

Research Article

Geology, mineralization, and geochemistry of ore and intrusive rocks in the North of Bahariyeh area, East of Kashmar, NE Iran

Fatemeh Najmi¹, Azadeh Malekzadeh Shafaroudi² , Mohammad Hassan Karimpour³ 

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, f.najmi@mail.um.ac.ir

² Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, shafaroudi@um.ac.ir

³ Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, karimpur@um.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 20 January 2022

Accepted: 28 September 2022

Keywords

Acidic-intermediate magmatism

Petrogenesis

Geochemistry

IOCG

North of Bahariyeh

Khaf-Kashmar-Bardaskan belt

Tectonic Zone



 20.1001.1.22285210.1402.14.1.5.0
 10.22108/ijp.2022.132381.1266

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Bahariyeh deposit is located in the central segment of the Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt (KKBMB), NE Iran. This belt is dominated by plutons of Kashmar batholith and associated volcanic rocks along the northern side of the Dorounh Fault and is one of the most important metallogenic provinces in Iran. Based on geochemical data carried out for the purpose of the present study, the expansion of Cu and other metals mineralization is determined, and on the basis of investigation of trace and rare earth elements behavior, the genetic-lithological relationship of the intrusive rocks is determined in the North of Bahariyeh region.

Method of study

About 80 thin sections of intrusive rocks were prepared and 10 least altered 10 samples were selected and analyzed by X-ray fluorescence (XRF; PHILIPS PW 1480) at the Analytical Laboratory of the Kansaran Binaloud Institute of Mashhad, Iran. Also, 10 samples were selected for geochemical analysis by (ICP-OES) at the Zarazma Mineral Studies Co., Mashhad, Iran.

 Corresponding Author

To cite this article: Najmi, F., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M. H. (2023) Geology, mineralization and geochemistry of ore and intrusive rocks in North of Bahariyeh area, East of Kashmar, NE Iran. *Petrological Journal*, 14(1), 109-138.

Regional Geology

Based on field observations a 1:10,000 geological map prepared from the study area, the existing rock outcrops mainly include an alternative of pyroclastic units, Eocene-Oligocene lavas, as well as subvolcanic and intrusive rocks.

Field observations show the North of Bahariyeh area is composed of dacite-rhyodacite and andesite volcanic units, and has been intruded by granodiorite, quartz monzonite, monzodiorite-diorite porphyry. These acidic-intermediate intrusive masses have a granular texture and are mainly porphyroid, which have been affected by propylitic, siliceous, argillic, and sericitic alterations. Copper mineralization is observed in the form of veins in different parts of the region, the thickness of these veins varies from about 5 mm to more than 10 cm. Two types of vein-veinlets can be distinguished in the mineralization zone of North of Bahariyeh: 1) vein-veinlets containing quartz + chalcopyrite + specularite + pyrite; 2) specularite-rich veins.

Petrography

Granodiorite: Granodiorite shows a coarse-grained granular texture with graphic and myrmekitic intergrowths. The main minerals consist of plagioclase, K-feldspar (orthoclase), quartz, hornblende, and opaque minerals. The euhedral-subhedral plagioclase and K-feldspar phenocrysts have been altered to sericite, clay minerals, epidote, and chlorite.

Monzodiorite porphyry: This unit has porphyritic and glomeroporphyritic textures with medium-grained groundmass. The monzodiorite porphyry contains up to 45-50 vol.% phenocrysts, consisting of plagioclase (15–20 vol.%), K-feldspar (10–15 vol.%), hornblende (5–7 vol.%), clinopyroxene (5–8 vol.%), and biotite (2–5 vol.%). The same minerals are also present in groundmass. Hornblende and biotite are replaced by chlorite

in some places. Also, some plagioclase and feldspar phenocrysts have been altered to sericite, chlorite, and epidote.

Quartz monzonite porphyry: The quartz monzonite porphyry has a porphyritic texture (0.1–0.2 mm) with a fine-grained groundmass and normally contains 40–45 vol.% phenocrysts that are 0.1–4 mm in diameter. It is mainly composed of plagioclase (30-35 vol.%), K-feldspar (25-30 vol.%), quartz (15–20 vol.%), and hornblende (5-10 vol.%). The same minerals are also present in groundmass.

Diorite porphyry: This unit has porphyritic and glomeroporphyritic textures, with medium-grained groundmass with phenocrysts 0.1–5 mm across, and 40-50 vol.% phenocrysts including 25-30 vol.% plagioclase and 15-20 vol.% clinopyroxene and hornblende with minor biotite and alkali feldspar. The same minerals are also present in groundmass. Its accessory minerals are quartz, zircon, and magnetite (2–3 vol.% and 0.5 mm).

Discussion

North of Bahariyeh provides important insights for reconstructing the Middle Eocene tectono-magmatic evolution of the NE of Iran. Significant outcomes of this work are:

The intrusive sequence in the North of Bahariyeh is inferred as monzodiorite porphyry, diorite porphyry, quartz monzonite, and granodiorite of middle Eocene. and all intrusive rocks belong to I-type metaluminous-peraluminous granites. Major and trace element geochemistry indicate the acidic-intermediate intrusive rocks in the North of Bahariyeh were likely generated by partial melting from the subcontinental lithospheric mantle affected by both slab-derived fluids and lower continental crustal components.

The enrichment of LILE (Ba, K, and Cs), depletion of HFSE (Nb, Ti), and the enrichment of LREE relative to HREE indicate crustal contamination and formation of the source

magmas in a subduction environment zone by low degrees of partial melting. Trace element geochemistry confirms the evolution of dioritic rocks by a partial melting process (1-5%). Geochemical results, combined with regional geological data, demonstrate a shallow mantle with a clear subduction imprint (metasomatized mantle wedge melts). The post-collisional transtensional tectonic regime favored magma genesis with decompression melting and magma rise through the well-developed fault system and the subvolcanic and intrusive units in the North of Bahariyeh area form the active continental margin-related subduction zone.

Overall, the data of the rare earth elements

of acidic-intermediate units in the area of study shows that the rocks under investigation were originated by partial melting of enriched mantle under the influence of the fluids released from the subduction blade and then under the contamination of the crust.

Acknowledgments

This study was supported by a grant from the Research Foundation of Ferdowsi University of Mashhad (Iran) (Project No. 46590.3, Date: 15 May 2018). We thank anonymous reviewers and editors for their thoughtful reviews.

زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی ماده معدنی و توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه، خاور کاشمر، شمال‌خاوری ایران

فاطمه نجمی^۱، آزاده ملک‌زاده‌شفارودی^۲، محمدحسن کریم‌پور^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، f.najmi@mail.um.ac.ir

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی خاور ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، shafaroudi@um.ac.ir

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی خاور ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، karimpur@um.ac.ir

چکیده

محدوده اکتشافی شمال بهاریه در بخش مرکزی پهنه ماگمایی خواف-کاشمر-بردسکن (KKBMB) و خاور شهرستان کاشمر در استان خراسان رضوی است. این محدوده شامل رخنمون‌هایی از واحدهای آذرآواری و آتشفشانی است که توده‌های ژرف (سینوگرانیت، گرانودیوریت) و نیمه‌ژرف (مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت و دیوریت پورفیری) در آنها نفوذ کرده‌اند. توده‌های آذرین درونی در عنصرهای LREE (عنصرهای خاکی کمیاب سبک) و LILE (عنصرهای لیتوفیل بزرگ‌یون) مانند K و Ba غنی‌شدگی و در عنصرهای HREE (عنصرهای خاکی کمیاب سنگین) و HFSE (عنصرهای با شدت میدان بالا) مانند Nb و Ti تهی‌شدگی نشان می‌دهند. این ویژگی از ویژگی‌های ماگماهای پدیدآمده در پهنه فروانش است. ناهنجاری اندک منفی Eu ($Eu/Eu^* = 0.66 - 0.89$) نشان‌دهنده حضور پلاژیوکلاز در خاستگاه سنگ است. تهی‌شدگی از Nb نشان‌دهنده آرایش اندک ماگما با پوسته قاره‌ای است. خاستگاه ماگمای سازنده این توده‌ها، ذوب‌بخشی درجه پایین اسپینل لرزولیت گوشته دگرنهاد در ژرفای نزدیک به ۶۵ کیلومتری است. کانه‌زایی به صورت رگه-رگچه‌ای با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در راستای گسل‌ها رخ داده است. دگرسانی‌های پروپیلیتیک، سیلیسی، سرب‌سیسی و آرژلیک در محدوده گسترش دارد؛ به گونه‌ای که پهنه‌های پروپیلیتیک و سیلیسی به صورت هاله‌ای در حاشیه رگه-رگچه‌ها دیده می‌شوند. کانه‌های هیپوزن شامل پیریت، کالکوپیریت و اسپیکولاریت هستند و کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت و اکسیدهای آهن از شمار کانی‌های سوپرژن هستند. دو نوع رگه-رگچه را می‌توان در این محدوده شناسایی کرد: (۱) کوارتز+کالکوپیریت+اسپیکولاریت؛ (۲) رگه-رگچه‌های غنی از اسپیکولاریت. مقدارهای فراوانی از عنصرهای مس (بیشینه ۲ درصد حجمی)، سرب (بیشینه ۰/۶۱ درصد حجمی) و روی (بیشینه ۰/۲ درصد حجمی) در رگه-رگچه‌های با کوارتز+کالکوپیریت+اسپیکولاریت یافت می‌شود. محدوده شمال بهاریه بر پایه شواهدی مانند کنترل ساختاری سامانه کانه‌زایی، نوع دگرسانی‌ها، ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی، شکل کانه‌زایی و ناهنجاری زمین‌شیمیایی احتمالاً همانند کانسارهای تیپ IOCG است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

کلید واژه‌ها

ماگماتیسیم اسیدی-حد واسط

سنگ‌زایی

زمین‌شیمی، IOCG

شمال بهاریه

کمر بند خواف-کاشمر-بردسکن

پهنه زمین‌ساختی



20.1001.1.22285210.1402.14.1.5.0

10.22108/ijp.2022.132381.1266

✉ نویسنده مسئول

استناد به این مقاله: نجمی، ف.، ملک‌زاده‌شفارودی، آ.، کریم‌پور، م. ح. (۱۴۰۲) زمین‌شناسی، کانه‌زایی و زمین‌شیمی ماده معدنی و توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه، خاور کاشمر، شمال‌خاوری ایران. پترولوژی، ۱۴(۱)، ۱۰۹-۱۳۸.



مقدمه

پهنه ماگمایی-فلززایی خواف-کاشمر-بردسکن (KKBMB)^۱ در شمال خاوری خردقاره ایران مرکزی، در جنوب افیولیت‌های سبزوار- تربت حیدریه و شمال گسل درونه جای گرفته است (شکل ۱- A). این پهنه بیشتر دربردارنده واحدهای آتشفشانی با ترکیب اسیدی- حد واسط و گاه مافیک است که توده‌های آذرین درونی باتولیتی گرانیتویدی ژرف- نیمه ژرف با ترکیب گرانیت تا دیوریت در آنها نفوذ کرده‌اند (شکل ۱- B) (Karimpour et al., 2002). بررسی‌های سن‌سنجی پیشین روی این واحدهای آذرین درونی گویای بازه سنی ۴۱ تا ۴۰ میلیون سال پیش در ائوسن است (Almasi et al., 2015; Shafaii Moghadam et al., 2015; Karimpour et al., 2017).

این پهنه پتانسیل بسیار خوبی برای اکتشاف ذخایر گوناگون اسکارنی آهن، مس- طلای پورفیری، رگه‌ای، مانتو^۲ و کانسارهای مس طلای همراه با اکسید آهن (IOCG)^۲ دارد. از مهم‌ترین رخدادهای کانه‌زایی شناخته شده در KKBMB می‌توان ذخایر اسکارنی آهن سنگان (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013; Golmohammadi et al., 2015)، طلای نوع IOCG کوه‌زر (Mazloumi et al., 2009; Karimpour et al., 2017)، توده مگنتیت- طلا دار تنورجه (Karimpour et al., 2017; Hossieni et al., 2018; al., 2006)، مس- طلای نامق (Taghadosi and Malekzadeh Shafaroudi, 2018)، رگه‌های اسپکیولاریت- طلا دار خاور کاشمر (Almasi et al., 2015) و ذخایر کائولن سرسفیدال، اوچ پلنگ و بهاریه (Almasi, 2016; Najmi et al., 2018) را نام برد.

منطقه شمال بهاریه در شمال خاوری ایران و در بخش میانی پهنه ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن جای دارد (شکل ۱- B). مساحت منطقه نزدیک به ۱۲ کیلومتر مربع است و در میان طول جغرافیایی ۲۰° ۳۷' ۵۸" تا ۲۸° ۴۲' ۵۸"

۵۸° خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۵۰° ۱۷' ۳۵" تا ۵۰° ۱۸' ۳۵" شمالی، در ۱۸ کیلومتری خاور شهرستان کاشمر جای دارد (شکل ۱- B). پیش از این، الماسی (Almasi, 2016) در پایان‌نامه دکتري خود ویژگی‌های کانی‌سازی، سنگ‌زایی و اکتشافات زمین‌شیمیایی- زمین‌فیزیکی محدوده اوچ پلنگ- سرسفیدال (خاور کاشمر) را بررسی کرده و منطقه بهاریه را معرفی کرده است. در این پژوهش گسترش کانه‌زایی مس و فلزات دیگر بر پایه داده‌های زمین‌شیمیایی مشخص می‌شود. سپس بر پایه رفتار عنصرهای اصلی، فرعی و خاکی کمیاب ارتباط ژنتیکی- لیتولوژیکی توده‌های آذرین درونی در منطقه شمال بهاریه تعیین می‌شود. در نهایت بر پایه همه ویژگی‌های زمین‌شیمیایی- پترولوژی، ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی، کانه‌زایی، خاستگاه و جایگاه زمین‌ساختی محدوده شمال بهاریه بررسی می‌شود.

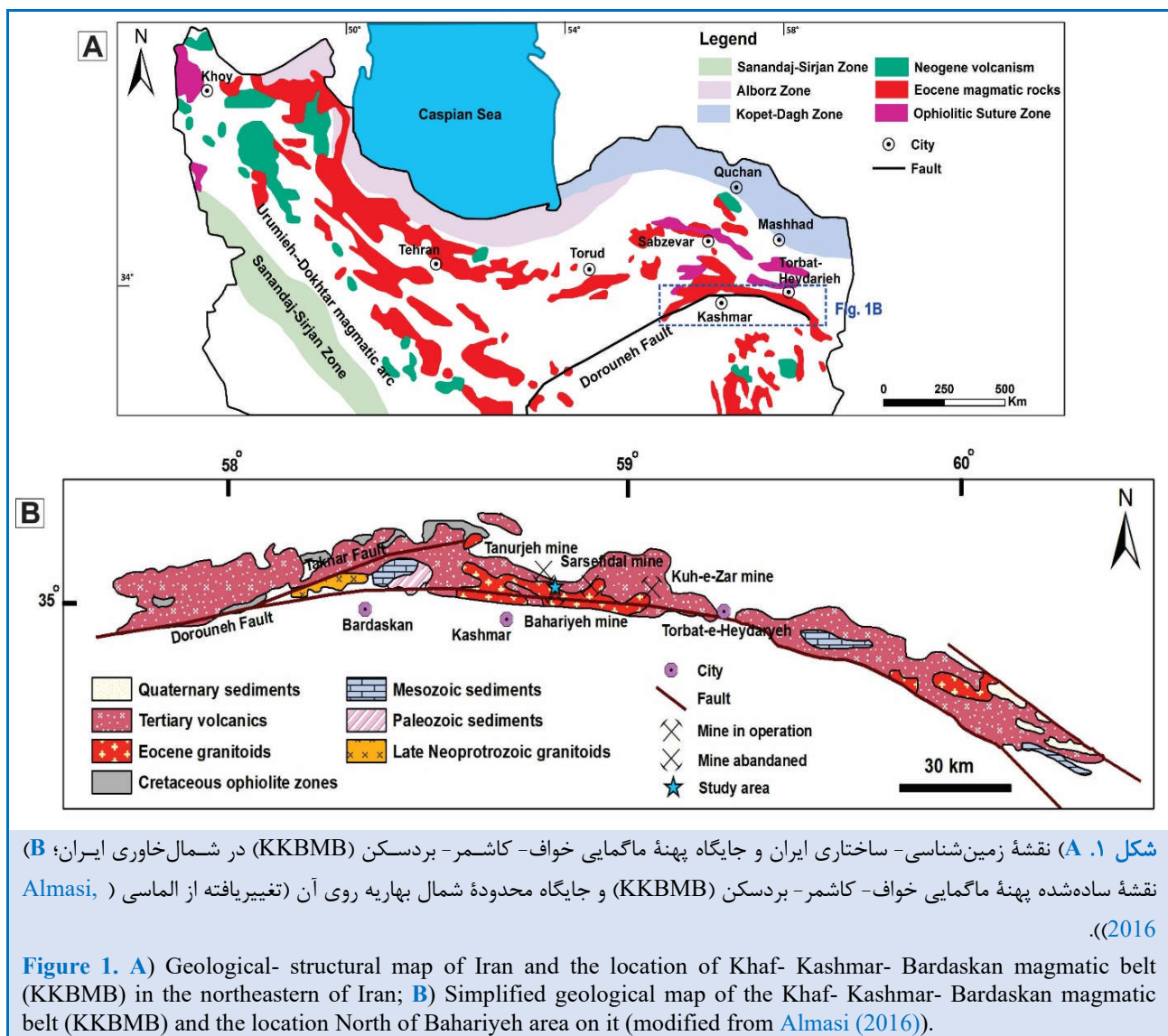
روش انجام پژوهش

در این پژوهش، همزمان با بررسی‌ها و بازدیدهای صحرایی رخنمون‌های سنگی، ترانشه‌های اکتشافی و پهنه‌های دگرسانی و کانه‌دار برداشت شد. نخست برای شناسایی و تفکیک واحدهای آذرین و بررسی ارتباط آنها، پیمایش‌های صحرایی و نمونه‌برداری بر پایه تنوع سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی این واحدها انجام شد. سپس پهنه‌های دگرسانی و کانه‌زایی برای شناخت مناطق امیدبخش و با توان کانه‌زایی و بررسی ارتباط کانه‌زایی با دگرسانی و گسل‌های محدوده مورد مطالعه برداشت شد. در پایان، از منطقه‌ای به بزرگی نزدیک به ۱۲ کیلومتر مربع، نزدیک به ۱۵۰ نمونه سنگی برداشت شد. از میان آنها، شمار ۸۰ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌شناختی و دگرسانی و شمار ۱۰ مقطع بلوک صیقلی برای شناسایی کانه‌های گوناگون آنها تهیه شد. در ادامه، با بررسی مقاطع نازک، شمار ۱۰ نمونه از سنگ‌های آذرین درونی و نیمه ژرف با کمترین میزان دگرسانی برگزیده شدند. نمونه‌های برگزیده

