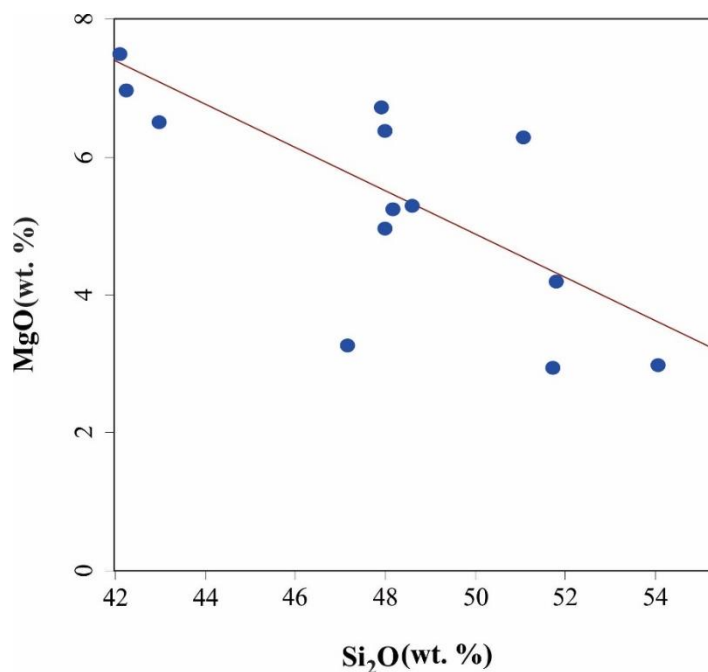
شکل ۶. نمودار Na₂O در برابر SiO₂ (Middlemost, 1975) برای نمونه‌های منطقه بوژان

Fig. 6. Na₂O vs. Si₂O diagram (Middlemost, 1975) for the Bojan area



شکل ۷. نمودار K_2O در برابر Na_2O (Middlemost, 1975) برای نمونه‌های منطقه بوژان

Fig. 7. Na_2O vs. K_2O diagram (Middlemost, 1975) for the Bojan area

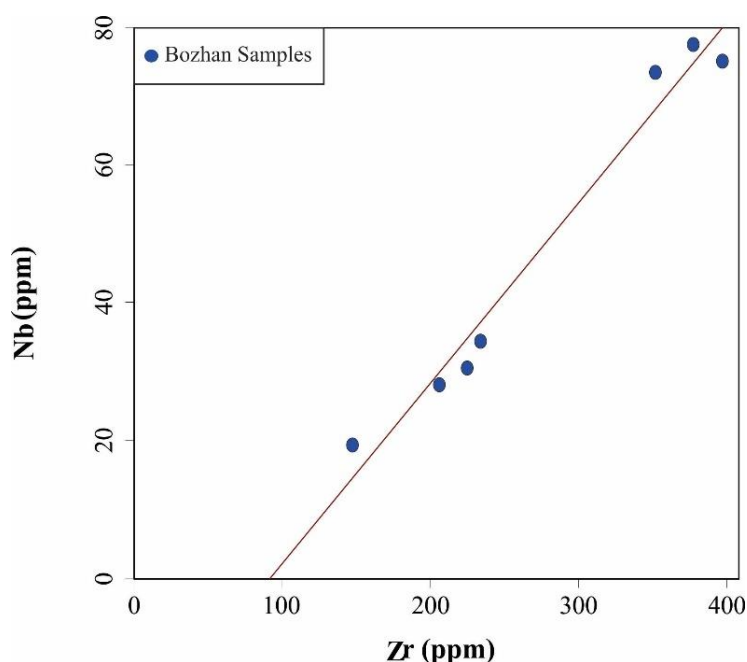


شکل ۸. نمودار MgO در برابر SiO_2 (Zhu et al., 2007) برای نمونه‌های منطقه بوژان

Fig. 8. MgO vs. Si_2O diagram (Zhu et al., 2007) for the Bojan area

می‌رسد، فرایند آغشتگی پوسته‌ای نقشی مهم در تحول و تغییرات ماگمای اولیه سنگ‌های منطقه مورد بررسی ایفا نکرده است. در نمودار Zr در مقابل Nb (شکل ۹) بر حسب ppm طیف سنگ‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد. در این نمودار به طور مشخص نسبت ثابتی حدود ۶/۵ از Zr/Nb دیده می‌شود که می‌تواند بیانگر این امر باشد که سنگ‌های مورد بررسی حاصل انجام تبلور تفریقی از یک ماگمای مادر اولیه هستند.

