



## RESEARCH ARTICLE

10.22067/ECONG.2023.83438.1083



## Sr-Nd Isotope Geochemistry and Tectonomagmatic Setting of Granitoid Intrusions of Balazard Prospecting Area, Southwest of Nehbandan

Roohollah Miri Bydokhti <sup>1</sup> , Mohammad Hassan Karimpour <sup>2</sup> , José Francisco Santos <sup>3</sup>, Mahdi Bemani <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Assistant professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Gonabad, Gonabad, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Geosciences, Geobiotec Research Unit, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

<sup>4</sup> Assistant professor, Mining engineering Department, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 10 September 2023

Revised: 23 October 2023

Accepted: 25 October 2023

#### Keywords

Geochemistry  
Subduction Zone  
Balazard  
Nehbandan  
Lut Block

#### \*Corresponding author

Roohollah Miri Bydokhti  
✉ [roholamiri@gonabad.ac.ir](mailto:roholamiri@gonabad.ac.ir)

### ABSTRACT

Balazard prospecting area is located in eastern Iran, about 120 km southwest of Nehbandan in the Central part of Lut Block. This area consists of exposed Eocene volcanic rocks, intruded by several diorite and monzodiorite dykes and stocks. These intrusive rocks display porphyritic textures with mm-sized phenocrysts, most commonly of plagioclase, clinopyroxene and hornblende, embedded in a fine-grained groundmass with variable amounts of plagioclase, quartz, and opaque minerals. The assessment of geochemical properties of the major elements showed that these granitoids are metaluminous and of high-K calc-alkaline variety. The patterns of trace elements are identical, denoting enrichments in the light REE (LREE) to heavy REE (HREE). Moreover, LILE enrichment relative to HFSE and Nb, Ti, and P show negative anomalies. The Eu/Eu\* ratios range from 0.96 to 0.76, which means that the plagioclase is a slag remnant in the origin of magma. The (87Sr/86Sr)<sub>i</sub> values of the assessed intrusive rocks range from 0.706 to 0.707, assuming an Oligocene age, while the εNdi values are between -1.9 to -3.2. These results manifest that the magmas were contaminated by continental crust. The contamination has probably occurred over the ascent of magma to crustal levels, and geochemical data verifies the proposition that the investigated intrusions were intruded in a volcanic belt resting on a subduction zone. Early magmas were created through the melting of mantle wedge peridotite, occasioning magma differentiation through crystal fractionation and crust contamination as they ascended to crustal levels.

#### How to cite this article

Miri Bydokhti, R., Karimpour, M.H., Francisco Santos, J. and Bemani, M., 2023. Sr-Nd Isotope Geochemistry and Tectonomagmatic Setting of Granitoid Intrusions of Balazard Prospecting Area, Southwest of Nehbandan. *Journal of Economic Geology*, 15(3): 1–24. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.83438.1083>



©2023 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.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Balazard prospecting area is located 120 km of the south-west of Nehbandan in South Khorasan Province, Iran. The area is part of the volcanic-plutonic belt known as Lut Block, which owns an elongated shape stretched north-southwardly. Nehbandan Fault forms the eastern boundary of Lut Block. This is while it has been bordered by the Great Kavir Fault in the north, and by Nayband Fault in the west. The southern part of the block is likely defined by South Jazmourian Fault. Karimpour et al. (2012) argue that ~65% of the rocks cropped out in Lut Block are volcanic and plutonic. The magmatic activity of Lut Block initiated over the Middle Jurassic, particularly between 165-162 million years ago, which was associated with the intrusion of Shah-Kuh batholith (Esmaily et al., 2005). This activity reached its highest level over the Tertiary period, particularly over the Middle Eocene (Arjmandzadeh & Santos, 2014). Over half of Lut Block is overlain by volcanic and subvolcanic rocks of Tertiary. These rocks show a thickness of up to 2000 m. They have been developed as a result of subduction before the collision between the Arabian and Asian plates (Berberian & King, 1981).

There is a perceptible potential for a variety of mineralization in Eastern Iran and particularly in Lut Block, which is due to its past tectonism as a subduction zone that led to extensive magmatic activity. The Middle Eocene to the Early Oligocene (30-39 million years ago) is perceptible, particularly, in respect of magmatism and mineralization (Karimpour et al., 2012). Karimpour et al. (2012) believe that a great deal of the magmatism and mineralization events in eastern Iran have occurred over the Tertiary. However, mineralization associated with Cretaceous magmatism has also been identified, such as Sn-Cu mineralization observed in Cretaceous monzonitic rocks in Kalateh Ahani (Karimpour et al., 2012). Here we present new geochemical data (elemental and isotopic) from shallow intrusive rocks, with the aim of providing a more detailed understanding of the petrogenetic processes and geodynamic evolution of Lut Block.

### Material and methods

A total of six samples from unaltered intrusive rocks at Balazard prospecting area and representing the

main lithologies were grabbed to chemically analyze major and trace elements through petrographic assessment. Major and trace elements were determined using fused disks and a Philips PW 1410 spectrometer through wavelength-dispersive X-ray fluorescence (XRF) spectrometry. The chemical analysis was undertaken at Amethyst Laboratory in Mashhad, Iran. Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry (ICP-MS) was applied to analyze four of the samples for trace elements at Acme Laboratories in Vancouver (Canada). The samples were tested by a lithium metaborate/tetraborate fusion and total digestion with nitric acid prior to analysis. Four whole-rock samples of Balazard granitoid rocks were analyzed for their Sr and Nd isotopic compositions at the University of Aveiro's Laboratory of Isotope Geology in Portugal.

The ground samples were treated with a HF/HNO<sub>3</sub> solution in Teflon Parr acid digestion bombs, which were heated at 200°C for three days. The ultimate solution was evaporated and the samples were then dissolved in HCl (6.2 N) in acid digestion bombs and dried again. The elements were purified before being analyzed by means of a two-stage conventional ion chromatography technique: a) Sr and REE elements were separated in an ion exchange column by AG8 50W Bio-Rad cation exchange resin; b) Nd was purified from other lanthanides by means of columns with Ln Resin (ElChrom Technologies) cation exchange resin.

All reagents that were applied to prepare the samples were sub-boiling distilled, and the water was produced using a Milli-Q Element (Millipore) apparatus. Sr was loaded onto a single Ta filament with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, while Nd was loaded onto a Ta outer side filament with HCl in a triple filament arrangement. The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd isotopic ratios were determined using a Multi-Collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54, with data acquired in dynamic mode and peak measurements at 1-2 V for <sup>88</sup>Sr and 0.5-1.0 V for <sup>144</sup>Nd. The Sr and Nd isotopic ratios were corrected for mass fractionation relative to <sup>88</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.1194 and <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219. While the investigation was in progress, the SRM-987 standard yielded an average <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr value of 0.710266 ± 14 (conf. lim 95%, N = 13) and a <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd value of 0.5121019 ± 75 (conf. lim 95%, N = 12) in comparison to the JNdi-1 standard.

### Result and discussion

Balazard intrusive rocks consist of diorite, quartz diorite, and quartz monzodiorite, and exhibit characteristics typical of high-K calc-alkaline rocks from a volcanic arc setting. The primitive mantle-normalized trace element spider diagrams display significant enrichment in LILE, including Rb, Sr, Ba, Zr, Cs, and Th, and depletion in some HFSE, such as P, Nb, and Y. Chondrite-normalized plots exhibit LREE enrichment and a significant La/Yb fractionation.

Balazard granitoid rocks have ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> values that vary between 0.7064 and 0.7066. In terms of isotopic compositions, Balazard granitoid rocks have  $\epsilon\text{Nd}_i$  between -1.9 and -3.2. The geochemical data are commensurate with the settlement of the investigated intrusions in a magmatic belt above a subduction zone suggesting contamination through being exposed to the continental crust during magma

ascent to crustal levels. Balazard granitoid rocks display a range of ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> values between 0.7064 and 0.7066. Additionally, the isotopic compositions of the rocks show  $\epsilon\text{Nd}_i$  values ranging from -1.9 to -3.2. These geochemical characteristics suggest that the investigated intrusions were emplaced in a magmatic belt above a subduction zone and were subsequently contaminated during magma ascent to continental crust.

### Acknowledgements

The authors wish to thank Mrs. Sara Ribeiro (Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade de Aveiro) for the TIMS analysis. This research was financially supported by the Geobiotec Research Unit (funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, through project PEst-OE/CTE/UI4035/2014, University of Aveiro, Portugal).



## مطالعه زمین‌شیمی، ایزوتوپ‌های Sr، Nd و جایگاه زمین‌ساختی توده‌های نفوذی در محدوده اکتشافی بالازرد، جنوب‌غرب نهندان

روح‌اله میری بیدختی<sup>۱\*</sup>، محمدحسن کریم‌پور<sup>۲</sup>، ژوزه فرانسیسکو سانتوس<sup>۳</sup>، مهدی بمانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه علوم‌زمین، دانشگاه آویرو، آویرو، پرتغال

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

محدوده اکتشافی بالازرد در ۱۲۰ کیلومتری جنوب‌غرب نهندان و در بخش مرکزی بلوک لوت واقع شده‌است. این محدوده پوشیده از سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن بوده که توده‌های نفوذی بصورت استوک و دایک در آن نفوذ کرده‌اند. بافت غالب این واحدها پورفیری با فنوکریست‌هایی در اندازه میلیمتر شامل کانی‌های پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز و کانی‌های تیره در زمینه هستند. براساس رده‌بندی شیمیایی، واحدهای نفوذی منطقه شامل مونزوگابرو، گابرودیوریت و مونزودیوریت می‌باشند. این توده‌های نفوذی، کالک‌آلکان پتاسیم‌بالا و با ماهیت متآلومینوس می‌باشند. غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به HFSE و همچنین بی‌هنجاری P، Nb و Ti شواهد مهمی است که نشان می‌دهد توده‌های نفوذی بالازرد در کمر بند ماگمایی زون فرورانش تشکیل شده‌اند. عنصر Eu ناهنجاری منفی نشان می‌دهد و مقدار  $Eu/Eu^*$  از ۰/۷۶ تا ۰/۹۶ در تغییر است. ناهنجاری منفی Eu احتمالاً بعثت حضور کانی پلاژیوکلاز در سنگ منشاء ماگما می‌باشد. مقدار  $^{87}Sr/^{86}Sr$  اولیه بین ۰/۷۰۶ تا ۰/۷۰۷ و مقدار  $\epsilon Nd_i$  بین ۱/۹- و ۳/۲- است که نشان‌دهنده آغشتگی ماگما با پوسته قاره‌ای می‌باشد. مطالعات ژئوشیمیایی این پژوهش نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی بالازرد هم‌خاستگاه بوده و از ذوب پوسته اقیانوسی در زون فرورانش در حاشیه فعال قاره منشاء گرفته و در حین جایگیری در سطوح کم‌عمق با پوسته قاره‌ای آغشتگی پیدا کرده‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

### واژه‌های کلیدی

ژئوشیمی

زون فرورانش

بالازرد

نهندان

بلوک لوت

### نویسنده مسئول

روح‌اله میری بیدختی

roholamiri@gonabad.ac.ir ✉

### استناد به این مقاله

میری بیدختی، روح‌اله؛ کریم‌پور، محمدحسن، فرانسیسکو سانتوس، ژوزه و بمانی، مهدی. ۱۴۰۲. مطالعه زمین‌شیمی، ایزوتوپ‌های Sr، Nd و جایگاه زمین‌ساختی توده‌های نفوذی در محدوده اکتشافی بالازرد، جنوب‌غرب نهندان. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۳): ۱-۲۴.

