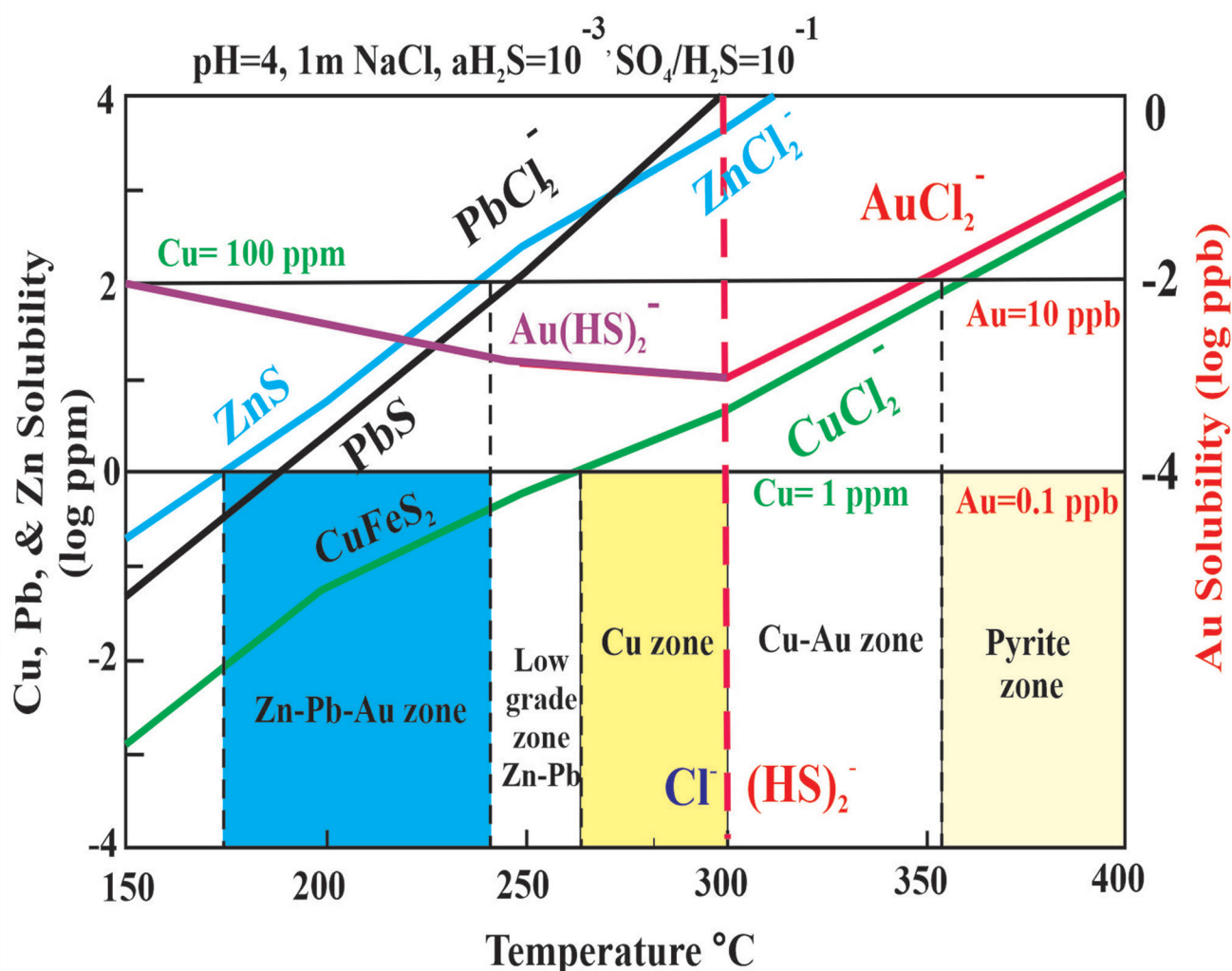


زمین شناسی اقتصادی





صاحب امتیاز

دانشگاه فردوسی مشهد

سر دبیر و مدیر مسئول

دکتر محمدحسن کریم‌پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

karimpur@um.ac.ir

هیأت تحریریه

دکتر محمدحسن کریم‌پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر چارلز استرن، استاد (دانشگاه کلرادو امریکا)

دکتر محمدحسین آدابی، استاد (دانشگاه شهید بهشتی)

دکتر ابراهیم راستاد، استاد (دانشگاه تربیت مدرس تهران)

دکتر غلامرضا لشکری‌پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر عباس مرادیان، استاد (دانشگاه شهید باهنر کرمان)

دکتر سیدرضا موسوی حرمی، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر سیداحمد مظاهری، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر مجید قادری، استاد (دانشگاه تربیت مدرس تهران)

دکتر فرهاد بوذری، دانشیار پژوهشی (دانشگاه بریتیش کلمبیا)

دکتر امیر مرتضی عظیم‌زاده، پژوهشگر ارشد (دانشگاه تکنولوژی لولنو)

کارشناس اجرایی

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مدیر اجرایی

دکتر آزاده ملکزاده شفاوردی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ویراستار فارسی

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

صفحه‌آرا

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اطلاعات نشریه

شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

دوره انتشار: فصلنامه

پروانه انتشار

(وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی)

۱۳۸۸/۰۹/۰۲ - ۲۱۱۲۴

اعتبار علمی - پژوهشی

(کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور)

۱۳۸۹/۰۵/۰۹ - ۴۱۴۳

تماس با نشریه

آدرس پستی: ایران، مشهد، میدان آزادی، پردیس

دانشگاه فردوسی، دانشکده علوم، نشریه زمین‌شناسی

اقتصادی

کد پستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۳

پست الکترونیکی: econg@um.ac.ir

وبسایت: <https://econg.um.ac.ir>

تلفن: ۳۸۸۰۴۰۵۰ (۵۱) ۰۹۸

نمابر: ۳۸۸۰۷۳۵۲ (۵۱) ۰۹۸

نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به صورت فصلنامه، در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی و علوم وابسته، به زبان فارسی و با چکیده مبسوط انگلیسی منتشر می‌شود.

اهداف

- نشر مقاله‌های علمی
- گسترش پژوهش و ارتقای دانش زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی
- نشر آخرین دستاوردهای علمی پژوهشگران دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های علمی در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی و علوم مرتبط با آن

زمینه‌های موضوعی

- زمین‌شناسی اقتصادی
- اکتشافات ژئوشیمیایی
- اکتشافات ژئوفیزیکی
- سنجش از دور و اکتشاف منابع معدنی
- زمین‌شناسی محیط زیست

بانک‌ها و نمایه‌نامه‌ها



با سلام

مواد معدنی در ادوار گذشته همواره نقشی مهم و اساسی در زندگی انسان ایفا کرده است. میزان و نوع استفاده از مواد معدنی در تقسیمات زمانی، رابطه‌ای مستقیم با دانایی انسان‌ها داشته است. امروزه مواد معدنی و معادن، جایگاه ویژه‌ای در اشتغال، اقتصاد، صنعت و استقلال کشورها دارند. پایدارترین اشتغال و درآمد مربوط به بخش معدن است. برای مثال، معدن مس پورفیری بینگام واقع در ایالت یوتای امریکا، از ۱۰۴ سال قبل تاکنون در حال بهره‌برداری است و حدود چهار نسل در این معدن شاغل بوده‌اند. معدن یادشده نقشی مهم در تولید مس و اقتصاد امریکا در طول تمامی این سال‌ها داشته است. کشورهای توسعه‌یافته، برنامه‌های ویژه و توجه جدی به اکتشاف و استخراج مواد معدنی دارند؛ از جمله می‌توان کشورهای استرالیا، کانادا، امریکا و چین را نام برد.

زمین‌شناسان اقتصادی و رشته‌های مرتبط، مسئولیت شناسایی، اکتشاف و مدیریت ذخایر معدنی را در کشورهای توسعه‌یافته برعهده دارند. موفقیت در کشف ذخایر معدنی، مرهون زمین‌شناسان اقتصادی باتجربه، کارآمد، ماهر و برخوردار از آخرین یافته‌های دانش زمین‌شناسی اقتصادی است. با نگاهی به گذشته، می‌توان دریافت که ایرانی‌ها در کشف و ذوب فلزات، دارای تاریخچه درخشان و با قدمت چندین هزار ساله‌اند. نخستین آلایژ (برنز) توسط ایرانی‌ها اختراع شد. بنابراین، ایران در زمینه کشف مواد معدنی، مهد دانایی، استعداد، توانمندی و تلاش بوده و انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران با توجه به توانایی بسیار ارزشمند و بالای کشور در خصوص مواد معدنی، تلاش خواهد کرد تا از طریق آموزش، پژوهش‌ها و اصلاحات قانونی، بهترین جایگاه در کشف ذخایر معدنی را برای کشور مهیا سازد.

انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران مصمم است با همدلی و تلاش اساتید، پژوهشگران، دانشجویان و دستگاه‌های اجرایی مرتبط با برنامه‌ریزی، گام‌های مهمی در راستای تحقق جایگاه مناسب اکتشاف ذخایر معدنی در کشور را فراهم کند. موارد زیر در دستور کار انجمن قرار گرفته است:

- ۱) هدفمند کردن تحقیقات و پژوهش‌ها در زمین‌شناسی اقتصادی (اکتشافات ذخایر معدنی). با توجه به توانایی و شرایط زمین‌شناسی و اولویت‌های تحقیقاتی - اکتشافی در خصوص اکتشاف ذخایر معدنی در مناطق مختلف کشور، این امر با مشارکت اساتید، پژوهشگران و دستگاه‌های اجرایی محقق خواهد شد. اساتید، پژوهشگران، دانشجویان دکتری و کارشناسی ارشد دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی، مجری طرح‌های مزبور خواهند شد. در خصوص تعیین اولویت‌ها، مؤلفه‌های متعددی مورد توجه قرار خواهد گرفت: ۱- تأمین مواد اولیه برای توسعه صنعت کشور، ۲- توسعه اشتغال در مناطق کم‌برخوردار با کشف ذخایر معدنی، ۳- تأمین مواد اولیه برای مصالح سبک و عایق‌های حرارتی با توجه به افزایش نرخ انرژی، ۴- افزایش سهم صادرات مواد معدنی با تأکید بر ارزش افزوده، ۵- توجه جدی به مسایل زیست‌محیطی اکتشاف و استخراج معادن، ۶- نوآوری در دانش و فناوری اکتشاف، ۷- اکتشاف مواد راهبردی و ۸- سایر مؤلفه‌ها.

۲) رصد کردن آموزش و تحقیقات زمین‌شناسی اقتصادی در کشورهای توسعه‌یافته و بومی‌سازی و به‌روز رسانی آموزش و پژوهش زمین‌شناسی اقتصادی در ایران.

۳) خوشبختانه نشریه زمین‌شناسی اقتصادی با کسب مجوز علمی-پژوهشی، زمینه چاپ تحقیقات و پژوهش‌های زمین‌شناسی اقتصادی در کشور را فراهم کرده است. با عنایت به این مهم که نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، نمادی از متخصصان زمین‌شناسی اقتصادی ایران است؛ لذا از تمامی اساتید، پژوهشگران و دانشجویان دکتری درخواست می‌شود بهترین مقاله‌های علمی-پژوهشی خود را برای چاپ در این مجله ارسال نمایند.

۴) برنامه‌ریزی برای برگزاری کارگاه‌های آموزشی و تخصصی.

- ۱ بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و زمین‌شیمی در محدوده اکتشافی مس کلاته‌نو، شمال غرب گناباد (استان خراسان رضوی)
صدیقه زیرجانی‌زاده، روح‌اله میری بیدختی
- ۲۳ زمین‌شیمی سنگ‌کل و شیمی‌بلور آپاتیت در دنبله‌های نفوذی ناحیه قینرجه- انگوران (غرب زنجان): رویکردی برای شناسایی گرانیتوئیدهای مولد اسکارن و تحولات ماگمایی- فلززایی
افسون دستور، ابراهیم طالع فاضل، اشرف ترکیان
- ۵۷ واکاوی تحلیلی و تطبیقی برنامه‌های توسعه صنعت مس در ایران
عادل روحی جویباری، سید محمد اسماعیل جلالی
- ۷۹ پتروژنز توده نفوذی شمال شرق جوینان، شمال اصفهان، پهنه ماگمایی ارومیه دختر
شهراد شرافت، مجید زیدی، مهناز خدای
- ۱۰۱ کاربرد مدل‌سازی فرکتالی عیار- مساحت و شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی Cu، Zn±Pb در منطقه هشتجین، شمال غرب ایران
علی امامعلی‌پور، حامد ابراهیمی، امیررضا عبدالله‌پور
- ۱۲۳ تحلیلی آسیب‌شناسانه بر برخی عوامل ایجادکننده خطا در بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی و ارائه راهکاری برای کمینه‌کردن آنها
حسین مقدسی، محسن مقدسی، احمد نیامدپور



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2024.1118



Geological, alteration, mineralogy and geochemical studies of the Copper deposit in the Kalatehno prospect area, northwest of Gonabad (Khorasan Razavi province)

Sedigheh Zirjanizadeh^{1*} , Roohollah Miri Bydokhti² ¹ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran² Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Gonabad, Gonabad, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History

Received: 27 June 2024
Revised: 21 August 2024
Accepted: 21 August 2024

Keywords

Subvolcanic units
Mineralization
vein type copper
Kalatehno
Gonabad

*Corresponding author

Sedigheh Zirjanizadeh
✉ szirjanizadeh@yahoo.com

The Kalatehno prospecting area is located at 23 Km northwest of Gonabad, Khorasan Razavi province, and north of the Lut Block. The geology of the area includes subvolcanic units with monzonite, monzodiorite and diorite porphyry, volcanic units, pyroclastic and Quaternary units. Mineralization occurred epigenetically and as vein, in volcanic and pyroclastic units. The ore vein extends to 100-300 m along, and 1-3 m wide. The hypogene mineralization is characterized by chalcopryrite as the main ore mineral and minor amount of bornite, pyrite, galena with quartz as gangue minerals. Malachite, chrysocolla, chalcocite and secondary iron oxides (hematite, goethite) constitute the mineralization of oxidation and supergene zone. The main alteration in the area are silicification propylitic and argillic. According to geochemical study, the amount of copper is between 750 to 19500 ppm, Pb from 62.8 to 30400 ppm and Zn from 258 to 1800 ppm. Based on the structural control of mineralization, alteration types, mineralization and geology features, the Kalatehno deposit is similar to vein type copper deposits.

How to cite this article

Zirjanizadeh, S. and Miri Bydokhti, R., 2024. Geological, alteration, mineralogy and geochemical studies of the Copper deposit in the Kalatehno prospect area, northwest of Gonabad (Khorasan Razavi province). *Journal of Economic Geology*, 16(3): 1–22. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1118>



©2024 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

The Kalatehno area is situated 23 km northwest of Gonabad city, Khorasan Razavi province, and in geographic latitude 34°28'30" to 34°29'30" N and longitude 58°31'30" to 58°32'30" E. This area is located in the north of the Lut Block zone. Due to different tectonic situations and the huge amount of magmatism with different geochemical characteristics, the Lut Block has very good potential for various mineralization. Mineralization events in Lut Block have occurred over the Tertiary. Previous studies in the prospecting area of the Kalatehno copper deposit include studies by [Zirjanizadeh et al., \(2016\)](#) and [Zirjanizadeh \(2015\)](#), which focus on petrology, geochemistry, mineralization, and alteration of igneous rocks northwest Gonabad and Kalatehno area. [Bemani et al. \(2023\)](#) discuss the processing of satellite images for extracting alterations with field evidence in the Kalatehno deposit. The purpose of this research is to identify rock units, alteration, mineralization and geochemistry and characterize the ore-forming processes to recognize mineralization type in the Kalatehno prospecting area.

Materials and methods

The methods include fieldwork, laboratory work, and interpretation. The fieldwork includes direct observation and sampling. After conducting field surveys and collecting 100 rock samples from different geological units and 60 samples from mineral veins, suitable samples were selected and prepared for laboratory studies. 30 thin sections were prepared and studied for a geological and alteration map with a scale of 1:5000. The texture and mineralogy were studied by preparing 10 polished block sections. For geochemical analysis, Laboratory analysis is conducted using Fire Assay (FA) for gold grade and Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) for Cu, Ag, Pb, As, Zn and other elements that were analyzed at Zarazma laboratory.

Result and Discussion

The lithological units found in the study area include volcanic and tuff units, subvolcanic rocks, dacite porphyritic dykes, and Quaternary units. The volcanic rocks are mostly composed of pyroclastic rocks, rhyolite, andesite and trachyandesite with

porphyritic textures. Rhyolites are observed in the northwest of the study area.

The phenocrysts at rhyolite include quartz, potassium feldspar, plagioclase, and opaque minerals. The groundmass comprises microcrystalline quartz and alkali feldspars, and the alkali feldspars are altered to clay minerals. Subvolcanic outcrops as stocks in different parts of the area. These units include biotite granodiorite porphyry, monzodiorite porphyry, biotite monzonite porphyry and biotite quartz monzodiorite porphyry. Propylitic and silicic alterations are common alterations of the Kalatehno prospect. The silicic alteration zone is divided into four main sub-zones: strong siliceous, strong siliceous + strong propylitic + weak argillic, and strong siliceous + epidote. The important minerals of these zones are quartz 50-60 %, sericite (less than 1-2 %), calcite (less than 2 %-5 %), epidote (veins and scattered up to 2%), chlorite (less than 2 %) resulting from alteration of hornblende and biotite, pyrite in about 1 % and clay minerals resulting from the alteration of feldspars. Quartz exists as disseminated, veins, veinlets and crystalline (milky quartz and amethyst) in rock units and is accompanied by mineralization in the Kalatehno area.

The propylitic alteration has different intensities and has affected the entire area. Chlorite reaches from 1% to 5% in strong propylitic. Epidote is seen as a vein and coarse crystal in groundmass and also a replacement in plagioclase and hornblende, and in some cases, because of high abundance, can be mentioned as a separate alteration. In the Kalatehno prospecting area, mineralization is observed in different forms: vein, disseminated, stockwork, replacement, colloform, and hydrothermal breccia. The mineralization in the Kalatehno area has occurred as veins in the host rock (pyroclastic rocks) and is observed with variable lengths and thicknesses. The mineralization is controlled by structures and faults. The vein mineralogy includes primary sulfide minerals, pyrite, chalcopyrite, bornite, and galena. Quartz grains with chalcopyrite and bornite were found. Both minerals are surrounded by chalcocite. Due to supergene processes, secondary minerals comprise malachite, azurite, chrysocolla, chalcocite, and Mn and Fe oxides with quartz as gangue mineral. The amount of copper is between 750 to 9100 ppm, Pb from 62.8 to 30400 ppm, and Zn from 258 to 1800 ppm. The

source rock related to mineralization in the area is monzodiorite porphyry. Silicic and propylitic alteration zones are the most important alteration.

Conclusion

In Kalatehno prospect area, vein-type epigenetic mineralization occurring along fault zones with main trending NW–SE. Mineralization is mainly hosted in pyroclastic rocks (tuffs) with silicification and propylitic alterations. Ore minerals at study area comprise pyrite, chalcopyrite, bornite, galena, and Secondary minerals include malachite, azurite,

chrysocolla, chalcocite, Fe oxides (hematite, goethite) and Mn oxides. quartz is main gangue mineral. Vein copper deposits include various vein-type deposits in which copper is the dominant metal. The ore minerals are deposited as open-space filling. Mineralogy of ore and texture, structurally controlled mineralization and type of alterations are similar to vein copper deposits.

Acknowledgments

We thank from anonymous reviewers and the editor for their thoughtful reviews.



بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و زمین‌شیمی در محدوده اکتشافی مس کلاته‌نو، شمال غرب گناباد (استان خراسان رضوی)

صدیقه زیرجانی‌زاده^{۱*}، روح‌اله میری بیدختی^۲

^۱ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

محدوده اکتشافی کلاته‌نو در ۲۳ کیلومتری شمال غرب گناباد، در استان خراسان رضوی و شمال بلوک لوت واقع شده است. زمین‌شناسی این محدوده شامل واحدهای نفوذی نیمه‌عمیق، آتشفشانی، رسوبی و کواترنری است. کانی‌سازی به صورت اپی‌ژنتیک و از نوع رگه‌ای، در داخل واحدهای آتشفشانی و پیروکلاستیک شکل گرفته است. ابعاد هر رگه به ضخامت متوسط ۱ تا ۳ متر و طول حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر متغیر است. کانه‌زایی عمده در سطح شامل مالاکیت، کریزوکولا، آزوریت، اکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) و کانی‌های سولفیدی اولیه شامل کالکوپیریت و به مقدار کمتر بورنیت، پیریت و گالن است. فراوان‌ترین کانی باطله کوارتز است. مهم‌ترین دگرسانی‌های رخ داده در منطقه، سیلیسی‌شدن، پروپیلیتیک و آرژیلیک است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شیمیایی، مقدار مس بین ۷۵۰ تا ۱۹۵۰۰ گرم در تن، سرب از ۶۲/۸ تا ۳۰۴۰۰ گرم در تن و مقدار روی از ۲۵۸ تا ۱۸۰۰ گرم در تن متغیر است. بر اساس شواهدی چون کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی‌ها، کانی‌شناسی ذخیره، محدوده اکتشافی کلاته‌نو مشابه کانسارهای مس رگه‌ای است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

واژه‌های کلیدی

واحدهای نفوذی نیمه‌عمیق

کانی‌سازی

مس رگه‌ای

کلاته‌نو

گناباد

نویسنده مسئول

صدیقه زیرجانی‌زاده

szirjanizadeh@yahoo.com ✉

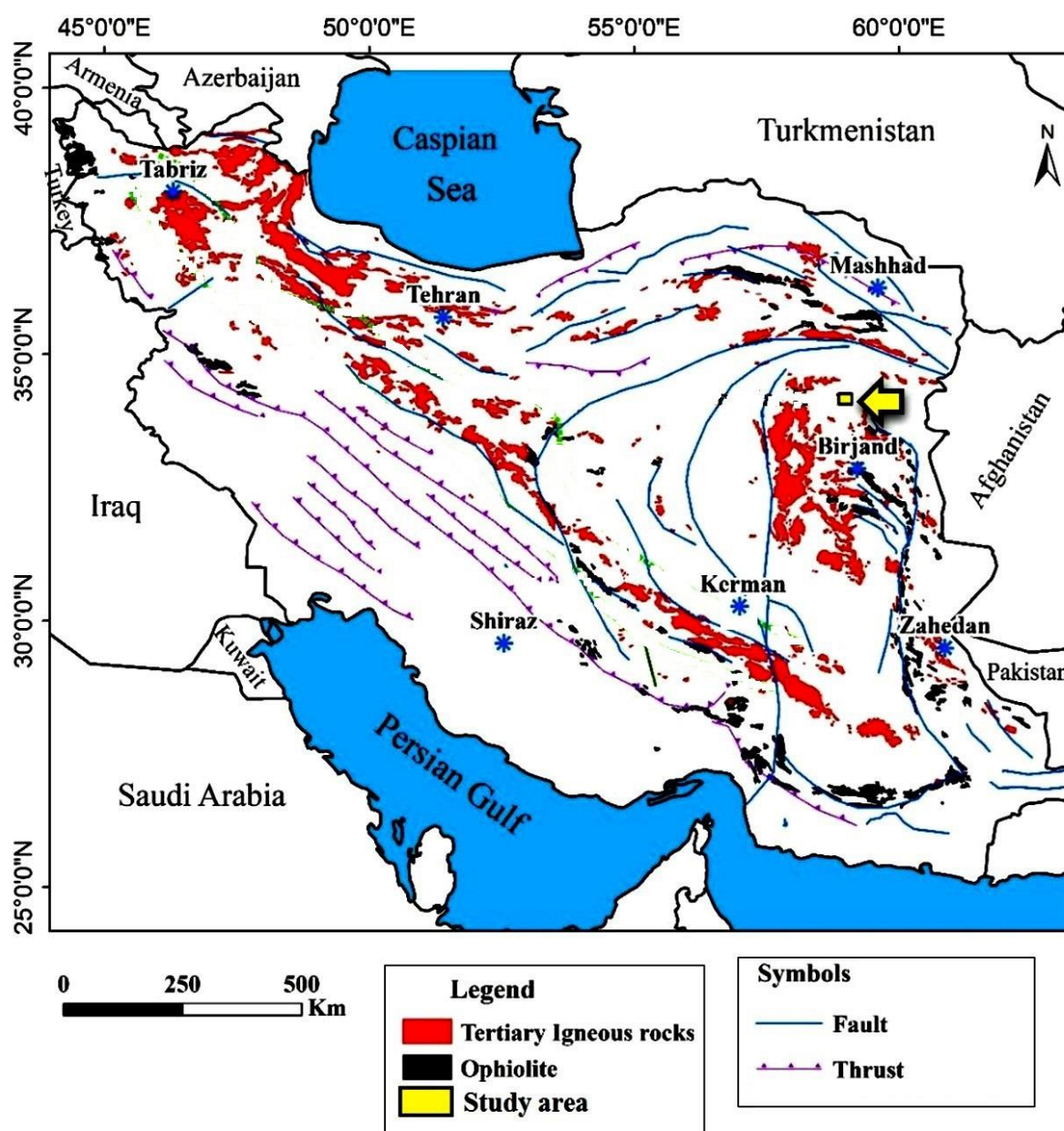
استناد به این مقاله

زیرجانی‌زاده، صدیقه؛ و میری بیدختی، روح‌اله، ۱۴۰۳. بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و زمین‌شیمی در محدوده اکتشافی مس کلاته‌نو، شمال غرب گناباد (استان خراسان رضوی). زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳): ۱-۲۲. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1118>

مقدمه

محدوده اکتشافی کلاته‌نو در شرق ایران و ۲۳ کیلومتری شمال غرب گناباد در استان خراسان رضوی و بین طول‌های جغرافیایی $58^{\circ}31'30''$ تا $58^{\circ}32'30''$ و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}28'30''$ تا $34^{\circ}29'30''$ قرار دارد. این منطقه از لحاظ تقسیم‌های رسوبی-ساختاری ایران در شمال بلوک لوت واقع شده است (Aghanabati, 2004) (شکل ۱).

محدوده اکتشافی کلاته‌نو در شرق ایران و ۲۳ کیلومتری شمال غرب گناباد در استان خراسان رضوی و بین طول‌های جغرافیایی $58^{\circ}31'30''$ تا $58^{\circ}32'30''$ و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}28'30''$ تا $34^{\circ}29'30''$ قرار دارد. این منطقه از لحاظ تقسیم‌های رسوبی-ساختاری ایران در شمال بلوک لوت واقع شده است (Aghanabati, 2004) (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت محدوده اکتشافی کلاته‌نو در نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران (Alavi, 1991)

Fig. 1. Location of the Kalatehno prospecting area in the tectonic map of Iran (Alavi, 1991)

است. بررسی نوع دگرسانی و نوع کانی سازی در این منطقه اکتشافی به دلیل وجود دگرسانی های گسترده و مشابه در تمام منطقه شمال غرب گناباد می تواند به دیدگاه منطقه ای و بررسی احتمالی پتانسیل بزرگ تر کمک کند.

روش مطالعه

در راستای اهداف این پژوهش، ابتدا پژوهش های پیشین شامل نقشه ها و گزارش ها جمع آوری و بررسی شدند. پژوهش در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی ادامه یافت. بررسی های صحرایی شامل شناسایی واحدهای سنگی و رخنمون های کانی سازی بوده که در این راستا تهیه نقشه زمین شناسی، دگرسانی و کانی سازی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ با برداشت بیش از ۱۰۰ نمونه سنگی از واحدهای مختلف زمین شناسی و ۶۰ نمونه از رخنمون های ماده معدنی و از محل ترانشه ها صورت گرفت. سپس به انتخاب و آماده سازی نمونه های مناسب برای انجام بررسی های آزمایشگاهی مورد نیاز پرداخته شد. از این بین، تعداد ۳۰ مقطع نازک برای بررسی های سنگ نگاری، دگرسانی و به منظور تهیه نقشه زمین شناسی تهیه شد و ۱۰ بلوک صیقلی برای بررسی های کانه نگاری و بررسی ساخت و بافت تهیه شد. بعد از تهیه مقاطع، بررسی سنگ نگاری و مینرالوگرافی مقاطع با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری و انعکاسی در مجتمع آموزش عالی گناباد انجام شد. به منظور بررسی های زمین شیمیایی و اندازه گیری مقادیر عناصر فلزی، ۶ نمونه از کانسنگ رگه ها برای آنالیز عناصر فلزی با روش AAS در آزمایشگاه شرکت زر آزمای تهران مورد آنالیز قرار گرفتند (جدول ۱).

زمین شناسی منطقه

محدوده اکتشافی کلاته نو از نظر زمین شناسی ناحیه ای، در شمال غرب برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد واقع شده است (Ghaemi and Shahrivar, 2004). بر اساس این نقشه، بخش اعظم منطقه توسط سنگ های آتشفشانی و آذر آواری نظیر آندزیت،

بلوک لوت به دلیل داشتن موقعیت های زمین ساختی مختلف در زمان های گذشته دارای حجم عظیم ماگماتیسیم با ویژگی های زمین شیمیایی متفاوت است که گاهی پتانسیل های بسیار مناسبی را برای تشکیل کانی سازی های مختلف فراهم آورده است (Karimpour et al., 2012a). کریم پور و همکاران (Karimpour et al., 2012b)، نشان دادند که محدوده سنی ائوسن میانی تا الیگوسن مهم ترین پنجره زمانی کانی سازی در بلوک لوت است. آنها توده های نفوذی تشکیل شده در این پنجره زمانی را مرتبط با فرو رانش بلوک افغان به زیر بلوک لوت و تشکیل حجم عظیم ماگماتیسیم مرتبط با کانی زایی در منطقه می دانند. از کانی سازی های بررسی شده در بلوک لوت می توان به کانسارها و مناطق اکتشافی مس پورفیری ماهرآباد و خویچک (Malekzadeh Shafaroudi, 2009)، ده سلم (Arjmandzadeh and Santos, 2014)، ماهور (Miri Bydokhti et al., 2015)، مس، سرب و روی نوع رگه ای اندیس های شوراب (Mehrabi et al., 2011)، خور (Javidi Moghaddam et al., 2018)، حوض رئیس (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013)، سه چنگی (Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015)، مس - طلای نوع IOCG قلعه زری (Karimpour et al., 2007) و طلای اپی ترمال سولفید بالای بالازرد (Miri Bydokhti et al., 2014) اشاره کرد. در محدوده اکتشافی کلاته نو، بمانی و همکاران (Bemani et al., 2023) با پردازش تصویرهای ماهواره ای و باز دیدهای میدانی و بررسی های سنگ نگاری، زون های دگرسانی را بررسی کرده اند. زیرجانی زاده و همکاران (Zirjanizadeh et al., 2016; Zirjanizadeh, 2015) به بررسی های سنگ شناسی، زمین شیمی، کانی سازی و منشأ سنگ های منطقه شمال غرب گناباد می پردازند که محدوده اکتشافی کلاته نو نیز در این منطقه واقع شده است. هدف از این پژوهش شناسایی واحدهای سنگی، دگرسانی، کانی سازی، زمین شیمی و تحلیل سامانه کانی سازی در منطقه اکتشافی کلاته نو

بررسی‌ها در محدوده اکتشافی کلاته‌نو، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته شامل واحدهای آتشفشانی و آذرآواری (توف‌ها)، سنگ‌های نفوذی نیمه عمیق، دایک ریولیت پورفیری و واحدهای رسوبی و کواترن است (شکل ۲).

تراکی آندزیت، بازالت، برش و توف اسیدی پالئوسن-ائوسن، پوشیده شده است. بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش نشان داد که برخی از واحدهایی که در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد، واحدهای آتشفشانی معرفی شده‌اند، توده‌های نفوذی نیمه عمیق هستند (شکل ۲). بر اساس این

جدول ۱. آنالیز شیمیایی نمونه‌های کانه‌دار در محدوده کلاته‌نو (داده‌ها به جز طلا بر حسب ppm)

Table 1. Chemical analysis of ore samples in the Kalatehno area (data in ppm (Au in ppb)

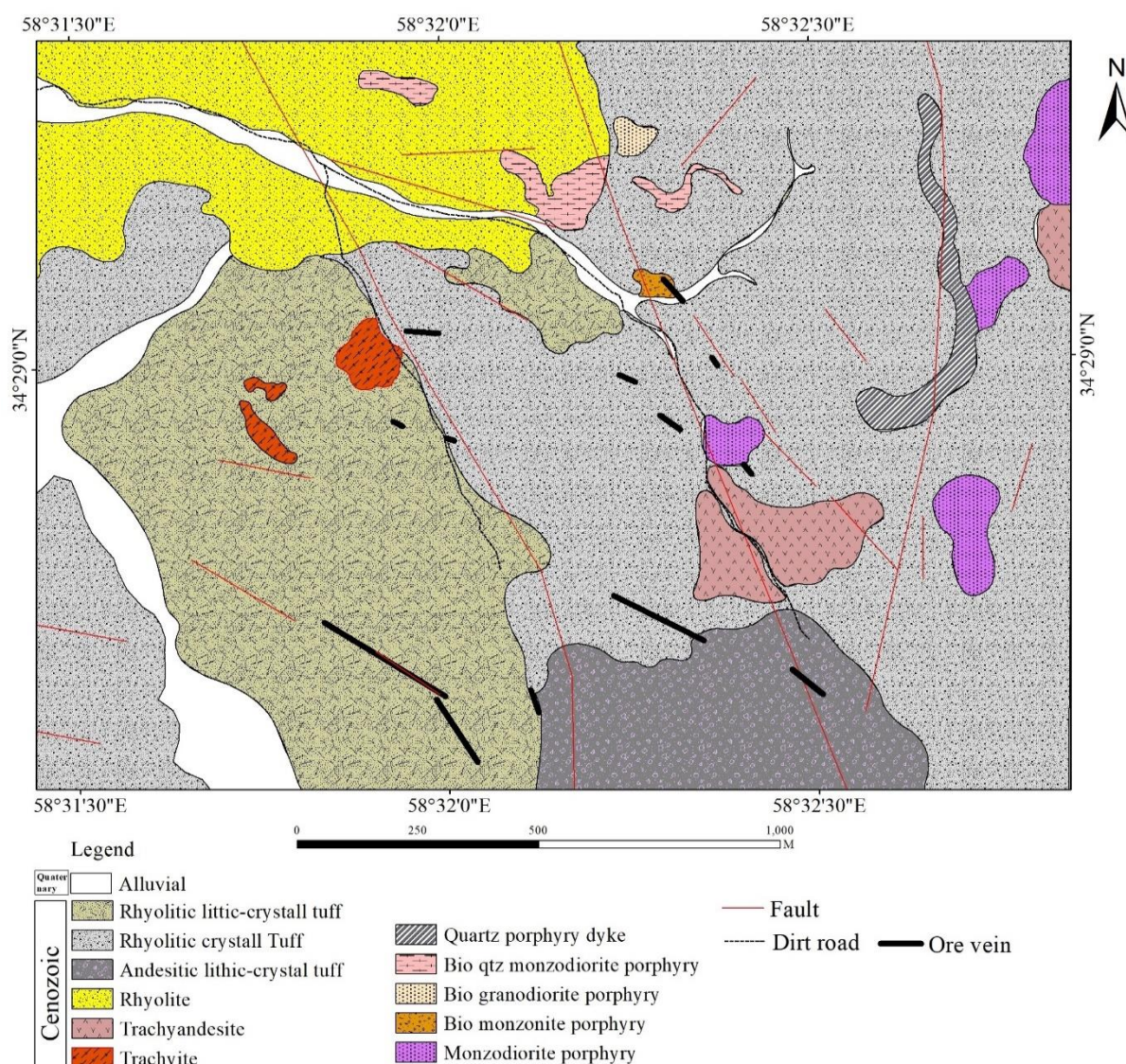
sample	Ag	Cd	Cu	Fe (%)	Mn	Pb	Zn	Sn	Au
Geo-kn-10	8	2	9100	4.79	1100	84.9	272.5	<1	89
Geo-kn-11	22.7	<1	738.4	16.39	31.2	78.6	270.3	<1	65
Geo-15	10.9	4/2	1800	10.22	123	256.9	693.5	<1	11
geo30	30.3	5.2	19500	3.34	76.5	30400	1800	<1	99
Geo-31	16	<1	876.20	0.67	166.1	1700	1800	<1	12
Geo-Kn-1	22.1	0.5	752.7	15.84	34	62.8	258	1<	95

سنگ‌نگاری

بر اساس بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری، واحدهای آتشفشانی و آذرآواری و توده‌های نیمه عمیق واحدهای تشکیل دهنده محدوده مورد بررسی هستند.

واحدهای آتشفشانی و آذرآواری: این واحدها گسترش و رخنمون سطحی زیادی در منطقه دارند و شامل واحدهای آذرآواری (توف و آگلومرا)، ریولیت، تراکی آندزیت و تراکیت است (شکل ۲ و شکل ۳-A، B و C). رخنمون ریولیت‌ها در شمال غرب منطقه مورد بررسی دیده می‌شود (شکل ۲). ریولیت‌های شمال غرب حالت جریانی، لایه‌ای و در بعضی قسمت‌ها حالت قله‌ای شکل دارند (شکل ۳-A و C). بافت ریولیت‌ها پورفیری است. درشت بلورهای موجود شامل کوارتز، خلیجی ۳ تا ۵ درصد، فلدسپار پتاسیم ۱۵ تا ۲۰ درصد، پلاژیوکلاز ۱۰ درصد است. کانی‌های کدر نیز به صورت درشت بلور حضور دارند. زمینه شامل کوارتز ریزبلور و آلکالی فلدسپارها تا ۷۰ درصد است و آلکالی فلدسپارها آرژیلیکی شده‌اند. تراکی آندزیت‌ها در مرکز منطقه و به شکل تپه‌ماهور

رخنمون دارند (شکل ۲). بافت این سنگ پورفیری است و درشت بلورها شامل پلاژیوکلاز تا ۲۵ درصد، قطعه‌های هورنبلند و بیوتیت با حاشیه سوخته ۵ درصد و آلکالی فلدسپات سریسیتی شده ۱ درصد دیده می‌شود (شکل ۳-D). زمینه شامل میکرولیت‌های پلاژیوکلاز ۳۰ تا ۳۵ درصد و کانی‌سازی کدر ۱ تا ۳ درصد است (شکل ۳-E). اپیدوت هم داخل پلاژیوکلاز و هم در زمینه تا ۱۵ درصد دیده می‌شود. کلریت و کربنات به صورت پراکنده کمتر از ۳ درصد دیده می‌شود. کوارتز به صورت رگچه سیلیسی در داخل متن سنگ دیده می‌شود. رخنمون‌های کوچکی از واحد تراکیت در غرب منطقه وجود داشته که در صحرا به رنگ بنفش دیده می‌شود (شکل ۲). ویژگی این واحد وجود بافت تراکیتی آن است (شکل ۳-E). میکرولیت‌های فلدسپار نوع سانیدین تا ۹۰ درصد سنگ را شامل می‌شوند. هورنبلند با حاشیه اکسید آهنی شده که قالب آنها توسط کربنات پر شده بین ۱ تا ۳ درصد دیده می‌شود. در این توده کربنات به صورت رگچه‌های بسیار ظریف (به ابعاد کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) و در زمینه تا ۲ درصد دیده می‌شود. اپیدوت تا ۳ تا ۵ درصد در زمینه دیده می‌شود (شکل ۳-E).



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه اکتشافی مس کلاته‌نو

Fig. 2. Geological map of Kalatehno prospect area

مس کلاته‌نو دیده می‌شود (شکل ۲). بافت این واحد پورفیری است. درشت بلورها شامل پلاژیوکلاز تا ۱۰ درصد، کوارتز ۴ تا ۵ درصد و بیوتیت ۳ تا ۵ درصد است زمینه شامل آلکالی فلدسپارها و کانی‌های دگرسانی است. این واحد به شدت دگرسان شده و رگچه‌های اپیدوت در نمونه دستی قابل مشاهده است. عمده پلاژیوکلازها به اپیدوت تبدیل شده‌اند و محتوی کربناتی شدن بین

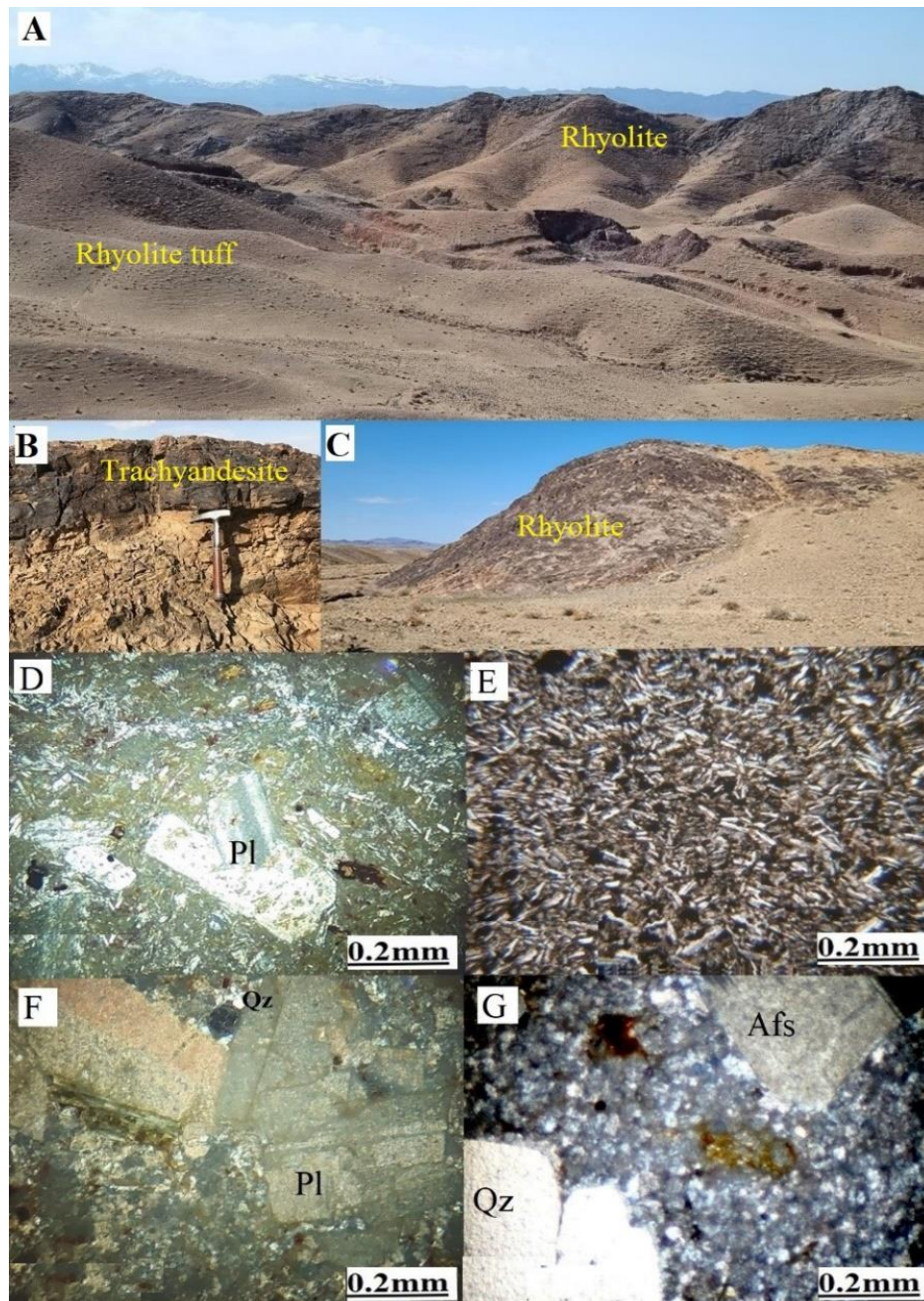
توده‌های نیمه عمیق: توده‌های نفوذی و نیمه عمیق رخمون یافته در منطقه به صورت استوک در قسمت‌های مختلف رخمون دارند و شامل واحدهای بیوتیت گرانودیوریت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری، بیوتیت مونزونیت پورفیری و بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری است. رخمون واحد بیوتیت گرانودیوریت پورفیری با راستای شمالی - جنوبی در شمال محدوده اکتشافی

۳۰ تا ۴۰ درصد است (شکل ۳-F). بیوتیت مونزونیت پورفیری تقریباً در مرکز منطقه کانی سازی مس کلاته نو رخنمون دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری است و حاوی ۱۰ تا ۱۵ درصد فلدسپات پتاسیم دگرسان شده و ۳ درصد پلاژیو کلاز و ۳ تا ۵ درصد بیوتیت کلریتی شده است. دگرسانی سیلیسی (۵ تا ۷ درصد) و ۱ تا ۲ درصد سیریسیت در این توده دیده می شود. رخنمون های کوچکی از بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری در شمال منطقه و به شکل استوک وجود دارد (شکل ۲). این واحد دارای بافت پورفیری است. درشت بلورها در آن شامل ۲۰ درصد پلاژیو کلاز، بیوتیت ۱۰ درصد، فلدسپار پتاسیم ۱۰ تا ۱۵ درصد و کوارتز تا ۷ درصد است. آلکالی فلدسپار در حد ۵ تا ۷ درصد سیریسیتی و ۲ تا ۳ درصد آرژیلیکی شده است. بیوتیت تا ۱۰ درصد به کلریت دگرسان شده است. کربنات ۲ تا ۳ درصد و سیلیسی شدن در زمینه ۵ تا ۷ درصد دیده می شود (شکل ۳-G).