^۱ Khaf-Kashmar-Bardaskan magmatic belt^۲ Manto^۳ Iron Oxide Copper Gold ore deposits

شدند. افزون‌براین، شمار ۱۰ نمونه خرده‌سنگی از پهنه‌های دگرسانی و مناطق با توان کانه‌زایی در محدوده شمال بهاریه برداشت شد. تجزیه زمین‌شیمیایی عنصرهای فلزی برای نمونه‌ها، به روش ICP-OES برای ۳۴ عنصر در آزمایشگاه شرکت زرازا مشهود انجام شد. نام اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانس (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و عنصرهای فرعی پس از خردایش و آماده‌سازی، به روش XRF در شرکت کانساران بینالود (دستگاه فیلیپس مدل PW) تجزیه شیمیایی شدند. سپس این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب به روش محلول‌سازی ذوب قلیایی و با روش دستگاهی ICP-MS (طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی) در آزمایشگاه MS Analytical کشور کانادا تجزیه



گسل راستالغز درونه همخوانی نشان می‌دهد. فرایندهای ماگمایی در KKBMB به صورت فوران‌های آتشفشانی با پیدایش سنگ‌هایی مانند توف‌های خاکستری تیره و گاه ایگنمبریتی آغاز شده و با پیدایش گدازه‌های آندزیتی

زمین‌شناسی منطقه

پهنه آتشفشانی- آذرین درونی خواف- کاشمر- بردسکن با درازای بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر و پهنای نزدیک به ۹۰ کیلومتر، راستای خاوری- باختری دارد و با روند

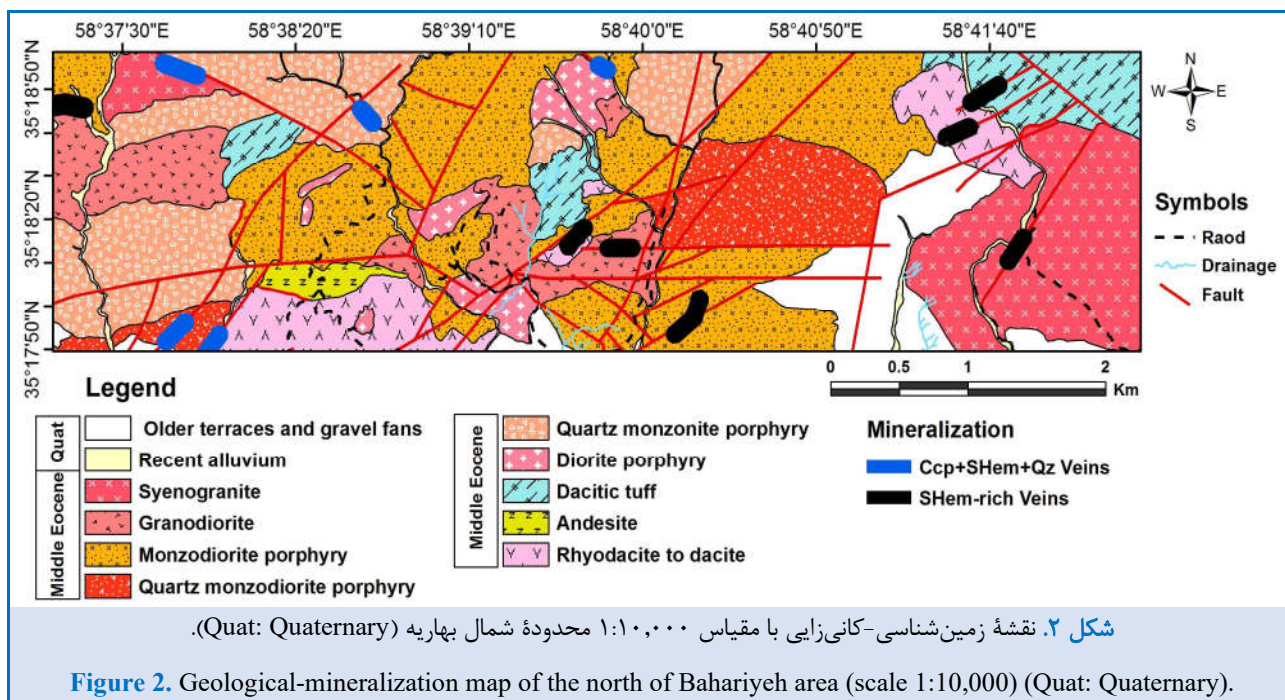
ریوداسیت تا آندزیت است و واحدهای آذرآواری شامل توف داسیتی هستند. همچنین، توده‌های آذرین درونی ژرف- نیمه ژرف منطقه حالت استوک دارند و ترکیب سنگ‌شناختی آنها شامل سینوگرانیت، گرانودیوریت، مونزونیت، مونزودیوریت و دیوریت دارند که درون گدازه‌های آتشفشانی نفوذ کرده‌اند (شکل ۲). این توده‌های آذرین درونی اسیدی- حد واسط بافت گرانولار و بیشتر پورفیروید دارند که دچار دگرسانی پروپلیتیک، سیلیسی، آرژیلیک و سرسیتی نیز شده‌اند. همچنین، رگه‌های اصلی کانه‌زایی در منطقه که از روند شکستگی‌ها و گسل‌های موجود پیروی می‌کنند درون این استوک‌های نفوذی متمرکز شده‌اند (شکل ۲). در حقیقت، کانه‌زایی به‌صورت رگه- رگچه‌ای در بخش‌های گوناگون منطقه دیده می‌شود؛ اما بیشترین تمرکز آن در بخش جنوب‌باختری منطقه است. گمان می‌رود در این منطقه، کانه‌زایی مس وابستگی بسیار نزدیکی با این توده‌های آذرین درونی دارد.

سنگ‌نگاری واحدهای آذرین درونی

سینوگرانیت:

این واحد بیشترین گسترش را در بخش خاوری و شمال‌باختری منطقه بررسی شده نشان می‌دهد (شکل ۳- A). این توده آذرین درونی بافت هیپیدئومورف گرانولار و گرافیک دارد و از کانی‌های پلاژیوکلاز، آلكالی‌فلدسپار (ارتوکلاز)، کوارتز، هورنبلند و کانی کدر ساخته شده است. پلاژیوکلاز فراوانی ۲۵-۲۰ درصد حجمی، آلكالی‌فلدسپار ۴۰-۳۵ درصد حجمی، کوارتز ۲۵-۲۰ درصد حجمی، هورنبلند ۵-۳ درصد حجمی و کانی‌های کدر ۵-۳ درصد حجمی نشان می‌دهند (شکل ۴- A). زیرکن و آپاتیت مهم‌ترین کانی فرعی موجود در این واحد است. در این واحد درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در برخی نقاط در حال جانشینی با سرسیت و کلریت و آلكالی‌فلدسپارها نیز در حال جانشینی با کانی‌های رسی هستند. همچنین، بخشی از رگه- رگچه‌های کانه‌زایی درون این واحد جای گرفته‌اند.

ادامه یافته است. سپس روی این واحدها، ضخامت بزرگی از توف‌های آندزیتی، برش‌های آتشفشانی و ایگنمبریت جای گرفته‌اند. محصول پایانی فرایندهای آتشفشانی در این زمان گدازه‌هایی با ترکیب آندزیت- تراکی آندزیت و آلكالی‌بازالت است. این فوران‌های پی‌پای آتشفشانی رخدادهای درونی (توده‌های آذرین درونی و نیمه ژرف) متناوب و معادل نیز داشته‌اند. در ادامه، باتولیت‌های گرانیتوئیدی با طیفی از گرانودیوریت، مونزوگرانیت تا آلكالی‌گرانیت و استوک‌هایی با ترکیب دیوریت، مونزودیوریت و مونزونیت درون سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های آتشفشانی مافیک- اسیدی ائوسن زیرین تا میانی بالایی نفوذ کرده‌اند. توده‌های آذرین درونی این منطقه و واحدهای آتشفشانی ممکن است معادل‌های نفوذی و بیرونی یکدیگر باشند. بررسی‌های پترولوژی و سن‌سنجی پیشین در این پهنه و ناحیه خاور کاشمر گویای آنست که توده‌های آذرین درونی اسیدی- حد واسط سرشت کالک‌آلكالین پتاسیم بالا دارند و از نوع I هستند که در زمان ائوسن میانی (۴۱-۴۰ میلیون سال پیش، سن‌سنجی به روش U- Pb روی کانی زیرکن) جایگزین شده‌اند (Almasi et al., 2015; Shafaii, Moghadam et al., 2015; Karimpour et al., 2017). محدوده اکتشافی شمال بهاریه به‌صورت مستطیلی به بزرگی نزدیک به ۱۲ کیلومترمربع در بخش شمالی معادن مس و کائولن بهاریه (شمال گسل درونه) و بخش مرکزی KKBMB جای دارد (شکل ۱- B). این منطقه در بخش شمال‌باختری برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ فیض‌آباد (Behrouzi, 1988) و جنوب‌باختری برگه ۱:۲۵۰,۰۰۰ تربت حیدریه جای دارد (Vaezi Pour and Alavi, 1992). بر پایه بررسی‌های صحرایی و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ محدوده، بیشتر رخنمون‌های سنگی شامل تناوبی از واحدهای آذرآواری، گدازه‌های ائوسن- الیگوسن و همچنین، توده‌های آذرین درونی ژرف- نیمه ژرف با ترکیب بیشتر اسیدی- حد واسط هستند (شکل ۲). بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند ترکیب بیشتر گدازه‌های آتشفشانی داسیت-



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی-کانه‌زایی با مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ محدوده شمال بهاریه (Quat: Quaternary).

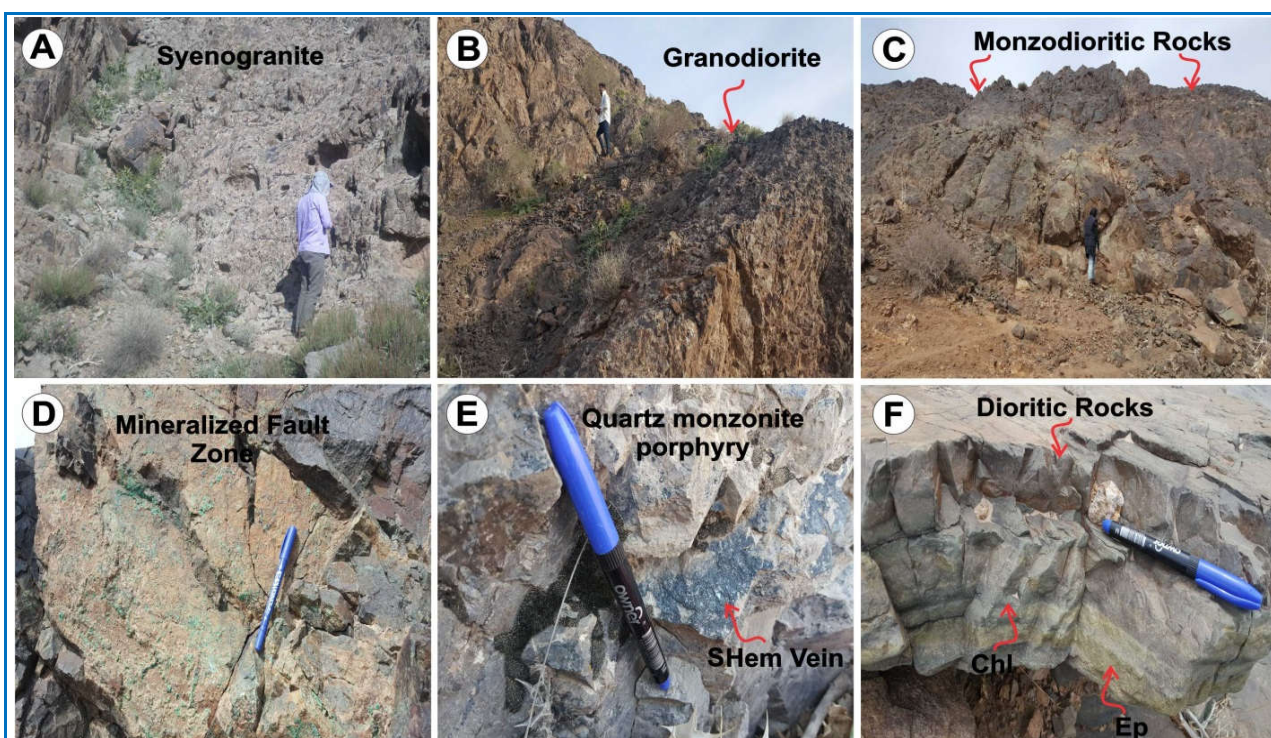
جنوبی تا باختر منطقه گسترش یافته است (شکل ۳-۳). بافت این واحد بیشتر پورفیری است و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، کوارتز، پیروکسن، هورنبلند و بیوتیت با ۵۰-۴۵ درصد حجمی کل سنگ در زمینه‌ای دانه‌ریز تا دانه‌متوسط از همین کانی‌ها جای گرفته‌اند. در این گروه سنگی، پلاژیوکلازهای کمابیش شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با فراوانی ۲۵-۲۰ درصد حجمی و آلکالی‌فلدسپار با فراوانی ۷-۵ درصد حجمی یافت می‌شوند. کوارتز با فراوانی ۳-۱ درصد حجمی، پیروکسن با ۵-۳ درصد حجمی، هورنبلند با ۴-۲ درصد حجمی، بیوتیت با ۳-۱ درصد حجمی و کانی‌های کدر نیز با فراوانی ۳-۲ درصد حجمی از دیگر کانی‌های سازنده این سنگ‌ها هستند (شکل ۴-۳). آپاتیت و مگنتیت کانی‌های فرعی این واحد هستند. پلاژیوکلاز با سرسیت، کلریت و اپیدوت و آلکالی‌فلدسپارها با کانی‌های رسی در حال جانشینی هستند. همچنین، پیروکسن و هورنبلندهای نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار به کلریت دگرسان شده‌اند. افزون‌بر این، برخی از رگه-رگچه‌های کانه‌دار در این واحد دیده می‌شوند.

گرانودیوریت:

این واحد در بخش مرکزی و باختری محدوده بررسی شده رخنمون یافته است (شکل ۳-۳). این واحد بافت بیشتر هیپیدئومورف گرانولار دارد و گاهی بافت‌های گرافیک و میرمیکیتی نیز در آن دیده می‌شوند. کانی‌های سازنده بیشتر شامل پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار (ارتوکلاز)، کوارتز، هورنبلند و کانی‌های کدر است. پلاژیوکلاز با فراوانی ۴۰-۳۵ درصد حجمی و اندازه ۳-۱ میلیمتر، آلکالی‌فلدسپار نوع ارتوکلاز با فراوانی ۲۰-۱۵ درصد حجمی و اندازه کمتر از ۲ میلیمتر، کوارتز با فراوانی ۳۵-۲۵ درصد حجمی، هورنبلند با فراوانی کمتر از ۲ درصد حجمی و کانی‌های کدر هم فراوانی ۳-۱ درصد حجمی دیده می‌شوند (شکل ۴-۳). آپاتیت، زیرکن و مگنتیت کانی‌های فرعی این سنگ‌ها هستند. در بخش‌هایی از این سنگ‌ها، بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز که ماکل پلی‌سینتیک دارند، همراه با آلکالی‌فلدسپارها، در حال جایگزینی با کلریت، اپیدوت، سرسیت و کانی‌های رسی هستند.