فرایند تبلور تفریقی می‌تواند به افزایش غلظت عناصر ناسازگار در ماگماهای بازالتی نسبت به ماگمای اولیه آنها منجر شود. از سوی دیگر، نسبت تقریباً ثابت عناصر کمیاب ناسازگار نظیر Nb/Zr، La/Zr، Ce/Zr و Rb/Zr در سنگ‌های با مقادیر متفاوت SiO₂ می‌تواند نشانه‌ای بر اهمیت فرایند تبلور تفریقی در تحول ماگمای اولیه باشد (Vogel et al., 2008). در حالی که در صورت تأثیر قابل ملاحظه فرایند آغشتگی پوسته‌ای، این نسبت‌ها به شدت در نمونه‌های تفریق یافته‌تر دچار تغییر می‌شوند. به این ترتیب، به نظر



شکل ۹. نمودار Zr در برابر Nb (Zhu et al., 2007) برای نمونه‌های منطقه بوژان

Fig. 9. Plot of Zr vs. Nb for the Bozhan area (Zhu et al., 2007)

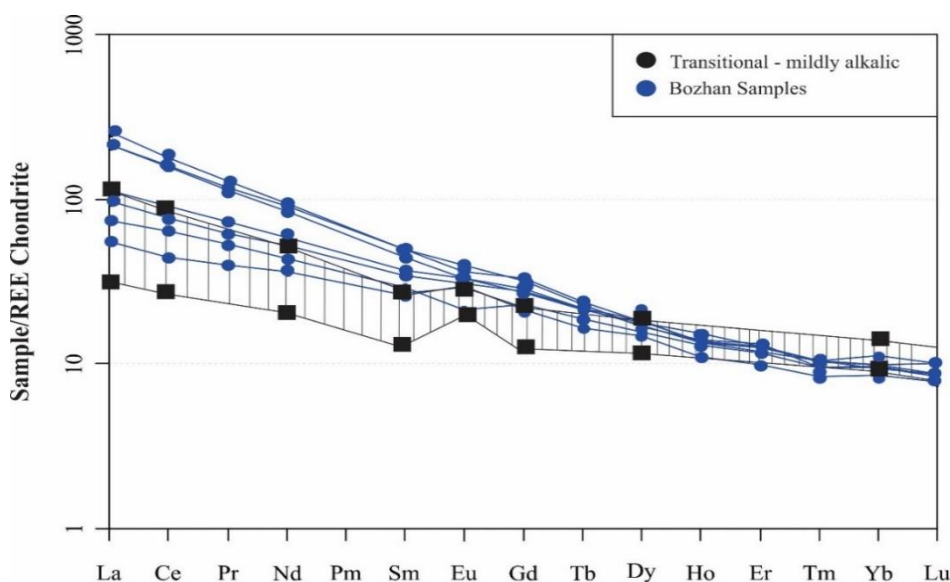
غنی‌شدگی بیشتر LREEs نسبت به HREEs می‌تواند در اثر دو عامل باشد، (۱) درجه‌های کم ذوب‌بخشی (۲/۵ درصد) منبع گوشته‌ای (۲) آلایش ماگما به وسیله مواد پوسته‌ای (Srivastava and Singh, 2004). چنان‌که قبلاً اشاره شد، آغشتگی پوسته‌ای نقشی مهم در تحول و تغییرات ماگمای اولیه سنگ‌های منطقه مورد بررسی ایفا نکرده است. بنابراین می‌توان درجه‌های کم

بررسی نمودارهای عنکبوتی و REE

عناصر نادر خاکی انحلال‌پذیری کمی دارند و در طول فرایندهای هوازدگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی هیدروترمال نسبتاً غیرمتحرک هستند. در نمودار عناصر نادر خاکی که نسبت به کندریت بهنجار شده‌اند (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی واضحی از LREE نسبت به HREE دیده می‌شود (شکل ۱۰).