<https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.83438.1083>

## مقدمه

محدوده اکتشافی بالازرد در شرق ایران و در ۱۲۰ کیلومتری جنوب غرب نهبندان در استان خراسان جنوبی واقع شده است (شکل ۱). از نظر تقسیمات ساختاری این منطقه در بلوک لوت قرار گرفته است (Aghanabati, 2004). یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بلوک لوت، فعالیت‌های ماگماتیسمی آن بوده که از ژوراسیک میانی با نفوذ باتولیت شاه کوه نهبندان آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است، بطوری که حدود ۷۵ درصد سنگ‌های بلوک لوت را واحدهای آتشفشانی و نفوذی تشکیل می‌دهند (Esmaily et al., Karimpour et al., 2012; 2005).

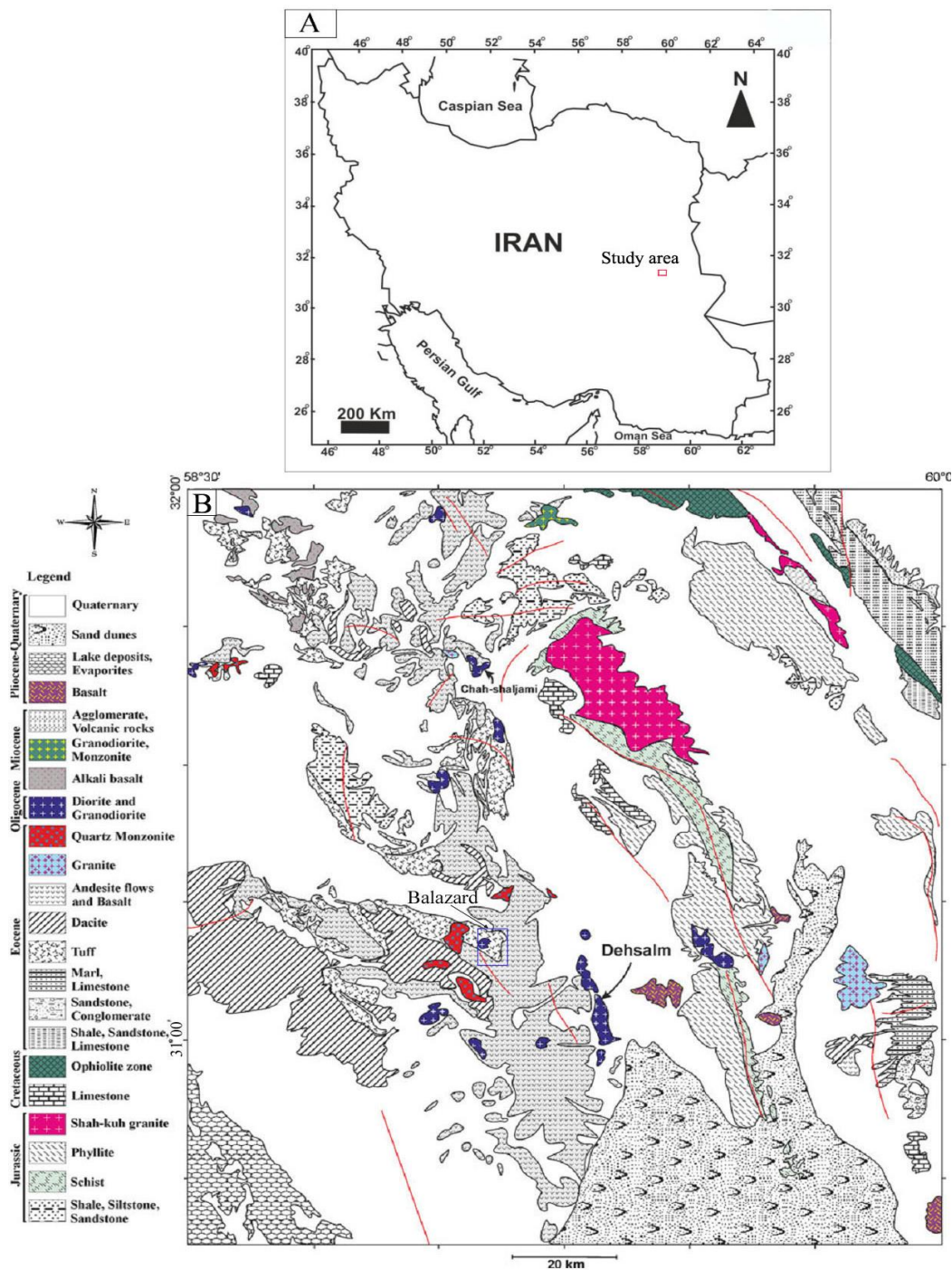
بر اساس پژوهش ارجمندزاده و همکاران، بلوک لوت بواسطه داشتن موقعیت‌های تکتونیکی مختلف در زمان‌های گذشته و بدنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسم با ویژگی‌های ژئوشیمیایی متفاوت، دارای پتانسیل مناسبی برای تشکیل کانی‌سازی‌های مختلف می‌باشد (Arjmandzadeh et al., 2011). کریم‌پور و همکاران نشان دادند، بازه زمانی بین ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن)، مهم‌ترین پنجره زمانی کانی‌سازی، در بلوک لوت می‌باشد، بنابراین توده‌های نفوذی تشکیل شده در این پنجره زمانی برای انواع کانی‌سازی مس-طلا پورفیری، طلای اپی‌ترمال سولفیدبالا، اسکارن آهن، رگه‌های Zn Pb و IOCG پتانسیل دارند (Karimpour et al., 2012). میری و همکاران، کانی‌سازی در محدوده بالازرد را از نوع طلا و نقره اپی‌ترمال سولفید بالا معرفی نمودند (Miri Beydokhti et al., 2014). از دیگر مطالعات قبلی انجام شده می‌توان به تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ده‌سلم و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ده‌سلم اشاره نمود، که البته در هیچ کدام به حضور توده‌های نفوذی اشاره‌ای نشده است (Griffis et al., 1991; Akrami and Naderi Mighan, 2005).

بررسی‌های پترولوژیکی مختلفی در بلوک لوت بر روی توده‌های نفوذی، نیمه عمیق و آتشفشانی انجام شده است. از کارهایی که در

مناطق نزدیک به محدوده بالازرد انجام شده است می‌توان به مطالعات صورت گرفته در مناطق کجه واقع در شمال غرب فردوس (Najafi et al., 2014)، کوه‌شاه واقع در جنوب خوسف (Abdi and Karimpour, 2013)، چاه شلجمی و ده‌سلم (Arjmandzadeh et al., 2011; Arjmandzadeh and Santos 2014)، بیشه نهبندان (Nakhaei et al., 2015)، ماهرآباد و خویبک (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2015)، خونیک (Samiee et al., 2016) و ماهور واقع در غرب نهبندان (Miri Beydokhti et al., 2015) اشاره کرد. بر اساس این مطالعات، عمده توده‌ها از نوع نیمه عمیق با بافت پورفیری و ترکیب آنها از دیوریت تا گرانیت تشخیص داده شده است، ولی غالباً مونزونیتی بوده و بطور عمده از نوع متاآلو مینوس هستند. این توده‌ها عمدتاً متعلق به سری مگنتیت هستند. در این نوشتار پتروژنز، مقادیر ایزوتوپ‌های رادیوژنیک و منشاء توده‌های نفوذی محدوده بالازرد مورد بحث قرار می‌گیرند.

از گستره مورد نظر، بیش از ۱۰۰ نمونه برداشت شد. تعداد ۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی از نمونه‌های برداشت شده، برای مطالعات پتروگرافی تهیه گردید و نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی محدوده اکتشافی بالازرد تهیه گردید. پس از مطالعه مقاطع نازک، تعداد ۶ نمونه از توده‌های نفوذی که دگرسان نبودند و یا دگرسانی کمی متحمل شده بودند، برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی به روش XRF (دستگاه فلیپس مدل II) به آزمایشگاه کانساران بینالود ارسال شد. پس از بررسی نتایج آنالیز عناصر اصلی، تعداد ۴ نمونه از توده‌های ذکر شده، به روش ICP-MS برای عناصر فرعی و نادرخاکی در آزمایشگاه ACME کانادا (با روش آماده‌سازی ذوب قلیایی) مورد تجزیه قرار گرفت. آنالیز زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های Rb-Sr و Sm-Nd چهار نمونه از توده‌های نفوذی با استفاده از Multi-Collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS) VG Sector 54 در دانشگاه آویرو (کشور پرتغال) انجام گردید.





شکل ۱. A: موقعیت منطقه اکتشافی بالازرد در شرق ایران و B: نقشه زمین شناسی ساده شده قسمت‌هایی از بلوک لوت و موقعیت محدوده بالازرد بر روی آن.

**Fig. 1.** A: Location of the Balazard prospecting area in the east of Iran, B: Simplified geological sketch map of the Lut Block and location of Balazard prospecting area on it.

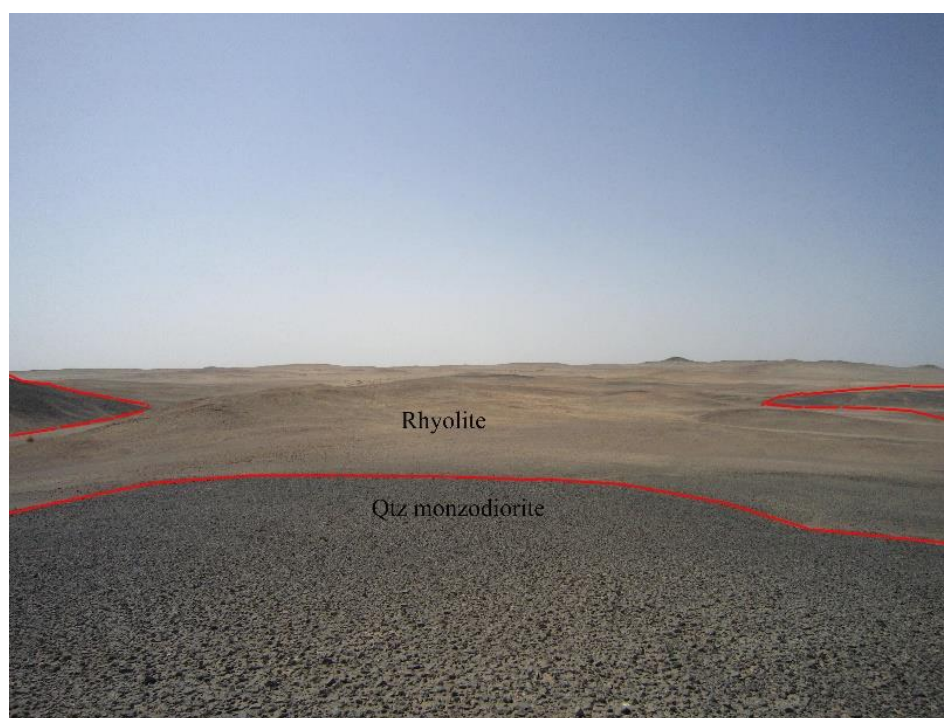
## زمین شناسی منطقه

محدوده اکتشافی بالازرد از نظر زمین شناسی ناحیه‌ای، در بخش غربی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ده‌سلم (Akrami and Naderi) و در گستره‌ای بین طول‌های  $59^{\circ}03'30''$  تا  $59^{\circ}08'50''$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $31^{\circ}09'00''$  تا  $31^{\circ}11'20''$  شمالی واقع شده‌است. بر طبق این نقشه، بخش اعظم منطقه توسط سنگ‌های آتشفشانی ریولیت و آندزیت ائوسن، پوشیده شده‌است. مطالعات صورت گرفته در این پژوهش نشان داد که بسیاری از واحدهایی که در نقشه، سنگ آتشفشانی معرفی شده‌اند، توده‌های نفوذی نیمه عمیق هستند. واحدهای زمین شناسی شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه را می‌توان به ۳ گروه زیر تقسیم کرد: (۱) سنگ‌های آتشفشانی ائوسن که توده‌های نیمه عمیق در آن نفوذ کرده‌اند؛ (۲) توده‌های نیمه عمیق حدواسط با سن نسبی بعد از ائوسن و (۳) تراس‌های آبرفتی

متعدد، ماسه‌بادی، دق‌های رسی و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر (شکل ۲).