مونزودیوریت پورفیری:

این واحد بزرگ‌ترین توده رخنمون یافته در منطقه شمال بهاریه است که بیشتر در بخش‌های شمالی-



شکل ۳. تصویری از رخنمون توده‌های آذرین درونی منطقه شمال بهاریه. (A) رخنمون صحرایی واحد سینوگرانیت؛ (B) نمای از واحد گرانودیوریت (دید رو به شمال)؛ (C) رخنمون واحد مونزودیوریت پورفیری (دید رو به شمال باختری)؛ (D) واحد کوارتز مونزودیوریت پورفیری همراه با رگه‌های کانی‌زایی درون ساختار گسلی؛ (E) رگه غنی از اسپیکولاریت (هماتیت اسپیکولار یا SHem) درون واحد کوارتز مونزونیت پورفیری؛ (F) واحد دیوریت پورفیری با دگرسانی پروپلیتیک (اپیدوت+کلریت).

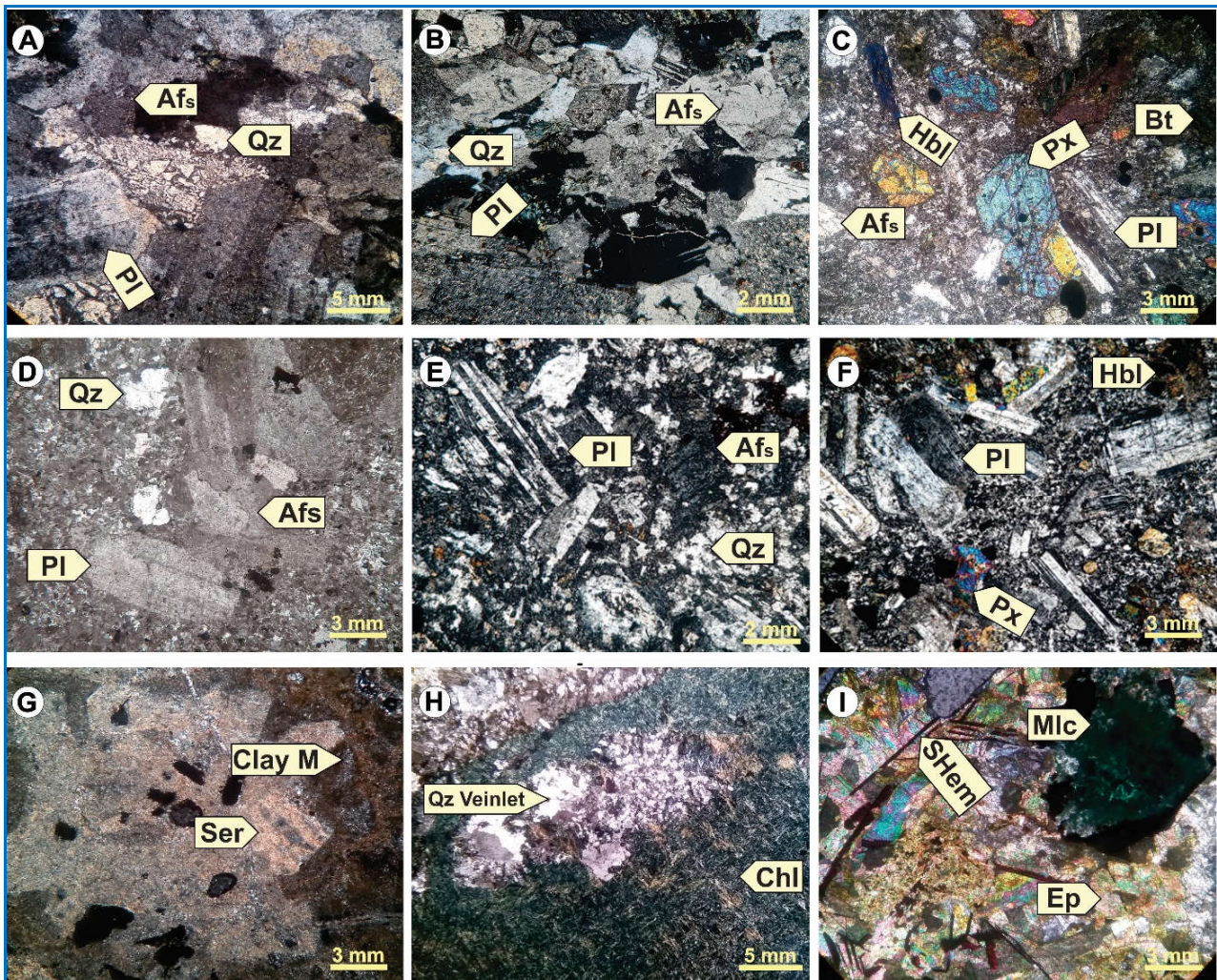
Figure 3. Field photographs of intrusive rocks in the north of Bhariyeh area. **A)** Outcrops of syenogranite unit; **B)** A view of granodiorite unit (northward view); **C)** Monzodiorite porphyry outcrop (northwestward view); **D)** Quartz monzonite porphyry unit with mineralization veins in the fault structure; **E)** Specularite (Specular hematite or SHem) vein within quartz monzonite porphyry unit; **F)** Diorite porphyry unit with propylitic alteration (epidote+chlorite).

کوارتز مونزونیت پورفیری:

این واحد در بخش‌های شمالی و شمال‌باختری-جنوب‌باختری منطقه گسترش یافته است (شکل ۳- E). بافت آن بیشتر پورفیری است و دربردارنده درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و کانی کدر است. از مجموع ۵۰ درصد حجمی درشت‌بلورهای سازنده این واحد، پلاژیوکلاز با فراوانی ۲۵-۲۰ درصد حجمی، کوارتز با فراوانی ۱۲-۱۰ درصد حجمی، آلکالی‌فلدسپار با فراوانی ۷-۵ درصد حجمی و کانی کدر با فراوانی کمتر از یک درصد حجمی است (شکل ۴- E). آپاتیت، زیرکن و مگنتیت هم از مهم‌ترین کانی‌های فرعی در این توده نیمه‌زرف هستند. پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار نیز با اپیدوت و کانی‌های رسی جایگزین شده‌اند. افزون‌براین، بخشی از رگه-رگه‌های کانه‌زایی درون این واحد یافت می‌شوند.

کوارتز مونزودیوریت پورفیری:

این واحد به صورت استوک‌های کمابیش کوچک در بخش‌های مرکزی و جنوب‌باختری منطقه شمال بهاریه رخنمون یافته است (شکل ۳- D). واحد یادشده بافت پورفیری با زمینه دانه‌ریز دارد و درشت‌بلورهای آن ۵۰ درصد حجمی حجمی کل سنگ را دربر می‌گیرند. این گروه سنگی دربردارنده درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز با فراوانی ۲۵-۲۰ درصد حجمی، کوارتز با فراوانی ۱۲-۱۰ درصد حجمی، آلکالی‌فلدسپار با ۷-۵ درصد حجمی و کانی کدر کمتر از یک درصد حجمی است (شکل ۴- D). کانی فرعی این واحد نیز آپاتیت است. در این توده پلاژیوکلازها با اپیدوت و کلریت و آلکالی‌فلدسپار با کانی‌های رسی جایگزین شده‌اند.



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی (در XPL) از توده‌های آذرین درونی رخنمون یافته در محدوده شمال بهاریه. **A)** واحد سینوگرانیت و هم‌رشدی کوارتز و آلکالی‌فلدسپار که بافت گرافیک را پدید آورده است، همراه با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز؛ **B)** واحد گرانودیوریت با درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و کوارتز با بافت گرانولار؛ **C)** واحد مونزودیوریت پورفیری که در آن درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن در زمینه‌ای پورفیری جای گرفته‌اند؛ **D)** حضور پلاژیوکلاز، کوارتز و آلکالی‌فلدسپار در واحد کوارتز مونزودیوریت پورفیری؛ **E)** واحد کوارتز مونزونیت پورفیری و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و کوارتز؛ **F)** واحد دیوریت پورفیری و حضور پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن در زمینه دانه‌ریز؛ **G)** دگرسانی آلکالی‌فلدسپارها به کانی رسی همراه با جایگزینی پلاژیوکلاز با سرسیت؛ **H)** همراهی رگچه سیلیسی (کوارتز ثانویه) و کلریتی توام با یکدیگر؛ **I)** تجزیه درشت‌بلور پلاژیوکلاز به اپیدوت همراه با کانه‌زایی ملاکیت و بلورهای سوزنی اسپیکولاریت.

Figure 4. Photomicrographs (in XPL) in the north of Bahariyeh intrusive units. **A)** Synogranite unit and co-growth of quartz and alkali feldspar, which created the graphic texture with plagioclase crystals; **B)** Granodiorite unit with plagioclase, alkali feldspar and quartz crystals contain granular texture; **C)** Monzodiorite porphyry unit in which plagioclase, alkali feldspar, hornblende, biotite and pyroxene crystals are located in the porphyry field; **D)** Presence of plagioclase, quartz and alkali feldspar in quartz monzodiorite porphyry unit; **E)** Quartz monzonite porphyry unit and plagioclase, alkali feldspar and quartz crystals; **F)** Diorite porphyry unit and presence of plagioclase, hornblende and pyroxene in a fine-grained groundmass; **G)** Alkali feldspar altered into clay minerals associated with alteration of plagioclase into sericite; **H)** Association of silica veins (secondary quartz) and chlorite with each other; **I)** Decomposition of plagioclase phenocryst into the epidote along with malachite mineralization and needle specularite.

دیوریت پورفیری:

این واحد به صورت دو استوک کوچک از شمال تا جنوب منطقه بهاریه رخمون یافته است (شکل ۳-F). این واحد بافت پورفیری و گلوپورفیری دارد و درشت بلورهای آن در زمینه‌ای دانه ریز تا دانه متوسط جای گرفته‌اند. درشت بلورهای سازنده این واحد نزدیک به ۵۰ درصد حجمی کل سنگ را در بر می‌گیرند و شامل پلاژیوکلاز با فراوانی ۳۰-۲۵ درصد حجمی، پیروکسن با فراوانی ۱۰-۸ درصد حجمی، هورنبلند با فراوانی ۶-۴ درصد حجمی و کوارتز، بیوتیت، آلکالی فلدسپار با فراوانی کمتر از ۴ درصد حجمی هستند (شکل ۴-F). در زمینه نیز کانی‌هایی همانند درشت بلورها دیده می‌شوند. آپاتیت و مگنتیت مهم‌ترین کانی‌های فرعی سازنده سنگ هستند. پلاژیوکلازها با اپیدوت و سرسیت جایگزین شده‌اند. همچنین، هورنبلندهای نیمه شکل دار تا شکل دار در حال جانشینی با کلریت، اپیدوت و گاه کلسیت هستند. همچنین، بخشی از رگه-رگچه‌های کانه‌زایی درون این واحد سنگ هستند.

دگرسانی

بررسی‌های صحرایی و بررسی‌های سنگ‌نگاری روی مقاطع نازک و صیقلی نشان‌دهنده گسترش چشمگیر دگرسانی گرمایی در منطقه شمال بهاریه است. بر این اساس، چهار دگرسانی اصلی پروپلیتیک (کلریتی-اپیدوتی)، سیلیسی، آرژیلیک و سرسیتی در منطقه بررسی شده شناسایی شد که شدت و گسترش آنها در بخش‌های گوناگون منطقه متغیر است. دگرسانی‌های آرژیلیک-سرسیتی در محدوده شمال بهاریه گسترش کمی دارد و شدت آنها از ضعیف تا متوسط در نوسان است. در واحدهای سینوگرانیت و گرانودیوریت، این دگرسانی‌ها جایگزینی پلاژیوکلازها (۲۰-۱۵ درصد حجمی) با کانی‌های رسی و (۱۰-۵ درصد حجمی) سرسیت را در پی داشته‌اند (شکل ۴-G).

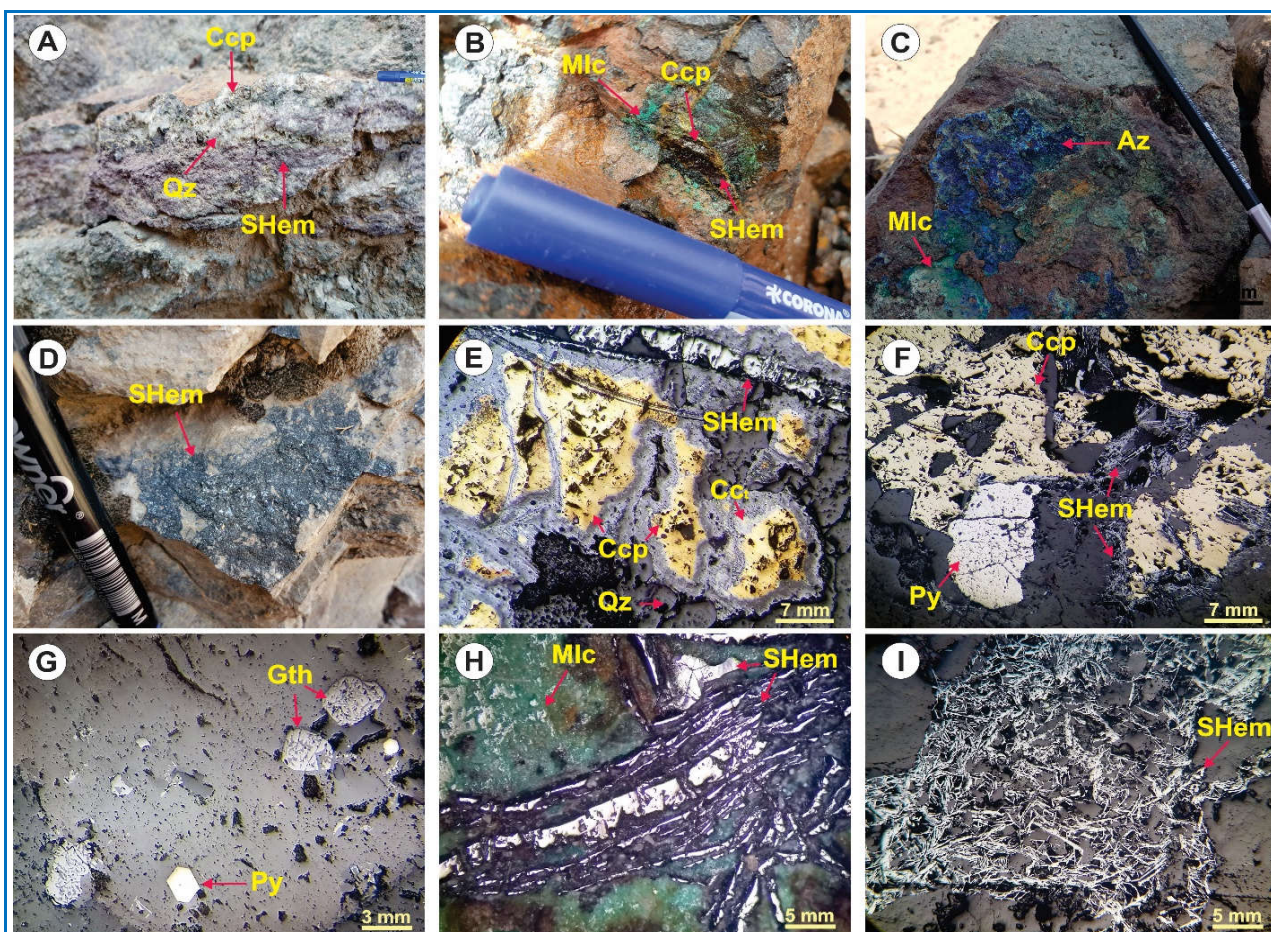
دگرسانی سیلیسی و پروپلیتیک روی بیشتر واحدهای مونوزودیوریتی تا دیوریتی تأثیر گذاشته است. دگرسانی سیلیسی به صورت سیلیس تجمعی (افزوده شده به زمینه سنگ) و رگه-رگچه‌ای دیده می‌شود و در بسیاری بخش‌ها با کلریت همراه است. (شکل ۴-H). در این نوع دگرسانی دانه‌های کوارتز به صورت نیمه شکل دار و بیشتر بی شکل در

بسیاری بخش‌ها و به ویژه اطراف رگه‌های کانه‌زایی دیده می‌شود. در محدوده بررسی شده، دگرسانی پروپلیتیک ضعیف تا متوسط نیز گسترش چشمگیری نسبت به دیگر دگرسانی‌ها دارد. در این نوع دگرسانی، پلاژیوکلاز (۱۵-۱۰ درصد حجمی) به کلریت (۲۵-۲۰ درصد حجمی) و اپیدوت تجزیه شده است (شکل‌های ۴-G و ۴-I). همچنین، کانی‌های مافیک مانند هورنبلند و پیروکسن نیز به کلریت، کربنات، اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن دگرسان شده‌اند. بیشتر دگرسانی‌های پروپلیتیک و سیلیسی در حاشیه رگه‌های کانه‌زایی گسترش دارند و در بسیاری بخش‌ها با روند کانه‌زایی همراه هستند. بر پایه بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی و روابط کانه‌نگاری گمان می‌رود دگرسانی‌های سیلیسی و پروپلیتیک ارتباط نزدیکی با پیدایش کانسنگ در محدوده شمال بهاریه دارند.