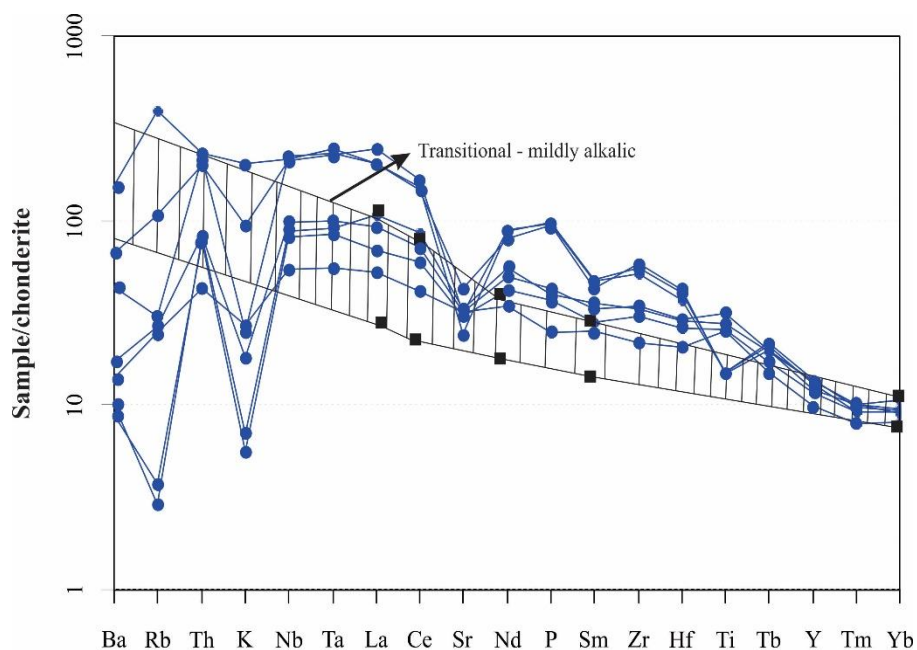
آلکان درون صفحه‌ای قاره‌ای است (Dai et al., 2018a; Dai et al., 2018b; Wang et al., 2011) این شواهد در نمودار چندعنصری بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه قابل شناسایی است. در نمودار چندعنصری بهنجار شده نسبت مورب‌ها (Pearce, 1983) که به ترتیب کاهش ناسازگاری مرتب شده‌اند، سنگ‌های منطقه مورد بررسی از نظر عناصر ناسازگار نسبت به مورب‌ها غنی‌شدگی نشان می‌دهند و از نظر عناصر Y و Yb نسبت به مورب‌ها فقیر شده هستند که می‌تواند بیانگر تشکیل آنها از یک منشأ غنی شده و احتمالاً با درجه‌های ذوب‌بخشی کمتری نسبت به مورب‌ها باشد. همچنین برای مقایسه، الگوی عناصر کمیاب در بازالت‌های درون صفحه‌ای و جزایر اقیانوسی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، شباهت بسیار زیادی بین الگوی عناصر یاد شده در بازالت‌های منطقه مورد بررسی و بازالت‌های درون قاره‌ای وجود دارد. غنی‌شدگی در Nb، Ta و P و تهی‌شدگی نسبت به عناصر Rb و K ویژگی بیشتر بازالت‌های قلیایی است (Dai et al., 2018a; Dai et al., 2018b).

ذوب‌بخشی منبع گوشته‌ای را عامل غنی‌شدگی بیشتر LREEs نسبت به HREEs دانست. همچنین برای مقایسه در شکل محدوده تغییرات عناصر کمیاب خاکی برای بازالت‌های نسبتاً آلکان تا انتقالی ریف شرقی نایواشا نمایش داده شده است (شکل ۱۰). چنان‌که مشاهده می‌شود، روند عناصر نادر خاکی در سنگ‌های منطقه مورد بررسی با بازالت‌های نسبتاً آلکان تا انتقالی ریف شرقی نایواشا همخوانی بسیار زیادی دارند. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲، نمودارهای چندعنصری بهنجار شده نسبت به کندریت (Thompson, 1982) و گوشته اولیه (Sun and Mc Donough, 1989) نشان داده شده است. چنان‌که مشهود است، بر اساس این نمودارها غنی‌شدگی واضحی از کلیه عناصر کمیاب نسبت به کندریت و گوشته اولیه دیده می‌شود. دارا بودن روند کاهش‌ی در نمودار چند عنصری بهنجار شده در برابر ترکیب گوشته اولیه، غنی‌شدگی عنصرهای Ta، Nb و P و آنومالی منفی عناصر Rb و K آنومالی منفی عنصرهای Nb، P و Ti نشان‌دهنده ویژگی‌های آشکار ماگماتیسم