واحدهای آتشفشانی شامل ریولیت و آندزیت در منطقه بر پایه مطالعات پتروگرافی شناسایی شدند، که از این میان ریولیت بیشترین گسترش را دارد (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری و جریانی با زمینه شیشه‌ای و دانه ریز می‌باشد. همه واحدهای آتشفشانی تحت تاثیر آلتراسیون‌های سیلیسی و آرژلیک قرار گرفته‌اند.

توده‌های نفوذی نیمه عمیق حدواسط تا بازیک با بافت پورفیری در بخش‌های مختلف محدوده و بخصوص در بخش‌های شمالی، رخمون دارند. این واحدها در سنگ‌های آتشفشانی نفوذ نموده‌اند بنابراین سن نسبی آنها در نقشه بعد از ائوسن در نظر گرفته شده‌است (شکل ۲).



شکل ۲. نفوذ توده‌های ساب‌ولکان داخل واحدهای آتشفشانی ائوسن در محدوده اکتشافی بالازرد (دید به شمال).

**Fig. 2.** Subvolcanic intrusions intruded into Eocene volcanic porphyry units in the Balazard prospecting area (view to the north).

درصد بصورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و ترکیب آندزین بوده و از خصوصیات آن‌ها می‌توان به ماکل آلپیت-پریکلین و آلپیت-کارلسباد و در برخی موارد منطقه‌بندی و بافت غربالی اشاره نمود. آمفیبول بصورت فنوکریست با فراوانی ۵ درصد کانی اصلی دیگر این واحد بوده که بصورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل در متن سنگ پراکنده است. زمینه از بلورهای پلاژیوکلاز و کانی‌های کدر تشکیل یافته است (شکل ۴-B).

**کوارتز مونزو دیوریت پورفیری:** این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز و همچنین بافت سری‌ایت است. درصد درشت‌بلورها حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل ۱۰-۱۵ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۵ میلی‌متر، ۸-۱۰ درصد آلکالی‌فلدسپار تا اندازه ۲ میلی‌متر دارای ادخال‌هایی از کانی کلینوپیروکسن، ۵-۸ درصد هورنبلند تا اندازه ۱ میلی‌متر و ۵-۷ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل فلدسپات و کوارتز است. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و مقدار آنها تا ۱ درصد می‌باشد (شکل ۴-C).

**پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری:** این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط است. درصد درشت‌بلورها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل ۱۵-۲۰ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۳ میلی‌متر، ۵-۷ درصد هورنبلند تا اندازه ۱ میلی‌متر، ۴-۵ درصد کلینوپیروکسن تا اندازه ۲ میلی‌متر و ۱-۲ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۲ میلی‌متر می‌باشند. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و اندازه آنها تا ۰/۱ میلی‌متر و مقدار آنها تا ۲ درصد می‌باشد (شکل ۴-D). کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل پلاژیوکلاز و کوارتز هستند.

**پیروکسن هورنبلند کوارتز دیوریت پورفیری:** این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. درصد درشت‌بلورها

این واحدها شامل کوارتز مونزو دیوریت پورفیری، کوارتز دیوریت پورفیری، پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری، هورنبلند پیروکسن کوارتز دیوریت پورفیری و هورنبلند دیوریت پورفیری می‌باشند و از این بین کوارتز مونزو دیوریت پورفیری با گسترشی در حدود ۰/۵ کیلومتر مربع در شمال محدوده، بیشترین گسترش را دارد (شکل ۳).

### پتروگرافی

بر اساس مطالعات صحرایی و پتروگرافی، گدازه‌های ریولیتی-آندزیتی، کوارتز مونزو دیوریت پورفیری، کوارتز دیوریت پورفیری، پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری، هورنبلند پیروکسن کوارتز دیوریت پورفیری و هورنبلند دیوریت پورفیری واحدهای تشکیل‌دهنده محدوده مورد مطالعه هستند.

**ریولیت:** ریولیت‌ها دارای بافت پورفیری جریان‌ی با خمیره میکروکریستالین می‌باشند. درصد کانی‌های فنوکریست، در حدود ۲۰-۲۵ درصد می‌باشد. کانی‌های فنوکریست شامل کوارتز با فراوانی ۱۰-۱۵ درصد و دارای حاشیه خلیجی بصورت نیمه‌شکل‌دار و گاهی گردشده تا اندازه ۲ میلی‌متر و فلدسپار پتاسیم با فراوانی ۵-۱۰ درصد، احتمالاً سانیدین نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل، که شدیداً به کانی‌های رسی و سریست دگرسان شده‌است، می‌باشند (شکل ۴-A). خمیره سنگ از میکروکریستال‌های کوارتز و فلدسپار گاهی همراه با شیشه تبلور مجددیافته، تشکیل شده و حدود ۷۵ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است.

**آندزیت:** گدازه‌های آندزیتی در نمونه دستی به رنگ خاکستری تا متمایل به سبز و گاهی حفره‌ای دیده می‌شوند. در مقاطع نازک دارای بافت پورفیری با خمیره میکروولیتی هستند. درصد کانی‌های فنوکریست، در حدود ۳۵-۴۰ درصد می‌باشد. کانی‌های فنوکریست شامل پلاژیوکلاز با فراوانی ۳۰-۳۵



درصد کلینوپیروکسن تا اندازه ۱ میلی‌متر و ۲-۳ درصد هورنبلند تا اندازه ۱ میلی‌متر می‌باشد. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل پلاژیوکلاز و کوارتز است. کانی‌های کدر شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و مقدار آنها تا ۲ درصد می‌باشد (شکل F-۴).

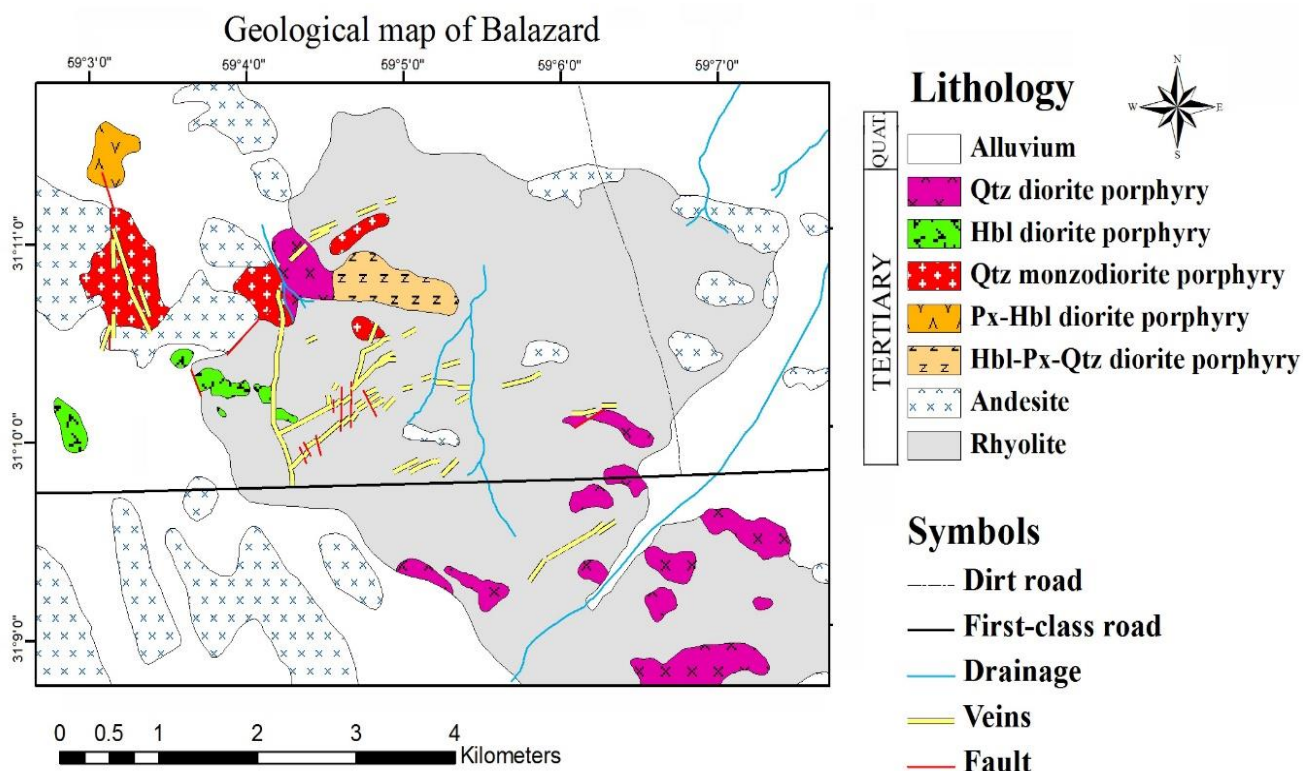
### بحث و بررسی

#### زمین‌شیمی

نتایج تجزیه عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی (wt.%)، عناصر فرعی و کمیاب توده‌های نفوذی بالازرد بر حسب (ppm)، در جدول شماره ۱ آورده شده‌است. میزان سیلیس توده‌های نفوذی محدوده اکتشافی بالازرد بین ۴۹/۵ تا ۵۷/۶ درصد متغیر می‌باشد.

حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل ۱۰-۱۵ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۵ میلی‌متر، ۵-۶ درصد هورنبلند تا اندازه ۱ میلی‌متر، ۴-۵ درصد کلینوپیروکسن تا اندازه ۱ میلی‌متر و ۴-۵ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. کانی‌های زمینه سنگ نیز شامل پلاژیوکلاز و کوارتز هستند. کانی‌های کدر، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار بوده و مقدار آنها تا ۱ درصد می‌باشد (شکل E-۴).