کانه‌زایی

کانه‌زایی در منطقه شمال بهاریه پراکندگی چشمگیری دارد و بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای، استوک ورک مانند درون توده‌های درونی-نیمه ژرف اسیدی تا حد واسط رخ داده است. به گفته دیگر، عملکرد گسل‌ها مهم‌ترین عامل رخداد کانه‌زایی درون این واحدهاست و ارتباط صحرایی و ساختاری کانه‌زایی با این توده‌ها کاملاً مشخص است. کانه‌زایی در این منطقه از روند کلی گسل‌ها پیروی می‌کند و رگه-رگچه‌های کانه‌دار در راستای گسل‌هایی با روند شمال باختری-جنوب خاوری و شمال خاوری-جنوب باختری رخ داده‌اند (شکل ۲). ضخامت این رگه-رگچه‌ها در مقیاس صحرایی و میکروسکوپی از نزدیک به ۵ میلیمتر تا بیش از ۱۰ سانتیمتر متغیر است و درازای آنها در برخی مناطق به بیش از ۵ متر نیز می‌رسد. کانه‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، اسپیکولاریت و کانه‌های ثانویه نیز شامل کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت و اکسیدهای آهن هستند (شکل‌های ۵-A تا ۵-I). بر پایه سامانه رگه-رگچه‌ای و نوع کانه‌ها می‌توان دو نوع رگه-رگچه را در پهنه کانه‌زایی شمال بهاریه شناسایی کرد (شکل ۲):

- (۱) رگه-رگچه‌های دارای کوارتز+کالکوپیریت+اسپیکولاریت±پیریت (شکل‌های ۵-A، ۵-B و ۵-C)؛
- (۲) رگه-رگچه‌های غنی از اسپیکولاریت (شکل ۵-D).



شکل ۵. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی (در نور PPL بازتابی) از انواع رگه- رگچه‌ها و کانه‌ها در محدوده شمال بهاریه. **(A)** رخنمون رگه- رگچه واجد کوارتز، کالکوپریت و اسپکیولاریت؛ **(B)** رگه- رگچه‌های با کوارتز، کالکوپریت و اسپکیولاریت همراه با مالاکیت؛ **(C)** رگه- رگچه با کانی ثانویه مالاکیت و آزوریت؛ **(D)** رگه- رگچه‌های غنی از اسپکیولاریت؛ **(E)** نمایی از کالکوپریت در حال جانشینی با کالکوسیت همراه با رگه- رگچه اسپکیولاریت؛ **(F)** همراهی کالکوپریت، پیریت، اسپکیولاریت درون رگه‌ها؛ **(G)** نمایی از کانه شکل‌دار پیریت و جایگزینی پیریت با گوتیت؛ **(H)** رگه- رگچه‌های با اسپکیولاریت همراه با مالاکیت؛ **(I)** بلورهای سوزنی و تیغه‌ای اسپکیولاریت.

Figure 5. Field and microscopic (in PPL reflected light) photos of all types of vein-veinlets and ores in the north of Bahariyeh area. **(A)** An outcrop of vein- veinlets containing quartz, chalcopryite and specular hematite; **(B)** Quartz, chalcopryite, specularite vein- veinlets along with malachite; **(C)** Vein-veinlets containing malachite and azurite as the secondary minerals; **(D)** Specularite rich vein-veinlets; **(E)** Chalcopryite altered into chalcocite along with specularite vein-veinlets; **(F)** Accompanying chalcopryite, pyrite, specular hematite in the veins; **(G)** A view of euhedral pyrite and alteration of pyrite into goethite; **(H)** Specularite vein-veinlets with malachite; **(I)** Needle and bladed shape specularite.

اکسیداسیون کالکوپریت‌ها از حاشیه در حال جانشینی با کالکوسیت (۱۰-۵ درصد حجمی) و مالاکیت و آزوریت (بیش از ۹۰ درصد حجمی) هستند (شکل‌های E-۵ و F-۵). پیریت دیگر کانه سولفیدی با فراوانی کمتر از ۵ درصد حجمی است که به صورت افشان و پراکنده درون این رگه- رگچه‌ها یافت می‌شود. اندازه دانه‌های آن از کمتر ۰/۱ تا یک میلی‌متر

در رگه- رگچه‌های نوع اول کالکوپریت اصلی‌ترین و فراوان‌ترین کانه سولفیدی در این ساختارها به‌شمار می‌رود. این کانه با فراوانی نزدیک به ۳۰ تا ۳۵ درصد حجمی به‌صورت بی‌شکل و بیشتر توده‌ای و پراکنده درون رگه- رگچه‌ها دیده می‌شود و اندازه دانه‌های آن از نزدیک به ۱ تا ۵ میلی‌متر متغیر است. افزون‌براین، به‌دنبال رخداد فرایند هوازدگی و

از آن کالکوپیریت، اسپیکیولاریت و کوارتز نیز پدید آمده‌اند. در پایان، کانی‌های ثانویه کالکوسیت، مالاکیت، آزرویت و گوتیت در این رگچه‌ها پدیدار شده‌اند. در **شکل ۶** توالی پاراژنی کانی‌های اولیه و ثانویه در این نوع رگه-رگچه‌ها نشان داده شده است.

در رگه-رگچه‌های غنی از اسپیکیولاریت نیز تنها بلورهای سوزنی و تیغه‌ای اسپیکیولاریت دیده می‌شود که همه حجم رگه-رگچه‌ها را دربر گرفته است. در این رگه-رگچه‌ها اسپیکیولاریت‌های اولیه به‌صورت تجمعی و توده‌ای همروند با راستای گسل‌های منطقه دیده می‌شوند (**شکل ۵- I**).

متغیر است و در برخی بخش‌ها در حال جانشینی با گوتیت و دیگر کانی‌های آهن‌دار است (**شکل ۵- G**). کوارتز نیز مهم‌ترین کانی باطله همراه با کانه‌ها در رگه-رگچه‌های گروه نخست است که گاهی در نزدیک به ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی حجم آنها را پر کرده است. اسپیکیولاریت فراوان‌ترین کانه اکسیدی موجود در محدوده شمال بهاریه است. این کانه با آگرکات سوزنی شاخص خود در این رگه-رگچه‌ها فراوانی ۳۰ تا ۳۵ درصد حجمی دارد و اندازه آنها نیز از ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر در تغییر است (**شکل ۵- H**). در این نوع رگچه‌ها، نخست پیریت به‌صورت پراکنده پدید آمده است و پس

Stage	Hypogene		Oxidized zone
Minerals	Early	Late	
Pyrite	-----		
Specular hematite		-----	
Chalcopyrite		-----	
Quartz	-----		
Goethite			-----
Malachite			-----
Azurite			-----
Chalcocite			-----

شکل ۶. توالی پاراژن کانی‌های اولیه و ثانویه در رگه-رگچه‌های دارای کوارتز+کالکوپیریت+هماتیت اسپیکولار (اسپیکیولاریت)±پیریت محدوده شمال بهاریه.

Figure 6. Paragenetic assemblages of primary and secondary minerals in vein-veinlets contain quartz+chalcopyrite+specular hematite±pyrite.

کوارتز، میزان مس از ۶۹۳ تا ۲۰۴۰۴ گرم در تن (میانگین: ۱۰۴۷۵ گرم در تن)، نقره از ۰/۳۷ تا ۲۲۴ گرم در تن (میانگین: ۴۷ گرم در تن)، سرب از ۳۰ تا ۶۱۰۴ گرم در تن (میانگین: ۱۸۴۸ گرم در تن)، روی ۲۸۰ تا ۱۸۸۴ (میانگین: ۷۶۲ گرم در تن) و آهن از ۱۸۰۰ تا ۸۹۳۵۰ (میانگین: ۳۵۵۶۶ گرم در تن) متغیر است (**جدول ۱**). افزون بر این، در رگه-رگچه‌های غنی از اسپیکیولاریت، مقدار مس از ۲۳ تا ۱۱۷ گرم در تن (میانگین: ۶۷ گرم در تن)، نقره ۰/۲ تا ۰/۳۸ گرم در تن (میانگین: ۰/۲۸ گرم در

زمین‌شیمی ماده معدنی

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، ۱۰ نمونه خرده سنگی به نمایندگی از پهنه‌های گوناگون کانه‌زایی در محدوده شمال بهاریه (**جدول ۱**) برگزیده و به روش ICP-OES برای سنجش عیار عنصرهای فلزی کانسار تجزیه شیمیایی شدند. بر پایه داده‌های به‌دست‌آمده عیار بیشینه، کمینه و میانگین برای عنصرهای Fe, As, Mo, Zn, Pb, Ag, Cu و در هر دو نوع رگه-رگچه به‌دست آورده شدند. بدین‌گونه در رگه-رگچه‌های دارای کالکوپیریت+اسپیکیولاریت+

سرب و روی دار درون این نوع رگه- رگچه‌ها دیده نشد. از سوی دیگر، میزان عنصرهای یادشده درون رگه- رگچه‌های غنی از اسپیکولاریت به شدت کاهش می‌یابد و تنها عنصر آهن بی‌هنجاری چشمگیری نشان می‌دهد. حضور کانی اسپیکولاریت درون این رگه- رگچه‌ها مهم‌ترین عامل بالابودن میزان آهن است. بر پایه داده‌های به دست آمده، ارتباط مشخص و معناداری میان عنصرهای دو تیپ رگه- رگچه دیده نمی‌شود. در پایان، بر پایه داده‌های به دست آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی هردو تیپ رگه- رگچه، بیشترین تمرکز عنصر مس درون رگه- رگچه‌های با کالکوپیریت+ اسپیکولاریت+ کوارتز در بخش جنوب‌باختری منطقه است (نمونه‌های BH-78، BH-97 و BH-99).

تن، سرب ۱۱ تا ۲۶ گرم در تن (میانگین: ۱۹ گرم در تن)، سرب ۲۴ تا ۱۷۵ گرم در تن (میانگین: ۶۸ گرم در تن) و آهن از ۳۱۲۲۹ تا ۵۸۰۱۱ گرم در تن (میانگین: ۴۴۸۷۷ گرم در تن) است (جدول ۱). بر پایه داده‌های به دست آمده، بیشترین میزان مس، نقره، سرب و روی درون رگه- رگچه‌های با کالکوپیریت+ اسپیکولاریت+ کوارتز شناسایی شد. این حجم بالا از عنصرهایی مانند مس به فراوانی کانی‌های اولیه کالکوپیریت و ثانویه مالاکیت و آزوریت درون این رگه- رگچه‌ها مربوط است. بیشتر این رگه- رگچه‌های در بخش‌های شمالی، باختری و جنوب‌باختری محدوده شمال بهاریه متمرکز شده‌اند (شکل ۲). افزون بر این، هیچ شواهدی از کانی‌های اولیه و ثانویه =

جدول ۱. داده‌های زمین‌شیمیایی برخی عنصرها (بر پایه ppm) در نمونه‌های خرده‌سنگی محدوده شمال بهاریه به روش ICP-OES.

Table 1. The geochemical data of some elements (in ppm) in the chip composite samples in the north of Bahariyeh area by using ICP-OES method.

Sample No.	Location	Type of vein-veinlet	Cu	Fe	Ag	Mo	Pb	Zn	As
BY- 51	X: 58° 39' 49" Y: 35° 18' 52.4"	Ccp+SHem+Qz	2017	89350	0.37	0.79	42	1012	2.5
BH- 61	X: 58° 37' 46" Y: 35° 17' 55"	Ccp+SHem+Qz	4850	7100	0.57	11.4	30	363	3.1
BH- 78	X: 58° 38' 40" Y: 35° 18' 42"	Ccp+SHem+Qz	14519	36457	2.9	109	3544	1884	3.3
BH- 97	X: 58° 37' 42.2" Y: 35° 17' 53"	Ccp+SHem+Qz	20404	12913	224	1.2	1147	707	100
BH- 99	X: 58° 37' 54.4" Y: 35° 17' 50"	Ccp+SHem+Qz	20364	65774	4.7	46.7	223	280	10
BH- 101	X: 58° 37' 47.4" Y: 35° 18' 54"	Ccp+SHem+Qz	693	1800	50.4	4.4	6104	328	22
BR- 23	X: 58° 41' 30" Y: 35° 18' 36"	SHem- rich	117	31229	0.28	1.28	11	24	2.3
BR- 46	X: 58° 41' 48" Y: 35° 18' 12"	SHem- rich	41	46889	0.2	0.77	16	32	2.4
BR- 47	X: 58° 41' 44" Y: 35° 18' 10"	SHem- rich	23	43380	0.26	0.64	26	42	2.8
BY- 60	X: 58° 39' 1.6" Y: 35° 18' 3.1"	SHem- rich	85	58011	0.38	1.2	24	175	11.7

پیشنهاد شده است. این داده‌ها شامل مجموع مقادیر K_2O و Na_2O (مجموع عنصرهای آلکان، TA) و مقدار SiO_2 (S) هستند.

زمین‌شیمی توده‌های آذرین درونی

داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی اکسیدهای اصلی، عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب برای رخنمون‌های آذرین درونی در محدوده شمال بهاریه در جدول ۲ آورده شده‌اند. برای نام‌گذاری سنگ‌های آذرنی درونی نمودارهای بسیاری بر پایه ترکیب شیمیایی آنها

جدول ۲. داده‌های شیمیایی عنصرهای اصلی (بر پایه درصدوزنی، به روش XRF)، کیمیا و خاکی کیمیا (بر پایه ppm، به روش ICP-MS) در توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه.

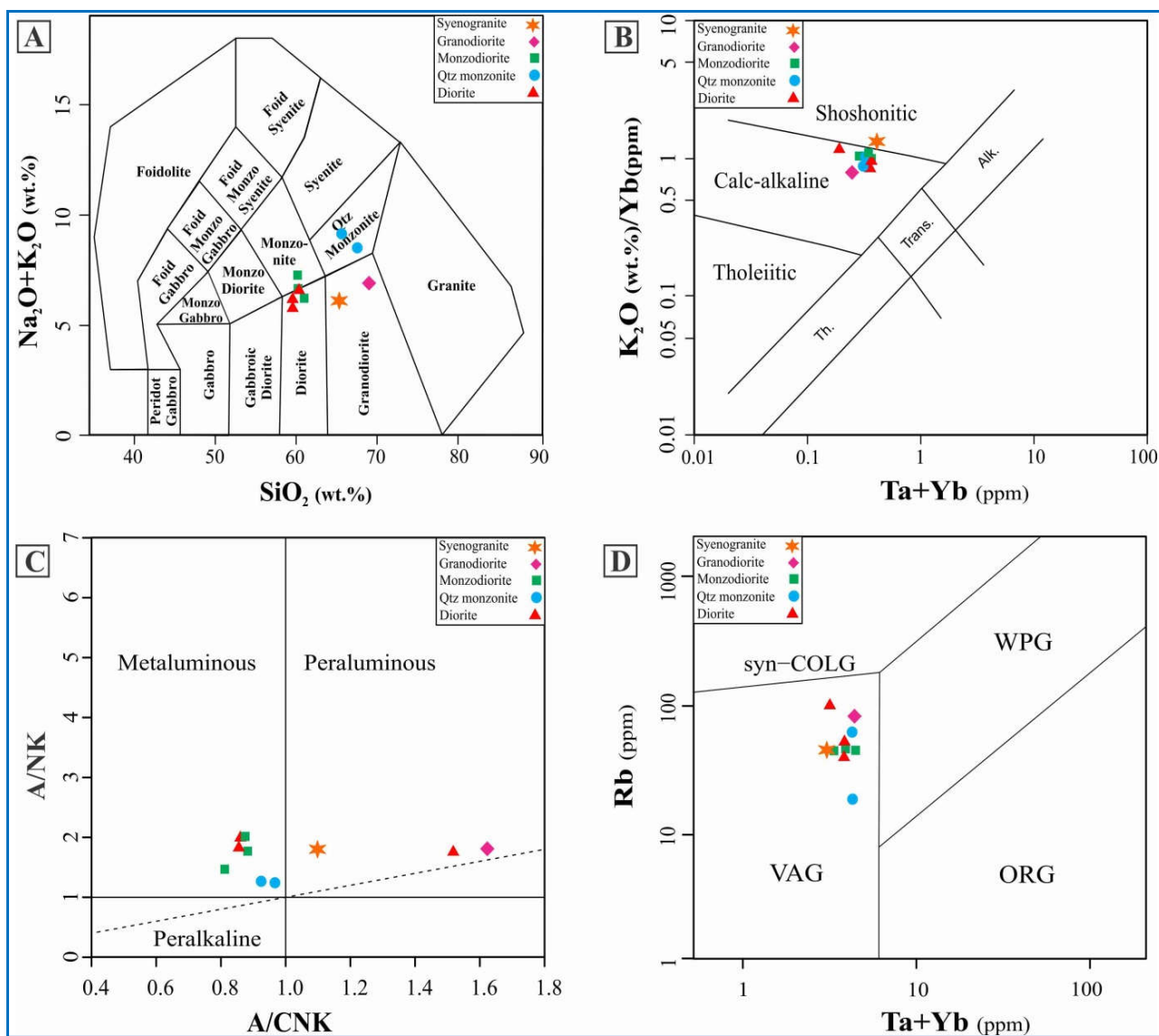
Table 2. The chemical data of the major elements (in wt% by XRF method), trace and rare earth elements (in ppm, by ICP- MS method) in the intrusions in the north of Baharieh area.