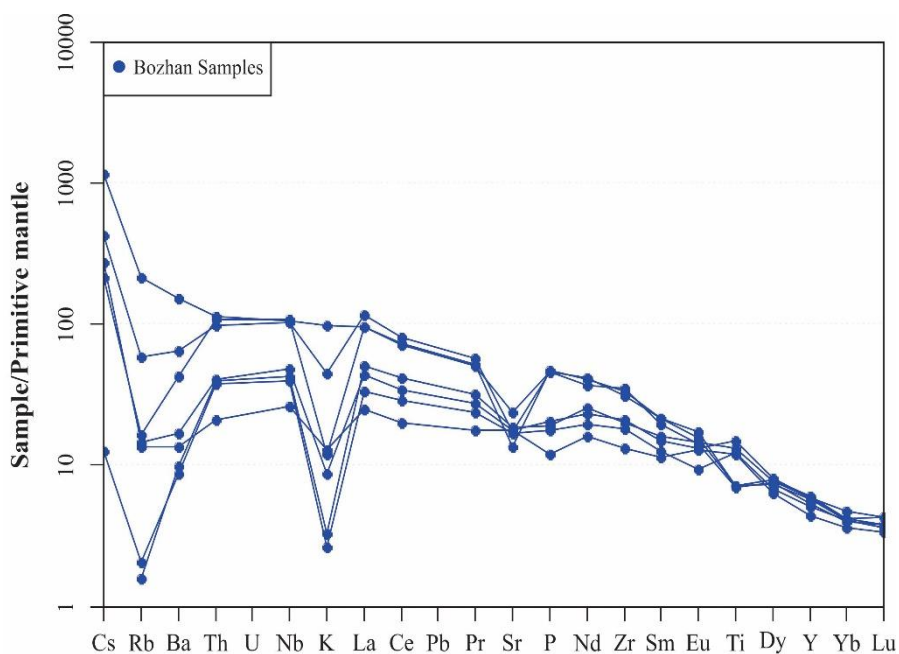
شکل ۱۰. نمودار عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان برگرفته از بویتون (Boynton, 1984). اطلاعات ریف شرقی نایواشا برگرفته از ویلسون (Wilson, 1989)

Fig. 10. Chondrite-normalized REE diagram for the Bojan volcanic rocks (Boynton, 1984). Data for Eastern rift of Nayvasha from Wilson (1989)



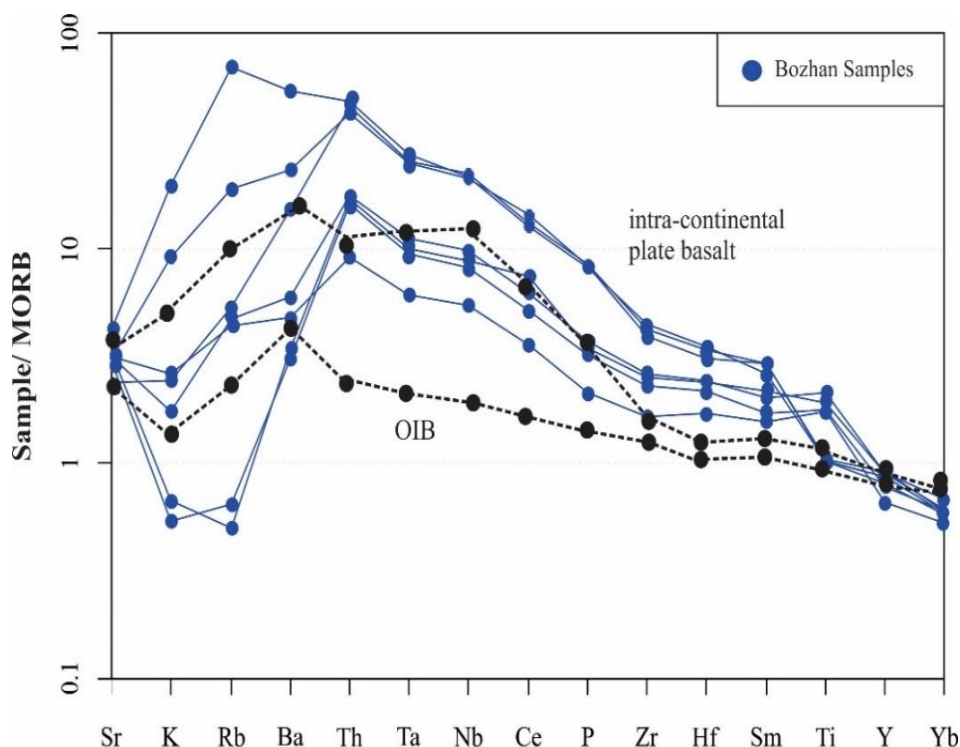
شکل ۱۱. نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب کندریت برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان برگرفته از تامپسون (Thompson, 1982). اطلاعات ریفت شرقی نایواشا برگرفته از ویلسون (Wilson, 1989)

Fig. 11. Chondrite normalized spider diagram for the Bojan volcanic rocks (Thompson, 1982). Data for Eastern rift of Nayvasha from Wilson (1989)



شکل ۱۲. نمودار عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and Mc Donough, 1989) در منطقه بوژان

Fig. 12. Primitive mantle-normalized trace element for the Boozhan mafic rocks (Sun and Mc Donough, 1989)



شکل ۱۳. مقایسه نمودار عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب MORB برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان و بازالت‌های OIB و بازالت داخل صفحه قاره‌ای (Pearce, 1983)

Fig. 13. A comparison between MORB-normalized spider diagrams of Bojan volcanic rocks and OIB and Intra-continental plate basalt (Pearce, 1983)