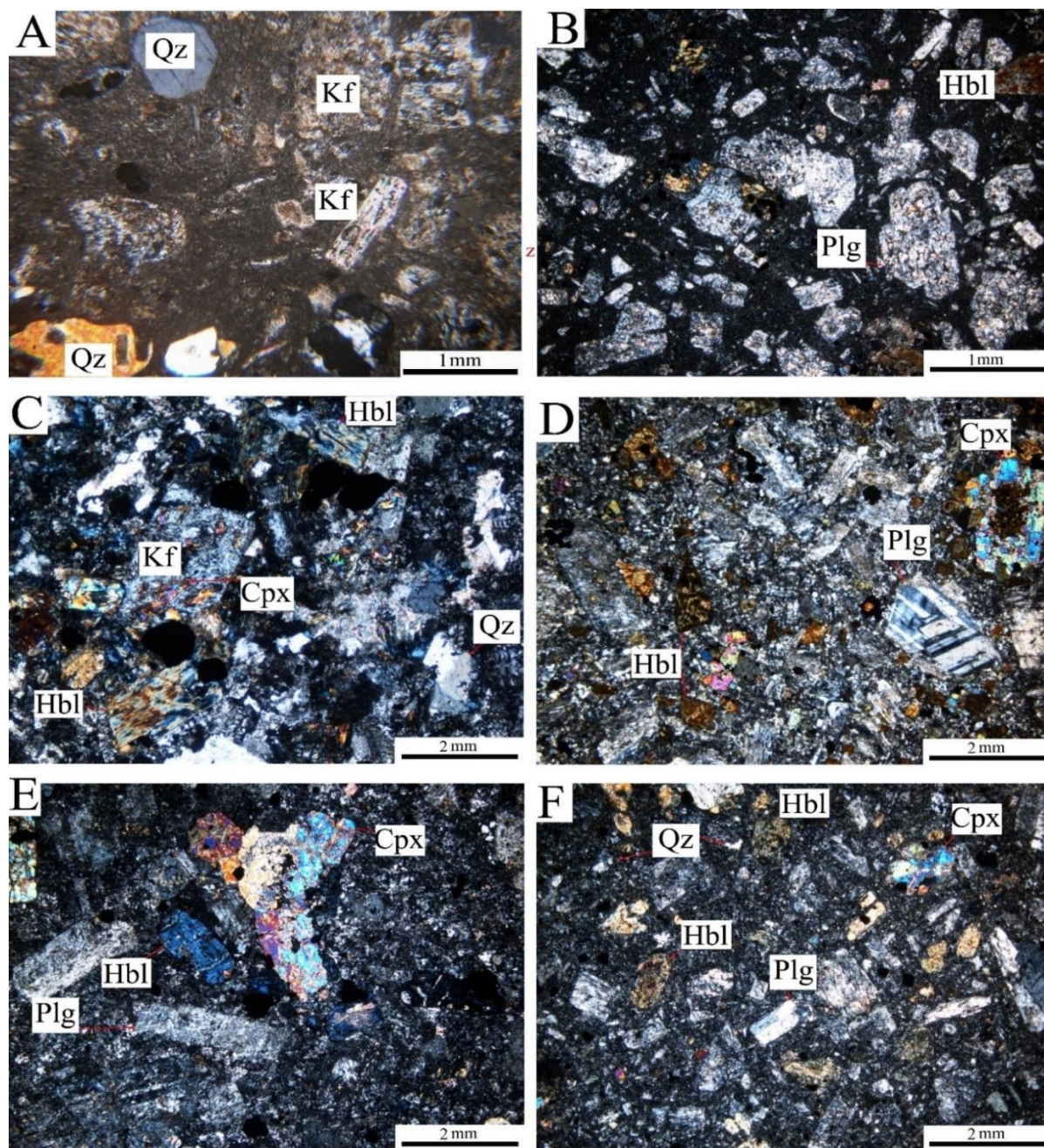
**کوارتز دیوریت پورفیری:** این واحد دارای بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز است. درصد درشت‌بلورها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد است. کانی‌های درشت‌بلور شامل ۲۰-۲۵ درصد پلاژیوکلاز تا اندازه ۳ میلی‌متر، ۵-۶ درصد کوارتز تا اندازه ۰/۵ میلی‌متر ۲-۳



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی بالازرد (Miri Beydokhti et al., 2014).

Fig. 2. Geological map of Balazard prospecting area (Miri Beydokhti et al., 2014).





**شکل ۴.** تصاویر میکروسکوپی از واحدهای سنگی محدوده اکتشافی بالازرد، در (XPL): A: ریولیت، B: آندزیت، C: کوارتز مونزودیوریت پورفیری، D: پیروکسن هورنبلند دیوریت پورفیری، E: پیروکسن هورنبلند کوارتز دیوریت پورفیری و F: کوارتز دیوریت پورفیری. علائم اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) (Qz: کوارتز، Kf: فلدسپارتاسیم، Hbl: هورنبلند، Plg: پلاژیوکلاز، Cpx: کلینوپروکسن).

**Fig. 4.** Photomicrograph (in XPL) of the Balazard rocks: A) Rhyolite, B) Andesite, C) Qz monzodiorite porphyry, D) Px. Hb. diorite porphyry, E) Px. Hb. Qz. diorite porphyry, F) Qz. diorite porphyry. Abbreviations from Whitney and Evans (2010). (Qz: quartz; Kf: K feldspar, Hbl: hornblende, Plg: plagioclase, Cpx-: clinopyroxene).

**جدول ۱.** نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادرخاکی توده‌های نفوذی بالازرد. علائم اختصاری: (Dph) دیوریت پورفیری، (Mzdph) مونزودیوریت پورفیری.

**Table 1.** Major (wt. %) and trace elements (ppm) data for the Balazard granitoid rocks. Abbreviations: (Dph) Diorite porphyry, (Mzdph) Monzodiorite porphyry.

Sample No.	B11	B12	B17	B20	B16	B7
Rock type	Dph	Mzdph	Mzdph	Mzdph	Dph	Dph
Long.	59° 4' 48"	59° 3' 7.8"	59° 3' 8.3"	59° 4' 45"	59° 5' 1"	59° 4' 8.2"
Lat.	31° 10' 46"	31° 11' 25"	31° 11' 26"	31° 10' 48"	31° 10' 44"	31° 9' 9"
<b>Major elements (wt.%)</b>						
SiO <sub>2</sub>	57.61	49.51	49.57	51.75	56.37	56.95
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.95	0.98	0.93	0.86	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.56	17.34	17.27	14.49	15.59	16.14
FeOt	8.24	9.04	9.34	9.04	7.81	7.56
MnO	0.16	0.16	0.16	0.2	0.16	0.18
MgO	4.7	5.84	5.75	6.29	4.98	5.35
CaO	5.22	7.51	7.71	6.48	7.42	6.08
Na <sub>2</sub> O	2.68	4.2	4.1	2.54	2.75	2.89
K <sub>2</sub> O	3.18	1.54	1.62	3.38	2.22	1.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.3	0.32	0.27	0.31	0.28
LOI	2.25	2.64	2.2	3.17	1.32	2.17
SO <sub>3</sub>	0.11	0.72	0.74	1.23	0	0
Total	99.8	99.75	99.76	99.77	99.79	99.76
<b>Trace elements (ppm)</b>						
Ba	460	262	270	495	-	-
Hf	4.7	2	1.5	3.5	-	-
Ta	0.8	0.4	0.4	0.6	-	-
Cs	19	14.5	16.3	20.3	-	-
Co	17.1	23.9	24.3	17.8	-	-
Nb	10.7	5.5	5.3	7.1	-	-
Sr	521	654.3	648.5	480.2	-	-
Rb	114.1	44.8	45.8	117.2	-	-
Zr	155.7	75.1	80.4	121.1	-	-
Ga	17.1	18.4	18.6	16.6	-	-

**ادامه جدول ۱.** نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادرخاکی توده‌های نفوذی بالازرد. علائم اختصاری: (Dph) دیوریت پورفیری، (Mzdph) مونزودیوریت پورفیری.

**Table 1 (Continued).** Major (wt. %) and trace elements (ppm) data for the Balazard granitoid rocks. Abbreviations: (Dph) Diorite porphyry, (Mzdph) Monzodiorite porphyry.

Sample No.	B11	B12	B17	B20	B16	B7
Rock type	Dph	Mzdph	Mzdph	Mzdph	Dph	Dph
Long.	59° 4' 48"	59° 3' 7.8"	59° 3' 8.3"	59° 4' 45"	59° 5' 1"	59° 4' 8.2"
Lat.	31° 10' 46"	31° 11' 25"	31° 11' 26"	31° 10' 48"	31° 10' 44"	31° 9' 9"
<b>Trace elements (ppm)</b>						
Y	3.5	2.5	2.6	2.1	-	-
Th	9.8	3.1	3.1	6	-	-
U	2.2	0.8	1	1.5	-	-
La	26.4	12.8	13.8	20.8	-	-
Ce	55.3	28	27.9	41.1	-	-
Pr	5.92	3.4	3.58	4.82	-	-
Nd	24.5	12.5	13.2	20.1	-	-
Sm	4.31	3.22	3.18	4.12	-	-
Eu	1.07	0.99	1.02	1.05	-	-
Gd	4.29	3.06	3.45	3.73	-	-
Tb	0.58	0.51	0.5	0.56	-	-
Dy	3.72	2.94	3.02	3.57	-	-
Ho	0.76	0.56	0.59	0.74	-	-
Er	1.77	1.81	1.59	2.01	-	-
Tm	0.34	0.22	0.26	0.3	-	-
Yb	1.83	1.72	1.82	1.72	-	-
Lu	0.29	0.22	0.21	0.29	-	-
Eu/Eu*	0.76	0.96	0.94	0.82	-	-
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.73	5.02	5.11	8.15	-	-
(Yb) <sub>N</sub>	8.76	8.23	8.71	8.23	-	-

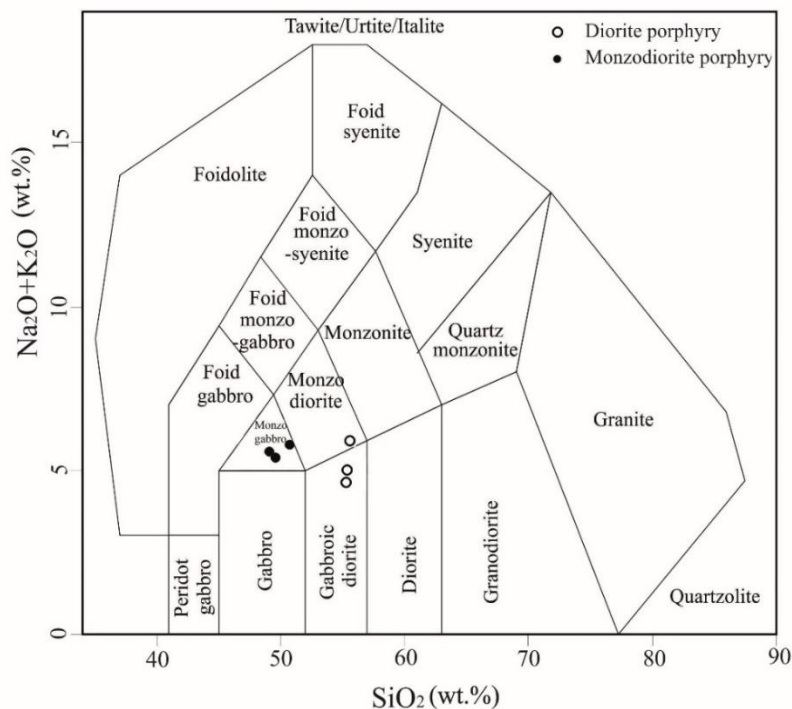
تمامی نمونه‌ها در محدوده متاآلومینوس قرار می‌گیرند (شکل ۷).  
و بواسطه اینکه مقدار A/CNK در تمامی نمونه‌ها کمتر از یک  
است، در محدوده توده‌های نفوذی سری I قرار می‌گیرند  
(Chappell and White, 1992; 2001).