دگرسانی

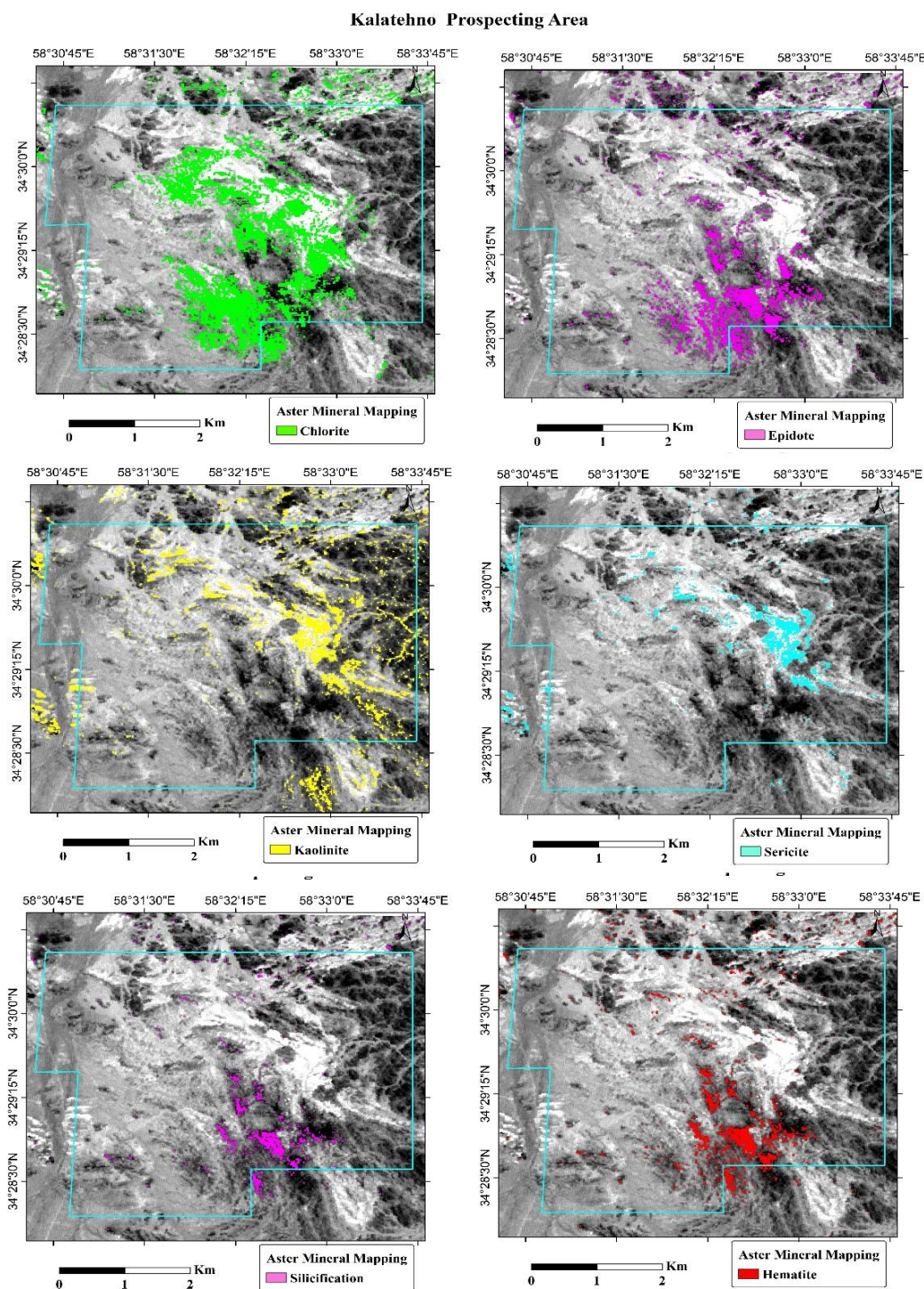
بر اساس پردازش تصویرهای ماهواره ای و بارزسازی کانی های حاصل از دگرسانی در محدوده اکتشافی کلاته نو (شکل ۴) و همچنین بررسی های صحرایی، دگرسانی منطبق بر سنگ های آتشفشانی و توده های نفوذی نیمه عمیق دیده می شود. این زون های دگرسانی شامل سیلیسی شدن و پروپیلیتیک و آرژیلیک است (شکل ۴). حضور سیلیس به صورت پراکنده در زمینه، رگه، رگچه و همچنین بلوری (کوارتز شیری و آمیتیست) تقریباً تمام منطقه را پوشش می دهد. این زون دگرسانی، واحدهای سنگی توف، ریولیت، آندزیت، توده های نفوذی نیمه عمیق و واحدهای آتشفشانی اسیدی- حدواسط (به خصوص واحد ریولیتی شمال غرب منطقه) را تحت تأثیر قرار داده است. این دگرسانی شامل زیرزون های سیلیسی شدید، سیلیسی شدید + پروپیلیتیک شدید + آرژیلیک ضعیف و سیلیسی شدید + اپیدوت است (شکل ۵ و شکل ۶-A و B). کانی مهم این زون ها شامل کوارتز، کلسیت، اپیدوت، کلریت، کانی های رسی و سیریسیت است. کلریت ناشی

از دگرسانی هورنبلند و بیوتیت است و اپیدوت و کربنات هم در زمینه به صورت پراکنده و رگچه و هم در داخل کانی های مافیک دیده می شوند. کانی های رسی ناشی از دگرسانی فلدسپات هاست. فراوانی کانی ها در این زون ها شامل کوارتز با فراوانی ۷ تا ۱۰ درصد، سیریسیت (با فراوانی کمتر از ۱ تا ۲ درصد)، کلسیت (با فراوانی کمتر از ۲ تا ۵ درصد) و اپیدوت (به صورت رگچه و پراکنده با فراوانی ۲ تا ۲ درصد، کلریت (با فراوانی کمتر از ۲ درصد) است. پیریت ۱ درصد به صورت پراکنده در متن این سنگ ها دیده می شوند. دگرسانی عمده در منطقه پروپیلیتیک با شدت های متفاوت است و تمام منطقه را تحت تأثیر قرار داده است. کانی های مافیک با فراوانی ۲۰ تا بیش از ۸۰ درصد به کلریت، کلسیت و اپیدوت تبدیل شده اند. مقدار کل کلریت با فراوانی ۱ تا ۵ درصد در پروپیلیتیک شدید می رسد. اپیدوت به صورت رگه، رگچه و درشت بلور و جانشینی در پلاژیو کلاز و کمتر در هورنبلند دیده می شود (شکل ۶-B). مقدار اپیدوت با فراوانی کمتر از ۱ درصد تا بیش از ۱۰ درصد متغیر است. کلسیت اغلب حاصل دگرسان شدن پلاژیو کلاز است؛ ولی بلورهای هورنبلند هم در بعضی قسمت ها از مرکز به کلسیت تبدیل شده اند (شکل ۶-A). در بعضی نقاط قالب پلاژیو کلاز به طور کامل با کربنات پر شده است. علاوه بر آن، کلسیت به صورت پراکنده در متن هم با فراوانی ۱ تا بیش از ۵ درصد دیده می شود. مقادیری سیریسیت با فراوانی ۱ تا ۲ درصد از تجزیه پلاژیو کلاز حاصل شده و به عنوان یک کانی فرعی در زون پروپیلیتیک دیده می شود. کوارتز با فراوانی کمتر از ۲ درصد و به صورت پراکنده در متن سنگ و در بعضی قسمت ها به صورت رگچه وجود دارد. دگرسانی آرژیلیک در حاشیه و در مواردی اطراف کانی سازی به صورت ضعیف در محدوده اکتشافی دیده می شود. به طور کلی گسترش این زون در سطح متوسط است و به رنگ زرد دیده می شود. کانی های رسی ایجاد شده ناشی از دگرسانی فلدسپات ها در سنگ های ریولیتی و توف هاست.



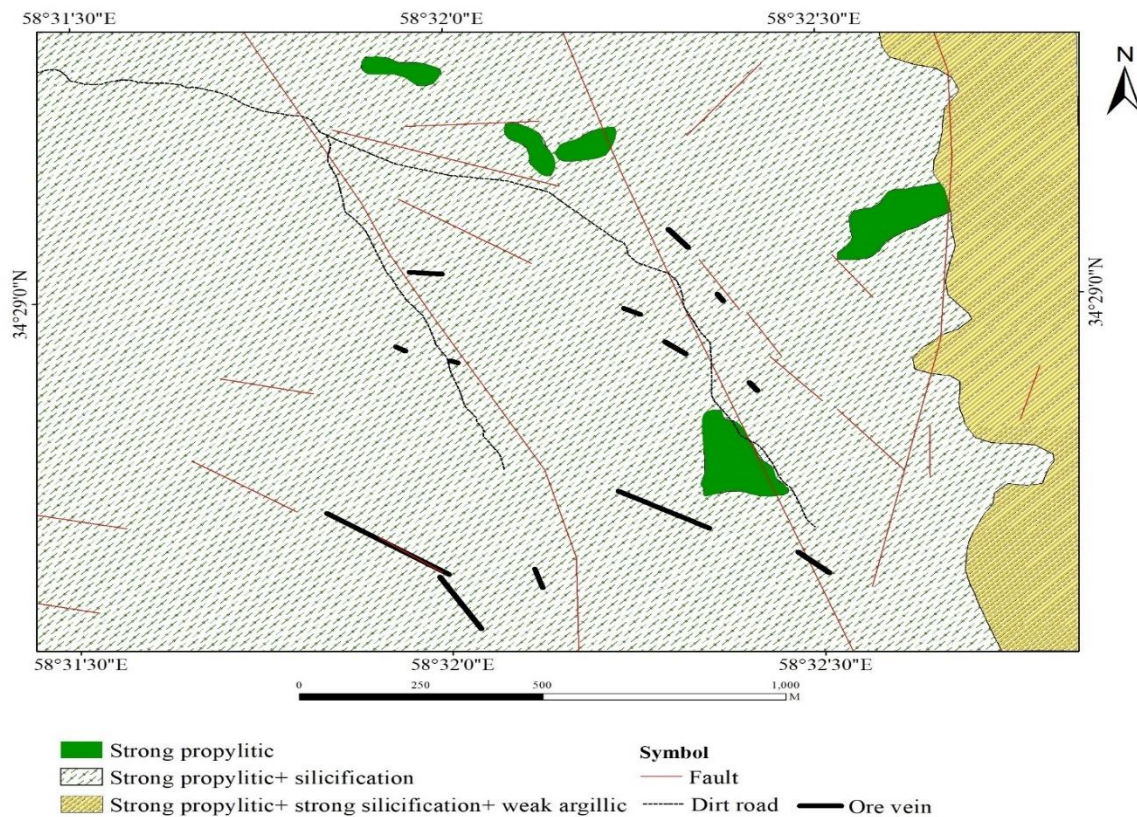
شکل ۳. A: نمایی از توپوگرافی واحدهای سنگی مختلف منطقه اکتشافی کلاته‌نو. B: رخمون واحد ریولیت (دید به شمال)، C: واحد تراکی آندزیت (دید به غرب)، D: تصویر میکروسکوپی از واحد تراکی آندزیت، E: تراکیت، F: بیوتیت گرانودیوریت پورفیری و G: بیوتیت کوارتز مونزودیوریت پورفیری (همه تصویرها در نور XPL)، علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، Afs: آلکالی فلدسپار).

Fig. 3. A: A view of different rock types in Kalatehno prospecting area, B: Outcrop of rhyolite unite (view to the N), C: Trachyandesite unite (view to the W), D: Photomicrograph of trachyandesite, E: Trachyte, F: Biotite granodiorite porphyry, and G: Biotite quartz monzodiorite porphyry (All pictures in XPL light). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Qz: quartz, Pl: Plagioclase, Afs: Alkali feldspar).



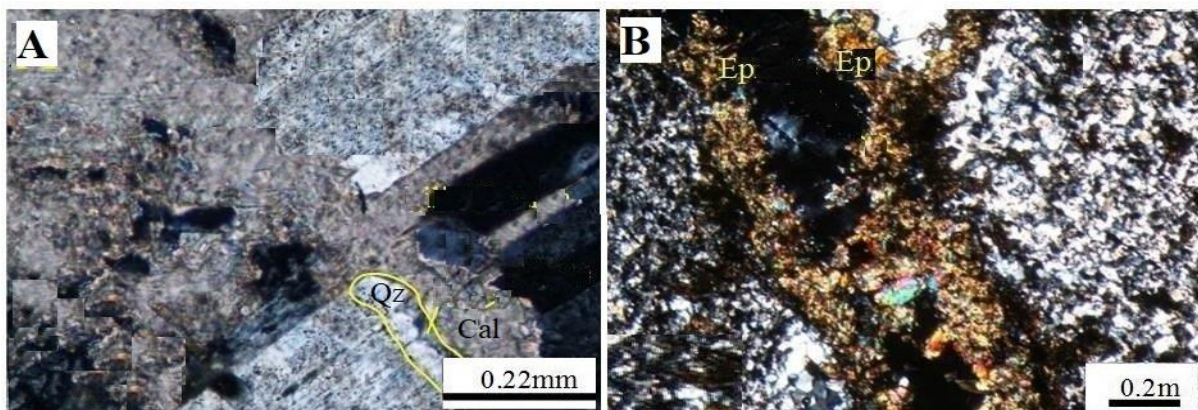
شکل ۴. تفکیک کانی های حاصل از دگرسانی در منطقه کلاته نو با استفاده از پردازش تصویرهای ماهواره ای آستر به روش پردازش زاویه طیفی (SAM)، مستطیل موقعیت منطقه مورد بررسی را نشان می دهد.

Fig. 4. Separation of minerals resulting from alteration in Kalatehno area by using Aster satellite image processing with Spectral Angle mapper method (SAM), the rectangle shows the location of the studied area.



شکل ۵. نقشه دگرسانی منطقه کلاته‌نو

Fig. 5. Alteration map of Kalatehno area



شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی از واحدهای سنگی در منطقه اکتشافی کلاته‌نو، A: بلور پلاژیوکلاز شکسته شده و توسط کلسیت پر شده است. در حاشیه پلاژیوکلاز کوارتز رشد کرده است و B: رگچه‌های اپیدوت در توف‌های شمال غرب منطقه کلاته‌نو (تصویرها در نور XPL)، علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ep: اپیدوت، Qz: کوارتز، Cal: کلسیت).

Fig. 6. Microscopic images of rock units in Kalatehno prospect area, A: The plagioclase crystal is broken and filled by calcite. Quartz has grown along the margin of plagioclase, and B: Epidote veins in the tuffs of the northwest Kalatehno. Images in XPL light, Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ep: Epidote, Qz: Quartz, Cal: Calcite).

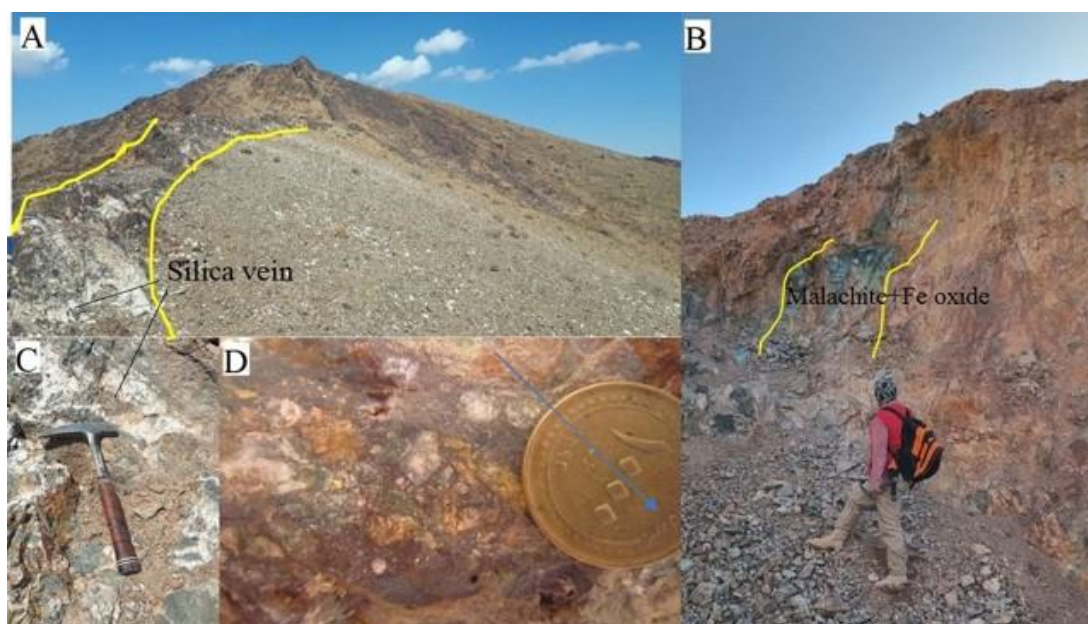
کانی‌سازی

کانی‌سازی در این محدوده به صورت رگه‌ای و برش گرمایی مشاهده می‌شود. مهم‌ترین بخش کانی‌سازی در منطقه کلاته‌نو، کانی‌سازی در سنگ میزبان آذرآواری رخ داده است.

کانی‌سازی رگه‌ای: در محدوده مورد بررسی، از رگه‌های اصلی کانی‌سازی، رگه‌های سیلیسی کانه‌دار با روند تقریبی شمال‌غرب-جنوب‌شرق است و با ضخامت متوسط ۱ تا ۳ متر و طول حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر (شکل ۷-۱، A، B و C) مشاهده می‌شود. در این رگه‌ها آغشتگی به اکسید آهن و همچنین کانی‌سازی مس شامل کانی‌های اولیه کالکوپیریت، بورنیت و پیریت و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، کالکوسیت و اکسیدهای آهن قابل مشاهده است. دگرسانی سیلیسی و پروپیلیتیک عمده‌ترین دگرسانی اطراف رگه‌هاست. رگه‌ها اغلب در واحدهای آذرآواری و به میزان کمتر در واحدهای آتشفشانی تشکیل شده‌اند. تمامی این رگه‌ها در امتداد زون‌های گسلی و شکستگی‌ها

رخ داده‌اند. از دیگر رگه‌های سیلیسی کانه‌دار، رگه‌ای با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق در مرکز و جنوب محدوده اکتشافی رخنمون دارد. در این رگه نسبت به رگه‌های دیگر حضور گالن به وضوح مشاهده می‌شود. ضخامت آن ۰/۵ تا ۱ متر، طول حدود ۲۵۰ متر و شیب رگه قائم است. سنگ میزبان رگه واحد توف بلورین ریولیتی است. کانی‌های اولیه شامل گالن، کالکوپیریت، پیریت و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، کالکوسیت و اکسیدهای آهن است. سنگ‌های دیواره در این منطقه دچار دگرسانی آرژلیک و پروپیلیتیک شده‌اند.

برش گرمایی: این زون حاوی قطعه‌های ریز و درشت زاویه‌دار از ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر است. جنس این قطعه‌ها ریولیت و توف ریولیتی بوده که توسط کوارتز و کربنات، سیمانی شده است. کانی‌سازی پیریت در قطعه‌های برشی شده و اکسیدهای آهن و منگنز در سیمان بین قطعه‌ها دیده می‌شود. قطعه‌های برش به شدت دگرسانی شده‌اند و به رنگ‌های روشن دیده می‌شوند (شکل ۷-۲، D).



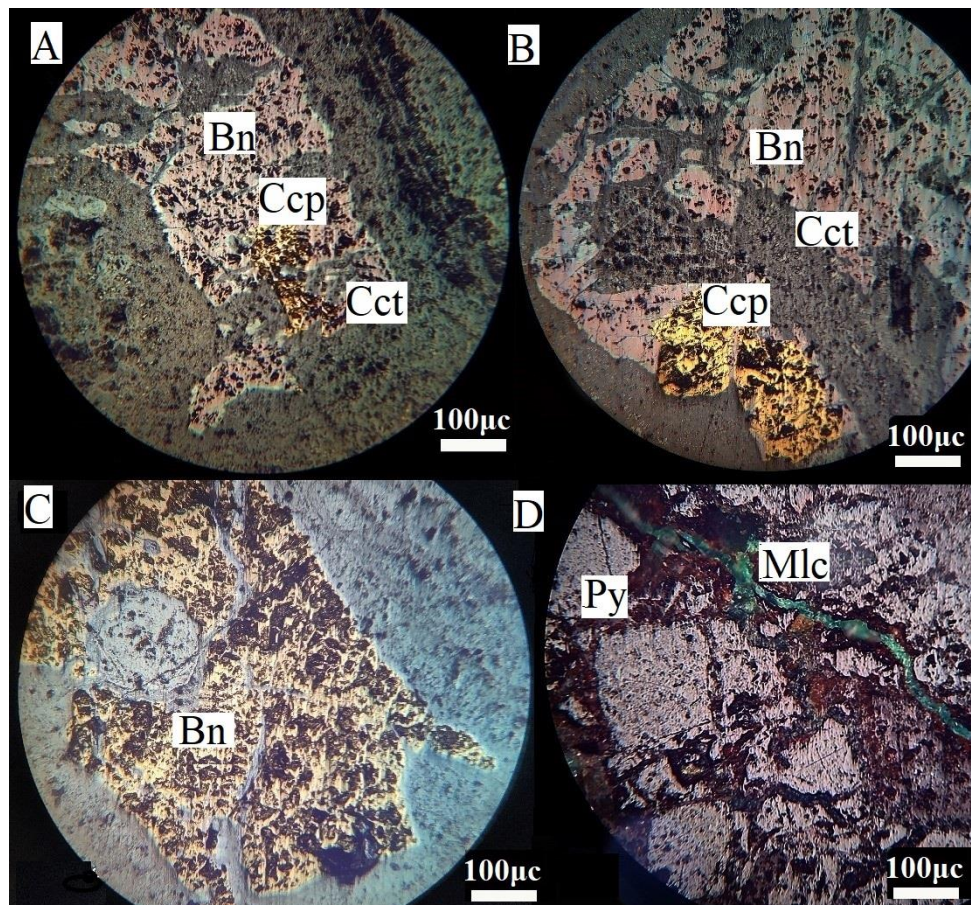
شکل ۷. نمایی از کانی‌سازی در منطقه اکتشافی کلاته‌نو، A، B و C: رگه‌های سیلیسی حاوی کانی‌سازی، عکس‌ها دید به سمت شمال‌غرب و D: کانی‌سازی پیریت و اکسیدهای آهن در زمینه برش گرمایی

Fig. 7. A view of mineralization in the Kalatehno prospect area, A, B and C: Quartz veins containing mineralization, (photos view to the NE), and D: Mineralization of pyrite and iron oxides in the hydrothermal breccia

ترکیب کانی‌شناسی و بافت ماده معدنی

کانی‌های سولفیدی که در سطح دیده می‌شوند اغلب شامل کالکوپیریت، پیریت و گالن است. کانی‌های ثانویه شامل بورنیت،

کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا، هماتیت و گوتیت هستند که در ادامه توصیف می‌شود (شکل ۸-A تا D و شکل ۹-A تا D).