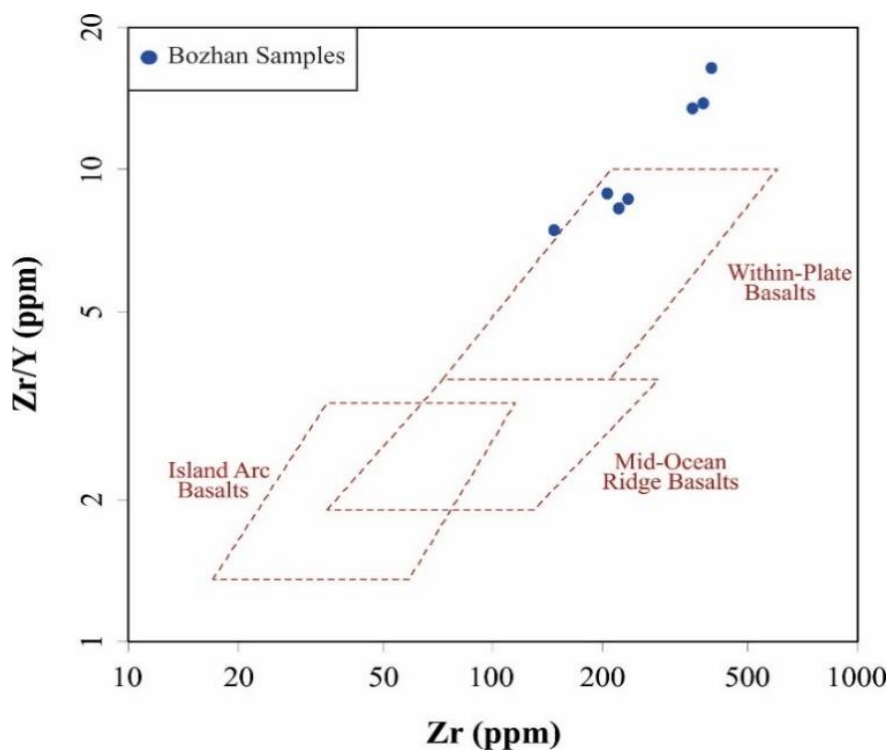
نمونه‌های منطقه مورد بررسی در محدوده بازالت‌های درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۴).

نمودار Zr-Ti (Pearce, 1982) نشان‌دهنده سه محدوده بازالت کمان آتشفشانی، MORB و بازالت‌های درون صفحه‌ای (WPG) است که بر اساس این نمودار، بیشتر نمونه‌های موجود در محدوده بازالت‌های درون صفحه‌ای و چهار نمونه در مرز بازالت‌های درون صفحه‌ای و MORB قرار می‌گیرند (شکل ۱۵). بر اساس نمودار سه تایی $\text{FeO}_T\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (Pearce et al., 1977) نیز نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های قاره‌ای قرار می‌گیرند. افزون بر این، در نمودار سه تایی $\text{Zr-}2*\text{Nb}/4\text{-Y}$ (Meschede, 1986) نیز نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های آلکالن درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۶ و شکل ۱۷).

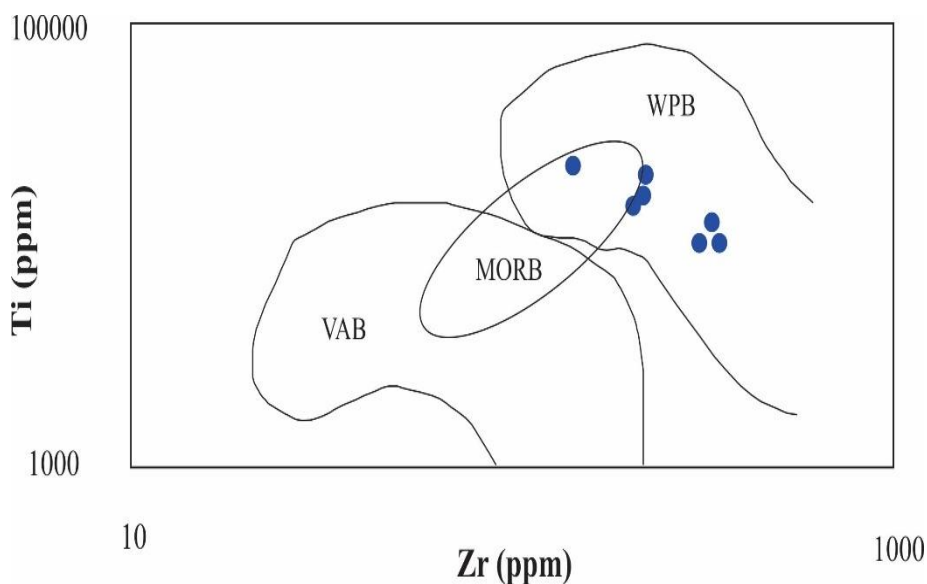
منشأ و جایگاه زمین‌ساختی

سنگ‌های آتشفشانی آلکالن در محیط‌های زمین‌ساختی گوناگونی (از محیط‌های قاره‌ای تا اقیانوسی و درون صفحه‌ای تا حاشیه قاره، مگر پشته‌های میان اقیانوسی) یافت می‌شوند (Zhao et al., 1995).