Rock type	Syenogranite	Granodiorite	Monzodiorite porphyry			Quartz monzonite porphyry		Diorite porphyry		
Longitude	58°42'05"	58°37'27"	58°39'35"	58°39'21"	58°40'20.4"	58°37'30.4"	58°38'34.2"	58°38'05"	58°39'5.3"	58°39'51"
Latitude	35°18'11"	35°18'28"	35°18'15.4"	35°18'26.4"	35°18'1.55"	35°18'3.5"	35°18'47.3"	35°18'00"	35°18'23.4"	35°18'48.6"
Sample No.	BR- 43	BH- 102	By- 4	By- 66	BR- 79	BA- 69	BH- 82	BH- 14	BH- 64	BY- 49
SiO ₂	63.66	67.21	58.37	58.41	59.41	65.54	63.73	55.34	58.76	58.62
TiO ₂	0.44	0.57	0.83	0.75	0.75	0.73	0.67	0.84	0.77	0.76
Al ₂ O ₃	14.95	16.43	14.66	15.1	15	14.5	15.12	15.05	14.97	15.01
Fe ₂ O _{3t}	7.31	4.46	8.67	8.53	8.11	4.48	5.8	8.55	8.96	8.78
MnO	0.09	0.12	0.17	0.19	0.2	0.15	0.096	0.12	0.21	0.17
MgO	2.82	1.95	3.38	3.87	3.68	2.45	2.04	4.19	3.62	3.76
CaO	2.92	0.46	4.43	4.49	5.19	1.87	1.73	5.26	5.26	4.97
Na ₂ O	2.94	3.72	4.26	3.47	2.72	7.3	5.14	3.1	3.03	3.52
K ₂ O	3.14	2.88	2.75	2.82	3.27	0.96	3.6	2.86	2.71	2.51
P ₂ O ₅	0.13	0.2	0.23	0.18	0.17	0.16	0.16	0.19	0.19	0.18
LOI	1.31	1.38	1.96	1.94	1.28	1.67	1.67	2.11	1.27	1.45
Total	99.70	99.38	99.71	99.75	99.78	99.81	99.76	97.61	99.75	99.73
V	75.00	57	161	164	144	59	75	144	168	156.00
Cr	52.00	58	94	81	127	39	52	48	48	72.00
Cs	2.37	1	0.56	1.44	0.43	0.36	1.25	1	0.55	0.76
Ba	1,377	1,475	678	655	591.1	176	220	983	669	695
Rb	46.90	80	48	48	50	18.5	19.4	102	53	44.40
Sr	398.9	129	529	466	388.9	170.3	137.9	150	403	404.7
Y	20.8	28	28	25	28	31.5	28.4	28	27	25.5
Zr	169	223	171	156	174	272	230	175	171	160
Nb	9	13	11	10.2	12.2	16.5	13.5	9	11	10.4
Ga	16.7	14	18	17	16.3	15.7	17.1	15	17	16
Hf	4.6	7	5	4.5	5	7.6	6.1	4	5	4.9
Ta	0.9	1	1	0.8	1	1.1	0.9	0.5	1	1
Th	11.47	11.2	8.5	7.4	8.5	16.04	11.18	6.5	8	7.12
U	2.31	3	1.8	1.6	2	3.22	2.21	1.4	1.7	1.69
La	25.5	30.8	23.9	22.2	23.3	30.8	28.8	14.8	23.1	22.9
Ce	51.7	59.5	51.9	48	51.6	70.9	64.2	33.8	49.5	50.1
Pr	5.69	7.16	6.58	5.99	6.41	8.68	8.03	4.22	6.08	6.07
Nd	20.6	27.9	26.1	23.6	25.1	31.6	30.6	18.3	24.1	24.3
Sm	4.33	5.43	5.62	5.09	5.45	5.81	6.24	3.76	5.26	5.04
Eu	1.05	1.19	1.55	1.43	1.27	1.51	1.56	1.04	1.46	1.36
Gd	3.77	5.64	5.09	4.78	4.92	5.56	5.43	3.73	5.04	4.8
Tb	0.64	0.83	0.85	0.82	0.87	0.92	0.83	0.57	0.83	0.82
Dy	3.65	5.74	4.88	4.69	5.07	5.52	5.21	4.23	4.79	4.66
Ho	0.7	1.08	1.01	0.95	1	1.11	0.97	0.86	1	0.96
Er	2.14	3.16	2.85	2.75	3	3.22	2.97	2.23	2.77	2.82
Tm	0.35	0.48	0.45	0.45	0.53	0.52	0.49	0.38	0.45	0.48
Yb	2.21	3.47	2.76	2.63	2.92	3.23	3.12	3.47	2.8	2.84
Lu	0.32	0.53	0.4	0.42	0.43	0.5	0.48	0.36	0.39	0.42
Eu/Eu*	0.79	0.66	0.89	0.89	0.75	0.81	0.87	0.69	0.87	0.85
(La/Yb) _N	7.78	5.98	5.84	5.69	5.38	6.43	8.05	3.79	5.56	5.44

(La/Yb)_N= chondrite-normalized La / chondrite-normalized Yb; Eu/Eu*=[Eu_N/(Sm_N × Gd_N)^{0.5}]

نمودار بیشتر نمونه‌ها در گستره ماگماهای کالک‌آلکان جای می‌گیرند و تنها نمونه سینوگرانیت در محدوده ماگماهای شوشونیتی جای می‌گیرد (شکل ۷- B). افزون‌بر این، برای بررسی مقدار اشباع‌شدگی از آلومین نمودار A/CNK در برابر A/NK به کار برده شد (شکل ۷- C).

بر پایه نمودار SiO_2 در برابر $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ، نمونه‌ها در محدوده گرانودیوریت، کوارتز مونزونیت، مونزودیوریت و دیوریت جای می‌گیرند (شکل ۷- A). همچنین، برای بررسی سری ماگمایی این واحدهای آذرین درونی اسیدی - حد واسط نمودار Ta+Yb در برابر $\text{K}_2\text{O}/\text{Yb}$ به کار برده شد. در این

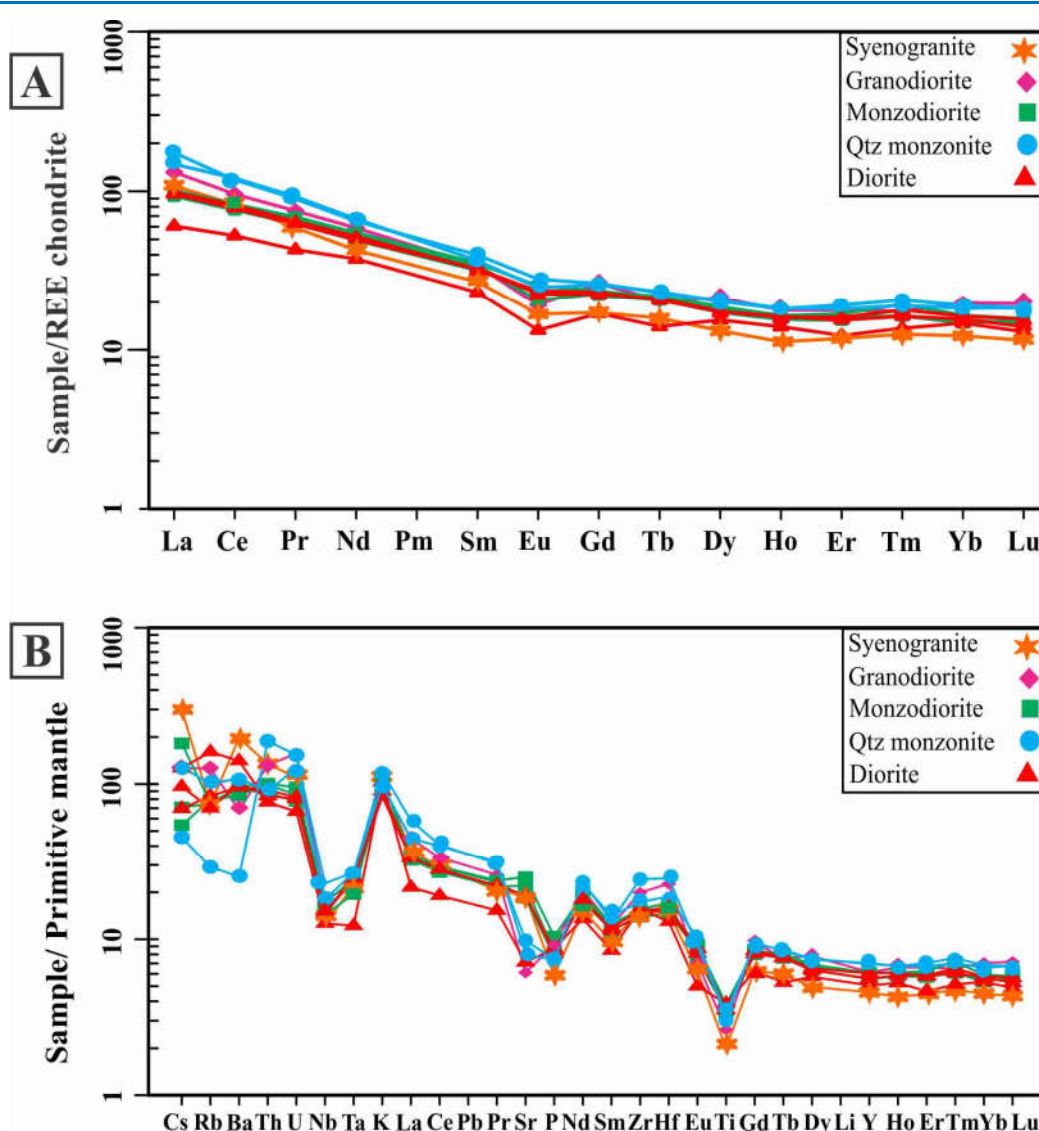


شکل ۷. ترکیب توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه در نمودارهای زمین‌شیمیایی. A) نمودار TAS برای نامگذاری توده‌های آذرین درونی (Middlemost, 1994); B) تعیین سری ماگمایی در نمودار Ta+Yb در برابر $\text{K}_2\text{O}/\text{Yb}$ (Pearce, 1982); C) نمودار شاخص اشباع آلومین (Shand, 1943); D) نمودار Ta + Yb در برابر Rb (Pearce et al., 1984).

Figure 7. Composition of intrusive rocks in the north of Bahariyeh in the geochemical diagrams. A) TAS classification diagram for the intrusive rocks (Middlemost, 1994); B) Magmatic series determination in Ta/Yb versus $\text{K}_2\text{O}/\text{Yb}$ diagram (Pearce, 1982) to; C) Alumina saturation index diagram (Shand, 1943); D) Ta+Yb versus Rb diagram (Pearce et al., 1984).

گرانیت‌های پشته‌های کمائی (ORG)، درون صفحه‌ای (WRG)، کمان آتشفشانی مرتبط با فرورانش (VAG) و گرانیت‌های مناطق برخوردی (syn-COLG) جای می‌گیرند. بر پایه نمودار Ta+Yb در برابر Rb، همه توده‌های اسیدی - حد واسط در جایگاه زمین‌ساختی کمان آتشفشانی مرتبط با پهنه فرورانش جای می‌گیرند (شکل ۷- D).

رده‌بندی سنگ‌ها بر پایه این نمودار نشان می‌دهد نمونه‌های اسیدی - حد واسط در محدوده پراآلمینوس تا بیشتر متاآلمینوس جای می‌گیرند. همچنین، برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه نمودارهای زمین‌ساختی پیشنهادی پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984) به کار برده شد. در این نمودارها گرانیتوئیدها در چهار قلمروی



شکل ۸. توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه در: (A) نمودار الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب بهنجار شده به ترکیب کندریت (Boynton, 1985); (B) نمودار بهنجار شده به ترکیب گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989).

Figure 8. Intrusive rocks in the north of Bahariyeh in: **A)** Chondrite-normalized rare earth elements diagram (Boynton, 1985); **B)** Primitive Mantle-normalized trace element diagram (Sun and McDonough, 1989).

داده شده است. بر پایه این نمودار محدوده شمال بهاریه غنی‌شدگی در عنصرهای LILE (مانند Ba, K, Rb و Cs) در مقایسه با عنصرهای HFSE (مانند Nb, Ti و Y) نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها معمولاً در ماگماهای پدیدآمده در پهنه‌های فرورانش دیده می‌شود (Wilson, 1989; Walker et al., 2001; Machado et al., 2005; Yang and Li, 2008).

بحث

رخد اد کانه‌زایی

ماگماتیسم و سامانه فلززایی پهنه خواف-کاشمر-بردسکن در پنجره زمانی سنوزویک (پالئوسن-ائوسن) رخ داده‌اند و بیشتر کانه‌زایی‌ها در این پهنه از نوع IOCG، پورفیری، اسکارن و رگه-رگچه‌ای هستند. برپایه شواهد اولیه، رخداد کانه‌زایی شمال بهاریه از گروه کانسارهای تیپ IOCG به‌شمار می‌رود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

نخستین بار هیتزمن و همکاران (Hitzman et al., 1992) کانسارهای مس و طلای همراه با اکسید آهن (Iron Oxide Copper-Gold یا IOCG) را به‌نام گروه جدیدی از ذخایر معدنی شناسایی کردند و سپس پژوهشگران بعدی آنها را دسته‌بندی کردند (Hitzman et al., 1992; Barton and Johnson, 1996; Sillitoe, 2003; Williams et al., 2005; Porter, 2010; Chen, 2013). هرچند درباره دسته‌بندی این ذخایر هنوز ابهاماتی هست، اما پس از ذخایر پورفیری بیشترین ذخیره‌های مس و طلای جهان را دارند. مهم‌ترین ویژگی‌های متمایزکننده این ذخایر شامل موارد زیر است:

- ۱) حضور دو کانی اکسیدی آهن مگنتیت و هماتیت (اسپیکولاریت) با محتوی تیتانیوم کم به‌صورت جداگانه یا با هم در یک سامانه کانه‌زایی؛
- ۲) گسترش چشمگیر دگرسانی گرمایی شامل پهنه‌های سدیک-پتاسیک-هیدرولیکی (سرسیت-کلریت-سیلیسی شدن)؛
- ۳) نبود وابستگی فضایی و مکانی آشکار با توده‌های آذرین درونی؛

برای بررسی سرشت فرایندهای زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی در مجموعه سنگ‌های محدوده شمال بهاریه، نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده به ترکیب گوشتۀ اولیه و عنصرهای خاکی کمیاب کندریت به‌کار برده شد. شکل ۸- A نمودار بهنجار شده عنصرهای خاکی کمیاب به ترکیب کندریت (Boynton, 1985) برای توده‌های آذرین درونی محدوده بهاریه را نشان می‌دهد. الگوی پراکندگی عنصرهای خاکی کمیاب در این نمودار غنی‌شدگی چشمگیری از LREE در مقایسه با عنصرهای HREE نمایش می‌دهد و فراوانی عنصرهای سبک‌تر با شیب بیش‌تری نسبت به عنصرهای سنگین کاهش می‌یابد (شکل ۸- A). این روند غنی‌شدگی و کاهشی عنصرهای خاکی کمیاب سبک نسبت به عنصرهای خاکی کمیاب سنگین می‌تواند شاخص پیدایش ماگماهای کالک‌آلکان در محیط فرورانش باشد (Rollinson, 1993; Nicholson et al., 2004; Zulkarnain, 2009; Helvacı et al., 2009; Asiabanha et al., 2012).