شکل ۸. تصویرهای میکروسکوپی از کانی‌سازی در منطقه اکتشافی کلاته‌نو، A، B و C: تبدیل کالکوپیریت و بورنیت به کالکوسیت از حاشیه و D: کانی‌سازی پیریت و رگچه سیلیسی-مالاکیت-اکسید آهن (تصویرها در نور XPL). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ccp: کالکوپیریت، Bn: بورنیت، Py: پیریت، Mlc: مالاکیت، Cct: کالکوسیت).

Fig. 8. Microscopic images of mineralization in Kalatehno prospect area, A, B and C: Chalcopyrite and bornite altered to chalcocite from the border, D: Pyrite mineralization in silica-malachite-iron oxide vein, Images in XPL light, Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ccp: Chalcopyrite, Bn: Bornite, Py: Pyrite, Mlc: Malachite, Cct: Chalcocite).

کلاته‌نو است (شکل ۸-A و B و شکل ۹-A). کالکوپیریت‌های تشکیل شده در این کانسار تحت تأثیر فرایندهای برون‌زاد به کانی‌های کالکوسیت، آزوریت، مالاکیت، کریزوکولا و

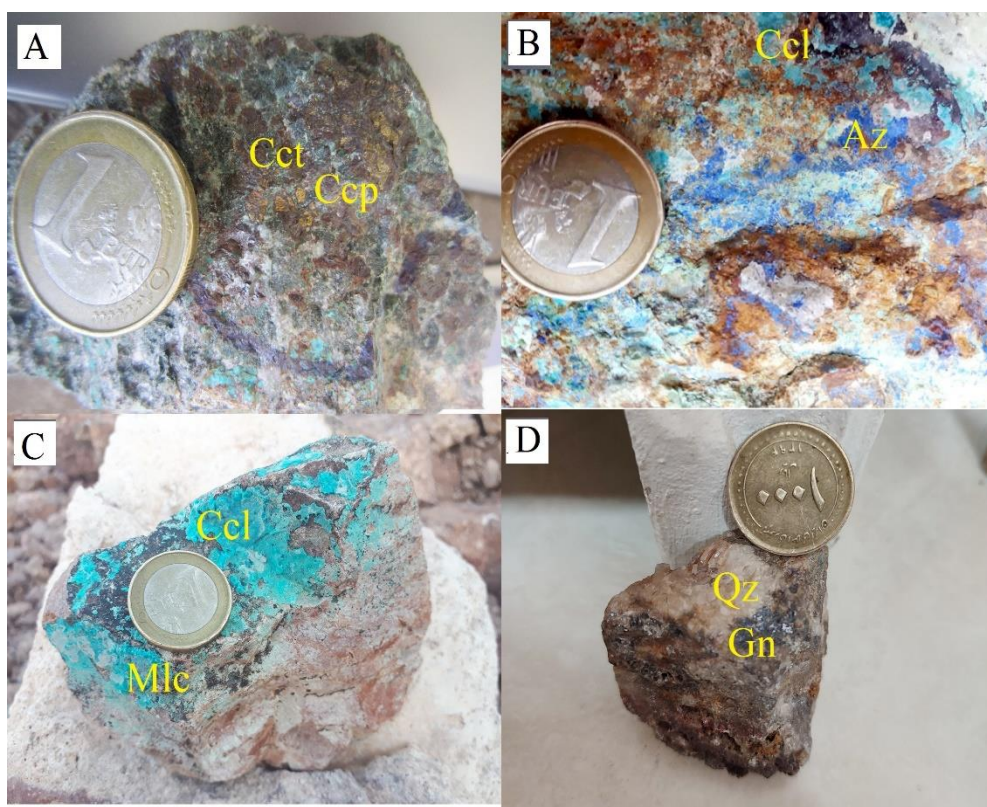
کالکوپیریت: این کانه در داخل رگه-رگچه‌های سیلیسی کانه دار، با توزیع ۲ تا ۳ درصد همراه با کوارتز دیده می‌شود. کالکوپیریت نخستین کانی سولفیدی مس تشکیل شده در کانسار

مشاهده می‌شود. این کانی به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و در اندازه‌های چند ده میکرون تا ۰/۳ میلی‌متر شناسایی شد (شکل ۸- D).

گالن: در رگه‌های سیلیسی‌کانه‌دار، در جنوب منطقه همراه با کالکوپیریت، پیریت و کانی‌های مالاکیت، کریزوکولا و اکسیدهای آهن است. بلورهای گالن به صورت تجمعی و شکل‌دار با درصد فراوانی ۳ تا ۵ درصد دیده می‌شود (شکل ۹- A تا D).

اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند. **بورنیت:** کانی بورنیت در برخی موارد جانشین کالکوپیریت اولیه شده که وجود قطعه‌های شناوری از این کانی در داخل بورنیت نشان‌دهنده تقدم تشکیل کالکوپیریت نسبت به بورنیت است. کانی بورنیت از حاشیه به کالکوسیت تبدیل شده است (شکل ۸- A، B و C).

پیریت: پیریت با فراوانی ۷ تا ۱۰ درصد همراه با کانی‌های اکسیدی و کربناته و یا به تنهایی در رگه‌های سیلیسی‌کانه دار



شکل ۹. تصویری از نمونه کانی‌سازی‌های موجود در منطقه اکتشافی کلاته‌نو. A: کالکوپیریت از حاشیه و یا به طور کامل به کالکوسیت تبدیل شده است، B: آزوریت، کریزوکولا همراه با کوارتز و اکسیدهای آهن، C: مالاکیت و کریزوکولا و گالن همراه با کوارتز. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cct: کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت، Ccl: کریزوکولا، Az: آزوریت، Mlc: مالاکیت، Qz: کوارتز، Gn: گالن).

Fig. 9. Photographs of ores from the Kalatehno prospect area, A: Chalcopyrite has been altered to chalcocite from the margin or completely, B: Azurite, chrysocolla with quartz and iron oxides, C: malachite and chrysocolla, and D: galena with quartz, Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cct: Chalcocite, Ccp: Chalcopyrite, Ccl: Chrysocolla, Az: Azurite, Mlc: Malachite, Qz: Quartz, Gn: Galena).

مالاکیت، آزوریت و کریزوکولا: مالاکیت از فراوان‌ترین کانی‌ها در بخش‌های سطحی رگه‌های این محدوده است و در امتداد شکستگی‌ها تا مناطق عمیق‌تر دیده می‌شود (شکل‌های B-۷، A-۸ و D و C-۹). مالاکیت در نمونه دستی به رنگ سبز و جلای شیشه‌ای و مات مشاهده می‌شود. فراوانی این کانی ۴ تا ۵ درصد است. آزوریت و کریزوکولا از دیگر کانی‌های مس‌دار است که معمولاً با مالاکیت دیده می‌شود (شکل B-۹ و C). مقدار کریزوکولا کمتر از مالاکیت در حد ۱ تا ۳ درصد است. آزوریت با فراوانی بسیار کمتر (کمتر از ۱ درصد) نسبت به مالاکیت همراه با این کانی دیده می‌شود.

هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن: اکسیدهای آهن شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت از تبدیل کانی‌های سولفیدی به ویژه پیریت شکل گرفته‌اند. اکسیدهای آهن فراوان‌ترین کانی ثانویه در منطقه اکتشافی است (شکل‌های B-۷ و D و A-۸).

اکسیدهای منگنز: منگنز در سطح به صورت پراکنده و در امتداد شکستگی‌ها و به رنگ قهوه‌ای و سیاه دیده می‌شوند.

کوارتز: مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی باطله است که به دو شکل سیلیسی‌شدن و رگه-رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی دیده می‌شود. ۷۵ تا ۹۰ درصد رگه-رگچه‌های سیلیسی کانه‌دار توسط کوارتز پر شده است. کوارتز به شکل آمیتیست نیز در منطقه دیده می‌شود که مربوط به نسل بعد از کانی‌سازی بوده و همراه با کانی‌سازی دیده نمی‌شود. توالی هم‌رزادی از کانه و کانی‌های باطله مشاهده شده در منطقه مورد بررسی در **شکل ۱۰** نشان داده شده است. در مرحله اول در اثر فرایند گسلش، فضای مناسب برای حرکت محلول‌های عمقی به بالا فراهم شده و کانی‌های کالکوپیریت، بورنیت و پیریت به همراه کوارتز در فضاهای خالی پهنه گسلی ته‌نشست کرده‌اند در مرحله بعد، پس از کانه‌زایی اولیه، تأثیر هوازدگی در رخنمون‌های سطحی، بین کانه‌ها و محیط پیرامون، موجب تبدیل کانی‌های اولیه به کانی‌های ثانویه از جمله کالکوسیت، مالاکیت و کریزوکولا به علاوه اکسید و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت و لیمونیت) شده است.

Mineral	Early stage	Late stage	Oxidation zone
Quartz			
Chalcopyrite			
Bornite			
Pyrite			
Galena			
Chalcocite			
Malachite			
Chrysocolla			
Azurite			
Fe oxide			

شکل ۱۰. توالی هم‌یافت در محدوده اکتشافی کلاته‌نو

Fig. 10. Mineral paragenesis in the Kalatehno prospect area

دیگر بافت‌های مشاهده شده در محل رگه اصلی کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی است. این بافت در حاشیه کانی کوارتز به همراه کانی‌سازی هماتیت + مالاکیت تشکیل شده است (شکل ۱۱-B). بافت جاننشینی ثانویه بر اثر فرایند سوپرژن در سطح و تبدیل کانی‌های کالکوپیریت و بورنیت به کانی‌های کالکوسیت، مالاکیت و آزوریت ایجاد شده است (شکل ۸-A، B و C). بافت جاننشینی ثانویه در پیریت نیز در اثر تبدیل به اکسیدهای آهن رخ داده است (شکل ۸-D).

کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی در قالب ساخت و بافت‌های پرکننده فضای خالی (شکل‌های ۷-A و ۸-D)، بافت‌های کلونیدی شامل قلوهای و گل کلمی (شکل ۱۱-A و B) و جاننشینی ثانویه مشاهده می‌شود (شکل ۸-A و B). عمده کانی‌زایی سولفیدی به صورت پرکننده فضای خالی صورت گرفته است. در بخش‌های اکسیدان، پیریت‌ها اغلب به گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند. بافت قلوهای شکل در مالاکیت بر اثر هوازدگی کانی‌های سولفیدی و اکسیدهای آهن ایجاد شده است (شکل ۹-A). بافت کلونیدی از



شکل ۱۱. تصویرهایی از انواع بافت در منطقه اکتشافی کلاته‌نو A: مالاکیت و کریزوکولا با بافت قلوهای و B: بافت کلوفرم در رگه حاوی کانی‌سازی
Fig. 11. Photographs from different texture in Kalatehno prospect area A: Malachite-chrysocolla mineralization in the form of colloform texture, and B: colloidal texture in the mineralization vein

زمین‌شیمی

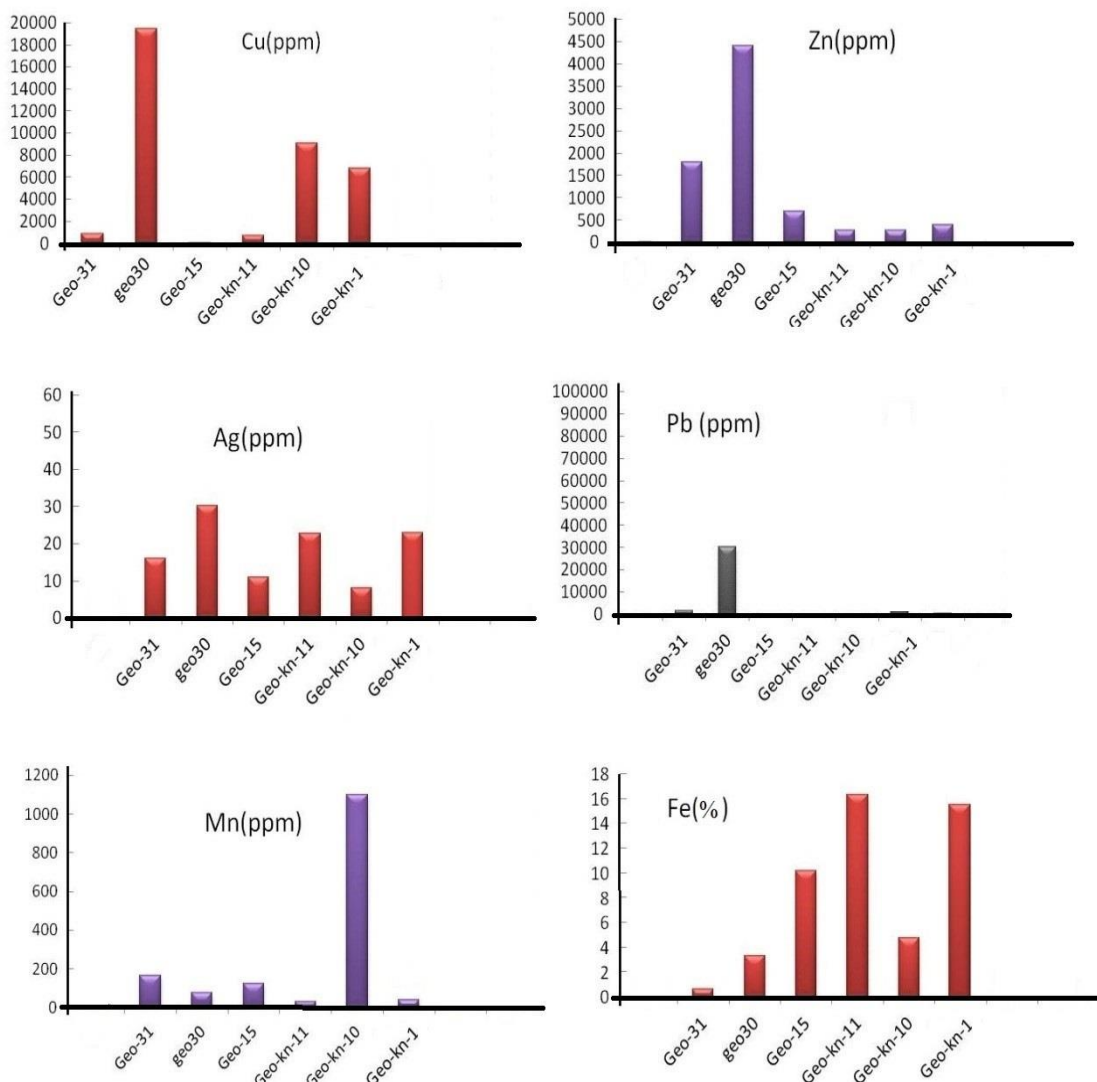
نمونه دستی و بررسی‌های کانه‌نگاری در رگه‌های کانه‌دار، ۶ نمونه به روش AAS مورد آنالیز قرار گرفته است (جدول ۱).

مافیک متوسط ۸/۴ تا ۳۶ گرم در تن است (Nassar et al.,

با توجه به مشاهده کانی‌سازی سولفیدی، اکسیدی و کربناته در مس: مقدار زمینه عنصر مس در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا

در تن است (Nassar et al., 2022). محدوده تغییرات غلظت عنصر سرب از ۶۲/۸ تا ۳۰۴۰۰ گرم در تن و عنصر روی از ۲۵۸ تا ۱۸۰۰ گرم در تن متغیر است. (جدول ۱ و شکل ۱۲). حضور ناهنجاری سرب مربوط به حضور کانی گالن در رگه سیلیسی کانه‌دار واقع جنوب منطقه اکتشافی است (شکل ۴). ناهنجاری روی نیز در همین منطقه مشاهده می‌شود.

غلظت عنصر مس در منطقه اکتشافی بین ۷۵۲ تا ۱۹۵۰۰ گرم در تن متغیر است (جدول ۱ و شکل ۱۲). محتوی مس به علت وجود کانی‌های کالکوپیریت، بورنیت و فراوانی مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و به مقدار کمتر کالکوسیت در رگه‌هاست. **سرب و روی:** در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا مافیک مقدار زمینه عنصر سرب بین ۱۶ تا ۵/۲ و محتوی روی بین ۴۶ تا ۷۳ گرم



شکل ۱۲. هیستوگرام محتوی عناصر در منطقه مورد بررسی کلاته‌نو

Fig. 12. Histograms of Cu, Zn, Ag, Pb, Mn and Fe in Kalatehno study area

نقره: مقدار این عنصر از ۸ تا ۳۰/۳ گرم در تن متغیر است. انطباق بین این عنصر و محتوی سرب و روی در نمونه Geo30 مشاهده می شود.

آهن: محدوده تغییرات این عنصر بین ۰/۶۷ تا ۱۶/۳۹ درصد است (جدول ۱). حضور ناهنجاری آهن که در رگه حاوی کانی سازی مس دیده می شود، به صورت کانی های ثانویه هماتیت، گوتیت و ... دیده می شود. کانی های سولفیدی مانند کالکوپیریت و پیریت درون سنگ میزبان دگرسان شده و کانی های ثانویه آهن دار ایجاد شده اند.

طلا: مقدار زمینه عنصر طلا در سنگ های آذرین حدوداً ۵ میلی گرم در تن است (Nassar et al., 2022). غلظت عنصر طلا در نمونه های کانه دار بین ۱۱ تا ۹۵ میلی گرم در تن متغیر است (جدول ۱) که احتمالاً در ارتباط با کانی های سولفیدی است.

منگنز: بیشینه غلظت عنصر منگنز به ۱۱۰۰ گرم در تن می رسد که به دلیل حضور اکسیدهای منگنز است.

بحث و نتیجه گیری

ذخایر مس رگه ای شامل ذخایر متنوعی است که در آنها مس، فلز غالب است. این نهشته ها کنترل ساختاری دارند و در گسل ها، سامانه های گسلی و زون های رگه - برش رخ می دهند. این ذخایر معمولاً کوچک هستند؛ اما از نظر اندازه و عیار بسیار متنوع هستند. اگرچه نهشته های مس رگه ای در ارتباط با بسیاری از سنگ های میزبان مختلف و در موقعیت های زمین شناسی متنوع رخ می دهند؛ اما دو زیر گروه اصلی شناسایی شده اند که بر اساس سنگ های نفوذی مرتبط تقسیم بندی می شوند. این ذخایر لزوماً در همه موارد در این سنگ های نفوذی وجود ندارند؛ اما احتمالاً از نظر ژنتیکی با آنها مرتبط هستند. زیر گروه اول شامل ذخایر مس رگه ای مرتبط با سنگ های نفوذی مافیک (گابرو و بازالت) است. زیر گروه دوم شامل ذخایر مس رگه ای همراه با نفوذهای متوسط تا فلسیک، از جمله برخی از نفوذی های مربوط به ذخایر مس پورفیری است. ذخایر مس رگه ای نوع چرچیل اغلب در محیط زمین ساختی

زون های کششی رخ می دهند؛ در حالی که سنگ های نفوذی اسیدی تا حدواسط همراه با مس رگه ای، اغلب در محیط های مربوط به فرورانش و جزایر کمانی رخ می دهند، به ویژه آنهایی که با ذخایر مس پورفیری مرتبط هستند. در بیشتر ذخایر مس رگه ای نوع همراه با توده های مافیک، کالکوپیریت کانه اصلی است. بورنیت، تتراهدريت، کولیت، و گالن در برخی از ذخایر به مقدار جزئی وجود دارد. پیریت اصلی ترین کانه گانگ مرتبط است. علاوه بر آن پیروتیت، کوارتز، کلسیت، دولومیت، آنکريت و هماتیت هم دیده می شود. کانی های اصلی در ذخایر مس رگه ای مرتبط با توده های فلسیک و نفوذی حدواسط متنوع تر بوده و شامل کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، انارژیت، تتراهدريت - تنانیت، بیسموتینیت، مولیدنیت، اسفالریت، طلا و الکتروم است. کانی های گانگ مرتبط شامل پیریت، پیروتیت، مگنتیت، هماتیت، کوارتز، فلدسپات پتاسیم، اپیدوت، کلسیت، آنکريت، سیدریت، کلریت، سریسیت و کانی های رسی است. انواع اصلی دگرسانی در مس رگه ای نوع چرچیل کربناتی و سیلیسی شدن است. دگرسانی سریسیتیک، کلریتی و اپیدوت در ذخایر مس رگه ای مرتبط با نفوذهای فلسیک تا حدواسط دیده می شود (Eckstrand et al., 1996). فرایند مخلوط شدگی سیال نقشی مهم در ته نشینت کانی های فلزی در ذخایر گرمابی دارد (Fan et al., 2013; Gu et al., 2011; Zhai et al., 2013). کانی سازی مس رگه ای در منطقه اکتشافی کلاته نو، درون واحدهای آتشفشانی با روند غالب شمال غرب - جنوب شرق رخ داده است (شکل ۲). سنگ های آتشفشانی در محدوده ریولیت، تراکیت، تراکی آندزیت و سنگ های آذر آواری (توف و لیتیک توف) بوده که توده های نیمه عمیق بیوتیت مونزودیوریت پورفیری، دیوریت پورفیری و کوارتز مونزونیت پورفیری آنها را قطع می کنند. کانی شناسی رگه ها شامل کوارتز، کانی های اولیه سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و گالن) و کانی های ثانویه (مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و اکسیدهای آهن) است. با توجه به موقعیت توده نسبت به کانی سازی، احتمالاً توده مرتبط با کانی سازی در منطقه

توده‌های پورفیری با ترکیب مونزودیوریت پورفیری است. دگرسانی رخ داده در منطقه شامل دگرسانی سیلیسی، پروپیلیتیک و آرژلیک است. دگرسانی فراگیر گرمابی، پروپیلیتیک است که اغلب بر سنگ‌های آتشفشانی تأثیر گذاشته است و شامل کانی‌های اپیدوت، کلریت، کربنات و مقادیر کم کوارتز است. دگرسانی پروپیلیتیک، معمولاً به عنوان هاله بیرونی بسیاری از کانسارهای پورفیری Cu-Au-Mo (Lowell and Guilbert, 1970; Seedorf et al., 2005; Sillitoe, 2010) ایجاد می‌شود. کوک و همکاران (Cooke et al., 2020) نشان دادند که محتوای As و Sb اپیدوت در نهشته‌های پورفیری بزرگ یک یا چند مرتبه از مقدار آن در اپیدوت در نهشته‌های پورفیری کوچک بیشتر است. اپیدوت دگرگونی با As و Sb بسیار کم (معمولاً زیر حد تشخیص) مشخص می‌شود؛ لذا بررسی عناصر کمیاب اپیدوت