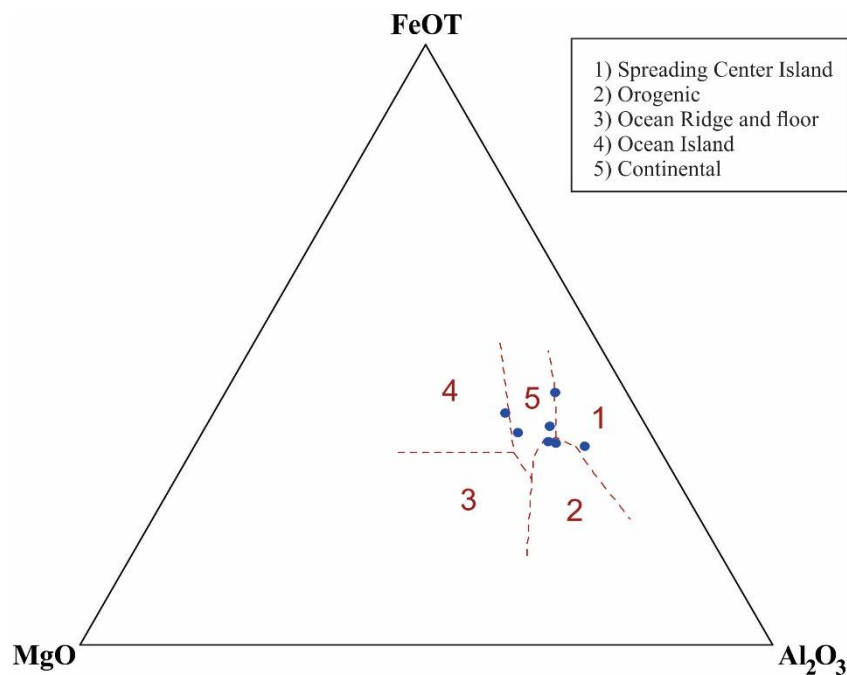
این سنگ‌ها معمولاً در پهنه‌های کششی، در نقاط داغ درون صفحه‌ای، در مراحل نخستین کافت درون قاره‌ای و در بخش‌های درون قاره‌ای پهنه‌های فرورانش حاشیه قاره یافت می‌شوند (Wilson, 1989). برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های مورد بررسی، از نمودارهای مختلف مرتبط با سنگ‌های بازالتی استفاده شد (شکل ۱۴، شکل ۱۵، شکل ۱۶ و شکل ۱۷). در نمودار سه تایی $\text{Zr-Zr}/\text{Y}$ (Pearce and Norry, 1979)،



شکل ۱۴. نمودار Zr در برابر Zr/Y برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان (Pearce and Norry, 1979)
Fig. 14. Zr vs. Zr/Y diagram of the Boozhan volcanic rocks (Pearce and Norry, 1979)