در نمودار تفکیک توده‌های نفوذی تیپ A از تیپ S و I که  
براساس اکسیدهای اصلی و عناصر آلومینیم و گالیم می‌باشد،  
توده‌های نفوذی بالازرد، در محدوده تیپ S یا I قرار می‌گیرند و  
ماهیت ژئوشیمی آنها با توده‌های نفوذی تیپ A متفاوت می‌باشد  
(شکل ۸) (Whalen et al., 1987).

برای نام‌گذاری ژئوشیمیایی سنگ‌های منطقه از نمودار SiO<sub>2</sub> در  
مقابل Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O استفاده گردید (Middlemost, 1994).  
براین اساس توده‌های نفوذی بالازرد در محدوده سنگ‌شناختی  
مونزوگابرو، گابرودیوریت و مونزودیوریت قرار می‌گیرند  
(شکل ۵).

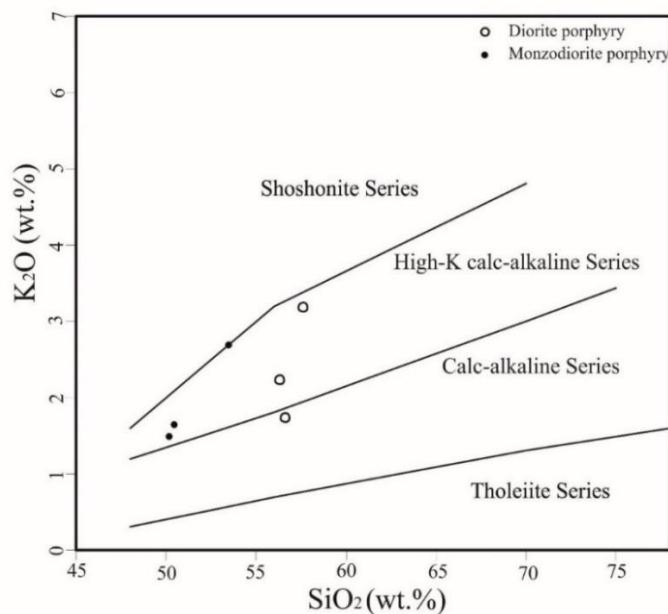
مقدار K<sub>2</sub>O توده‌ها نیز از ۱/۴۱ تا ۳/۳۸ درصد متغیر است. در  
نمودار K<sub>2</sub>O در مقابل SiO<sub>2</sub> (Peccerillo and Taylor, 1976)  
توده‌های نفوذی بالازرد عمدتاً در محدوده سنگ‌های  
سری کالک‌آلکانل پتاسیم بالا قرار می‌گیرند (شکل ۶).  
براساس نمودار A/NK در مقابل A/CNK (Shand, 1969)،





شکل ۵. نام‌گذاری توده‌های نفوذی محدوده بالازرد براساس مقدار  $SiO_2$  در مقابل  $Na_2O+K_2O$  (Middlemost, 1994).

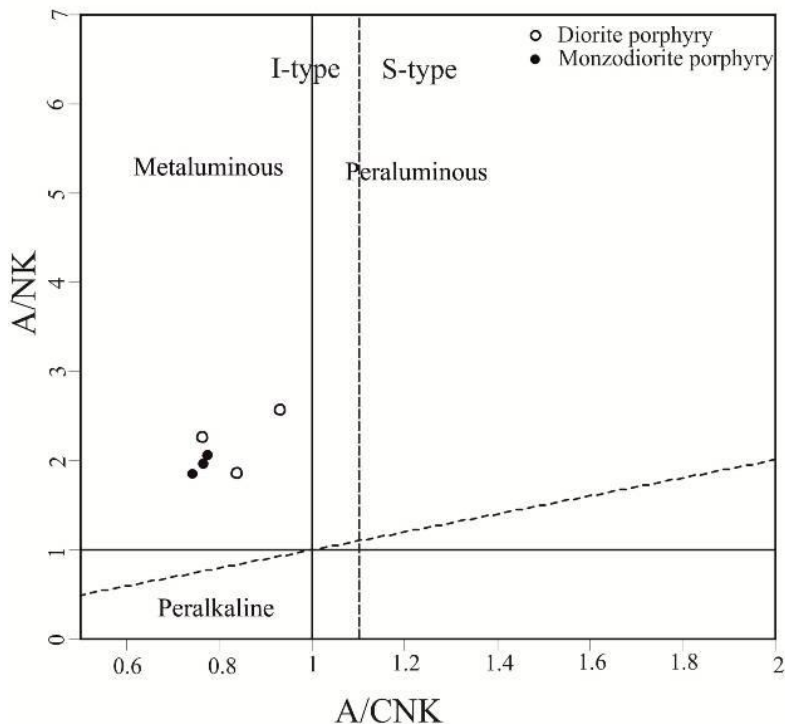
Fig. 5: Plot of granitoids of Balazard on the total alkali vs.  $SiO_2$  diagram (Middlemost, 1994)



شکل ۶. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976).

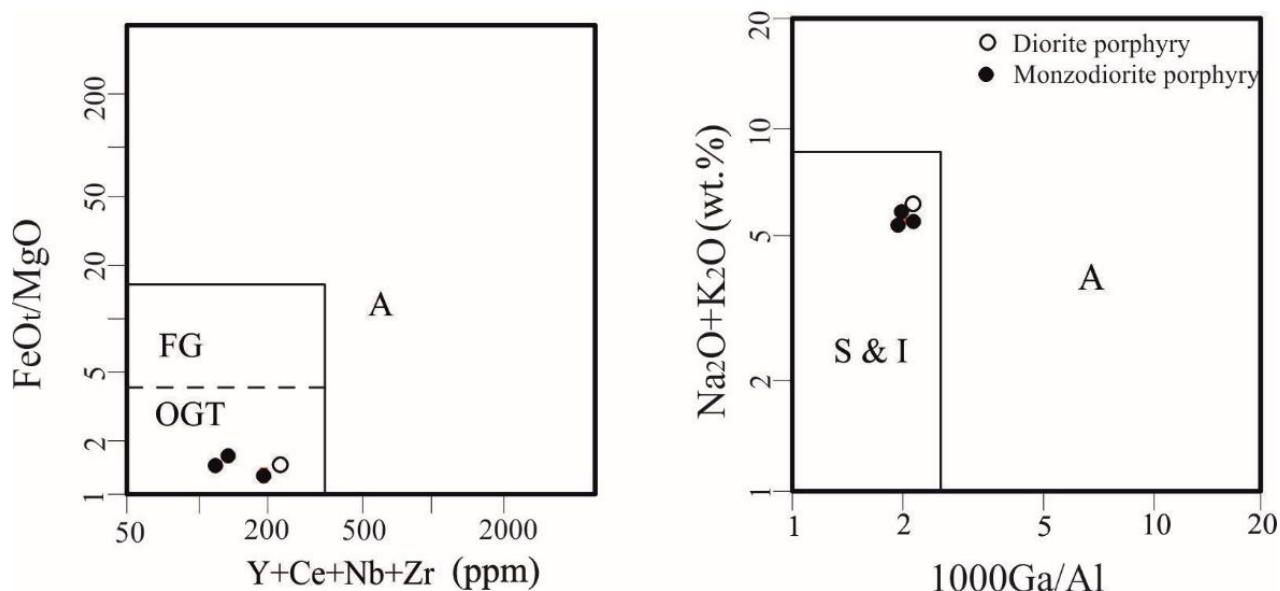
Fig. 6.  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  plot of the Balazard intrusive rocks (Peccerillo and Taylor, 1976).





شکل ۷. نمودار تعیین اندیس آلومینیم واحدهای نفوذی محدوده بالازرد (Shand, 1969).

Fig. 7: A / NK vs. A / CNK diagrams of the Balazard intrusive rocks (Shand, 1969).

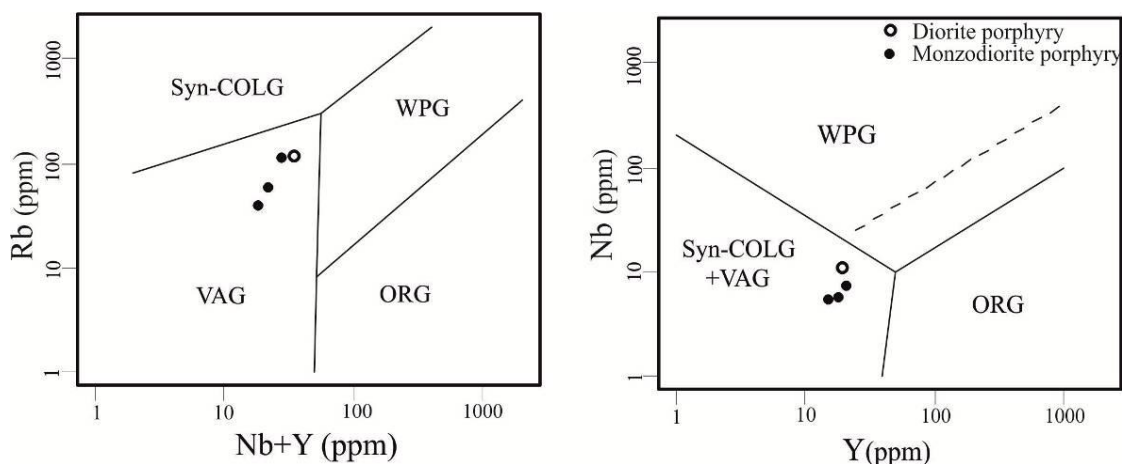


شکل ۸. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار متمایزکننده گرانیتوئیدها (Whalen et al., 1987).

Fig. 8: Granite discrimination diagrams for the Balazard intrusive rocks (Whalen et al., 1987).