جهت بررسی ارتباط هاله پروپیلیتیک و فاصله آن از یک سامانه پورفیری و حتی اندازه سامانه پورفیری می‌تواند کمک اکتشافی بسیار خوبی باشد. نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی نمونه‌های خرده‌سنگی از زون کانی‌سازی در منطقه کلاته‌نو، نشان‌دهنده پتانسیل برای عناصر مس، سرب و روی است. عواملی مانند کانه‌های موجود و بافت، نوع و گسترش دگرسانی، کنترل‌های ساختاری و دما و شوری پایین سیال کانه‌دار (Zirjanizadeh, 2015)، نشان‌دهنده سامانه کانی‌سازی مس رگه‌ای است که در طول پهنه گسلی شکل گرفته است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

References

- Aghanabati, S.A., 2004. *Geology of Iran*, Geological Survey of Iran, Tehran, 586 pp.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the Paleo-Tethys Remnants in Northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8): 983–992.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0983:SASCOT>2.3.CO;2)
- Arjmandzadeh, R. and Santos, J.F., 2014. Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusive from Lut Block, eastern Iran. *Int. Journal of Earth Sciences*, 103: 123–140. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0959-4>
- Bemani, M., Zirjanizadeh, S. and Miri Bydokhti, R., 2023. satellite image processing for extraction of alterations with mineralogy and field studies Kalateh No Copper Deposit, northwest of Gonabad, Razavi Khorasan province, 15th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Damghan, Damghan, Iran.
- Cooke, D.R., Wilkinson, J.J., Baker, M., Agnew, P., Phillips, J. and Chang, Z., 2020. Using mineral chemistry to aid exploration: A case study from the resolution porphyry Cu-Mo deposit, Arizona. *Economic Geology*, 115(4): 813–840. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4735>
- Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D. and Thorpe R.I., 1996. *Geology of Canadian mineral deposit types*, Canada Communication Group, Ottawa, 650 pp.
- Fan, H.R., Hu, F.F., Wilde, S.A., Yang, K.F. and Jin, C.W., 2011. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'er shan region, central China: Fluid-inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *International Geology Reviews*, 53(1): 25–45. <https://doi.org/10.1080/00206810902875370>
- Ghaemi, F. and Shahrivar, H., 2004, *Geological Map of Gonabad*, scale 1:100000, geological survey of Iran.
- Gu, L.X., Wu, C.Z., Zhang, Z.Z., Franco, P., Ni, P., Chen, P.R. and Xiao, X.J., 2011. Comparative study of ore-forming fluids of hydrothermal copper-gold deposits in the lower Yangtze River Valley, China. *International Geology Reviews*, 53(5–6): 477–498. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.533873>
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Haidarian Shahri, M.R. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Mineralogy, Geochemistry, Fluid Inclusion and Oxygen Isotope Investigations of Epithermal Cu ± Ag Veins of the Khur Area, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 1139–1156. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13596>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Heydarian, M.R. and Askari, A., 2007. Mineralization, alteration and geochemistry of Hired gold-tin prospecting area, South Khorasan province. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 15(1): 67–90. Retrieved January 15, 2024 from <https://ijcm.ir/article-1-662-en.pdf>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Lang Farmer, G. and Stern, C.R., 2012a. 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>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Stern, C.R. and Farmer, L., 2012b. Petrogenesis of Granitoids, U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd isotopic characteristic, 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>
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposit. *Economic Geology*, 65(4): 373–408. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>
- Malekzadeh Shafaroudi, A., 2009. *Geology, mineralization, alteration, geochemistry, microthermometry, radiogenic isotopes, petrogenesis of intrusive rocks and determination of source of mineralization in Maherabad and Khopik prospect area, South Khorasan Province*, Unpublished Ph.D. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 536 pp.
- Malekzadeh Shafaroudi A. and Karimpour M.H., 2015. Mineralogic, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence for the genesis of Sechangi lead-zinc (–copper) deposit, Eastern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 107: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.015>

- Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2013. Geology, Mineralization, and Fluid Inclusion Studies of the Howz-e-Rais Lead-Zinc-Copper Deposit, Eastern Iran. *Advanced Applied Geology*, 2(4): 63-73. (in Persian with English abstract) Retrieved August 17, 2024 from https://aag.scu.ac.ir/article_11587.html?lang=en
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E. and, Nokhbatolfoghahaie, A., 2011. The role of magmatic and meteoric water mixing in mineralization of Shurab polymetal ore deposit South of Ferdows: isotope geochemistry and microthermometry evidences, *Iranian journal of mineralogy and crystallography*, 19(1): 121–130. (in Persian with English abstract). Retrieved January 15, 2024 from <http://ijcm.ir/article-1-472-en.html>
- Miri Bydokhti, R., Karimpour, M.H. and 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>
- Miri Bydokhti, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F. and Klötzlid, 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>
- Nassar, N. T., Lederer, G.W., Brainard, J.L., Padilla, A.J. and Lessard, J.D., 2022, Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes. *Environmental Science & Technology*, 56(10): 6710–6721. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07875>
- Seedorf, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A. and Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary*, 251–298. <https://www.researchgate.net/publication/284048433>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zhai, D.G., Liu, J.J., Wang, J.P., Yao, M.J., Wu, SH., Fu, C., Liu, Z.J., Wang, S.G. and Li, Y.X., 2013. Fluid evolution of the Jiawula Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia: mineralogical, fluid inclusion, and stable isotopic evidence. *International Geology Reviews*, 55(2): 204–224. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.692905>
- Zirjanizadeh, S., 2015, Mineralogy, geochemistry and petrogenesis igneous rocks in the northwest of Gonabad, Ph.D. thesis, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran, 259 pp.
- Zirjanizadeh, S., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, Kh. and Santos, J.F., 2016. Petrography, Geochemistry and Petrogenesis of Volcanic Rocks, NW Gonabad, Iran. *Journal of Economic Geology* 8(1): 265–282. <https://doi.org/10.22067/econg.v8i1.48865>



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2024.1107



Whole-rock geochemistry and crystal chemistry of apatite at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district (west of Zanjan): an approach to the identification of skarn-causative granitoids and magmatic-metallogenic evolutions

Afsoon Dastour¹, Ebrahim Tale Fazel^{2*} , Ashraf Tourkian³ ¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran³ Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 29 March 2024
Revised: 22 August 2024
Accepted: 24 August 2024

Keywords

whole-rock geochemistry
apatite
Qeynarjeh-Angouran
west of Zanjan

*Corresponding author

Ebrahim Tale Fazel
✉ e.talefazel@basu.ac.ir

ABSTRACT

The Qeynarjeh-Angouran district is located at the intersection of the Urumieh-Dokhtar and the Sanandaj-Sirjan structural zones in NW Iran. In this area, intrusive suites of Middle Triassic-Upper Jurassic age are exposed, including the Gharavol-Khane quartz diorite, the Kuh-e Belghais granite porphyry, and the Qeynarjeh granodiorites. Whole-rock geochemical data and crystal chemistry of apatite were analyzed to obtain the geochemical-metallogenic evolutions of magma and compare fertility using trace element interpolation. These intrusive suites with zircon saturation temperature (T_{Zr}) less than 900 °C and meta-aluminous to slightly peraluminous nature ($A/CNK = 0.5-1.2$) belong to the calc-alkaline series, which is evidence of I-type granitoids ($Na_2O/K_2O = 0.8-2.0$) in subduction zones (enrichment of LILE compared to HFSE along with P, Nb and Ti anomalies). ΣREE concentration, LREE/HREE ratio, and LILE content (including Rb, Ba, Th, U, K and Pb elements) in the Qeynarjeh granodiorites are determined to be twice as much as other intrusive suites, which are placed at a depth of 20 to 30 km of crust ($Sr/Y=10-20$), Rb/Sr ratio of whole-rock less than 0.4 and FeO content about 4 wt.% indicate characteristics of ore-bearing skarns. EPMA results show apatite crystals from Gharavol-Khane quartz diorite with high fluorine concentration ($F = 2.2-2.7$ wt.%) have been formed directly from the parent magma and Kuh-e Belghais granite porphyry apatites with high chlorine variation ($Cl = 0.52-0.65$ wt.%) is a result of large fluid-rock interactions between the granite porphyries and hydrothermal fluids. Overall, the Qeynarjeh granodiorites and the Gharavol-Khane quartz diorites show the most similarity with the petrogenesis-metallogenesis pattern of the iron skarn-causative intrusions.

How to cite this article

Dastour, A., Tale Fazel, E. and Tourkian, A., 2024. Whole-rock geochemistry and crystal chemistry of apatite at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district (west of Zanjan): an approach to the identification of skarn-causative granitoids and magmatic-metallogenic evolutions. *Journal of Economic Geology*, 16(3): 23–55. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1107>



©2024 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 and geological background

Chemical composition, origin, and magmatic–metallogenic evolution of intrusive suites with granitoid nature have a significant role in evaluating mineral potential and separating fertile and barren intrusive rocks in orogenic belts (Svetlitskaya and Nevolko, 2022). Determining the physicochemical characteristics of granitoids such as temperature, pressure, oxygen fugacity ($\log f_{O_2}$), and volatile elements (e.g., water content, chlorine, and sulfur oxide) is necessary to investigate the relationship between the formation of intrusive suites and mineralization (Richards and Kerrich, 2007; Wang et al., 2014; Zhu et al., 2018; Zhang et al., 2022). Determination of these characteristics is important, especially for evaluating magmatic–hydrothermal systems and the skarn-causative granitoid deposits (e.g., porphyry and skarn deposits). The Takab-Angouran belt in the northwest of Iran hosts numerous mineral deposits from Neoproterozoic to Cenozoic, some world-class deposits (e.g., Angouran zinc and Zarshoran gold deposits) have been formed in this area. The enormous magmatic-hydrothermal-geothermal eruptions caused by the closing of the big Neotethys sea and the occurrence of the Zagros Mountain belt have led to the formation of a large volume of granitoid and volcanic intrusive suites with the age range of Triassic–Jurassic to Miocene in the Takab-Angouran. In this research, the whole-rock geochemical data and chemistry of apatite in Gharavol-Khane quartz diorite, Kuh-e Belghais granite porphyry, and Qeynarjeh granodiorite have been evaluated from the point of view of iron skarn potential. The purpose of this research is to achieve magmatic control factors and compare the fertility indicators of granitoids using the trace element ratio and geochemical diagrams in the intrusive suites. Also, petrography and apatite crystal chemistry have been used to obtain the petrogenesis-metallogenesis pattern of granitoids. This evidence could be helpful in advancing exploration programs and identifying encouraging mineral areas in the Qeynarjeh-Angouran area.

Material and methods

After studying geological maps and conducting detailed sampling, field works, and sampling of different rock units were conducted. Therefore, 80 rock samples were taken from various intrusive suites, and after petrographic studies, 20 fresh samples were selected.

Petrographic studies were carried out using a ZEISS reflected-transmitted polarizing microscope (Axioplan2 model). For chemical analysis, 10 samples of Gharavol-Khane quartz diorite, 5 samples of Kuh-e Belghais granite porphyry, and 5 samples of Qeynarjeh granodiorite were selected and grounded in agate pounder to 200 mesh size (about 75 micrometers). Whole-rock geochemical data has been carried out in the Geochemistry Laboratory of Istanbul University of Technology, by X-ray fluorescence (WDXRF) wavelength-based model S8 TIGER to detect the main oxide elements (in terms of wt.%) and inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS), ELAN DRC-e model for identification of minor and rare earth elements (in terms of ppm). Digestion of samples (approximately 50 mg) has been done in two steps: 1) by 6 ml of HCl acid (37% concentration), 2 ml of HNO₃ acid (65% concentration), and 1 ml of HF acid (concentration 38–40 percent), and 2) the destruction of the remaining refractor minerals by adding 6 ml of B(OH)₃ acid (concentration 5%). Destruction of the samples was done in a Berghoff model microwave Teflon pot at a temperature of 135 °C. The analysis accuracy surpasses 2% for major elements and surpasses 5% for rare elements. To obtain the chemical composition of apatite types in the study intrusive suites, about 30 points were tested by electron microprobe analysis (EPMA) model JEOL JXA-8530F in the laboratory of the German Geosciences Research Center (GFZ). Spot analysis was performed with a 15kV voltage, an electron beam current of 5 nA, a beam diameter of 10 microns, and an irradiation time of 5 to 10 seconds. The X-ray geometry jump angle of the device is between 50 and 60 degrees, and the analysis error is less than 10 grams per ton.

Results and discussion

The intrusive suites of the studied area include the Gharavol-Khane quartz diorite intrusion with granular and porphyroidic textures, the Kuh-e Belghais granite porphyry with porphyry, granular and graphic textures, and the Qeynarjeh granodiorite, has microgranular, porphyroidic, and graphic textures. In terms of alumina saturation index (ASI), the study intrusive suites belong to the metaluminous to slightly peraluminous series and I-type granite and have calc-alkaline to shoshonitic affinity. An enrichment of LILE compared to HFSE was observed in the study area, and this enrichment occurred during melting due to the high ionic potential of LILE and the decrease in solubility of HFSE in aqueous fluids.

A negative anomaly in Eu and a positive anomaly in Ce were observed, which occurred due to low-oxygen fugacity and increased $\text{Eu}^{+2}/\text{Eu}^{+3}$ and $\text{Ce}^{+3}/\text{Ce}^{+4}$ ratios in the silicate melt. Three types of apatite: Ap1 (with elongate habit and homogeneous appearance in the Gharavol-Khane quartz diorite), Ap2 (subhedral to anhedral form in the Kuh-e Belghais granite porphyry), and Ap3 (anhedral to subhedral form in the Qeynarjeh granodiorite), were recognized in Qeynarjeh-Angouran district. All apatites belong to the hydroxy-fluorine apatite class and originated from magmatic origin. Ap1 crystals were formed directly from the parent magma but Ap2 and Ap3 crystals were formed during skarnization. The intrusive suites of the studied area, have the characteristic signatures of subduction zone magmas in

a volcanic arc setting. Qeynarjeh granodiorite is ore-bearing, Kuh-e Belghais granite porphyry is non-productive, and Gharavol-Khane quartz diorites are barren to ore-bearing nature and they are all in the range of mineralized differentiated intrusive in-depth. The Qeynarjeh granodiorite is an ore-bearing granite and shows evidence of a skarn-causative suite (non-porphyry).

Acknowledgements

This research has been done with the support of the Bu-Ali Sina University. The authors are grateful for the useful comments of the reviewer of Economic Geology Journal.



زمین‌شیمی سنگ‌کل و شیمی‌بلور آپاتیت در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه- انگوران (غرب زنجان): رویکردی برای شناسایی گرانیتوئیدهای مولد اسکارن و تحولات ماگمایی- فلززایی

افسون دستور^۱، ابراهیم طالع فاضل^{۲*} ID، اشرف ترکیان^۳ ID

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
ناحیه قینرجه- انگوران در محل تلاقی پهنه‌های ساختمانی ارومیه- دختر و سسندج- سیرجان، در شمال غرب ایران جای دارد. در این ناحیه دنباله‌های نفوذی با سن تریاس میانی- ژوراسیک بالایی شامل توده کوارتز دیوریت قراول‌خانه، واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس و توده گرانودیوریتی قینرجه رخنمون دارند. این پژوهش به واکاوی داده‌های زمین‌شیمی سنگ‌کل و شیمی‌بلور آپاتیت در دنباله‌های نفوذی یادشده برای دستیابی به تحولات زمین‌شیمیایی- فلززایی ماگما و مقایسه شاخص‌های باروری توسط درون‌یابی عناصر کمیاب می‌پردازد. توده‌های مورد بررسی با دمای همگنی زیر کن (T_{Zr}) کمتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و ماهیت متاآلمین تا کمی پرآلمین (A/CNK = 0.5-1.2) متعلق به سری کلاک آلکالن هستند که شواهد گرانیتوئیدهای نوع I (Na₂O/K₂O = 0.8-2.0) محیط‌های فروارانش (غنی‌شدگی LILE نسبت به HFSE همراه بی‌هنجاری‌های P، Nb و Ti) را نشان می‌دهند. تمرکز ΣREE نسبت LREE/HREE و محتوای LILE (شامل مجموع عناصر Pb، K، U، Th، Ba، Rb) در گرانودیوریت‌های قینرجه به طور متوسط دو برابر توده‌های دیگر تعیین شده است که جای‌گیری در عمق ۲۰ تا ۳۰ کیلومتری پوسته (Sr/Y = 10-20) نسبت Rb/Sr سنگ‌کل کمتر از ۰/۴ و محتوای FeO حدود ۴ wt.%، ویژگی اسکارن‌های آهن‌دار را نشان می‌دهد. طبق شواهد ریزکاو الکترونی، آپاتیت‌های کوارتز دیوریت قراول‌خانه با تمرکز بالای فلوئور (F = 2.2-2.7 wt.%) به طور مستقیم از ماگمای نخستین و آپاتیت‌های گرانیت پورفیری کوه بلقیس با تغییرات بالای کلر (Cl = 0.52-0.65 wt.%) در نتیجه تبادلات وسیع سیال-سنگ میان توده گرانیت پورفیری و سیال گرمایی شکل گرفته‌اند. در مجموع، توده گرانودیوریتی قینرجه و پس از آن کوارتز دیوریت قراول‌خانه بیشترین شباهت را با الگوی پتروژنز- فلززایی توده‌های مولد ذخایر اسکارن آهن نشان می‌دهند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳ واژه‌های کلیدی زمین‌شیمی سنگ‌کل آپاتیت قینرجه- انگوران غرب زنجان نویسنده مسئول ابراهیم طالع فاضل e.talefazel@basu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

دستور، افسون؛ طالع فاضل، ابراهیم و ترکیان، اشرف، ۱۴۰۳. زمین‌شیمی سنگ‌کل و شیمی‌بلور آپاتیت در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه- انگوران (غرب زنجان): رویکردی برای شناسایی گرانیتوئیدهای مولد اسکارن و تحولات ماگمایی- فلززایی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳): ۵۵-۲۳. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1107>

مقدمه

بررسی ترکیب شیمیایی، خاستگاه و تکامل ماگمایی-فلززایی دنباله‌های نفوذی ماهیت گرانیتوئیدی که دارای ارتباط فضایی-زمانی با هم هستند، نقش به سزایی در ارزیابی توان معدنی و تفکیک توده‌های بارور و عقیم در کمربندهای کوه‌زایی دارد (Svetlitskaya and Nevolko, 2022). شکل‌گیری ذخایر اسکارن مرتبط با گرانیتوئیدها مستلزم آزادسازی فلز از ساختمان توده نفوذی و مهاجرت آن توسط سامانه گرمایی بوده که این فرایند توسط تغییرات زمین‌شیمیایی سنگ منشأ قابل ردیابی است. از دهه ۱۹۹۰ میلادی، معیارهای مختلفی برای ارزیابی پتانسیل فلززایی گرانیتوئیدها بر اساس زمین‌شیمی سنگ کل (نظیر نسبت‌های $(10000 \times \text{Eu}/\text{Eu}^*)/Y$, V/Sc , La/Yb , Sr/Y) و شیمی کانی‌های کمیاب (نظیر آپاتیت، روتیل و زیرکن)، پیشنهاد شده است (Cline and Bodnar, 1991; Mao et al., 2016; Soloviev, 2022; Groves et al., 2014). تعیین ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی گرانیتوئیدها نظیر مؤلفه‌های دما، فشار، فوگاسیته اکسیژن ($\log f_{O_2}$) و مواد فرار (محتوای آب، کلر و گوگرد اکسیدان) برای درک ارتباط تکوین توده‌های نفوذی و کانی‌سازی ضروری است (Richards and Kerrich, 2007; Wang et al., 2014; Zhu et al., 2018; Zhang et al., 2022). تعیین این ویژگی‌ها به ویژه برای ارزیابی سامانه‌های ماگمایی-گرمایی و احتمال شکل‌گیری گرانیتوئیدهای مولد ذخایر اسکارن از اهمیت بالایی برخوردار است.

کمر بند تکاب-انگوران در شمال غرب ایران، میزبان ذخایر معدنی متعددی از نئوپروتروزوئیک تا سنوزوئیک است که برخی ذخایر بارده جهانی (نظیر کانسارهای روی-سرب انگوران و طلای زرشوران) در این ناحیه شکل گرفته‌اند. تکاپوهای عظیم ماگمایی-گرمایی-زمین گرمایی ناشی از بسته‌شدن دریای عظیم نئوتتیس و رخداد کمر بند کوه‌زاد زاگرس به شکل‌گیری حجم وسیعی از توده‌های گرانیتوئیدی و آتشفشانی با محدوده سنی تریاس-ژوراسیک تا میوسن در ناحیه تکاب-انگوران منجر شده است. جای‌گیری توده‌های گرانیتوئیدی موجب فعال‌شدن سامانه گرمایی و مهاجرت حجم عظیمی از فلزها در این ناحیه شده است که طی آن بیش از ۲ میلیون تن ذخیره آهن در

کانسارهای شهرک (Maanijou and Salemi, 2013; Sepahi et al., 2020)، علم‌کندی (Nouri et al., 2021)، گویجه قلعه (Aliyari et al., 2020)، کوه یلدا (Hafez et al., 2019) و قینرجه (Fallah Karimi, 2013) تخمین زده می‌شود. در این پژوهش، داده‌های زمین‌شیمی سنگ کل و شیمی آپاتیت در دنباله‌های نفوذی کوارتز دیوریت قراول‌خانه، گرانیت پورفیری کوه بلقیس و گرانودیوریت قینرجه، از دیدگاه پتانسیل اسکارن‌زایی آهن مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف این پژوهش، دستیابی به کنترل‌کننده‌های ماگمایی و مقایسه شاخص‌های باروری گرانیتوئیدها با استفاده از درونیایی عناصر کمیاب و نمودارهای زمین‌شیمیایی در دنباله‌های نفوذی مورد بررسی است. همچنین، از سنگ‌نگاری و شیمی بلور آپاتیت، برای دستیابی به الگوی پتروژنز-فلززایی گرانیتوئیدها استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش احتمالاً می‌تواند در پیشبرد اهداف اکتشافی و شناسایی مناطق امیدبخش معدنی در ناحیه قینرجه-انگوران مؤثر باشد.