افزون‌بر این، درجه کم ذوب‌بخشی گوشته و یا آلیش با مواد پوسته‌ای از دیگر دلایل غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREEها است (Almeida et al., 2007). در نمونه‌های محدوده شمال بهاریه نسبت $(La/Yb)_N$ از نزدیک به $3/79$ تا $8/05$ در تغییر است (جدول ۱) و این نسبت کم، نبود یا کم‌بودن گارنت در خاستگاه را نشان می‌دهد. در این نمودارها عنصر Eu اهمیت ویژه‌ای دارد. نسبت Eu/Eu^* در این نمونه‌ها از $0/66$ تا $0/89$ متغیر است که گویای ناهنجاری اندکی منفی است. به گفته دیگر، هرگاه میزان Eu/Eu^* کمتر از یک باشد ناهنجاری منفی و مقدارهای بیشتر از یک نشان‌دهنده ناهنجاری مثبت هستند (Taylor and McLennan, 1985). مقدارهای Eu/Eu^* کمتر از یک در توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه گویای حضور پلاژیوکلاز در خاستگاه آنهاست. همچنین، ناهنجاری مثبت Eu یا مقادیر بیشتر از یک نشان‌دهنده نبود پلاژیوکلاز و حضور گارنت در خاستگاه و احتمالاً بالابودن فوگاسیتۀ اکسیژن در ماگماست (Rollinson, 1993). نمودار بهنجار شده عنصرهای فرعی و کمیاب در برابر ترکیب گوشتۀ اولیه (Sun and McDonough, 1989) در شکل ۸- B نشان

سنگ میزبان آذرین درونی ژرف- نیمه ژرف در پی پیدایش این رگچه- رگچه‌های کانه‌دار دچار دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت+اپیدوت)، سیلیسی و گاهی سرسیتی شده است. بر پایه نظر بارتون (Barton, 2014)، روند دگرسانی همانند نوع هیدرولیکی (اسیدی) در ذخایر IOCG است و مجموعه کانایی شامل کوارتز+کلریت+اپیدوت+سرسیت است. ذخایر پهنه شیلی مانند Mantoverde نیز دگرسانی هیدرولیکی نشان داده (Rieger et al., 2010)، هرچند در ذخیره المپیک دم در جنوب استرالیا دگرسانی پتاسیک نیز گزارش شده است (Skirrow et al., 2007). در محدوده بررسی شده داده‌های تجزیه‌های زمین‌شیمیایی گویای آنست که عنصر مس، مهم‌ترین ناهنجاری موجود در رگه‌هاست و افزون‌بر این عنصرهای سرب، روی و نقره بی‌هنجاری‌های چشمگیری نشان می‌دهند.

بر پایه بررسی‌های پیشین در پهنه خواف- کاشمر- بردسکن رژیم زمین‌ساختی مرتبط با پهنه فروانش (فروانش اسلب اقیانوسی نئوتتیس به زیر لبه جنوب‌باختری صفحه اوراسیا) اصلی‌ترین محیط زمین‌ساختی سازنده این سامانه‌هاست (Karimpour et al., 2017). ذخایر پهنه شیلی در محیط‌های مرتبط با پهنه فروانش حاشیه فعال قاره‌ای پدید آمده‌اند (del Real et al., 2018). ذخایر موجود در پهنه خواف- کاشمر- بردسکن مانند کوه‌ز در بازه زمانی ائوسن میانی (Karimpour et al., 2017) پدید آمده است؛ اما ذخیره‌های پهنه شیلی در بازه ژوراسیک- کرتاسه زیرین تا آغاز پالئوژن گزارش شده است (Rieger et al., 2017; Chen, 2013; Barra et al., 2010). الگوی تقریباً هموار توزیع عنصرهای خاکی کمیاب در محدوده شمال بهاریه، غنی‌شدگی نسبی در عنصرهای LREE ($La/Sm \sim 2.48-4.02$) و بی‌هنجاری کمی منفی Eu ($Eu/Eu^* \sim 0.66-0.89$) و تهی‌شدگی از عنصرهایی مانند Ti و Nb بیش‌ترین همانندی و شباهت را با باتولیت گرانیتیویدی Copiapó در ذخیره معدنی Candelaria Punta del Cobre ($La/Sm \sim 4.856$) (del Real et al., 2018).

(۴) کنترل‌های ساختاری بسیار بالا دارند و پیدایش ذخیره ارتباط نزدیکی با این ساختارها دارد؛

(۵) وجود عیار بالای مس و بی‌هنجاری‌های کاملاً اقتصادی عنصرهایی مانند Ni, Mo, Zn, Pb, Ag, U, Au, Co, P, F, Ba, LREEs؛

(۶) در بازه بزرگ زمانی از آرکئن تا پلیوسن پدید آمده‌اند؛

(۷) در محیط‌های زمین‌ساختی گوناگونی مانند کافت، نقاط داغ درون‌قاره‌ای و حوضه‌های کششی پهنه فروانش و محیط‌های پس‌برخوردی پدید آمده‌اند؛

(۸) طیف گسترده‌ای از سنگ میزبان شامل سنگ‌های آتشفشانی، توده‌های آذرین درونی ژرف و نیمه ژرف اسیدی تا مافیک و سنگ‌های آذرآواری را دربر می‌گیرند (Hitzman, 2000; Williams et al., 2005; Barton, 2014; Skirrow et al., 2019).

پهنه ماگمایی خواف- کاشمر- بردسکن در شمال‌خاوری ایران میزبان سامانه‌های کانه‌زایی متنوع و مهمی مانند انواع پورفیری (تنورجه کاشمر) و IOCG (طلا کوه‌ز) است (Karimpour et al., 2006; Mazloumi et al., 2009).

در محدوده شمال بهاریه همانند برخی ذخایر IOCG در پهنه Coastal Cordillera شیلی مانند Mantoverde و Candelaria که کانه‌زایی همروند با گسل آتاکاما رخ داده است (Barra et al., 2017; Childress et al., 2020)، سامانه کانه‌زایی کنترل ساختاری دارد و از روند درز و شکاف‌ها و گسل‌های منطقه (گسل بهاریه) و در مقیاس بزرگ از روند گسل درونه در بخش جنوبی منطقه پیروی می‌کند. در حقیقت، چندین افق کانه‌زایی با روند شمال‌خاوری- جنوب‌باختری و شمال‌باختری- جنوب‌خاوری در محدوده رخنمون دارند و ماده معدنی به‌صورت رگه- رگچه‌ای و شکافه پرکن درون توده‌های آذرین اسیدی- حد واسط واقع شده است. کانی‌شناسی اصلی و اولیه رگه- رگچه‌ها، پیریت، کالکوپریت و اسپیکولاریت همراه با کوارتز به‌عنوان کانی باطله است. از این‌رو، بر پایه رده‌بندی پیشنهادی کریم‌پور (Karimpour, 2004) و ویلیامز (Williams, 2010)، محدوده شمال بهاریه به‌عنوان کانسارهای نوع اسپکیولایت‌دار (هماتیت) تیپ IOCG به شمار می‌رود.

کناسارهای تیپ IOCG در پهنه شیلی با ذخایر موجود در KKBMB (معدن کوه‌زر و محدوده شمال بهاریه) مقایسه شده‌اند. هرچند اثبات IOCG بودن آن نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تر مانند بررسی‌های زیرسطحی، آنالیزهای زمین‌شیمیایی برای عیارسنجی طلا، دماسنجی و سنجش شوری سیال کانه‌ساز و ترکیب ایزوتوپی آنهاست.

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، رخداد کانه‌زایی شمال بهاریه بر پایه سرشت زمین‌ساختی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، نوع سنگ میزبان، دگرسانی، کانه‌های اولیه، سامانه کانه‌زایی همراه با کنترل ساختاری و توزیع زمین‌شیمیایی عناصرها، با وجود پاره‌ای تفاوت‌ها، شباهت بسیاری با کناسارهای نوع IOCG به‌ویژه ذخایر پهنه شیلی دارد. در ادامه و در جدول ۳ برخی از مهم‌ترین

جدول ۳. مقایسه ذخایر مهم IOCG در ایران و جهان با محدوده شمال بهاریه.

Table 3. Comparison of important IOCG reserves in Iran and the world with the North of Baharieh area.

	Bahariyeh	Kuh-e-Zar	Mantoverde	Candelaria
Location	Central KKBMB, NE Iran	Central KKBMB, NE Iran	Central Andes of northern Chile	Cloncurry districts of Australia
Host rocks	Intrusions-Subvolcanic	Volcanic rocks	Volcanoclastic rocks, andesite and basaltic andesite	Andesitic-Basaltic lavas and volcanoclastic rocks
Related intrusive rock(s)	Diorite, monzodiorite	Diorite, monzodiorite	Granodiorite, diorite	Diorite
Ore-controlling structure	Strike slip faults	Strike slip faults	Normal fault-detachment-dilational zone/shear zone	Strike slip faults (Atacama fault)
Hydrothermal alteration	Chloritization, silicification	Chloritization, silicification	Potassic, chloritization	Potassic, silicification
Mineralization shape	Vein-veinlet	Vein	Breccias and veins	Vein- Breccias -stockwork like
Ore assemblages	Hem-Ccp-Py-minor Sp-Gn	Hem-Py-Ccp	Ccp-Hem-Py	Py-Mt-Ccp
Economic elements	Cu±Au±Zn±Pb	Au±Cu	Cu-Au	Cu-Au
Mineralization age	Middle Eocene	Middle Eocene	Jurassic-Early Cretaceous	Jurassic-Early Cretaceous
Tectonomagmatic setting	Subduction-related continental arc	Subduction-related continental arc	Inversion basins in extensional arc on subduction-related continental margin	Inversion basins in the extensional arc in the subduction-related continental margin
References	This study	Karimpour et al., 2017	Rieger et al., 2010., 2012, Childress et al., 2020	Rieger et al., 2010., 2012, Barra et al., 2017

نمودارهای بهنجارشده به ترکیب عنصرهای خاکی کمیاب کندریت و گوشته اولیه، وجود ناهنجاری منفی Eu و غنی‌شدگی چشمگیری از عنصرهای LILE و LREE را نشان می‌دهند. در این پژوهش برای درک بهتر تحول و فرایندهای تکاملی ماگماهای سازنده

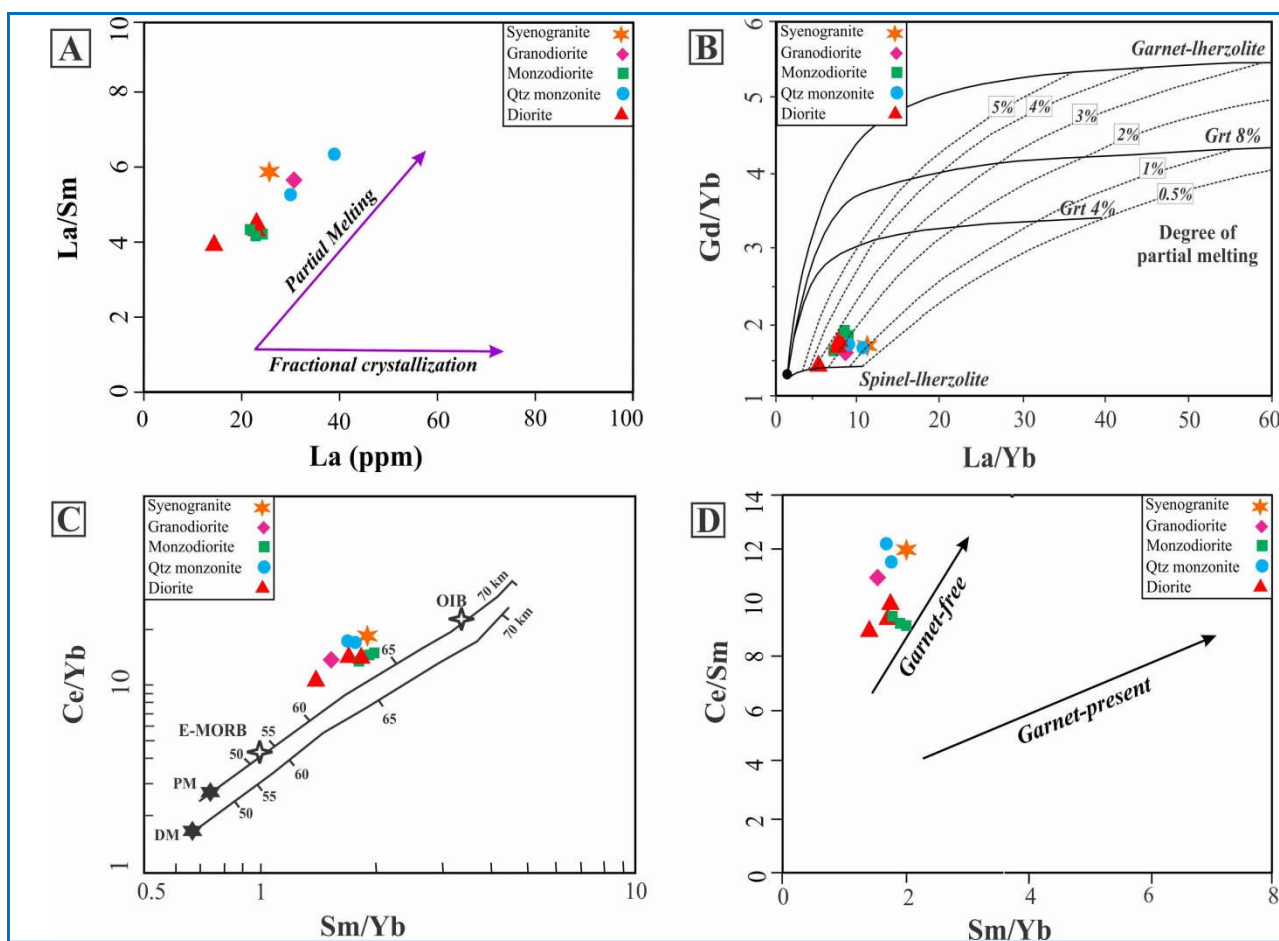
خاستگاه ماگما و سنگ‌زایی^۴ توده‌های آذرین درونی

ویژگی‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی کل سنگ گویای آنست که ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی در محدوده شمال بهاریه سرشت کالک‌آلکان دارند و از گرانیتوئیدهای نوع I هستند (شکل ۷-B). همچنین،

⁴ Petrogenesis

آنها برای شناخت فرایندهای تبلوربخشی و ذوببخشی استفاده می‌شود. داده‌های زمین‌شیمیایی و نمودارهای ترسیم‌شده نشان می‌دهند ذوببخشی نقش کلیدی در پیدایش سنگ‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه دارند و این ماگماها بیشتر در پی ذوببخشی پدید آمده‌اند تا فرایند تبلوربخشی (شکل ۹-ا).

سنگ‌های اسیدی - حد واسط پدیدآمده در محدوده شمال بهاریه الگوسازی نسبت‌های عنصرهای کمیاب به کار برده شد. از این‌رو، برای بررسی شرایط ذوب ماگمای پدیدآمده در محدوده بررسی‌شده از نمودار La در برابر La/Sm بهره گرفته شد (شکل ۹-ا). این نسبت‌ها به فرایند ذوببخشی حساس نیستند، از این‌رو، از



شکل ۹. ا) روند ذوببخشی در نمودار La در برابر La/Sm (Li et al., 2011)؛ ب) تعیین درجه ذوببخشی در نمودار La/Yb در برابر Gd/Yb (Halliday et al., 1995)؛ ج) بررسی ژرفای پیدایش در نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Yb (Wang et al., 2002)؛ د) بررسی بود یا نبود گارنت در خاستگاه در نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm (Hawkesworth et al., 1994).

Figure 9. A) Determination of partial melting process in La versus La/Sm diagram (Li et al., 2011); B) Determination of partial melting in La/Yb versus Gd/Yb diagram (Halliday et al. 1995); C) Determination of formation depth in Sm/Yb versus Ce/Yb diagram (Wang et al., 2002); D) Determination of absence or presence of garnet at source in Sm/Yb versus Ce/Sm (Hawkesworth et al., 1994).