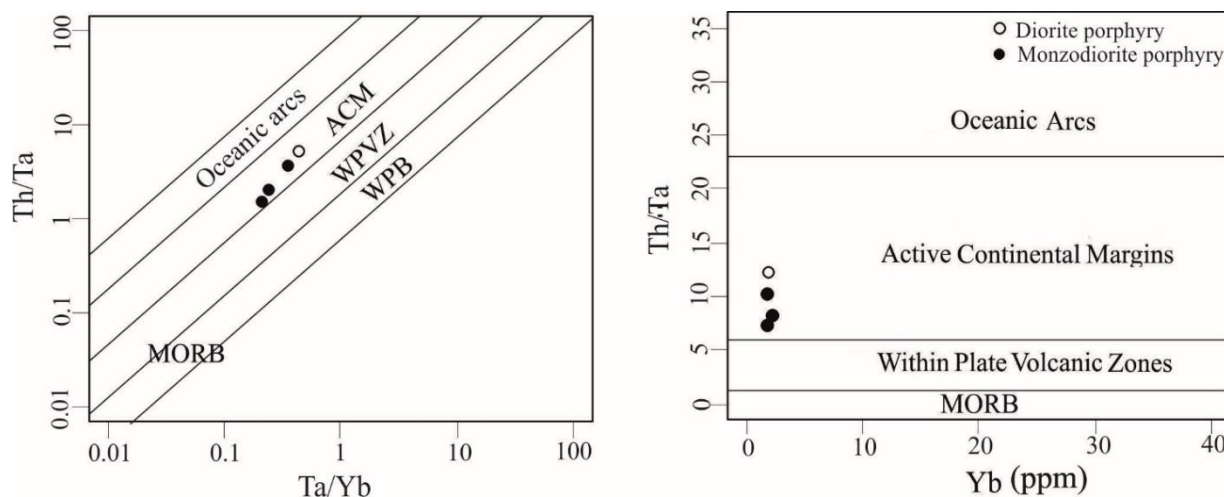
تمامی توده‌های نفوذی بالازرد در موقعیت تکتونیکی کمرندهای آتشفشانی زون فرورانش واقع شده‌اند (شکل ۹). بر مبنای نمودار اسکندل و گورتون (Schandl and Gorton, 2002) توده‌های نفوذی بالازرد در حاشیه‌های قاره‌ای فعال تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰).

پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، بر پایه مقدار عناصر Ta، Rb، Nb و Y گرانیت‌ها را به انواع گرانیت‌های زون گسترش<sup>۱</sup>، گرانیت‌های همزمان با تصادم قاره‌ای<sup>۲</sup>، گرانیت‌های درون‌صفحه‌ای<sup>۳</sup> و گرانیت‌های آتشفشانی زون فرورانش<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرده‌اند. با استفاده از این تقسیم‌بندی،



شکل ۹. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی گرانیتوئیدها (Pearce et al., 1984). WPG: گرانیت‌های درون صفحه‌ای VAG: گرانیت‌های کمرندهای آتشفشانی زون فرورانش ORG: گرانیت‌های زون گسترش syn-COLG: گرانیت‌های همزمان با تصادم قاره‌ای.

**Fig. 9.** Tectono-magmatic discrimination diagrams for the Balazard intrusive rocks (Pearce et al., 1984). WPG: within-plate granitoids; VAG: volcanic arc granitoids; ORG: ocean ridge granitoids; syn-COLG: syn-collisional granitoids.

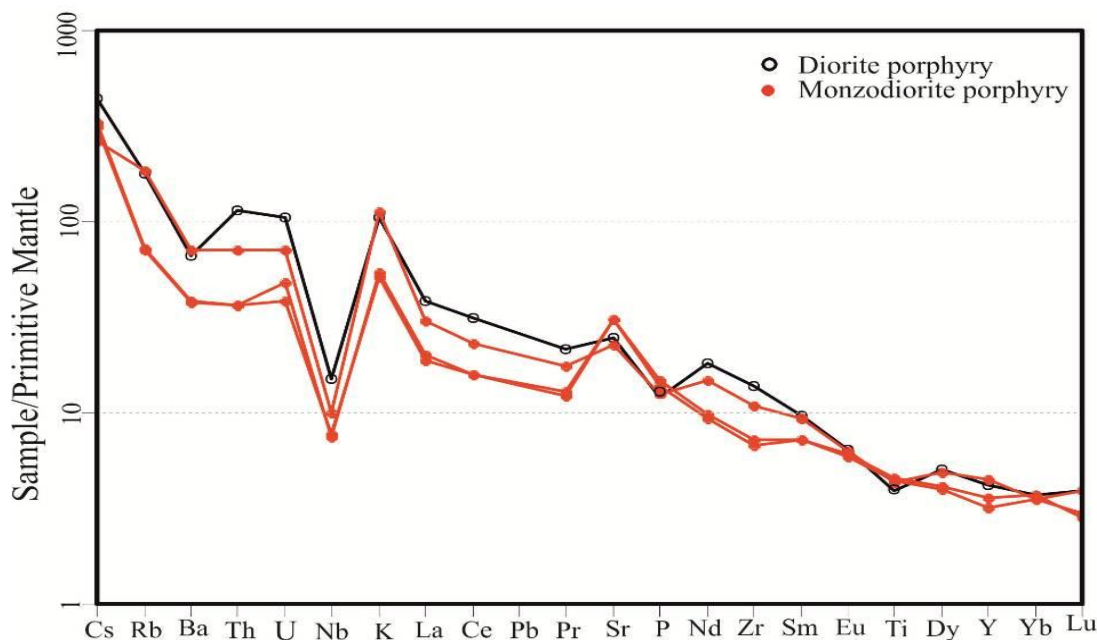


شکل ۱۰. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار تعیین موقعیت تکتونیکی گرانیتوئیدها (Schandl and Gorton, 2002).

**Fig. 10.** Tectonomagmatic discrimination diagrams for the Balazard granitoid rocks (Schandl and Gorton, 2002).

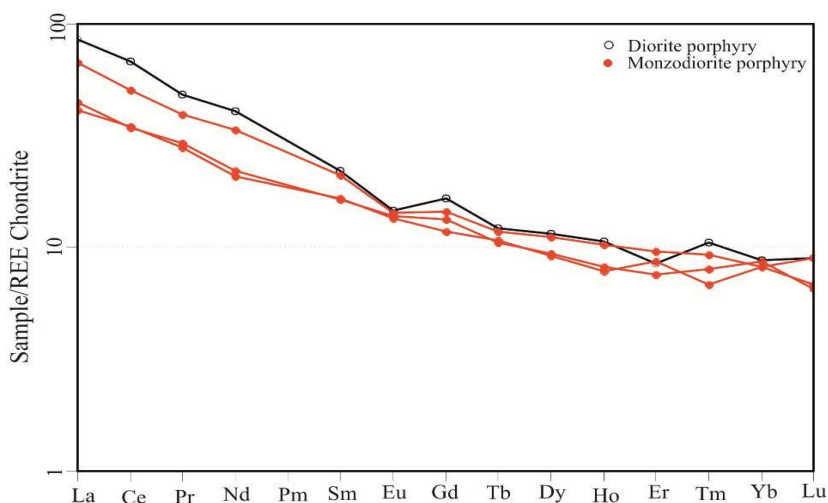
موجب تغییرات در فراوانی برخی عناصر فرعی (بخصوص عناصر ناسازگار) می‌شود. به عنوان مثال آرایش با مواد پوسته‌ای باعث افزایش میزان Rb، K، Ba و از طرفی کاهش Nb، Ti، Y و Zr می‌شود (Reichew et al., 2005). علاوه بر این، ناهنجاری منفی Nb از ویژگی‌های سنگ‌های پوسته قاره‌ای است، بنابراین ناهنجاری منفی ماگماهای با منشأ گوشته‌ای از این عنصر، می‌تواند ناشی از آرایش این ماگماها با مواد پوسته‌ای در خلال صعود باشد. کاهیدگی Ti و P در نمونه‌ها مربوط به تبلور تفریقی کانی‌هایی نظیر تیتانومگنتیت و آپاتیت از ماگما است (Pearce and Parkinson, 1993). ناهنجاری منفی Ti نیز از ویژگی‌های بارز سنگ‌های پوسته‌ای است. به عقیده ویلسون (Wilson, 1989) آنومالی منفی Nb خاص مناطق فرورانش و آنومالی مثبت آن خاص مناطق کششی و کافتی است.

نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب که براساس داده‌های سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989) نسبت به گوشته اولیه بهنجار شده‌اند، در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. تهی‌شدگی مشخصی در عناصر با شدت میدان زیاد<sup>۵</sup> نظیر Nb، P و Ti مشاهده می‌شود و در مقابل، غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل یون بزرگ<sup>۶</sup> نظیر Sr، K، Rb، Ba، Cs و Th دیده می‌شود. غنی‌شدگی در عناصر LILE و عناصر نادر خاکی سبک و تهی‌شدگی در عناصر HFSE از نشانه‌های ماگمای مرتبط با زون فرورانش است (Rollinson, 1993; Pearce, 1983; Gill, 1981). تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا نظیر Nb، P، Ti که از ویژگی‌های برجسته محیط‌های کمانی می‌باشند، می‌تواند ناشی از خاستگاه ماگما از یک پوسته اقیانوسی فرورانده شده، گوشته فوقانی بالای آن، تبلور تفریقی و یا آرایش ماگما با مواد پوسته‌ای باشد (Saunders et al., 1992, Nagudi et al., 2003). آرایش با مواد پوسته‌ای



شکل ۱۱. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب توده‌های نفوذی بالازرد، بهنجار شده با جبه اولیه. داده‌های جبه اولیه از (Sun and McDonough, 1989).

**Fig. 11.** Primitive-mantle-normalized trace element patterns for the Balazard intrusive rocks. Normalizing values are from Sun and McDonough (1989).



شکل ۱۲. نمودار عنکبوتی عناصر نادرخاکی توده‌های نفوذی بالازرد، بهنجارشده با REE کندریت. داده‌های کندریت از بوینتون (Boynton, 1984).

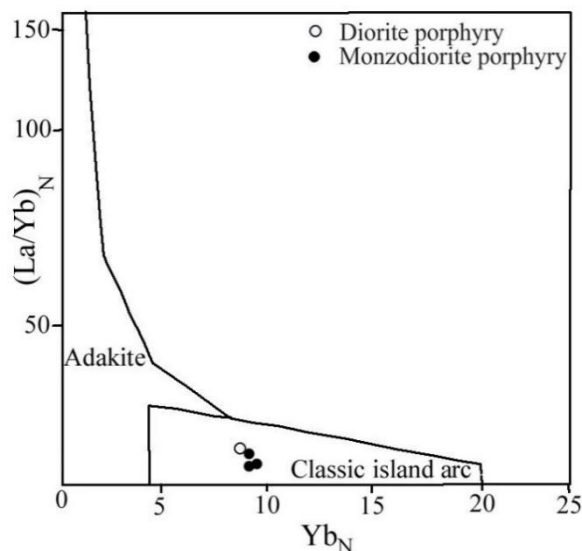
**Fig. 12.** Chondrite-normalized REE patterns for the intrusive and volcanic rocks of the Balazard district. Normalizing values are from Boynton (1984).

نفوذی بالازرد در موقعیت کمان ماگمایی نرمال واقع می‌گردند (شکل ۱۳) که این نیز بر عمق کم تشکیل ماگما دلالت دارد.