زمین‌شناسی ناحیه قینرجه-انگوران

ناحیه قینرجه-انگوران از دیدگاه تقسیمات چینه‌شناسی-ساختمانی ایران (Aghanabati, 2004)، در محل تلاقی پهنه‌های ساختمانی ارومیه-دختر و سندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱-۱). واحدهای سنگی منطقه بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان (Babakhani and Ghalamghash, 2001) از قدیم به جدید شامل واحد کوارتز مسکویت شیت (PC_k^{sh}) متشکل از میکاشیت و کوارتزیت است که پس از آن به صورت ناپیوسته واحد سرپانتین شیت (Sr) شامل مجموعه‌ای از سرپانتینیت و سرپانتین شیت، متاکابرو و متابازالت شکل گرفته است. واحد ضخیم لایه (ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ متر) مرمر جانگوتاران (PC_j) با میان لایه دولومیت خاکستری روشن تا تیره به طور ناپیوسته بر روی واحد گنیس، مرمر و آمفیبولیت ($Mtgn$) قرار گرفته است. واحد $Mtgn$ از سنگ‌های دگرگونی بیوتیت-فلدسپار گنیس (با ساخت میگماتیته) و میان لایه‌های دولومیت مرمری سفید (واحد mb) تشکیل شده است که با شیب ۵۰-۶۰° زیر افق مرمر جانگوتاران

است. همچنین، گسل زندان سلیمان و گسل راندگی لعل کان در جنوب شرقی ناحیه مورد بررسی واقع شده‌اند.

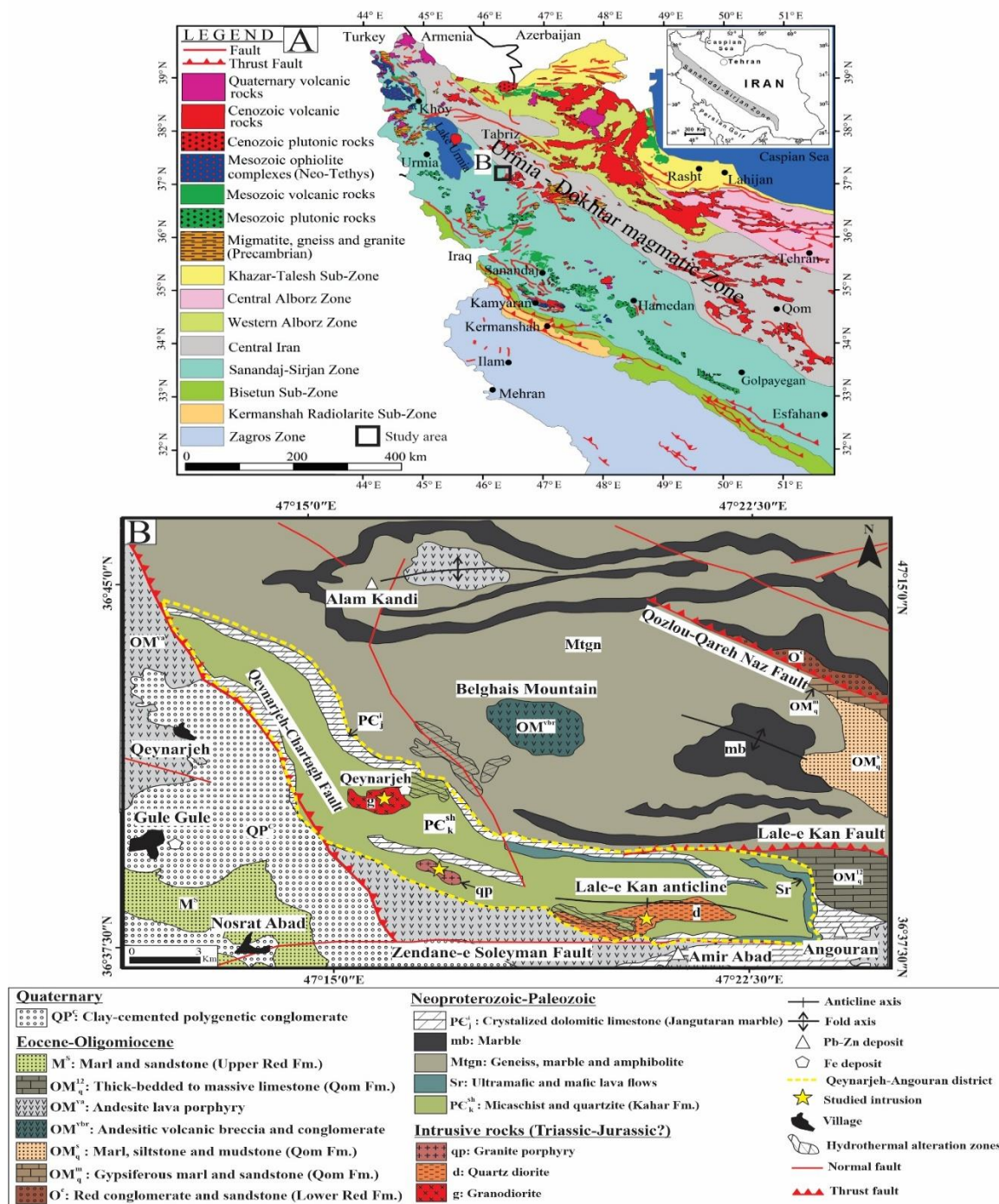
روش پژوهش

پس از بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و جانمایی دقیق واحدهای سنگی، بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری از دنباله‌های نفوذی انجام شد (شکل ۲). بر این اساس، تعداد ۸۰ نمونه سنگی برداشت شده که پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری توسط میکروسکوپ پلاریزان بازتابی-عبوری زایس (مدل Axioplan2)، تعداد ۲۰ نمونه غیرهوازده از میان آنها انتخاب شد. برای انجام تجزیه شیمیایی، تعداد ۱۰ نمونه از کوآرتز دیوریت قراول‌خلنه، ۵ نمونه از گرانیت پورفیری کوه بلقیس و ۵ نمونه از گرانودیوریت قینرجه، انتخاب شده و نمونه‌ها تا ابعاد ۲۰۰ مش (حدود ۷۵ میکرون) آسیاب شدند.

داده‌های زمین‌شیمی سنگ کل در دنباله‌های نفوذی مورد بررسی، توسط فلورسانس پرتو ایکس مبتنی بر طول موج (WDXRF) مدل S8 TIGER برای آشکارسازی عناصر اکسیدی اصلی (بر حسب wt.%) و طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) مدل ELAN DRC-e برای شناسایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی (بر حسب ppm)، در آزمایشگاه زمین‌شیمی دانشگاه صنعتی استانبول، انجام شده است. هضم نمونه‌ها (تقریباً ۵۰ میلی گرم) در دو مرحله: ۱- توسط ۶ میلی لیتر اسید HCl (غلظت ۳۷ درصد)، ۲ میلی لیتر اسید HNO₃ (غلظت ۶۵ درصد) و ۱ میلی لیتر اسید HF (غلظت ۳۸ تا ۴۰ درصد) و ۲- تخریب کانی‌های مقاوم باقی‌مانده با افزودن ۶ میلی لیتر اسید B(OH)₃ (غلظت ۵ درصد)، انجام شده است. تخریب نمونه‌ها در یک بوتله تفلونی با استفاده از مایکروویو مدل Berghoff و دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. دقت آنالیز برای عناصر اصلی بهتر از ۲ درصد و برای عناصر کمیاب بهتر از ۵ درصد است. محتوای مواد فرار (LOI) به عنوان کاهش وزن نمونه‌ها پس از ۹۰ دقیقه حرارت‌دهی یک گرم نمونه در کوره با دمای ثابت ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری شد.

مشاهده می‌شود (شکل ۱-B). واحد آتشفشانی-رسوبی سازند قرمز زیرین (OM^C) شامل تناوبی از کنگلومرای قرمز و ماسه‌سنگ (با قطعه‌های سنگ دگرگونی) به صورت همساز در زیر واحد آهک ضخیم لایه سازند قم (OM^{12q})؛ و این واحد به طور ناهمساز زیر تناوبی از ماسه‌سنگ‌های قرمز سازند قرمز بالایی (M^S) با سن الیگوسن-میوسن قرار گرفته است. بر این اساس، واحدهای سنگی منطقه شامل سنگ بستر دگرگونی نئوپروتروزوئیک-پالئوزوئیک (سازندهای کهر و جانگوتاران) توسط دنباله‌های گرانیتوئیدی تریاس-ژوراسیک (جنس‌های گرانیت، گرانیت پورفیری، گرانودیوریت و مونزودیوریت) قطع شده و پس از آن واحدهای سنگی آذرآواری-رسوبی الیگومیوسن (سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی) با ناپیوستگی بر روی واحدهای پیشین نهشته شده است (شکل ۱-B).

طبق پژوهش کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2021)، در پهنه سنندج-سیرجان زنجیره‌ای از توده‌های نفوذی مرکب و چندفازی به سن ژوراسیک (۱۶۰ تا ۱۷۸ میلیون سال)، ماهیت ایلیمیتی (گرانیت نوع S) ناشی از ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای رخنمون دارند. توده‌های گرانیتوئیدی منطقه ماهنشان (به عنوان نزدیک‌ترین واحدهای نفوذی به ناحیه قینرجه-لنگوران) دارای طیف ترکیبی از بیوتیت، گرانیت، گرانودیوریت گنیسی، لوکوگرانیت و کوآرتز مونزونیت هستند (Honarmand et al., 2018). طبق سن‌سنجی‌های U-Pb زیرکن توسط هنرمند و همکاران (Honarmand et al., 2018)، این گرانیتوئیدها در دو بازه سنی ادیاکاران-کامبرین (۵۳۱-۵۷۶ میلیون سال) و الیگوسن بالایی (۲۵/۴۱ میلیون سال) شکل گرفته‌اند. طبق این پژوهش‌ها، گرانیتوئیدهای ماهنشان با ماهیت کالک‌آلکالن و متآلو مینوس از ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای و آناکسی سنگ‌های آذرین نئوپروتروزوئیک در یک محیط کمان آتشفشانی تشکیل شده‌اند. مهم‌ترین گسل موجود در منطقه، گسل راست‌الغز قینرجه-چارتاق (موسوم به گسل تکاب) با راستای NNW و درازای ۸۰ کیلومتر است که بخش عمده‌ای از تحولات ساختاری ناحیه تکاب-انگوران تحت تأثیر حرکت‌های این گسل شکل گرفته است. این گسل به طور عمده توسط نهشته‌های تراورتن و کنگلومرای عهد حاضر پوشیده شده

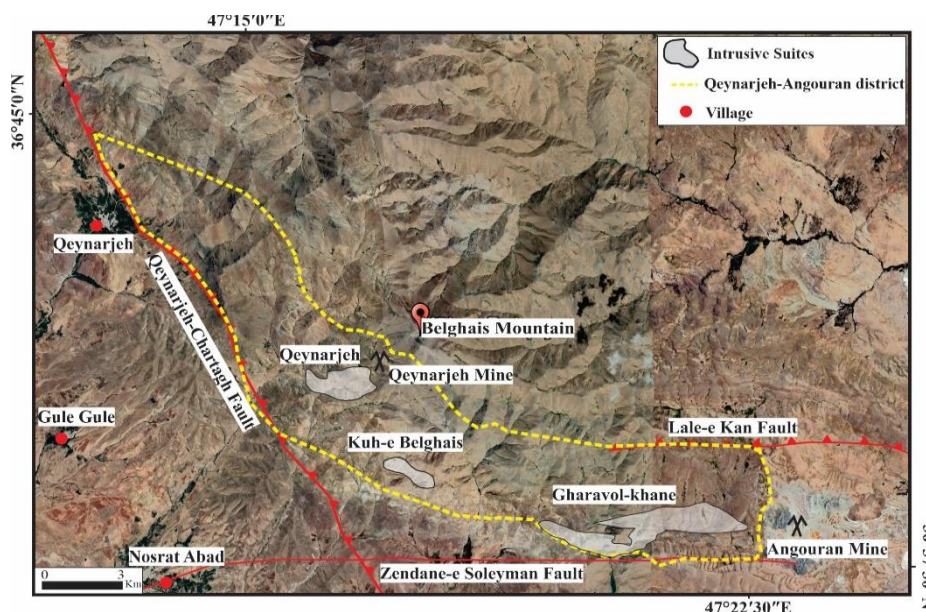


شکل ۱. A: نقشه ساده شده پهنه‌های ساختاری-زمین‌شناسی شمال غرب ایران، نقشه پایه از سهندی و سهیلی (Sahandi and Soheili, 2014) و موقعیت ناحیه قینرجه-انگوران و B: نقشه زمین‌شناسی ناحیه قینرجه-انگوران، نقشه پایه از باباخانی و قلمقاش (Babakhani and Ghalamghash, 2001) و موقعیت دنباله‌های نفوذی مورد بررسی

Fig. 1. A: Simplified structural-geologic map of NW Iran, modified after Sahandi and Soheili (Sahandi and Soheili, 2014) and location of the Qeynarjeh-Angouran district, and B: Geological map of the Qeynarjeh-Angouran district modified after Babakhani and Ghalamghash (Babakhani and Ghalamghash, 2001) and location of studied intrusive suites

الکترونی ۵ نانوآمپر، قطر پرتو ۱۰ میکرون و زمان تابش ۵ تا ۱۰ ثانیه انجام شده است. زاویه جهش ژئومتری پرتو ایکس دستگاه بین ۵۰ تا ۶۰ درجه و خطای تجزیه کمتر از ۱۰ گرم در تن گزارش شده است.

برای دستیابی به ترکیب شیمیایی آپاتیت‌ها در دنباله‌های نفوذی مورد بررسی، حدود ۳۰ نقطه توسط تجزیه ریز کاواالکترونی مدل JEOL JXA-8530F در آزمایشگاه مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان، مورد آزمایش قرار گرفت. تجزیه نقطه‌ای با ولتاژ ۱۵ کیلوولت، جریان پرتو



شکل ۲. موقعیت دنباله‌های نفوذی مورد بررسی در ناحیه قینرجه-انگوران بر روی تصویر ماهواره‌ای

Fig. 2. Location of the intrusive suites at Qeynarjeh-Angouran district on the satellite image

(مجموع فراوانی ۳۰ درصد حجمی) و کانی‌های فرعی پیروکسن، ارتوکلاز، کوارتز و کلریت (مجموع فراوانی ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی) هستند. کانی‌های کمیاب (فراوانی کمتر از ۲ درصد حجمی) اغلب شامل زیرکن، آپاتیت، ایلمنیت و مگنتیت است (شکل ۳-۱). دگرسانی‌های سریستی و کلریتی به ترتیب در بلورهای پلاژیوکلاز و بیوتیت این واحد سنگی مشاهده شده است.

کوه بلقیس: واحد گرانی پورفیری کوه بلقیس با وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع دارای ترکیب گرانی و دارای ضریب رنگی لو کوکراتیک (شکل ۳-۲) بوده که در نتیجه نفوذ آن درون واحد میکاشیست سازند کهر یک هاله اسکارنی غنی از گارنت گوهری سبز (موسوم به دمانتوئید تکاب) ایجاد شده است. سن این واحد سنگی بر اساس بررسی‌های

سنگ‌نگاری دنباله‌های نفوذی

قراول خله: توده نفوذی قراول‌خانه با وسعت تقریبی ۸ کیلومتر مربع، سنگ بستر میکاشیست و کوارتزیت پرکامبرین را قطع کرده و در رخنمون‌های صحرایی با ظاهر سبز تیره تا خاکستری روشن و دارای یک هاله اسکارنی مگنتیت‌دار قابل مشاهده است (شکل ۳-۱ و ۳-۲). شکل‌گیری این توده هم‌زمان با فاز کوه‌زایی سیمین پیشین و معادل تریاس میانی-بالایی گزارش شده است (Babakhani and Ghalamghash, 2001). طبق شواهد سنگ‌نگاری، این واحد دارای جنس کوارتزیدیوریت و مونزودیوریت با بافت‌های گرانولار، بوئی کیلیتیک و پورفیروئیدی است. کانی‌های اصلی این واحد شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند (مجموع فراوانی ۵۰ درصد حجمی)، بیوتیت

ناحیه‌ای باباخانی و قلمقاش (Babakhani and Ghalamghash, 2001)، ژوراسیک میانی-بالایی گزارش شده است. در نمونه دستی دارای درشت بلورهای کوارتز (ابعاد ۳ تا ۵/۵ میلی متر) در خمیره ریزبلور کوارتز و فلدسپاتاسیم است (شکل ۳-E). طبق شواهد سنگ‌نگاری، این واحد سنگی با بافت پورفیری از کانی‌های اصلی کوارتز و فلدسپاتاسیم (مجموع فراوانی ۸۰ درصد حجمی)، کانی‌های فرعی کلریت، هورنبلند، سریسیت و کلسیت (مجموع فراوانی ۱۵ تا ۲۰ درصد حجمی) و کانی‌های کمیاب اسفن، زیرکن، آپاتیت و پیریت (مجموع فراوانی کمتر از ۲ درصد حجمی)، تشکیل شده است (شکل ۳-F). در این توده، دگرسانی‌های سریسیتی و کائولینیتی (در بلورهای فلدسپاتاسیم) و دگرسانی کربناتی (در زمینه سنگ) مشاهده شد.

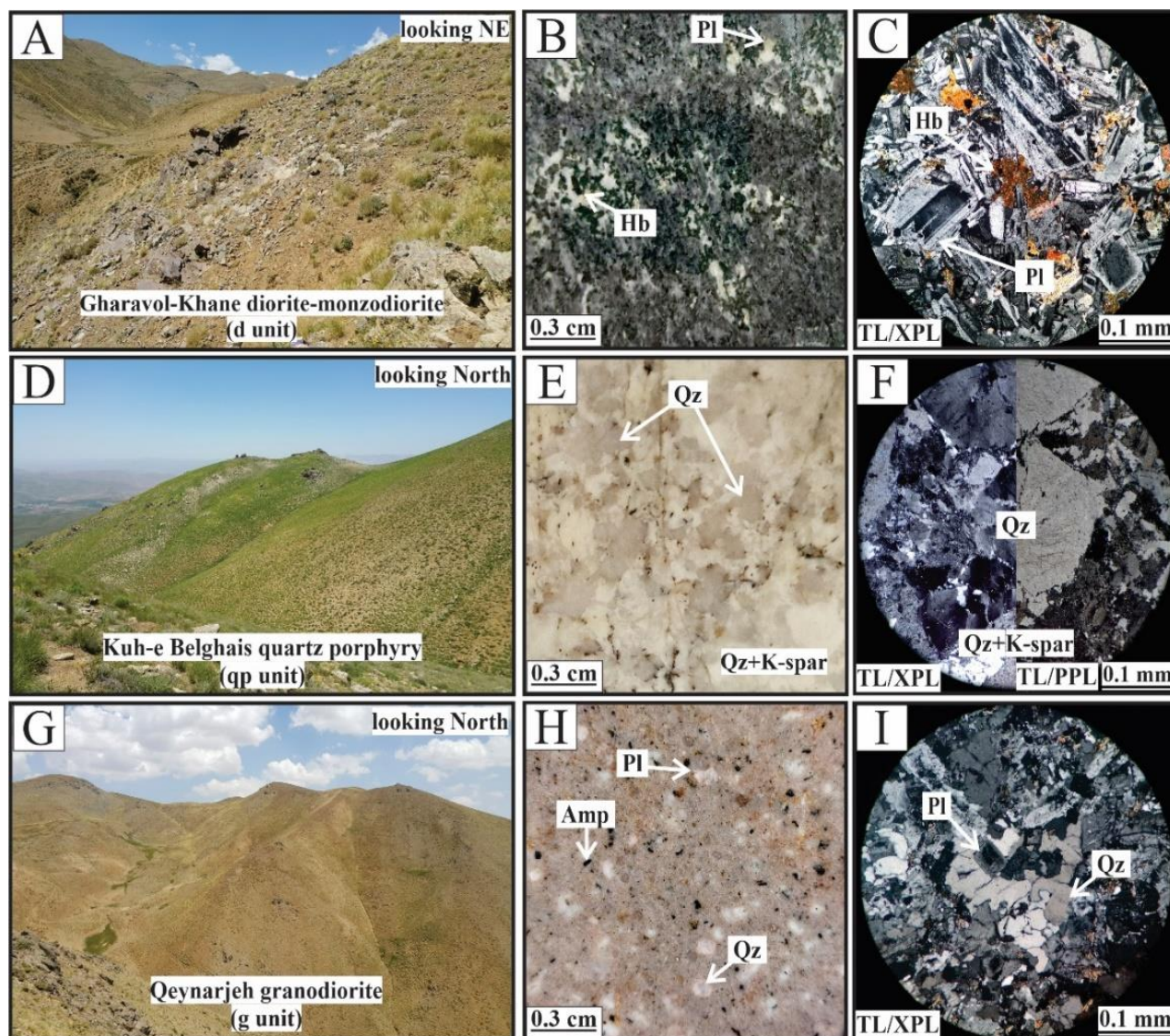
قینرجه: توده نفوذی قینرجه با وسعت تقریبی ۳ کیلومترمربع، در رخنمون‌های صحرایی با رنگ سبز تا خاکستری روشن قابل مشاهده است (شکل ۳-G). این واحد سنگی در مجاورت کانسار آهن اسکارنی قینرجه رخنمون دارد (شکل‌های ۱ و ۲) که واحدهای پالئوزوئیک (نظیر ماسه سنگ سازند لالون) را قطع کرده و توسط توالی کربناتی سازند قم با سن الیگوسن-میوسن به طور ناهمساز پوشیده شده است. بر این مبنا، زمان نسبی توده نفوذی منطقه قینرجه احتمالاً پس از کامبرین و پیش از الیگوسن است که با توده‌های نفوذی هم‌زمان با فاز کوه‌زایی سیمین پسین (ژوراسیک بالایی) ناحیه تکاب-لنگوران تطابق دارد (Babakhani and Ghalamghash, 2001). طبق شواهد سنگ‌نگاری، این واحد دارای جنس گرانودیوریت با بافت‌های میکروگرانولار و پورفروئیدی است (شکل ۳-H). کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و کوارتز (مجموع فراوانی ۶۰ درصد حجمی)، کانی‌های فرعی هورنبلند و بیوتیت (فراوانی ۱۰ درصد حجمی) و کانی کمیاب آپاتیت، زیرکن، اپیدوت و پیریت (فراوانی کمتر از ۲ درصد حجمی) است (شکل ۳-I).