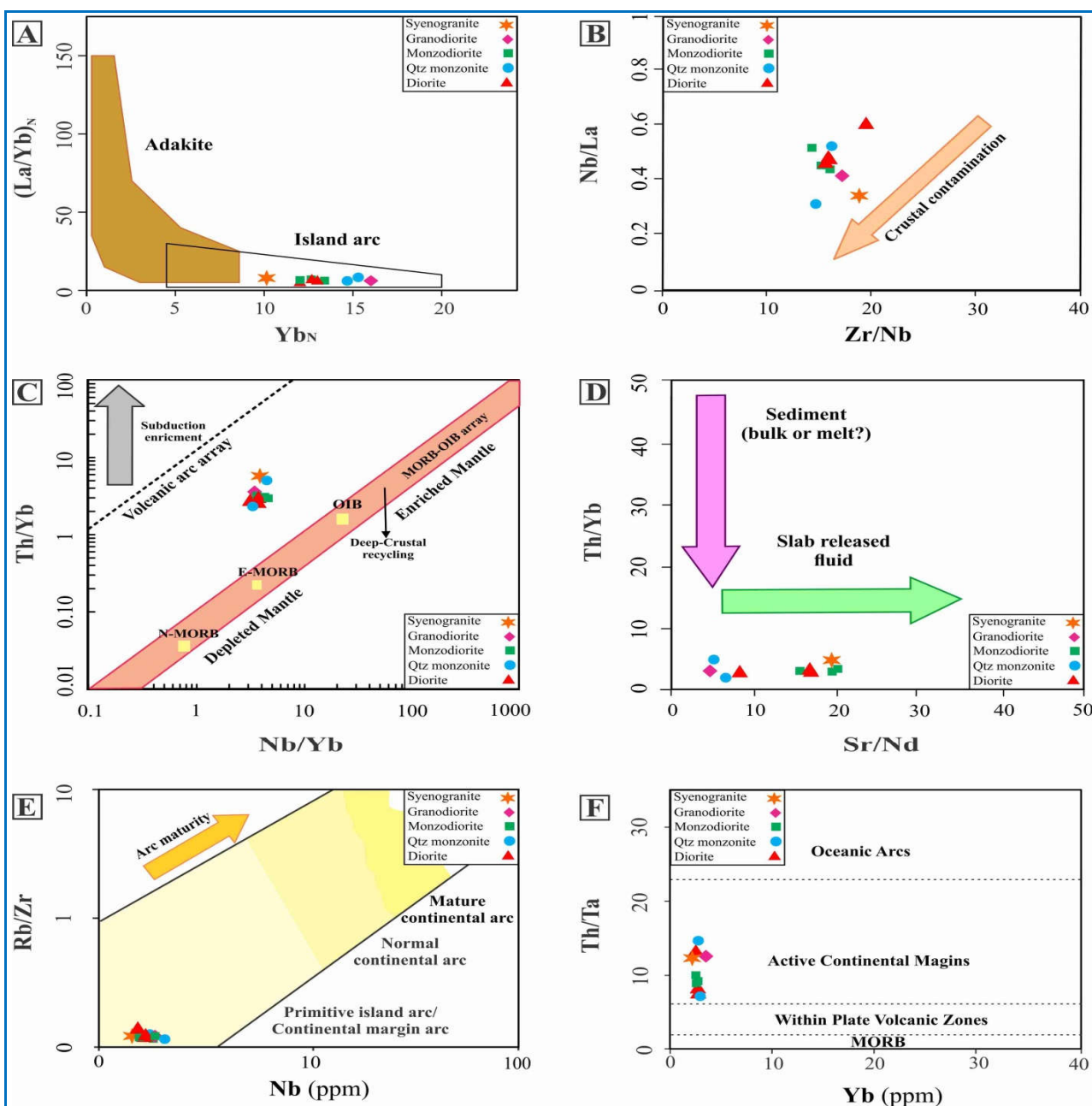
در برابر Gd/Yb نشان داده شده است (شکل ۹-ب)، سنگ‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه دچار ذوببخشی درجه پایین (۱-۴ درصد) گوشته‌ای شده‌اند و

برای تعیین درجه ذوببخشی، ژرفا و ترکیب ماگمای برخاسته از گوشته از نسبت‌های مختلف عنصرهای خاکی کمیاب استفاده می‌شود. همان‌گونه که در نمودار La/Yb

این نمونه‌ها از روند اسپینل لرزولیت پیروی می‌کنند و گویای آنست که این توده‌ها از گوشته غنی شده خاستگاه گرفته‌اند. همچنین، مقدارهای $(Ce/Yb)_N$ برای سنگ‌های اسیدی - حد واسط محدوده بررسی شده در نزدیک به $3/32$ تا $6/05$ به دست آمده است. افزون بر این، در نمودار Ce/Yb در برابر Sm/Yb (شکل ۹- C)، دیده می‌شود ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی از بخش‌های بالایی گوشته در ژرفای نزدیک به $60-65$ کیلومتری خاستگاه گرفته است (Cotton et al., 1995; Wang et al., 2002). افزون بر این، نسبت Ce/Sm ($8/8-12/2$) در نمونه‌ها بسیار بیشتر از نسبت Sm/Yb ($2/03-1/08$) است. غنی‌شدگی در میزان Ce نسبت به Yb هنگامی رخ می‌دهد که گارنت در خاستگاه نباشد؛ بدین معنی که Ce وارد فاز کانیایی شده است. نمودار Sm/Yb در برابر Ce/Sm ، نبود گارنت در خاستگاه ماگما سازنده توده‌های آذرین درونی منطقه شمال بهاریه را نشان می‌دهد (شکل ۹- D). الگوسازی زمین‌شیمیایی این نسبت‌ها نشان‌دهنده نبود گارنت در خاستگاه است، بدین معنی که این توده‌ها در نبود گارنت از خاستگاه اسپینل لرزولیت (~ 65 کیلومتر) پدید آمده‌اند.

افزون بر این، برای تعیین خاستگاه ماگمای سازنده سنگ‌های محدوده شمال بهاریه، از نمودار Yb_N در برابر $(La/Yb)_N$ استفاده شد (شکل ۱۰- A). این نمودارها برای شناسایی سنگ‌هایی با سرشت آداکیتی از ماگماهای پهنه فرورانش (پیامد ذوب گوشته‌ای) پیشنهاد شده‌اند. بر پایه این نمودار، توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه ویژگی ماگماهای غیر آداکیتی (مرتبط با پهنه فرورانش) با نسبت کم $(La/Yb)_N$ نزدیک به $3/79$ تا $8/05$ و محتوی بالای Yb_N نزدیک به $10/57$ تا $16/60$ را نشان می‌دهند (شکل ۱۰- A). گرانیوتیویدهای نوع I با سرشت کالک‌آلکالن در پهنه فرورانش، عموماً از ذوب بخشی پریدوتیت گوه گوشته‌ای پدید می‌آیند که با سیال‌های آزاد شده از تخته اقیانوسی فرورو دگرنهاد می‌شوند؛ اما ماگماهای آداکیتی معمولاً از ذوب بخشی خود تخته اقیانوسی فرورو و هم از اندرکنش مذاب

پدیدآمده از ذوب ورقه با گوه گوشته‌ای پدید می‌آیند (Tatsumi and Takahashi, 2006; Whattam et al., 2012). از این رو، توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه، با توجه به سرشت غیر آداکیتی‌شان، از ذوب بخشی گوشته دگرنهاد شده در پهنه فرورانش پدید آمده‌اند. معمولاً گدازه‌های پدیدآمده در پهنه‌های کم‌انی غنی‌شدگی چشمگیری از LILE و LREE نشان می‌دهند و دگرنهاد شدن خاستگاه گوشته‌ای زیر کم‌انی با سیال‌های غنی شده از این عنصرهای کمیاب آزاد شده از تخته فرورو عامل آن است (Tatsumi, 1995; Pearce and Peate, 1989). عنصرهایی مانند Nb و Rb از فراوان‌ترین عنصرهای پوسته قاره‌ای هستند (Bonin et al., 1978). ناهنجاری منفی Nb و Ta در مناطق با فرورانش گویای نقش بنیادی پوسته در پیدایش ماگما مرتبط است و از ویژگی‌های اصلی حاشیه‌های فعال قاره‌ای و محیط‌های فرورانشی به‌شمار می‌رود (Patchett, 1992; Reichew et al., 2004). از سوی دیگر، نسبت Zr/Nb از دیگر شاخصه‌های اصلی برای تعیین آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای است، این نسبت در همه توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه از $14/26$ تا $19/4$ متغیر است. مقدارهای بالاتر از 20 نشان‌دهنده کمترین میزان آلودگی پوسته‌ای در ماگماست (Martin, 1999). نمونه‌های محدوده بررسی شده در نمودار Zr/Nb در برابر Nb/La شواهدی از آرایش پوسته‌ای یا غنی‌شدگی با مواد پوسته در پهنه فرورانش را نشان می‌دهند (شکل ۱۰- B). همچنین، برای درک بهتر ویژگی‌های محیط پیدایش سنگ‌های نفوذی محدوده شمال بهاریه، نمونه‌ها در نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb ترسیم شدند (شکل ۱۰- C). در این نمودار Yb عامل بهنجار کننده برای Th و Nb است، بدین‌سان که این عنصرها ضریب تفکیک یکسانی در مذاب و بلور دارند و در پهنه‌های فرورانش میزان Th درون ماگما افزایش و از میزان Nb کاسته می‌شود (Leat et al., 2004).



شکل ۱۰. جایگاه و محیط پیدایش توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه. **(A)** نمودار Yb_N در برابر $(La/Yb)_N$ (Moyen and Martin, 2012); **(B)** تعیین آلودگی پوسته‌ای در نمودار Zr/Nb در برابر Nb/La (Rudnick and Gao, 2003); **(C)** نمودار Nb/Yb در برابر Th/Yb (Pearce, 1983); **(D)** نمودار Sr/Nd در برابر Th/Yb (Woodhead et al., 1998); **(E)** نمودار Rb/Zr در برابر Nb (Brown et al., 1984); **(F)** نمودار Yb در برابر Th/Ta (Schandl and Gorton, 2002) (N-MORB = Normal MORB, E-MORB = Enriched MORB, PM= Primitive Mantle and OIB= Oceanic Island Basalts (values from Sun and McDonough, 1989); UC= Upper; Continental; LC= Lower continental (values from Taylor and McLennan, 1985)).

Figure 10. The location and formation setting of the intrusive rocks in the north of Bahariyeh district. **(A)** Yb_N versus $(La/Yb)_N$ diagram (Moyen and Martin, 2012); **(B)** Determination of crustal contamination in Zr/Nb versus Nb/La diagram (Rudnick and Gao, 2003); **(C)** Nb/Yb versus Th/Yb diagram (after Pearce, 1983); **(D)** Sr/Nd versus Th/Yb (Woodhead et al., 1998); **(E)** Nb versus Rb/Zr diagram (Brown et al., 1984); **(F)** Yb versus Th/Ta diagram (Schandl and Gorton, 2002) (N-MORB = Normal MORB, E-MORB = Enriched MORB, PM= Primitive Mantle and OIB= Oceanic Island Basalts (values from Sun and McDonough, 1989); UC= Upper; Continental; LC= Lower continental (values from Taylor and McLennan, 1985)).

هستند؛ اما Nd و Sr عنصرهایی هستند که به آسانی در سیال‌های آبی مهاجرت می‌کنند. از این‌رو، نمودار Sr/Nd در برابر Th/Yb نقش سیال آزادشده از تخته فرورو در ترکیب ماگمای مادر را نشان می‌دهد. افزایش چشمگیر نسبت Sr/Nd و میزان کمابیش ثابت Th/Yb در مجموعه نمونه‌ها نشان می‌دهد ترجیحاً سیال‌های آزادشده عامل اصلی دگرنهادشدن گوشته هستند تا فرایند ذوب. از این‌رو، می‌توان گفت خاستگاه ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه از سیال‌های آزادشده از تخته فرورو در پهنه فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای متأثر شده است (شکل ۱۰- D).

افزون‌بر این، داده‌های زمین‌شیمیایی برای همه نمونه‌های ترسیم شده محدوده شمال بهاریه در نمودارهای Nb در برابر Rb/Zr و Yb در برابر Th/Ta گویای پیدایش توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه در بخش‌های حاشیه فعال قاره‌ای مرتبط با پهنه‌های فرورانشی هستند (شکل‌های ۱۰- E و ۱۰- F). در کل، داده‌های عنصرهای خاکی کمیاب توده‌های اسیدی- حد واسط در محدوده شمال بهاریه نشان می‌دهند این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی گوشته غنی شده تحت‌تأثیر سیال‌های آزادشده از تخته فرورانشی پدید آمده‌اند و سپس دچار آلیش پوسته‌ای و تبلوربخشی شده‌اند.

برداشت

بررسی‌های سنگ‌نگاری در محدوده شمال بهاریه گویای رخنمون طیف گسترده‌ای از سنگ‌های آذرآواری، آتشفشانی و آذرین درونی ژرف- نیمه‌ژرف با ترکیب اسیدی- حد واسط است. روند کانه‌زایی در محدوده بررسی شده گسترده است و به‌صورت رگه- رگچه‌ای و استوک‌ورک مانند درون پهنه‌های گسلی با روند NW-SE و NE-SW رخ داده است. در حقیقت، کانه‌زایی در محدوده بررسی شده کنترل ساختاری دارد و از روند گسل‌ها

همان‌گونه که در شکل ۱۰- C دیده می‌شود میزان Th در نمونه‌ها افزایش یافته است و نمونه‌های از سیال‌های آزادشده از تخته فرورو در پهنه فرورانش غنی‌شدگی نشان می‌دهند. به گفته دیگر سرشت ماگماهای برخاسته از حاشیه فعال قاره‌ای که درون آرایه گوشته‌ای^۵ جای دارند با نسبت‌های پایدار Th/Nb ارزیابی می‌شود. از این‌رو، سنگ‌های جدادشده از خاستگاه دگرنهاد مرتبط با پهنه فرورانش بایستی غنی‌شدگی Th نسبت به Nb و Yb را حفظ کنند و همچنین، نسبت بالاتری از Th/Yb در مقایسه با Nb/Yb نشان دهند (Pearce, 1982). برپایه شکل ۱۰- C، همه نمونه‌ها بسیار بالاتر از آرایه گوشته‌ای ترسیم می‌شوند و موازی با گوشته دگرنهاد جای می‌گیرند. این رفتار نشان می‌دهد این سنگ‌ها از گوشته غنی‌شده سرچشمه گرفته‌اند (Pearce, 2008; Buchs et al., 2013; Rossetti et al., 2017). نمونه‌های محدوده شمال بهاریه در بخش زیرین آرایه MORB-OIB، به‌سوی آرایه کمان آتشفشانی^۶ و یا تخته فرورو حرکت می‌کنند. همان‌گونه که پیشتر گفته شد، سنگ‌های بررسی شده با درجات متغیر غنی‌شدگی در عنصرهای متحرک مانند Rb, Cs, Ba و Th شناخته می‌شوند. غنی‌شدگی عنصرهای LILE در مقایسه با عنصرهای HFSE (مانند Nb و Ta) معمولاً به فرورانش مرتبط با دگرنهادشدن نسبت داده می‌شود؛ زیرا هنگام فرایند آگیری پیش‌رونده، عنصرهای HFSE بیشتر درون تخته فرورو به جای مانده‌اند؛ اما عنصرهای LILE و LREE در سیال‌های آزاد شده از تخته فرورو که سمت بالا حرکت می‌کند به جای مانده و یا ذوب می‌شوند و ترکیب گوّه گوشته‌ای را تغییر می‌دهند (Tatsumi, 1989). Th و Yb در سیال عنصرهای نامتحرکی

^۵ Mantle Array

^۶ Volcanic arc array

کل می‌توان گفت ماگمای سازنده توده‌های آذرین درونی محدوده شمال بهاریه از ذوب‌بخشی درجه کم (کمتر از ۵ درصد) گوشته غنی‌شده با خاستگاه اسپینل لرزولیت و آلایش پوسته‌ای درون کمان آتشفشانی مرتبط با پهنه فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای پدید آمده‌اند.

با اینکه کنترل‌های ساختاری نقش بزرگی در جایگیری ماده معدنی درون این توده‌ها داشته است، اما گمان می‌رود ماگماتیسم کالک‌آلکان مرتبط با پهنه فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای نیز ارتباط ژنتیکی منشأیی با کانه‌زایی تیپ IOCG در این محدوده دارد. شواهدی مانند جایگاه زمین‌ساختی توده‌های آذرین درونی، ترکیب سنگ‌شناسی، نوع و گسترش دگرسانی‌ها، کنترل‌های ساختاری، حالت و شکل کانه‌زایی، نوع کانه‌های اولیه و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی، چه‌بسا نشان‌دهنده حضور سامانه کانه‌زایی نوع IOCG غنی از مس در خاور کاشمر (محدوده شمال بهاریه) هستند. ویژگی‌هایی مانند رخنمون گسترده توده‌های آذرین درونی ژرف و نیمه ژرف، گسترش دگرسانی‌های شاخص سیلیسی و پروپیلیتیک (به‌ویژه کلریتی) پیرامون پهنه‌های کانه‌زایی و سامانه کانه‌زایی منطبق بر کنترل‌های ساختاری (به‌علت حضور گسل بزرگ درونه) در پهنه خواف-کاشمر-بردسکن می‌تواند راهبرد و کلید اکتشافی ارزشمندی برای پی‌جویی ذخایر احتمالی IOCG و دیگر ذخایر معدنی در این منطقه به‌شمار آید.