#### پذیرفتاری مغناطیسی

خصوصیات مغناطیسی سنگ با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی مشخص می‌شود. سنگ‌های گرانیتی توسط ایشی‌هارا (Ishihara, 1977) به دو گروه سری مگنتیت و سری ایلمنیت تقسیم شده‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی در بیش از ۳۰ نمونه بدون دگرسانی یا با دگرسانی کم از توده‌های نفوذی بالازرد مورد مطالعه و اندازه‌گیری قرار گرفت. میانگین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی برای هر واحد زمین‌شناسی در جدول ۲ آمده است. در مناطق با حداقل دگرسانی، بالاترین میزان پذیرفتاری  $SI^{-5}$   $10 \times 10^{-4}$  تا  $2194 \times 10^{-5}$  پایین‌ترین  $SI^{-5}$   $651 \times 10^{-5}$  می‌باشد. ایشی‌هارا مقدار پذیرفتاری مغناطیسی گرانیتوئیدهای سری مگنتیت (بعلت حضور کانی فرعی مگنتیت) را بیش از  $SI^{-5}$   $80 \times 10^{-5}$  معرفی کرد (Ishihara, 1981). براین اساس، توده‌های نفوذی منطقه بالازرد در محدوده دسته مگنتیت قرار می‌گیرند.

نمودار عناصر نادرخاکی بهنجارشده با کندریت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. غنی‌شدگی نسبی در عناصر نادرخاکی سبک نسبت به الگوی مسطح عناصر نادرخاکی متوسط و سنگین در نمونه‌ها دیده می‌شود، اما این مقدار زیاد نبوده و مقدار نسبت  $(La/Yb)_N$  نمونه‌ها ۵/۰۲ تا ۹/۷۳ می‌باشد (جدول ۱). غنی‌شدگی عناصر نادرخاکی سبک نسبت به عناصر نادرخاکی سنگین بیانگر حضور گارنت بعنوان فاز باقی‌مانده در منشاء است. الگوی عناصر نادرخاکی، شاخص ماگماهای تشکیل شده در زون فرورانش و در کمان‌های آتشفشانی کالک‌آلکانل حاشیه فعال قاره می‌باشد (Gill, 1981; Pearce, 1983; Wilson, 1989). در این نمودار، عنصر Eu ناهنجاری منفی نشان می‌دهد و مقدار  $Eu/Eu^*$  از ۰/۷۶ تا ۰/۹۶ در تغییر است. ناهنجاری منفی Eu احتمالاً بعلت برجا ماندن کانی پلاژیوکلاز بصورت تفاله در سنگ منشاء ماگما است (Faure and Mensing, 2005). باتوجه به موازی بودن روندهای وابسته به واحدهای سنگی نفوذی منطقه، می‌توان به هم‌خاستگاه بودن آن‌ها پی‌برد (Moradi et al., 2012). در نمودار مارتین (Martin, 1999) براساس  $(La/Yb)_N$  در مقابل  $Yb_N$  نمونه‌های واحدهای سنگی



شکل ۱۳. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار  $(La/Yb)_N$  در مقابل  $Yb_N$  (Martin, 1999).

Fig. 13. Plot of the Balazard intrusive rocks on  $Yb_N$  vs.  $(La/Yb)_N$  diagram (Martin, 1999).

## جدول ۲. پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی بالازرد

Table 2. Magnetic susceptibility of the Balazard intrusive rocks

Lithology	Susceptibility ( $\times 10^{-5}SI$ )
Hornblende diorite porphyry	2194
Quartz diorite porphyry	1941
Pyroxene Hornblende diorite porphyry	880
Quartz monzodiorite porphyry	964
Pyroxene Hornblende quartz diorite porphyry	651

توده‌های نفوذی بالازرد بین  $0.706387$  تا  $0.706643$  و نسبت  $^{143}Nd/^{144}Nd$  اولیه بین  $0.512458$  تا  $0.512533$  بدست آمد (جدول ۳). مقدار  $\epsilon Nd_i$  بین  $-2/15$  تا  $-3/20$  محاسبه شده است (جدول ۴). در نمودار شکل ۱۴، که براساس مقادیر  $\epsilon Nd_i$  در مقابل  $\epsilon Sr_i$  ترسیم گردیده است نمونه‌های نفوذی بالازرد در موقعیتی بین سنگ‌های با منشاء جبه‌ای و پوسته قاره‌ای

## ژئوشیمی ایزوتوپی Sr-Nd

مقدار نسبت‌های  $^{87}Sr/^{86}Sr$  اولیه و  $^{143}Nd/^{144}Nd$  اولیه در محدوده بالازرد با تجزیه نمونه سنگ کل و با استفاده از سن حاصل از نمودار ایزوکرون در محدوده اکتشافی ده‌سالم توسط ارجمندزاده و سانتوز (Arjmandzadeh and Santos, 2014) ۳۳ میلیون سال - محاسبه شده است. مقدار نسبت  $^{87}Sr/^{86}Sr$  اولیه



ده‌سلم و چاه‌شلجی که از ماگمای مشتق شده از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی با آغستگی کم در زون فرورانش تشکیل شده‌اند (Arjmandzadeh et al., 2011; Arjmandzadeh and Santos, 2014)، نشان می‌دهد که ماگمای توده‌های نفوذی بالازرد از ذوب پوسته اقیانوسی ایجاد شده و آلایش بیشتری با پوسته قاره‌ای داشته‌اند.

قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه در بازالت‌های میان‌اقیانوسی MORB که کم‌ترین آغستگی با پوسته را دارند، نسبت  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  اولیه بین ۰/۵۱۳۰ تا ۰/۵۱۳۴ می‌باشد (Arjmandzadeh et al., 2011). این مقادیر بالاتر از مقادیر بدست آمده از توده‌های نفوذی محدوده اکتشافی بالازرد است و علت آن آلایش ماگما با پوسته قاره‌ای می‌باشد. مقایسه مقادیر  $\epsilon\text{Nd}_i$  و  $\epsilon\text{Sr}_i$  توده‌های نفوذی بالازرد با توده‌های نفوذی

### جدول ۳. داده‌های ایزوتوپی Rb-Sr توده‌های نفوذی بالازرد.

Table 3. Rb-Sr isotopic data of the Balazard intrusions.

Sample	Sr (ppm)	Rb (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ Error (2s)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Error (2s)	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon\text{Sr}_i$
B11	521.0	114.1	0.634	0.018	0.706940	0.000020	0.706643	31
B20	480.2	117.2	0.706	0.020	0.706880	0.000021	0.706549	29.6
B17	648.5	45.8	0.204	0.006	0.706483	0.000013	0.706387	27.3
B12	654.3	44.8	0.198	0.006	0.706489	0.000024	0.706396	27.5

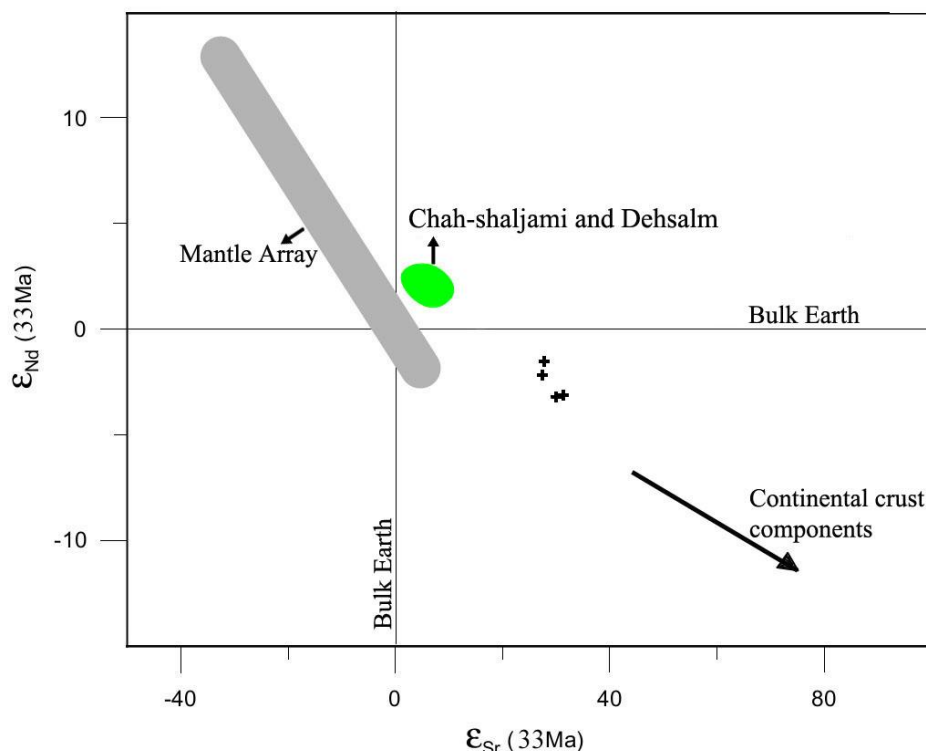
Note:  $^{87}\text{Rb}$  decay  $\lambda = 1.42 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$  (Jacobsen and Wasserburg, 1980). The initial ratio of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios were calculated an age of 33 Ma, based on the Rb-Sr data (Arjmandzadeh and Santos, 2014).

### جدول ۴. داده‌های ایزوتوپی Sm-Nd توده‌های نفوذی بالازرد.

Table 4. Sm-Nd isotopic data Balazard intrusions.

Sample	Nd (ppm)	Sm (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ Error (2s)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ Error (2s)	$\epsilon\text{Nd}_i$	TDM
B11	24.5	4.31	0.106	0.006	0.512460	0.000016	-3.10	863
B20	20.1	4.12	0.124	0.007	0.512458	0.000015	-3.20	1020
B17	13.2	3.18	0.146	0.008	0.512517	0.000017	-2.15	1193
B12	12.5	3.22	0.156	0.008	0.512533	0.000020	-1.88	1105

Note:  $^{147}\text{Sm}$  decay  $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ year}^{-1}$ ; The  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  ratios of chondrite and depleted mantle at present day are 0.512638 and 0.1967, 0.51315 and 0.2137, respectively (Jacobsen and Wasserburg, 1980). The initial ratio of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios were calculated an age of 33 Ma, based on the Rb-Sr data (Arjmandzadeh and Santos, 2014).



شکل ۱۴. موقعیت توده‌های نفوذی بالازرد در نمودار  $\epsilon_{Nd_i}$  در مقابل  $\epsilon_{Sr_i}$  داده‌های توده‌های نفوذی دهسلم از ارجمندزاده و سانتوز (Arjmandzadeh and Santos, 2014) و توده‌های نفوذی چاه‌شلجی از ارجمندزاده و همکاران (Arjmandzadeh et al., 2011).

**Fig. 14.**  $\epsilon_{Nd_i} - \epsilon_{Sr_i}$  diagram for the Balazard intrusions. Data for Dehsalm granitoid rocks from (Arjmandzadeh and Santos, 2014) and for Chah-Shaljami granitoid rocks from (Arjmandzadeh et al., 2011).