زمین شیمی سنگ کل

عناصر اصلی

داده‌های زمین شیمی سنگ کل برای تعداد ۲۰ نمونه از دنباله‌های نفوذی

قراول‌خانه، کوه بلقیس و قینرجه، در جدول ۱ ارائه شده است. محتوای SiO_2 در کوارتزیدیوریت قراول‌خانه بین ۵۲/۲۱ تا ۵۷/۷۲ wt.% (متوسط ۵۴/۳۰ wt.%)، در واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس بین ۷۰/۱۲ تا ۷۵/۶۵ wt.% (متوسط ۷۳/۷۷ wt.%) و گرانودیوریت قینرجه بین ۶۴/۱۸ تا ۷۰/۴۹ wt.% (متوسط ۶۸/۲۸ wt.%) به دست آمد. بیشترین محتوای K_2O متعلق به گرانودیوریت قینرجه (متوسط wt.%) ۳/۰۸ و کمترین آن متعلق به گرانیت پورفیری کوه بلقیس (متوسط wt.%) ۲/۵۷ است. با این وجود، بیشترین محتوای عناصر قلیایی (مجموع $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) در توده نفوذی قینرجه (متوسط wt.%) ۶/۷۰ و کمترین آن در منطقه قراول‌خانه (متوسط wt.%) ۵/۷۳ به دست آمد (جدول ۱). بیشترین محتوای LOI در توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس (متوسط wt.%) ۱/۷۲ و کمترین آن در گرانودیوریت قینرجه (متوسط wt.%) ۰/۸۳ ثبت شده است. مقادیر $\text{Mg\#}$ {با رابطه $100 * \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$ } در کوارتزیدیوریت قراول‌خانه بین ۱۹/۲۸ تا ۳۶/۲۶ mol% (متوسط ۲۸/۷۴ mol%)، گرانیت پورفیری کوه بلقیس بین ۹/۹۵ تا ۳۵/۲۶ mol% (متوسط ۲۰/۳۲ mol%) و گرانودیوریت قینرجه بین ۳/۶۲ تا ۲۳/۰۹ mol% (متوسط mol% ۱۲/۴۹) به دست آمد. دمای همگنی زیرکن (T_{Zr}) بر حسب درجه سانتی گراد طبق معادله $T_{\text{Zr}} = 12,900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496,000 / Z_{\text{r}}^{\text{melt}})]$ (Miller and Wooden, 2004) به دست آمد که در آن $D^{\text{Zr, Zircon/melt}}$ نسبت غلظت Zr (ppm) در زیرکن به غلظت Zr در مذاب اشباع و M یک عامل ترکیبی است که به میزان حلالیت زیرکن به SiO_2 و پرآلومینوس مذاب $[(\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Al} \cdot \text{Si})]$ بستگی دارد. همچنین، T عامل دما بر حسب کلون است. بر این اساس، در کوارتزیدیوریت قراول‌خانه بین ۵۶۱ تا ۷۳۳ درجه سانتی گراد (متوسط ۶۵۶ درجه سانتی گراد)، گرانیت پورفیری کوه بلقیس بین ۷۱۹ تا ۸۷۱ درجه سانتی گراد (متوسط ۷۴۷ درجه سانتی گراد) و گرانودیوریت قینرجه بین ۷۵۱ تا ۸۱۳ درجه سانتی گراد (متوسط ۷۸۱ درجه سانتی گراد) به دست آمد (جدول ۱).



شکل ۳. تصاویرهای صحرایی و سنگ‌نگاری از دنباله‌های نفوذی در ناحیه قینرجه-انگوران. منطقه قراول‌خانه شامل A: رخمون واحد نفوذی کوارتز دیوریت، B: بلورهای پلاژیو کلاز و هورنبلند در نمونه دستی، C: بافت گرانولار از تجمع کانی‌های پلاژیو کلاز و هورنبلند. منطقه کوه بلقیس شامل D: رخمون واحد نفوذی گرانیت پورفیری، E: بلورهای کوارتز و فلدسپار پتاسیم در نمونه دستی، F: بافت پورفیری با حضور درشت بلور کوارتز. منطقه قینرجه شامل G: رخمون توده گرانودیوریتی، H: بلورهای پلاژیو کلاز، هورنبلند و کوارتز در نمونه دستی و I: بافت میکروگرانولار از تجمع کانی‌های پلاژیو کلاز و کوارتز. علائم اختصاری کانی‌ها از وار (Warr, 1994) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Pl: پلاژیو کلاز، Px: پیروکسن، Hb: هورنبلند، K-spar: فلدسپار پتاسیم، Amp: آمفیبول). علائم اختصاری میکروسکوپی شامل TL: نور عبوری، XPL: نور متقاطع پلاریزه است.

Fig. 3. Field and petrographic images of the intrusive suites at Qeynarjeh-Angouran district. The Gharavol-Khane area includes A: quartz diorite intrusive rock, B: hand specimen of plagioclase and hornblende minerals, C: granular texture with plagioclase and quartz mineral assemblage. The Kuh-e Belghais area includes D: granite porphyry intrusive rock, E: hand specimen of quartz and K-feldspar minerals, F: porphyry texture with quartz phenocryst. The Qeynarjeh area includes G: granodiorite intrusive rock, H: hand specimen of plagioclase, hornblende, and quartz minerals, I: microgranular texture with plagioclase and quartz mineral assemblage. Abbreviations after Warr (1994) (Qz: quartz, Pl: plagioclase, Px: pyroxene, Hb: hornblende, K-spar: K-feldspar, Amp: amphibole). Abbreviations of photomicrographs: TL: transmitted light, XPL: cross-polarized light.

جدول ۱. داده‌های زمین شیمی سنگ کل در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 1. Whole-rock geochemical data at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Location	Gharavol-Khane									
Rock type	Quartz monzodiorite (n=5)					Quartz diorite (n=5)				
Sample no.	Gh-1	Gh-2	Gh-3	Gh-4	Gh-5	Gh-8	Gh-9	Gh-10	Gh-11	Gh-12
Major oxides (wt.%)										
SiO ₂	55.37	52.35	53.99	52.77	52.21	54.73	53.17	53.69	56.92	57.72
TiO ₂	0.76	0.99	0.70	0.51	0.84	0.83	1.15	0.91	1.02	0.76
Al ₂ O ₃	17.99	18.24	16.55	17.72	17.76	16.12	17.27	16.25	18.08	16.82
Fe ₂ O ₃	7.22	7.41	7.82	5.99	8.06	8.44	7.03	7.42	7.35	6.73
MnO	0.13	0.06	0.15	0.10	0.15	0.17	0.12	0.14	0.14	0.09
MgO	3.37	2.62	2.78	3.96	3.89	4.61	3.82	4.58	2.04	3.13
CaO	8.97	8.96	10.11	10.44	11.29	10.26	10.53	11.17	7.74	6.24
Na ₂ O	3.05	2.75	3.11	3.33	2.22	2.51	3.32	2.94	3.54	3.63
K ₂ O	2.00	2.53	3.72	3.70	2.61	2.17	2.49	2.21	2.38	3.13
P ₂ O ₅	0.17	0.23	0.18	0.13	0.15	0.02	0.21	0.18	0.23	0.21
LOI	0.80	3.69	0.71	0.95	1.16	0.03	1.29	1.07	0.36	1.00
Total	99.83	99.83	99.82	99.60	100.34	99.89	100.40	100.56	99.80	99.46
Mg#	28.65	23.32	23.42	36.26	29.34	31.97	31.86	34.69	19.28	28.58
Trace elements and REE (ppm)										
Ba	274.00	373.00	188.00	139.00	127.00	72.00	390.00	154.00	345.00	443.00
Cs	2.60	1.20	0.50	1.50	1.10	0.10	0.70	1.90	2.65	0.80
Ga	17.02	20.05	17.12	16.41	16.79	18.49	16.01	18.31	20.00	15.84
Nb	10.00	11.00	10.00	8.00	20.00	8.00	9.00	4.00	16.00	18.00
Ta	1.20	1.67	1.82	1.00	1.30	2.82	2.70	2.60	3.60	3.00
Rb	69.01	67.40	42.58	19.62	34.05	5.09	40.37	33.91	83.18	71.28
Sr	203.00	266.00	390.00	333.00	290.00	339.00	365.00	313.00	271.00	247.00
Th	5.90	6.60	5.00	4.10	5.50	4.10	3.50	4.20	7.21	8.00
U	1.59	2.24	1.91	1.34	2.31	1.03	1.37	1.38	1.89	1.76
Zr	128.00	142.00	138.00	62.00	101.00	24.00	107.00	64.00	176.00	175.00

Note: LOI= loss on ignition; $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; $Mg\# = [100 \times \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})]$; T_{Zr} = Zircon saturation temperature calculated from the whole-rock compositions (Miller and Wooden, 2004).

ادامه جدول ۱. داده‌های زمین شیمی سنگ کل در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 1 (Continued). Whole-rock geochemical data at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Location	Gharavol-Khane									
Rock type	Quartz monzodiorite (n=5)					Quartz diorite (n=5)				
Sample no.	Gh-1	Gh-2	Gh-3	Gh-4	Gh-5	Gh-8	Gh-9	Gh-10	Gh-11	Gh-12
Hf	2.34	3.76	3.70	3.10	3.87	4.72	4.20	3.34	3.34	4.40
V	168.00	156.00	145.00	130.00	187.00	229.00	236.00	259.00	144.00	116.00
W	0.35	0.45	0.43	0.20	0.20	0.88	1.00	1.10	1.00	1.10
Y	22.10	27.20	17.60	14.70	25.30	8.60	21.70	19.00	29.56	21.80
Pb	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00
Rare Earth Elements (REE) (ppm)										
La	14.60	20.20	12.70	7.60	13.60	12.40	14.50	7.50	21.88	19.20
Ce	32.20	44.10	28.80	18.80	32.90	23.00	31.70	19.60	47.77	39.30
Pr	3.64	5.30	3.33	2.22	3.91	3.71	3.82	2.58	5.81	4.32
Nd	14.30	21.00	14.00	9.70	15.70	13.80	16.00	11.44	22.68	16.20
Sm	3.48	4.70	3.10	2.49	3.61	3.15	3.86	3.16	5.12	3.70
Eu	0.87	1.34	0.78	0.68	1.04	1.23	1.04	0.86	1.27	0.93
Gd	3.68	4.83	3.03	2.68	4.09	3.34	3.89	3.28	5.00	3.49
Tb	0.60	0.76	0.49	0.45	0.64	0.44	0.63	0.57	0.86	0.63
Dy	3.46	4.33	2.87	2.55	3.80	2.39	3.73	3.29	4.94	3.70
Ho	0.76	0.92	0.57	0.50	0.84	0.52	0.75	0.65	1.07	0.74
Er	2.18	2.85	1.90	1.45	2.41	1.90	2.19	1.87	3.01	2.08
Tm	0.33	0.40	0.26	0.22	0.39	0.23	0.31	0.25	0.45	0.34
Yb	2.04	2.70	1.86	1.36	2.25	1.81	2.10	1.58	2.66	1.87
Lu	0.29	0.39	0.30	0.22	0.32	0.34	0.31	0.24	0.44	0.27
ΣREE	82.47	113.85	74.03	50.88	85.53	38.27	84.73	56.86	122.95	96.81
LREE/HREE	4.80	5.15	5.14	4.04	4.42	4.61	7.12	3.52	5.24	5.88
La _N /Yb _N	4.77	4.98	4.56	3.71	4.02	4.59	4.61	3.16	5.49	6.85
Eu/Eu*	0.70	0.81	0.73	0.76	0.78	1.09	0.77	0.77	0.72	0.74
Ce/Ce*	1.06	1.02	1.06	1.10	1.08	0.81	1.02	1.07	1.02	1.03
T _{Zr} (°C)	693.90	699.70	654.00	603.90	643.90	561.00	642.50	600.20	729.50	733.00

Note: LOI= loss on ignition; Eu/Eu* = $Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; Ce/Ce* = $Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; Mg# = $[100 \times \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})]$; T_{Zr}= Zircon saturation temperature calculated from the whole-rock compositions (Miller and Wooden, 2004).

ادامه جدول ۱. داده‌های زمین شیمی سنگ کل در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 1 (Continued). Whole-rock geochemical data at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Location	Kuh-e Belghais					Qeynarjeh				
Rock type	Granite porphyry (n=5)					Granodiorite (n=5)				
Sample no.	Bl-17	Bl-18	Bl-19	Bl-20	Bl-21	Qn-23	Qn-24	Qn-29	Qn-30	Qn-31
Major elements (wt.%)										
SiO ₂	70.12	73.07	75.65	74.8	75.21	66.84	64.18	70.49	69.87	70.06
TiO ₂	0.60	0.90	0.70	0.70	0.60	0.38	0.45	0.16	0.24	0.18
Al ₂ O ₃	14.73	13.21	12.77	11.34	13.1	15.47	17.15	13.31	14.74	14.91
Fe ₂ O ₃	1.58	2.27	2.17	1.34	1.09	3.31	3.64	3.89	4.04	3.72
MnO	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.09	0.12	0.01	0.04	0.02
MgO	1.00	0.32	0.42	0.71	0.14	1.07	1.27	0.17	0.51	0.19
CaO	2.19	1.72	1.44	2.79	1.25	3.93	5.33	4.25	3.88	2.04
Na ₂ O	4.13	3.86	3.18	4.28	4.25	3.62	3.76	2.91	3.26	4.54
K ₂ O	2.48	2.75	2.72	2.47	2.45	3.93	2.33	3.25	2.88	3.04
P ₂ O ₅	0.07	0.09	0.03	0.02	0.08	0.23	0.39	0.12	0.14	0.1
LOI	2.29	1.52	1.42	2.03	1.34	0.91	1.14	0.55	0.65	0.93
Total	99.2	99.72	100.52	100.5	99.54	99.78	99.76	99.11	100.25	99.69
Mg#	35.26	10.81	14.27	31.31	9.95	21.76	23.09	3.62	9.79	4.21
Trace elements and REE (ppm)										
Ba	38.00	39.00	42.00	52.00	19.00	525.00	599.00	578.00	847.00	866.00
Cs	0.29	0.25	0.43	0.24	0.22	0.24	0.50	0.31	0.27	0.71
Ga	18.10	14.63	13.48	15.61	12.14	16.03	16.19	14.73	15.43	14.51
Nb	14.00	17.00	19.00	15.00	11.00	23.00	14.00	16.00	14.00	16.00
Ta	1.10	1.76	1.65	1.70	1.78	2.60	5.50	3.63	2.10	2.67
Rb	12.89	18.28	18.37	15.25	13.89	57.15	61.01	114.67	90.62	97.03
Sr	235.00	147.00	123.00	216.00	161.00	260.00	315.00	274.00	278.00	292.00
Th	9.60	18.99	19.63	14.63	15.92	22.66	15.90	29.83	19.72	15.93
U	0.68	1.39	1.01	1.25	0.76	4.51	2.59	2.15	2.58	2.42
Zr	119.00	101.00	125.00	102.00	122.00	182.00	163.00	146.00	258.00	225.00
Hf	6.10	7.65	6.65	6.75	6.56	8.30	7.40	5.20	6.10	7.10
V	37.00	6.00	4.00	20.00	4.00	28.00	36.00	10.00	28.00	17.00
W	23.21	12.12	15.32	15.21	16.23	5.60	3.43	4.20	7.60	3.56
Y	21.25	21.02	22.79	31.69	27.72	40.76	22.93	14.73	16.15	18.00
Pb	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00	3.00	3.00	1.00	2.00	2.00

Note: LOI= loss on ignition; $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; $Mg\# = [100 \times \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})]$; T_{Zr} = Zircon saturation temperature calculated from the whole-rock compositions (Miller and Wooden, 2004).

ادامه جدول ۱. داده‌های زمین شیمی سنگ کل در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 1 (Continued). Whole-rock geochemical data at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Location	Kuh-e Belghais					Qeynarjeh				
Rock type	Granite porphyry (n=5)					Granodiorite (n=5)				
Sample no.	Bl-17	Bl-18	Bl-19	Bl-20	Bl-21	Qn-23	Qn-24	Qn-29	Qn-30	Qn-31
Rare Earth Elements (REE) (ppm)										
La	9.60	10.62	5.41	5.12	8.68	41.28	32.06	23.35	30.17	50.06
Ce	35.25	56.25	21.99	27.61	26.41	98.27	62.21	59.01	62.97	81.09
Pr	5.23	5.05	2.13	2.53	3.66	8.74	6.25	5.39	6.23	7.18
Nd	23.40	21.76	14.43	16.33	12.74	32.05	22.47	18.54	21.58	22.64
Sm	4.94	6.50	2.41	1.55	2.75	5.47	4.22	3.69	3.57	4.48
Eu	0.38	0.25	0.10	0.14	0.15	0.90	0.88	0.78	0.97	0.76
Gd	4.53	6.72	3.08	1.74	1.56	5.35	4.04	3.18	2.97	3.09
Tb	0.68	1.29	0.59	0.28	0.17	0.80	0.65	0.56	0.44	0.54
Dy	3.69	5.76	4.08	2.79	2.18	4.58	3.78	2.83	2.48	2.93
Ho	0.73	1.59	1.03	0.37	0.28	0.93	0.75	0.58	0.46	0.58
Er	2.15	4.46	2.94	1.10	0.75	3.17	2.34	2.07	1.72	1.83
Tm	0.28	0.63	0.46	0.15	0.10	0.41	0.36	0.27	0.26	0.29
Yb	1.74	2.92	2.54	1.07	1.05	3.10	2.13	1.65	1.79	2.08
Lu	0.24	0.53	0.49	0.16	0.10	0.49	0.34	0.30	0.30	0.26
ΣREE	92.90	124.39	61.73	61.01	60.65	205.61	142.54	122.26	136.00	177.87
LREE/HREE	5.42	4.14	3.02	6.77	8.50	9.40	8.31	.98	10.89	13.34
La _N /Yb _N	3.66	2.42	1.41	3.18	5.47	8.86	10.02	9.41	11.19	16.01
Eu/Eu*	0.23	0.11	0.11	0.25	0.21	0.48	0.61	0.65	0.85	0.58
Ce/Ce*	1.19	1.85	1.55	1.84	1.12	1.24	1.05	1.26	1.10	1.03
T _{Zr} (°C)	763.60	750.80	781.30	719.00	772.00	769.30	760.80	751.20	813.60	811.10

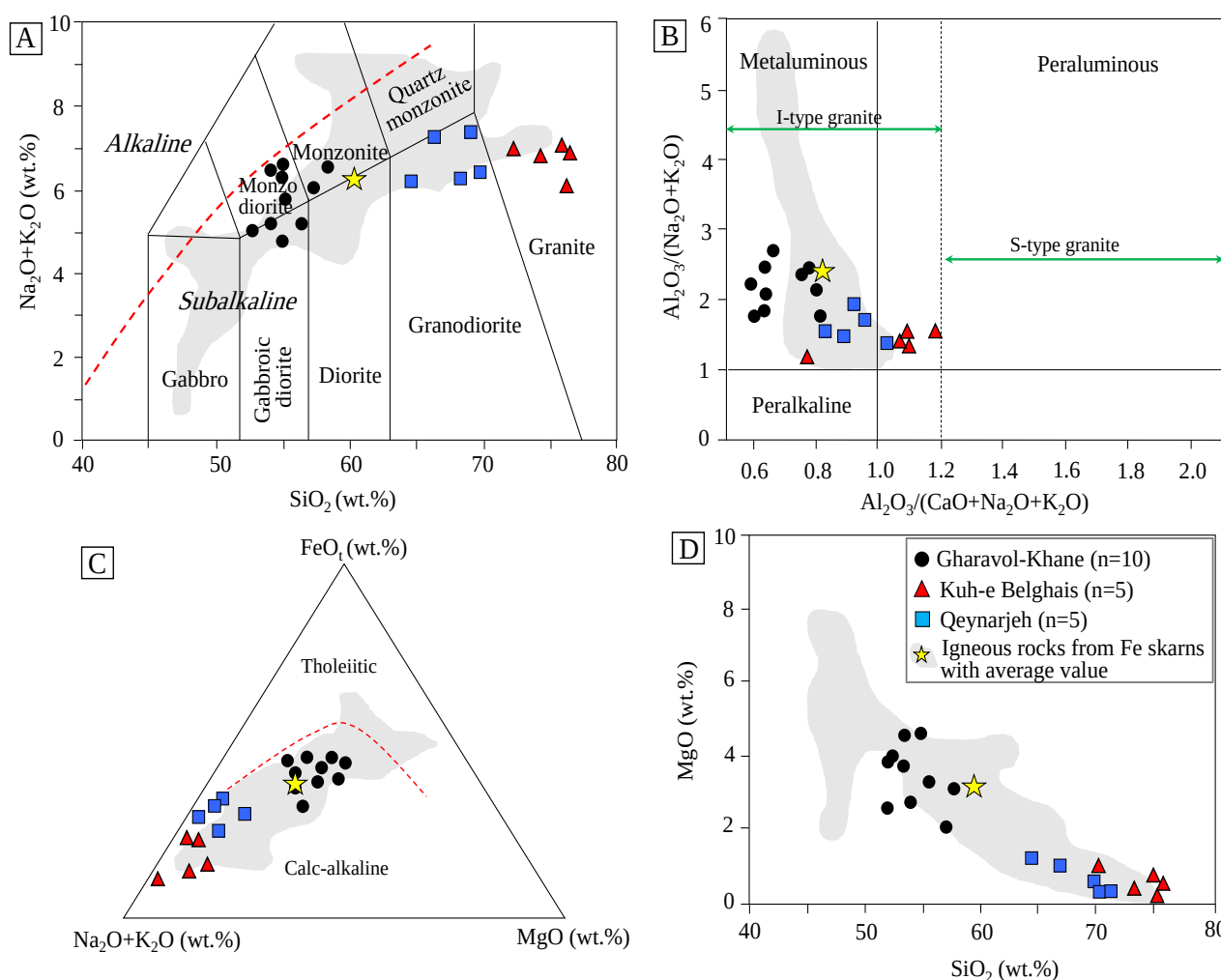
Note: LOI= loss on ignition; Eu/Eu*= $Eu_N/(Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; Ce/Ce*= $Ce_N/(La_N \times Pr_N)^{1/2}$; Mg# = $[100 \times \text{molar Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})]$; T_{Zr}= Zircon saturation temperature calculated from the whole-rock compositions (Miller and Wooden, 2004).

مونزودیوریت-مونزونیت، گرانودیوریت و گرانیت قرار گرفتند (شکل ۴-ا). درجه اشباعی از آلومینا (Chappell and White, 2001) در دنباله‌های نفوذی مورد بررسی با نسبت مولار $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ بین ۰/۵۰ تا ۱/۲۰ متعلق به سری

در نمودار دوتایی $Na_2O + K_2O$ در مقابل SiO_2 موسوم به نمودار TAS، اصلاح شده توسط بلینی و همکاران (Bellieni et al., 1996)، دنباله‌های نفوذی منطقه زیر منحنی سبب آلکالن (منطبق با ترکیب عمومی گرانیتوئیدهای اسکارن آهن دنیا) و محدوده سنگ‌های

یوده و (شکل ۴-۲) و با توجه به نمودار دوتایی MgO در مقابل SiO_2 (Meinert, 1995) در محدوده گرانیتوئیدهای مولد اسکارن آهن تصویر شده‌اند (شکل ۴-۲).