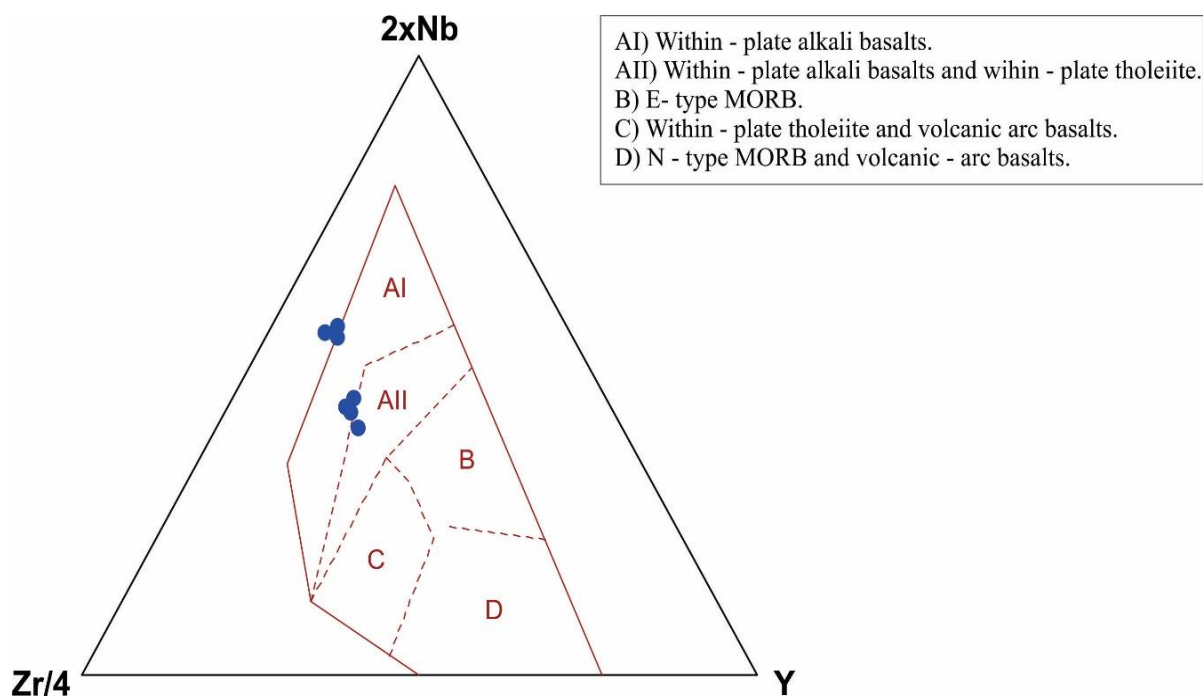


شکل ۱۵. نمودار زمین‌ساختی برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان (Pearce, 1982)
Fig. 15. Tectonomagmatic discrimination diagrams for the Bojan volcanic rocks based on Zr vs. Ti (Pearce, 1982)



شکل ۱۶. نمودار سه تایی $FeO_T-Al_2O_3-MgO$ برای بازالت‌های منطقه بوژان (Pearce et al., 1977)

Fig. 16. Ternary diagram of $FeO_T-Al_2O_3-MgO$ (Pearce et al., 1977) for the Bojan volcanic rocks



شکل ۱۷. نمودار سه تایی $Zr/4-Y-2*Nb$ (Meschede, 1986) برای سنگ‌های آتشفشانی بوژان

Fig. 17. Ternary diagram of $Zr/4-Y-2*Nb$ (Meschede, 1986) for the Bojan volcanic rocks

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آتشفشانی منطقه بوژان با ترکیب بازالت تا آندزیت دارای سرشت آلکالن سدیک هستند. الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده به ترکیب کندریت و نیز نمودارهای چند عنصری بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه با مذاب‌های ریشه گرفته از خواستگاه بازالت‌های درون صفحه‌ای مطابقت می‌کند. همچنین

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده جایگاه زمین‌ساختی ماگمای درون ورقه‌ای هستند. در این خواستگاه منبع گوشته‌ای دچار درجه‌های کم ذوب‌بخشی شده و آثار آرایش پوسته‌ای در کمترین میزان ممکن بوده است. ماگماتیسم در منطقه بوژان در طول چرخه‌ای از کافت درون قاره در هنگام بازشدگی پالتوتیس در اردوئین تا سیلورین شکل گرفته است.