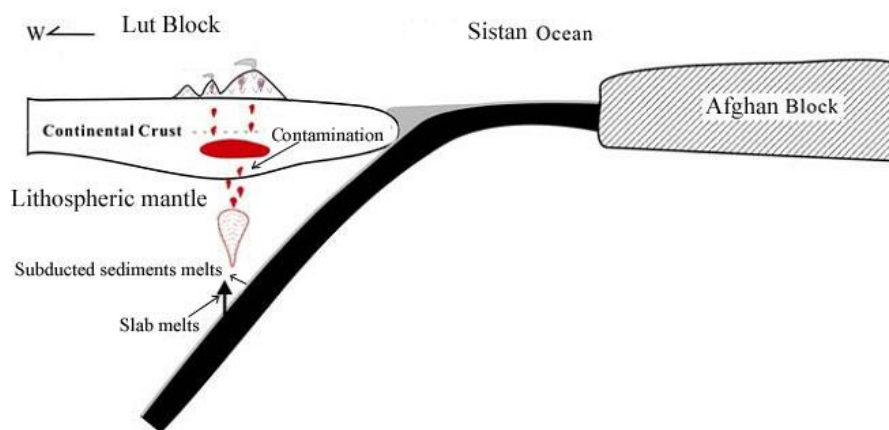
### نتیجه‌گیری

نسبت به الگوی عناصر نادرخاکی سنگین<sup>۸</sup> در کلیه توده‌های نفوذی منطقه مشاهده می‌شود که شاخص ماگماهای تشکیل شده در زون فرورانش است. ویژگی‌های ژئوشیمیایی عناصر فرعی نظیر افزایش مقادیر Rb، P و Ba و کاهش Y، Zr، Ti و Nb نشان‌دهنده آرایش ماگمای اولیه با پوسته قاره‌ای در طی صعود و جایگیری ماگما در سطوح کم‌عمق، می‌باشد. در الگوی بهنجار شده عناصر کمیاب نسبت به گوشته اولیه، غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل یون بزرگ و تهی‌شدگی در عناصر با شدت میدان زیاد، بیان‌گر ماگماتیسیم کمان‌های آتشفشانی - نفوذی حاشیه قاره است و براساس نمودارهای مختلف سنگ‌شناسی نیز

باتوجه به بررسی‌های ژئوشیمی و پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده، توده‌های نفوذی بالازرد، از نوع توده‌های نفوذی I هستند. ترکیب این توده‌ها از دیوریت تا گابرو دیوریت متغیر می‌باشد. براساس خصوصیات ژئوشیمیایی، سری ماگمایی این توده‌ها از نوع کالک‌آلکالن با پتاسیم بالا است. این توده‌ها بلحاظ شاخص آلومینیم، از نوع متاآلومینوس بوده و در کمر بند زون فرورانش تشکیل شده‌اند. مقادیر پایین Y، Nb و Zr نشان می‌دهد که سنگ‌های نفوذی منطقه بالازرد، در یک محیط کمانی شکل گرفته‌اند. غنی‌شدگی در عناصر نادرخاکی سبک<sup>۷</sup>

ماگمای تشکیل شده از ذوب پوسته اقیانوسی فرورانش شده با پوسته قاره‌ای در حین جایگیری ماگما در افق‌های بالایی می‌باشد. بعبارت دیگر قبل از جایگیری ماگما احتمالاً Nd و Sr از منابعی دیگر نظیر سنگ‌های پوسته قاره‌ای مسیر حرکت ماگما، به درون این ماگما وارد شده‌است (شکل ۱۵). بنابراین توده‌های نفوذی بالازرد در اوایل الیگوسن از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی و آغشتگی با پوسته قاره‌ای در حین جایگیری در سطوح کم عمق تر ایجاد شده‌اند.

محیط تکتونیکی منطقه بالازرد با پهنه‌های فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای مرتبط است. توده‌های نفوذی بالازرد در محدوده ماگمای کالک‌آلکانل نرمال قرار دارند. مقدار  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  اولیه توده‌های نفوذی بالازرد بیشتر از ۰/۷۰۶ و مقدار  $\epsilon\text{Nd}_i$  کمتر از ۲/۱۵- است که نشان‌دهنده آرایش این توده‌ها با پوسته قاره‌ای می‌باشد. داده‌های ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی بالازرد نشان می‌دهد که آنها در زون فرورانش تشکیل شده‌اند و بنابراین مقدار  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  اولیه و مقدار  $\epsilon\text{Nd}_i$  مربوط به آغشتگی



شکل ۱۵. طرح شماتیک از مدل احتمالی تشکیل، جایگاه تکتونیکی و برهم کنش پوسته- گوشته سنگ‌های نفوذی بالازرد.

**Fig. 15.** Schematic sketch depicts possible formation model of the tectonic setting and crust-mantle interaction of the Balazard intrusive rocks.

خیبرو، مسئول آزمایشگاه ژئوشیمی ایزوتوپی دانشگاه آویرو در خصوص آنالیز ایزوتوپهای Sr-Nd صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

#### تعارض منافع:

هیچگونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

#### قدردانی:

نویسندگان از مساعدت شرکت تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی در امر استقرار در کمپ و از مساعدت خانم سارا

- |                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| <sup>1</sup> ORG      | <sup>5</sup> HFSE |
| <sup>2</sup> Syn-COLG | <sup>6</sup> LILE |
| <sup>3</sup> WPG      | <sup>7</sup> LREE |
| <sup>4</sup> VAG      | <sup>8</sup> HREE |

## References

- Abdi, M. and Karimpour, M.H., 2013. Petrochemical characteristics and timing of Middle Eocene granitic magmatism in Kooch-Shah, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica*, 87(4) 1032–1044.  
<https://doi.org/10.1111/1755-6724.12108>
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, (in Persian) 606p.
- Akrami, A. and Naderi Mighan, N., 2005. Geological map of Dehsalm, Scale 1:100,000. Geological Surver of Iran.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J. and Homam, S.M., 2011. Sr–Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 41(3): 283–296.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.02.014>
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J.F., 2014. Sr–Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu–Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, eastern Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 103(1): 123–140.  
<https://doi.org/10.1007/s00531-013-0959-4>
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Boynnton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: P. Henderson (Editor), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63–114.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 83(1-2): 1–26. Published online by Cambridge University Press: 03 November 2011.  
<https://doi.org/10.1017/S0263593300007720>
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite type: 25 years later. *Australian Journal of Earth Science*, 48(4): 489–499.  
<https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Esmaeily, D., Nedelec, A., Valizadeh, M.V., Moore, F. and Cotton, J., 2005. Petrology of the Jurassic Shah-kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(6): 961–980.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.09.003>
- Faure, G., Mensing, T.M., 2005. *Isotopes: Principles and applications*. John Wiley and Sons, New Jersey, 928 pp.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer, New York, 390 pp.
- Griffis, A.R., Magries, H., Abedian, N. and Behrozi, A., 1991. Explanatory text of Dehsalm (Chahvak). Geological Quadrangle Map 1:250,000. No. K6, Geological Surver of Iran.
- Ishihara, S., 1977. The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *Mining Geology*, 27(145): 293–305.  
<https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu1951.27.293>
- Ishihara, S., 1981. The Granitoid Series and Mineralization. In: B.J. Skinner (Editor), *Economic Geology 75th Anniversary Issue*. Economic Geology Publishing Company, New Haven, Connecticut, pp. 458–484.  
<https://doi.org/10.5382/AV75.14>
- Jacobsen, S. B. and Wasserburg, G. J., 1980. Sm–Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1), 139–155.  
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90125-9)
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Lang Farmer, G. and Stern, C.R., 2012. U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristics, and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut block, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1–27. (in Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13391>
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H. and Stern, C.R., 2015. The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran: Geology, alteration and mineralization, fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 522–544.  
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.04.015>
- Martin, H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429.

- [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0)
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth–Science Reviews*, 37(3–4): 215–224.  
[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miri Beydokhti, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F. and Klotzli, U., 2015. U–Pb zircon geochronology, Sr–Nd geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Mahoor granitoid rocks (Lut Block, Eastern Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 192–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.028>
- Miri Beydokhti R., Karimpour M.H., Mazaheri S.A., 2014. Studies of remote sensing, geology, alteration, mineralization and geochemistry of Balazard copper-gold prospecting area, west of Nehbandan. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22(3): 459-470. (in Persian with English abstract) Retrieved March 15, 2021 from  
<http://ijcm.ir/article-1-227-fa.html>
- Moradi, M., Karimpour, M.H., Farmer, G.L. and Stern, C.R., 2012a. Sr–Nd isotopic characteristics, U–Pb zircon geochronology, and petrogenesis of Najmabad granodiorite batholith, eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 3(2): 127-145. (in Persian with English abstract)  
<https://doi.org/10.22067/ECONG.V3I2.11436>
- Nagudi, N., Koberl, Ch. and Kurat, G., 2003. Petrography and geochemistry of the Singo granite, Uganda and implications for origin. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1-2): 73-87.  
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(03\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00014-9)
- Najafi, A., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Stern, Ch. and Farmer, L., 2014. U–Pb zircon geochronology, Rb–Sr and Sm–Nd isotope geochemistry, and petrogenesis of granitoid rocks at Kaje prospecting area, northwest Ferdows: Evidence for upper Cretaceous magmatism in Lut block. *Journal of Economic Geology*, 6(1): 107-135 (in Persian with English abstract).
- Samiee, S., Karimpour, M.H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M.R., Kloetzli, U. and Santos, J.F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south  
<https://doi.org/10.22067/econg.v6i1.24415>
- Nakhaei, M., Mazaheri, S.A., Karimpour, M.H., Stern, C.R., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S. and Heydarian shahri, M.R. 2015. Geochronologic, geochemical, and isotopic constraints on petrogenesis of the dioritic rocks associated with Fe skarn in the Bisheh area, Eastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10): 8481-8495  
<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1834-3>
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (Editors), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva Publications, Nantwich, Cheshire, pp. 230–249. Retrieved June 4, 2017 from  
<http://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8626>
- Pearce, J.A., Harris, N.B. and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pearce, A. J. and Parkinson, I. J., 1993. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. *Geological Society*, 76: 373-403.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.076.01.19>
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.  
<https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- Reichew, M. K., Saunders, A. D., White, R. V., Medvedev, A. Ya. and Al M-Ukhamedov, A. I., 2005. Geochemistry and petrogenesis of basalts from the west Siberian Basin: An extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos* 79(3–4): 425-452.  
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.011>
- Rollinson, H., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Routledge, London, 384pp.  
<https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- of Birjand, Iran: Geochemical, Sr–Nd isotopic and U–Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 170-182.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.09.023>



- Saunders, A. D., Storey, M., Kent, R. W. and Norry, M. J., 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: *Magmatism and the causes of continental break-up*. Geological Society London Special Publication, 68: 41-60. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.068.01.04>
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P., 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97(3): 629–642. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629>
- Shand, S.J., 1969. *Eruptive rocks: their genesis, composition, classification and their relation to ore deposits*. John Wiley and Sons, New York, 488pp.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Publications*, 42: 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Whalen, J. B., Currie, K. L. and Chappell, B. W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 277-279. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. Unwin Hymen, London, 466pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>