سپاس‌گزاری

این مقاله با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۴۶۵۹۰/۳ به تاریخ ۹۷/۲/۲۸ انجام شده است. همچنین، نگارندگان از سردبیر و داوران گرامی مجله پترولوژی برای پیشنهادهای ارزنده‌شان در بهبود کیفیت و ساختار علمی مقاله بسیار سپاس‌گذارند.

و شکستگی‌های موجود پیروی می‌کند. کانه‌زایی پس از پیدایش واحدهای سنگی در منطقه رخ داده است و از ائوسن جوان‌تر است. کانه‌زایی به دو نوع شامل رگه-رگچه‌های دارای کوارتز+کالکوپیریت+اسپیکولاریت±پیریت و رگه-رگچه‌های غنی از اسپیکولاریت دسته‌بندی می‌شود. کانه‌نگاری اولیه و اصلی رگه-رگچه‌ها شامل پیریت، کالکوپیریت و اسپیکولاریت و کانه‌های ثانویه نیز شامل کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، گوتیت و اکسیدهای آهن است. اصلی‌ترین کانی باطله همراه با این کانه‌های فلزی در پهنه کانه‌زایی کوارتز است. دگرسانی‌های سیلیسی، پروپیلیتیک، سرسیتی و آرژیلیک نیز در محدوده گسترش چشمگیری دارند؛ اما مهم‌ترین دگرسانی با پهنه کانه‌زایی سیلیسی شدن و پروپیلیتیک (کلریتی-ایپیدوتی) مرتبط است که به‌صورت هاله‌ای پیرامون رگه-رگچه‌ها رخ داده است. داده‌های زمین‌شیمیایی بی‌هنجاری اقتصادی از عنصرهای مس و به میزان کمتر سرب و روی در محدوده بررسی شده را نشان می‌دهند؛ اما همبستگی مثبت و چشمگیری میان این عناصر در دو نوع رگه-رگچه وجود ندارد.

داده‌های زمین‌شیمیایی به‌دست‌آمده برای توده‌های آذرین درونی اسیدی-حد واسط محدوده شمال بهاریه گویای سرشت کالک‌آلکان این واحدها هستند. الگوی پراکندگی عنصرهای کمیاب و خاکی کمیاب در نمودارهای ترسیم شده، غنی‌شدگی در عنصرهای کمیاب و خاکی سبک (LILE و LREE) نسبت به عنصرهای سنگین‌تر (HFSE و HREE) نشان می‌دهد. این ویژگی همراه با بی‌هنجاری مثبت Th و تهی‌شدگی Nb نشان‌دهنده پیدایش ماگما در پهنه فرورانش است. از دیدگاه زمین‌ساختی پیدایش این توده‌های سنگی در مناطق حاشیه فعال قاره‌ای مرتبط با پهنه فرورانش بوده است. افزون‌بر این، آلایش سنگ‌های منطقه با پوسته بالایی می‌تواند از مهم‌ترین دلایل پیدایش این توده‌ها نیز باشد. در

References

- Almasi, A. (2016) Mineralization, Petrogenesis and Geochemical- Geophysical Exploration in Uch-Palang- Sarsefidal (East of Kashmar). Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, IRI.
- Almasi, A., Karimpour, M. H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Rahimi, B., Klötzli, U. and Santos, J. F. (2015) Geology, mineralization, U- Pb dating and Sr-Nd isotope geochemistry of intrusive bodies in northeast of Kashmar. *Journal of Economic Geology*, 1 (7), 69–90 (in Persian).
- Almeida, M. E., Macambira, M. J. B. and Oliveira, E. C. (2007) Geochemistry and zircon geochronology of the I- Type high K calc-alkaline and S- Type granitoid rocks from Southeastern Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence (1.97–1.96 Ga) in Central portion of Guyana shield. *Precambrian Research*, 155, 69–97.
- Asiabanha, A., Bardintzeff, J. M., Kananian, A. and Rahimi, G. (2012) Post- Eocene volcanics of the Abazar district, Qazvin, Iran: Mineralogical and geochemical evidence for a complex magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 79- 94.
- Barra, F., Reich, M., Rojas, P., Selby, D., Simon, A. C., Salazar, E. and Palma, G. (2017) Unraveling the origin of the Andean IOCG Clan: a Re-Os isotope approach. *Ore Geology Review*, 81, 62–78.
- Barton, M. D. (2014) Iron oxide (- Cu–Au–REE–P–Ag–U–Co) systems. 2nd Edition. *Treatise on Geochemistry*, 13, 515–541.
- Barton, M. D., Johnson, D. A. (1996) Evaporitic- source model for igneous- related Fe oxide- (REE–Cu–Au–U) mineralization. *Geology*, 24, 259–262.
- Behrouzi, A. (1988) Geological Quadrangle Map of Fyezabad 1:100000, No.7760. Geological survey of Iran, Tehran, IRI.
- Bonin, B., Grelou- Orsini, C. and Vialette, Y. (1978) Age, origin and evolution of the anorogenic complex of Evisa (Corsica): A K- Li- Rb- Sr study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65, 425-435.
- Boynton, W. V. (1985). Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies. In: *Rare Earth Element Geochemistry* (Ed. Henderson, P.) 115–1522. Elsevier Science Publishers, New York.
- Brown, G. C., Torpe, R. S. and Webb, P. C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of Geological Society*, 141, 413- 426.
- Buchs, D. M., Bagheri, S., Martin, L., Hermann, J. and Arculus, R. (2013) Paleozoic to Triassic Ocean opening and closure preserved in Central Iran: constraints from the geochemistry of meta- igneous rocks of the Anarak area. *Lithos*, 172, 267–287
- Chen, H. Y. (2013) External sulfur in IOCG mineralization: implications on definition and classification of the IOCG clan. *Ore Geology Review*, 51, 74–78.
- Childress, T. M., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Arce, M., Lundstrom, C. C. and Bindeman, I. N. (2020) Formation of the Mantoverde iron oxide- copper- gold (IOCG) deposit, Chile: insights from Fe and O stable isotopes and comparisons with iron oxide- apatite (IOA) deposits. *Mineralium Deposita*, 55, 1489–1504.
- Cotton, J., Le Dez, A., Bau, M., Caroff, M., Maury, R. C., Dulski, P., Fourcade, S., Bohn, M. and Brousse, R. (1995) Origin of anomalous rare- earth element and yttrium enrichments in subaerially exposed basalts, evidence from French Polynesia. *Chemical Geology*, 119, 115- 138.
- del Real, I., Thompson, J. F. H. and Carriedo, J. (2018) Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria- Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. *Ore Geology Review*, 102, 1–48
- Golmohammadi, A., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S. A. (2015) Alteration- mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Review*, 65, 545–563.
- Halliday, A. N., Lee, D. C., Tommasini, S., Davies, G. R., Paslick, C. R., Fitton, J. G. and James, D. E.

- (1995) Incompatible trace elements in OIB and MORB and source enrichment in the sub-oceanic mantle. *Earth Planet Science Letters*, 133, 379- 395
- Hawkesworth, C. J., Gallagher, K., Hergt, J. M. and McDermott, F. (1994) Destructive plate margin magmatism: geochemistry and melt generation. *Lithos*, 33, 169–188.
- Helvacı, C., Ersoy, E., Sözbilir, H., Erkül, F., Sümer, Ö. and Uzel, B. (2009) Geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia. *Journal Volcanology Geothermal Research*, 185, 181- 202.
- Hitzman, M. W. (2000) Iron oxide- Cu–Au deposit: what, where, when, and why. In: *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective* (Ed. Porter, T. M.) 2, 9–26. PGC Publishing, Adelaide.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N. and Einaudi, M. T. (1992) Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu–U–Au- REE) deposit. *Precambrian Research*, 58, 241- 287.
- Hosseini R., Karimpour M. H. and Malekzadeh Shafaroudi A. (2018) Petrography, geochemistry, U- Pb dating and Sr-Nd isotopes of igneous rocks in Tannurjeh porphyry Au- Cu prospect area (NE Kashmar). *Petrological Journal*, 33, 45–70 (in Persian).
- Karimpour M. H., Malekzadeh Shafaroudi A., Mazloumi Bajestani A. R., Schader R. K., Stern C. R., Farmer L. and Sadeghi M. (2017) Geochemistry, geochronology, isotope and fluid inclusion studies of the Kuh- e- Zar deposit, Khaf- Kashmar- Bardaskan magmatic belt, NE Iran: Evidence of gold-rich iron oxide–copper–gold deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 183, 58- 78.
- Karimpour, M. H., Saadat, S. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2002) Exploration of Fe- oxide Cu- Au and magnetite deposits related to Khaf- Kashmar- Bardaskan volcanic- plutonic belt. 21st International Geosciences Congress, Tehran, Iran.
- Karimpour, M. H., Saadat, S. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2006) Geochemistry, petrology, and Mineralization of Tannurjeh porphyry gold- copper. *Journal of Science (University of Tehran) (JSUT)*, 3(33): 173- 185 (in Persian).
- Karimpour, M. H. (2004) Mineralogy, alteration, source rock, and tectonic setting of Iron–Oxides Cu–Au deposits and examples of Iran. 11th Symposium of Iranian Crystallography and Mineralogy Society, Yazd University, 184–189.
- Leat, P. T., Pearce, J. A., Barker, P. F., Millar, I. L., Barry, T. L. and Larter, R. D. (2004) Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: the South Sandwich arc- basin system. *Earth and Planetary Science Letters*, 227: 17- 35.
- Li, J. X., Qin, K. Zh., Li, G. M., Xiao, B., Chen, L. and Zhao, J. X. (2011) Post-collisional ore bearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust. *Lithos*, 126, 265–277.
- Machado, A. T., Chemale, Jr. F., Conceicao, R. V., Kawaskita, K., Morata, D., Oteiza, O. and Schmus, W. R. V. (2005) Modeling of subduction components in the Genesis of the Meso- Cenozoic igneous rocks from the South Shetland arc, Antarctica. *Lithos*, 82(3- 4), 435- 453.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Golmohammadi, A. (2013) Zircon U–Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C- North and Baghak districts, Sangan, iron mine NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64(5), 256- 271.
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, 411- 429.
- Mazloumi, A., Karimpour, M. H., Rasa, I., Rahimi, B. and Vosoghi Abedini, M. (2009) Kuhe- Zar gold deposit of Torbat- e- Hydarieh: New model of gold mineralization. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 16, 364–376 (in Persian).
- Middlemost, E. A. K. (1994) Naming materials in the magma igneous rock system. *Earth Science Review*, 37, 215- 224.
- Moyen, J. F., Martin, H. (2012) Forty years of TTG research. *Lithos*, 148, 312–336.

- Najmi, F., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M. H. (2018) Geology, petrography and mineralogy of alteration zones in Bahariyeh Kaolin Mine, east of Kashmar, NE of Iran. 10th Symposium of Iranian Economic Geological Society, Isfahan University, Isfahan, IRI.
- Nicholson, K. N., Black, P. M., Hoskin, P. W. O. and Smith, I. E. M. (2004) Silicic volcanism and back-arc extension related to migration of the Late Cainozoic Australian- Pacific plate boundary. *Journal Volcanology Geothermal Research*, 131, 295- 306.
- Patchett, P. J. (1992) Isotopic studies of Proterozoic crustal growth and evolution. In: *Proterozoic Crustal Evolution* (Ed. Condie, K. C.) Elsevier, Amsterdam.
- Pearce, J. A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: *Andesites* (Eds. Thorpe, R. S.) 525–548. John Wiley and Sons, New York.
- Pearce, J. A. (1983) Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. (Eds. Hawkesworth, C. J. and Norry, M. J.) 230- 249. Shiva Publications, Nantwich, Cheshire.
- Pearce, J. A. (2008) Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100, 14- 48.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956- 983.
- Pearce, J. A. and Peate D. W. (1995) Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 23, 251- 285.
- Porter, T. M. (2010) Advances in the Understanding of IOCG and Related Deposits. In: *Hydrothermal Iron Oxide Copper–Gold and Related Deposits: A Global Perspective* (Ed. Porter, T. M.) 3, 5–106. PGC Publishing, Adelaide.
- Reichew, M. K., Saunders, A. D., White, R. V. and Ukhamedov, A. I. (2004) Geochemistry and Petrogenesis of Basalts from the west Siberian Basin, an extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos*, 79, 425- 452.
- Rieger, A., Marschik, R. and Díaz, M. (2012) The evolution of the hydrothermal IOCG system in the Mantoverde district, northern Chile: new evidence from microthermometry and stable isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 47, 359–369.
- Rieger, A. A., Marshik, R. and Diaz, M. (2010) The Mantoverde district, Northern Chile: an example of distal portions of zoned IOCG systems. In: *Hydrothermal iron oxide copper–gold and related deposits: a global perspective* (Ed. Porter, T. M.) 3, 273–284. PGC Publishing, Adelaide.
- Rollinson, H. R. (1993) *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, Harlow, England.
- Rossetti, F., Monié, P., Nasrabad, M., Theye T., Lucci, F. and Saadat, M. (2017) Early Carboniferous subduction- zone metamorphism preserved within the Palaeo- Tethyan Rasht ophiolites (western Alborz, Iran). *Journal of the Geological Society*, 174, 741–758.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003) Composition of the continental crust. In: *The crust, a treatise in geochemistry* (Ed. Rudnick, R. L.) 3, 1–64. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. (2002) Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology*, 97, 629–642.
- Shafaii Moghadam, H., Khademi, M., Hu, Z., Stern, R. J., Santos, J. F. and Wu, Y. (2015) Cadomian (Ediacaran–Cambrian) arc magmatism in the ChahJam–Biarjmand metamorphic complex (Iran): Magmatism along the northern active margin of Gondwana. *Gondwana Research*, 27, 439–452.
- Shand, S. J. (1943) *Eruptive Rocks; Their Genesis, Composition, Classification, and their Relation to Ore Deposits, with a Chapter on Meteorites*. Revised second ed. Hafner Publishing Company, New York.
- Sillitoe, R. H. (2003) Iron oxide-copper–gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38, 787-

812.

- Skirrow, R. G., Bastrakov, E. N., Barovich, K., Fraser, G. L., Creaser, R. A., Fanning, C. M., Raymond, O. L. and Davidson, G. J. (2007) Timing of iron oxide Cu- Au- (U) hydrothermal activity and Nd isotope constraints on metal sources in the Gawler craton, South Australia. *Economic Geology*, 102, 1441–1470.
- Skirrow, R. G., Murr, J., Schofield, A., Huston, D. L., van der Wielen, S. E., Czarnota, K., Coghlan, R., Highet, L. M., Connolly, L. M., Doublier, M. and Duan, J. (2019) Mapping iron oxide Cu- Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach. *Ore Geology Review*, 113, 1–31.
- Sun, S. S. and McDonough W. F. (1989) Chemical and isotopy systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean: Basins* (Eds. Saunders, A. D. and Norry, M. J.) 42, 313- 345. Geological Society, London.
- Taghadosi, H. and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2018) Mineralogy, alteration, geochemistry, and fluid inclusion studies of Fe oxide copper mineralization of Namegh area, NE Kashmar, Iran. *Journal of Crystallography and Mineralogy*, 3(26), 541- 554 (in Persian).
- Tatsumi, Y. (1989) Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 94, 4697–4707.
- Tatsumi, Y. and Takahashi, T. (2006) Operation of subduction factory and production of andesite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 101, 145-153.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) The continental crust, its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell, Oxford.
- Vaezipour, M. J and Alavi Tehrani, N. (1992) Geological Quadrangle Map of Torbat Heydariyeh 1: 250000. Geological Survey of Iran, Tehran, IRI.
- Walker, J. A., Patino, L. C., Carr, M. J. and Feigenson, M. D. (2001) Slab control over HFSE depletions in central Nicaragua. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 533–543.
- Wang, K., Plank, T., Walker, J. D., Smith, E. I. (2002) A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research*, 107, 5- 21.
- Whattam, S. A., Montes, C., McFadden, R. R., Cardona, A., Ramirez, D. and Valencia, V. (2012) Age and origin of earliest adakitic- like magmatism in Panama: implication for the tectonic evolution of the Panamanian magmatic arc system. *Lithos*, 142, 226- 244.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185–187.
- Williams, P. J. (2010) Classifying IOCG deposits. In: Corriveau L, Mumin H (eds) *Exploring for iron oxide copper- gold deposits: Canada and global analogues*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 20, 13- 22.
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Oliver, N. H. S. and Marschik, R. (2005) Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. 100th Anniversary of *Economic Geology*, 371–405.
- Wilson. M. (1989) *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. Harper Collins, London.
- Woodhead, J., Eggins, S. and Johnson, R. (1998) Magma genesis in the New Britain island arc: Further insights into melting and mass transfer processes. *Journal of Petrology*, 39(9), 1641–1668.
- Yang, W. and Li, S. (2008) Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102(1-3), 88-117.
- Zulkarnain, I. (2009) Geochemical signature of Mesozoic volcanic and granitic rocks in Madina regency area, North Sumatra, Indonesia and its tectonic implication. *Indonesian Journal of Geoscience*, 4, 117- 131.