References

- Aghanabati, S.A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey and Mining Exploration of Iran, Tehran. 586p. (in Persian)
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8): 983–992.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2)
- Ayati, F., Khalili M., Noghreiyani M. and Mackizadeh, M.A., 2011. Silurian magmatism in the Abyaneh area (Kashan-Central Iran). *Journal of Science* 35 (4): 21–31. (in Persian) Retrieved July 01, 2021 from <https://www.magiran.com/p794211>
- Baharifar, A.A., Mazaheri, S.A. and Moein-Vaziri, N., 2005. Deformation and its relationship with the crystallization of metamorphic minerals in Dehno area (Mashhad-Khorasan). 9th symposium of Geological society of Iran, Tarbiat Moalem University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian) Retrieved July 01, 2021 from <https://www.en.symposia.ir/SGSI09>
- Boynnton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: P. Henderson (Editor) the rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 115–1522.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Dai, H.K., Zheng, J.P., Xiong, Q., Su, Y.P., Pan, S.K., Ping, X.Q. and Zhou, X., 2018a. Fertile lithospheric mantle underlying ancient continental crust beneath the northwestern north China craton: significant effect from the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Journal of Geological Society of America Bulletin*, 131: 3–20.
<https://doi.org/10.1130/B31871.1>
- Dai, L.Q., Zheng, F., Zhao, Z.F. and Zheng, Y.F., 2018b. Geochemical insights into the lithology of mantle sources for Cenozoic alkali basalts in West Qinling, China. *Lithos*, 302-303: 86–98.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.013>
- Derakhshi, M. and Ghasemi, H., 2015. Soltan Maidan Complex (SMC) in the eastern Alborz structural zone, northern Iran: magmatic evidence for Paleotethys development. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2): 849–866.
<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1180-2>
- Esmaeili, D., Kananian, A. and Valizadeh, M.V., 2003. Polymorphism in the margins of Mashhad granitoids. 2th symposium of Geological society of Iran, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian) Retrieved July 01, 2021 from <https://www.en.symposia.ir/SGSI02>
- Floyd, P.A. and Winchester, J.A., 1978. Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements, *Chemical Geology*, 21(3-4): 291–306.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(78\)90050-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(78)90050-5)
- Ghazi, A.M., Pessagno, E.A., Hassanipak, A.A., Kariminia, S.M., Duncan, R.A. and Babaie, H.A., 2003. Biostratigraphic zonation and 40Ar–39Ar ages for the Neotethyan Khoy ophiolite of NW Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193(2): 311–323.
[https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00234-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00234-7)
- 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. *Petrology*, 48 (12): 2341–2357.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>
- Hatefi, R., 2003. Study on metamorphic rocks and intrusive units in Dehno area (Northwest of Mashhad). M.Sc. Thesis, Tarbiat Moalem University, Tehran, Iran, 112 pp. (in Persian)
- Homam, M. and Ghaemi, F., 2008. The mechanism of fibrolite formation in the contact aureole of Mashhad granite. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 16(1): 159–168 (in Persian). Retrieved July 01, 2021 from <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=112654>
- Karimpour, M.H., Stern, C.R. and Farmer, G.L., 2010. Zircon U–Pb geochronology, Sr–Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(4): 384–393.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.11.001>
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb–Zr–Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3–4): 207–218.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)
- Middlemost, E.A., 1975. The basalt clan. *Earth-Science Reviews*, 11(4): 337–364.
[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(75\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(75)90039-2)

- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran. Geological survey of Iran, Tehran. 109 pp. (in Persian) Retrieved July 01, 2021 from <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=38741>
- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, Andesites. Wiley, United Kingdom, 548 pp. Retrieved July 01, 2021 from <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/8625>
- Pearce, J.A., 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva, United Kingdom, 249 pp. Retrieved July 01, 2021 from <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/8626>
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69(1): 33–47. <https://doi.org/10.1007/BF00375192>
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. Earth and Planetary Science Letters, 36(1): 121–132. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90193-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90193-5)
- Pour Latifi, A., 2001. Geological map of Torghabeh, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Samadi, R., 2001. Investigation on the origin of garnet megacrysts in Dehno tonality, Northwest of Mashhad. M.Sc. Thesis, Tehran University, Tehran, Iran, 179 pp. (in Persian)
- Srivastava, R.K. and Singh, R.K., 2004. Trace element geochemistry and genesis of Precambrian sub-alkaline mafic dikes from the central Indian craton: evidence for mantle metasomatism. Journal of Asian Earth Sciences, 23(3): 373–389. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00150-0)
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders, M.J. Norry, (Editors), Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications 42, pp. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Thompson, B.M., 1982. Growth and development of *Pseudocalanus elongatus* and *Calanus* sp. in the laboratory. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 62(2): 359–372. <https://doi.org/10.1017/S0025315400057337>
- Vogel, T.A., Hidalgo, P.J., Patino, L., Tefend, K.S. and Ehrlich, R., 2008. Evaluation of magma mixing and fractional crystallization using whole-rock chemical analyses: Polytopic vector analyses. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9(4): 1–27. <https://doi.org/10.1029/2007GC001790>
- Wang, H., Wu, Y.B., Gao, S., Liu, X.C., Gong, H.J., Li, Q.L., Li, X.H. and Yuan, H.L., 2011. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks. Journal of Metamorphic Geology, 29(9): 1019–1031. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00955.x>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilson, M., 1989. Review of Igneous Petrogenesis: Aglobal Tectonic Approach. Terra Nova, 1(2): 18–222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1989.tb00357.x>
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation prototextures and setting of VMS mineralization in the Pilbara ducts using immobile elements. Chemistry Geology, 20: 325–344. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Zhao, J.X., Shiraishi, K., Ellis, D.J. and Sheraton, J.W., 1995. Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamato Mountains, East Antarctica: implications for the origin of syenitic magmas. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(7): 1363–1382. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00050-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00050-A)
- Zhu, D., Pan, G., Mo, X., Liao, Z., Jiang, X., Wang, L. and Zhao, Z., 2007. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalaya: A probable example of plume–lithosphere interaction. Journal of Asian Earth Sciences, 29 (2–3): 320–335. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.12.004>