متالومین تا کمی پرآلومین و زیرنوع گرانیت I منسوب خواهد بود (شکل ۴-۲). بر اساس نمودار سه‌تایی AFM (Irvine and Baragar, 1971) کلیه نمونه‌ها متعلق به سری ماگمایی کالک‌آلکان



شکل ۴. نمودارهای زمین‌شیمی عناصر اصلی در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. A: نمودار دوتایی $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 ، اصلاح‌شده توسط بلینی و همکاران (Bellieni et al., 1996)، B: نمودار درجه اشباعی آلومینا (Chappell and White, 2001)، C: نمودار AFM با منحنی تمایز تولیتی از کالک‌آلکان (Irvine and Baragar, 1971)، و D: نمودار دوتایی MgO در مقابل SiO_2 (Meinert, 1995). ترکیب اسکارن‌های آهن دنیا توسط ماینرت (Meinert, 1995) برای مقایسه نشان داده شده است.

Fig. 4. Geochemical diagrams of major elements at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district. A: $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 diagram, modified from Bellieni (Bellieni et al., 1996), B: Aluminum saturation index diagram (Chappell and White, 2001), C: AFM diagram with calc-alkali-tholeiitic boundary line (Irvine and Baragar, 1971), and D: MgO versus SiO_2 diagram by Meinert (Meinert, 1995). The composition of Fe skarns worldwide (from Meinert, 1995) are shown for comparison.

عناصر کمیاب و کمیاب خاکی

مجموع عناصر کمیاب خاکی در دنباله‌های نفوذی مورد بررسی به ترتیب در کوارتز دیوریت قراول‌خانه بین ۵۰/۸۸ تا ۱۲۲/۹۶ ppm (متوسط ۸۳/۶۴ ppm)، گرانیت پورفیری کوه بلقیس بین ۶۰/۶۵ تا ۱۲۴/۳۹ ppm (متوسط ۸۰/۱۴ ppm) و گرانودیوریت قینرجه بین ۱۲۲/۲۷ تا ۲۰۵/۶۲ ppm (متوسط ۱۵۶/۸۶ ppm) است (جدول ۱). بر این اساس، محتوای REE در گرانودیوریت‌های منطقه قینرجه به طور متوسط دو برابر دیگر مناطق است. همچنین، **نسبت عناصر کمیاب خاکی سبک به سنگین** در دنباله‌های نفوذی قراول‌خانه بین ۳/۵۲ تا ۷/۱۲ (متوسط ۴/۹۹)، کوه بلقیس بین ۳/۰۲ تا ۸/۵۰ (متوسط ۵/۵۷) و قینرجه بین ۸/۳۱ تا ۱۳/۳۴ (متوسط ۱۰/۱۸) است که این نسبت در گرانودیوریت‌های منطقه قینرجه به طور متوسط دو برابر سایر توده‌هاست. طبق شواهد زمین‌شیمیایی، به ترتیب بیشترین تا کمترین محتوای **عناصر لیتوفیل بزرگ یون** شامل مجموع عناصر Th, Ba, Rb, U, K و Pb در گرانودیوریت قینرجه (متوسط ۷۹۳/۹۵ ppm)، کوارتز دیوریت قراول‌خانه (متوسط ۳۰۶/۴۸ ppm) و واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس (متوسط ۷۲/۶۹ ppm) است. تغییرات **عناصر با شدت میدان بالا** شامل Ta, Nb و Ti تهی‌شدگی بارزی در تمام نمونه‌های بهنجار شده با ترکیب گوشته اولیه، داده‌ها از سان و مکدونوف (Sun and McDonough, 1989) نشان می‌دهد که مجموع غلظت آنها به تدریج از توده نفوذی قراول‌خانه (متوسط ۱۴/۰۸ ppm) به منطقه کوه بلقیس (متوسط ۱۷/۲۱ ppm) و در نهایت گرانودیوریت قینرجه (متوسط ۲۰/۰۶ ppm) افزایش می‌یابد. همچنین، در نمودار بهنجار شده با کندریت (Boynton, 1984)، غنی‌شدگی LREE نسبت به HREE و یک تهی‌شدگی در موقعیت Eu مشاهده می‌شود (شکل ۵- A تا C). به علت سازگاری Eu در ترکیب پلاژیو کلاز و آلکالی فلدسپار، تهی‌شدگی در موقعیت Eu اغلب توسط فلدسپارها کنترل می‌شود (Rollinson, 1993). طبق شواهد، مقادیر کم آتومالی Eu/Eu^* در کوارتز دیوریت قراول‌خانه (متوسط ۰/۷۸) و گرانودیوریت قینرجه (متوسط ۰/۶۳) و مقادیر بالای آتومالی در گرانیت پورفیری کوه بلقیس (متوسط ۰/۱۸) به دست آمده است. متناظر با آن، بیشترین

محتوای Sr/Y نیز در توده‌های نفوذی قراول‌خانه (متوسط ۱۴/۵۸) و قینرجه (متوسط ۱۴/۴۳) و کمترین آن در توده کوه بلقیس (متوسط ۷/۲۲) ثبت شده است.

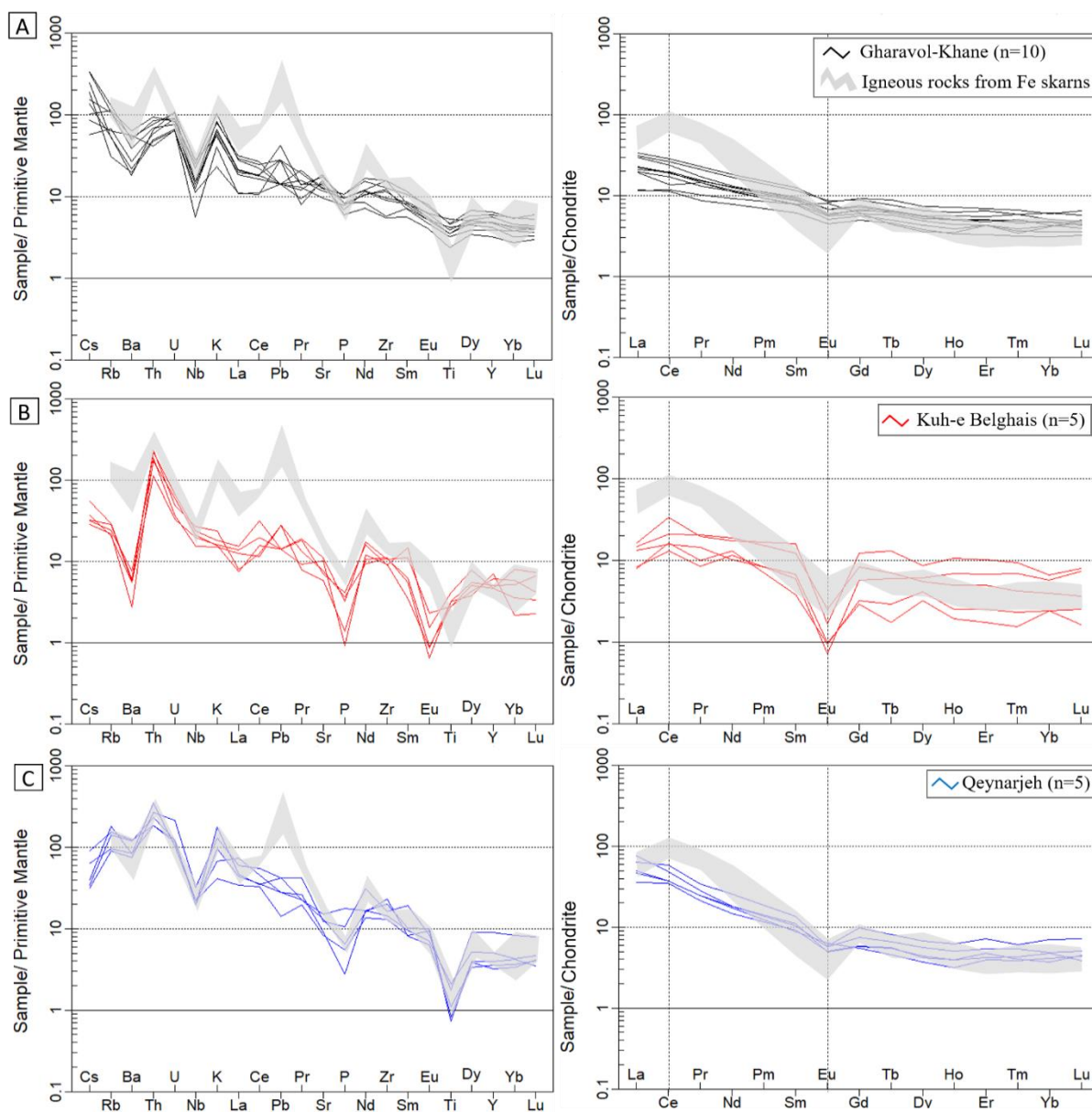
طبق بررسی‌ها، LILE پتانسیل یونی بالایی داشته و در فشار و دمای بالا در مذاب سیلیکاتی حل شده و انتقال می‌یابند؛ اما انحلال‌پذیری HFSE در مذاب پایین بوده و به همین دلیل در هنگام ذوب بخشی، LILE نسبت به HFSE غنی می‌شوند (Tatsumi et al., 1986). بر اساس نمودار بهنجار شده با گوشته اولیه، تهی‌شدگی از عناصر Ti و Nb هم‌زمان با غنی‌شدگی Rb, Ba, Th و U بیانگر شکل‌گیری دنباله‌های نفوذی در یک محیط مرتبط با فروانش است (Wilson, 1989) (شکل ۵-A تا C). تهی‌شدگی نسبی در عناصر Ti و P در اغلب نمودارها، به ترتیب گویای ارتباط سنگ‌نگاری-شیمیایی تبلور کانی‌های تیتانیت (اسفن) و آپاتیت در مراحل تفریق ماگمایی است (شکل ۵-A تا C). بیشترین آتومالی Ce/Ce^* در واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس (متوسط ۱/۱۵) و کمترین آن به ترتیب در کوارتز دیوریت قراول‌خانه (متوسط ۱/۰۲) و گرانودیوریت قینرجه (متوسط ۱/۱۳) به دست آمده است. سایر نسبت‌های عنصری محاسبه شده در جدول ۱ ارائه شده است.

سنگ‌نگاری و شیمی بلور آپاتیت

طبق شواهد سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی، آپاتیت‌های موجود در دنباله‌های نفوذی قراول‌خانه، کوه بلقیس و قینرجه به ترتیب با حروف Ap1, Ap2, Ap3، نام‌گذاری شده است. بلورهای Ap1 (ابعاد متغیر ۵۰ تا ۴۰۰ میکرون)، با ظاهر کشیده و همگن به صورت بلورهای اذخال در میزبان پروکسن (شکل ۶-A) یا همراه کانی‌های پلاژیو کلاز و اپیدوت (شکل ۶-B و C) در کوارتز دیوریت‌های قراول‌خانه شناسایی شده است. بلورهای Ap2 (ابعاد ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون) به صورت نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل همراه کانی‌های کوارتز، کلسیت و پلاژیو کلاز در توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس مشاهده شده است (شکل ۶-D, E و F). بلورهای Ap3 (ابعاد ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) با ظاهر نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل، به صورت درهم‌رشدی با مجموعه کانی‌های

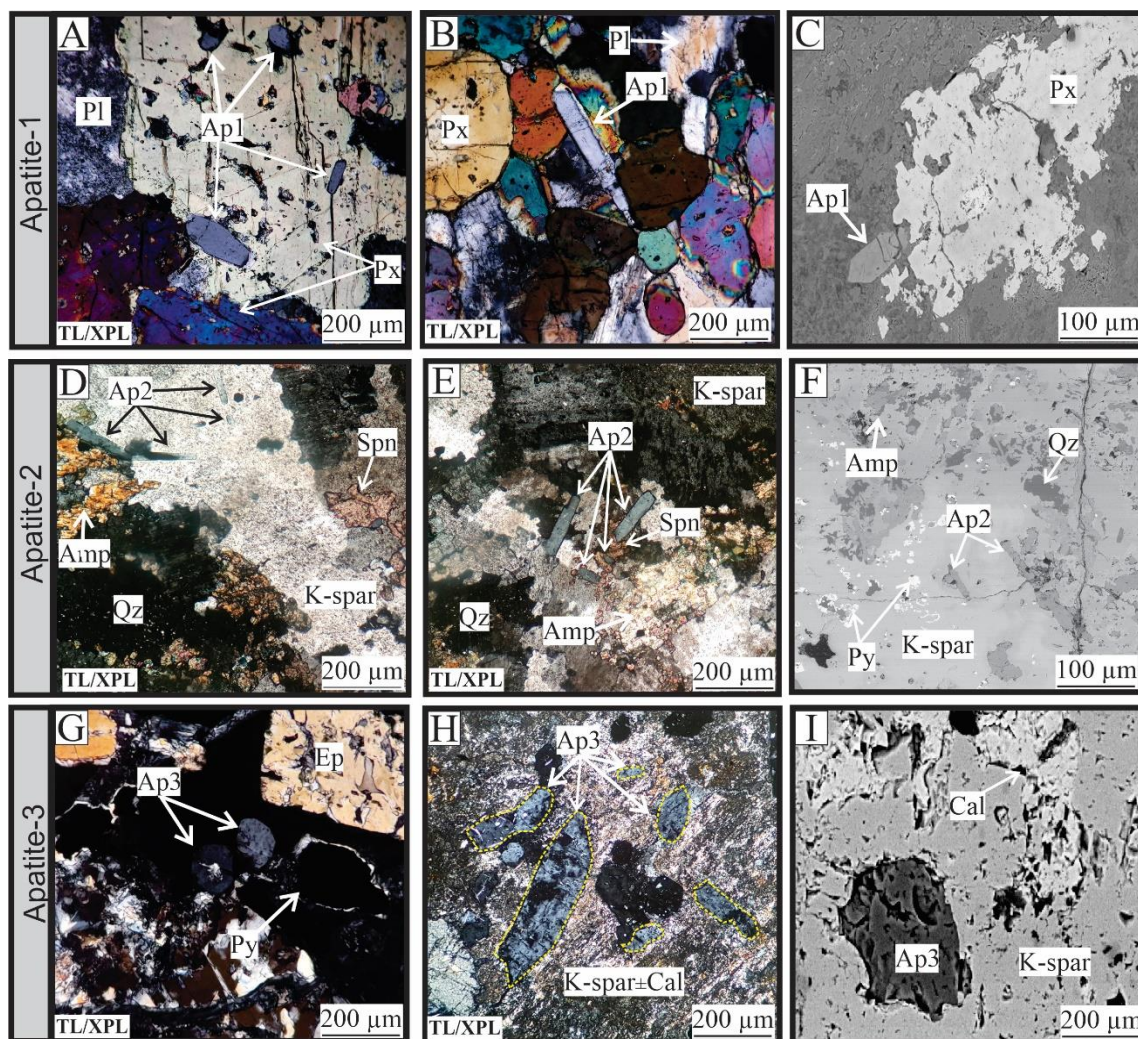
تصویرهای SEM ادخال‌های Ap3 (ابعاد متوسط ۴۰۰ میکرومتر) در میزبان فلدسپارتاسیم مشاهده شد (شکل ۶-I).

پلاژیو کلاز، فلدسپارتاسیم و کوارتز در میزبان واحد سنگی گرانودیوریت قینرجه شناسایی شده است (شکل ۶-G، H و I) در



شکل ۵. نمودارهای عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) و عناصر کمیاب خاکی بهنجار شده با کلدريت (Boynton, 1984) در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. A: توده کوارتز دیوریت قراول‌خلنه، B: واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس و C: واحد گرانودیوریت قینرجه. ترکیب توده‌های نفوذی مرتبط با ذخایر اسکارن آهن دنیا توسط ماینرت (Meinert, 1995) برای مقایسه نشان داده شده است.

Fig. 5. Primitive mantle-normalized trace element (normalizing data for all elements are from Sun and McDonough, 1989) and Chondrite-normalized REE (normalizing data for all elements are from Boynton, 1984) spidergram at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district. A: Gharavol-Khane quartzdiorite, B: Kuh-e Belgais granite porphyry, and C: Qeynarjeh granodiorite. The composition of intrusive rocks with Fe skarns worldwide by Meinert (Meinert, 1995) are shown for comparison.



شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی و SEM از آپاتیت‌ها در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. تصویر بلورهای Ap1 در کوارتز دیوریت منطقه قراول‌خانه شامل: بلورهای Ap1 به صورت اداخل در میزبان پیروکسن، B: همراهی بلور کشیده Ap1 با کانی‌های پلاژیو کلاز و پیروکسن، C: تصویر SEM همراهی Ap1 با بلور پیروکسن. تصویر بلورهای Ap2 در گرانیات پورفیری کوه بلقیس شامل D: بلورهای پراکنده Ap2 در زمینه فلدسپارتاسیم، E: تجمع بلورهای Ap2 در زمینه فلدسپارتاسیم و همراهی با کانی‌های کوارتز و آمفیبول، F: تصویر SEM از بلورهای پراکنده Ap2 در زمینه فلدسپارتاسیم. تصویر بلورهای Ap3 در گرانودیوریت قینرجه شامل G: همراهی بلورهای Ap3 با کانی‌های اپیدوت و پیریت، H: بلورهای Ap3 در زمینه فلدسپارتاسیم±کلسیت و I: تصویر SEM از اداخل Ap3 در فلدسپارتاسیم. علائم اختصاری کانی‌ها از وار (Warr, 1994) اقتباس شده است (Ep: اپیدوت، Pl: پلاژیو کلاز، Py: پیریت، Cal: کلسیت، Ap: آپاتیت، Px: پیروکسن، Qz: کوارتز، K-spar: فلدسپارتاسیم، Amp: آمفیبول، Spn: اسفن). علائم اختصاری میکروسکوپی شامل TL: نور عبوری، XPL: نور متقاطع پلاریزه است.

Fig. 6. Photomicrographs and SEM images of apatites at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district. Ap1 crystals in Gharavol-Khane quartz diorite including A: Ap1 crystals as inclusions within pyroxene, B: association of Ap1 with plagioclase and pyroxene minerals, C: SEM image of Ap1 association with pyroxene crystal. Ap2 crystals in Kuh-e Belghais granite porphyry including D: Ap2 crystals within K-feldspar, E: Ap2 crystals within K-feldspar and coexist by quartz and amphibole, F: SEM image from Ap2 within K-feldspar. Ap3 crystals in Qeynarjeh granodiorite including G: Association of Ap3 crystals with epidote and pyrite minerals, H: Ap3 crystals in K-feldspar±calcite context, and I: SEM image of Ap3 inclusions within K-feldspar. Abbreviations after Warr (1994) (Ep: epidote, Pl: plagioclase, Py: pyrite, Cal: calcite, Ap: apatite, Px: pyroxene, Qz: quartz, K-spar: K-feldspar, Amp: amphibole, Spn: sphene). Abbreviations of photomicrographs: TL: transmitted light, XPL: cross-polarized light.

Ap2 (متوسط ۱/۶۳ wt.%) و سپس به Ap3 (متوسط ۱/۴۳ wt.%) کاهش می‌یابد؛ در حالی که فراوانی کلر روند معکوس داشته و از Ap1 (متوسط ۰/۲۳ wt.%) به Ap2 (متوسط ۰/۵۷ wt.%) و سپس Ap3 (متوسط ۰/۶۰ wt.%) افزایش می‌یابد (شکل ۶-B). رابطه معکوس فلئور و کلر در ترکیب آپاتیت بیانگر جانشینی این عناصر به دلیل شعاع یونی مشابه بوده که در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است (Liu et al., 2008; Wu et al., 2003). علاوه بر این، فراوانی گوگرد همبستگی مثبتی با فلئور نشان می‌دهد که مقدار آن به ترتیب از Ap1 (متوسط ۰/۰۵ wt.%) به Ap2 (متوسط ۰/۰۴ wt.%) و Ap3 (متوسط ۰/۰۱ wt.%) روندی کاهشی دارد (شکل ۶-C).

نتایج به دست آمده از تجزیه ریز کاوالکترونی بلورهای مختلف آپاتیت در جدول ۲ ارائه شده است. بر این اساس، تفاوت آشکاری در محتوای عناصر اصلی CaO و P₂O₅ در بلورهای Ap1، Ap2 و Ap3 وجود ندارد. محتوای CaO در Ap1 بین ۵۴/۶۸ تا ۵۶/۶۸ wt.%(متوسط ۵۵/۶۶ wt.%)، در Ap2 بین ۵۵/۳۹ تا ۵۵/۱۳ wt.%(متوسط ۵۵/۶۵ wt.%) و در Ap3 بین ۵۵/۵۰ تا ۵۵/۹۷ wt.%(متوسط ۵۵/۷۹ wt.%) به دست آمد. همچنین، محتوای P₂O₅ در Ap1 بین ۴۱/۱۲ تا ۴۱/۷۸ wt.%(متوسط ۴۱/۷۵ wt.%)، در Ap2 بین ۴۱/۲۵ تا ۴۱/۷۸ wt.%(متوسط ۴۱/۵۰ wt.%) و در Ap3 بین ۴۱/۰۳ تا ۴۱/۷۸ wt.%(متوسط ۴۱/۴۳ wt.%) ثبت شده است (جدول ۲). در خصوص فراوانی هالوزنها، تمرکز فلئور به ترتیب از Ap1 (متوسط ۲/۳۹ wt.%) به

جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کاوالکترونی از ترکیب آپاتیت‌ها در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 2. EPMA results from apatites composition at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Apatite-1 (Gharavol-Khane)										
Point no.	P1-1	P1-2	P1-3	P1-4	P1-5	P1-6	P1-7	P1-8	P1-9	P1-10
Major oxides (wt.%)										
FeO	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.07	0.06	0.03
TiO ₂	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl
Cr ₂ O ₃	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	0.01	bdl	bdl
Na ₂ O	bdl	bdl	0.01	bdl	0.05	0.06	0.05	bdl	bdl	0.04
P ₂ O ₅	41.58	41.35	41.75	41.21	41.26	41.44	41.12	41.35	41.68	41.32
SiO ₂	0.11	0.14	0.17	0.16	0.15	0.17	0.14	0.17	0.17	0.16
MgO	bdl	0.01	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
MnO	0.11	0.07	0.09	0.11	0.13	0.12	0.04	0.08	0.07	0.11
K ₂ O	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl
CaO	55.61	54.68	54.68	55.57	55.70	55.53	55.69	56.03	55.76	55.97
F	2.31	2.37	2.69	2.46	2.17	2.26	2.65	2.15	2.64	2.23
Cl	0.20	0.26	0.32	0.34	0.23	0.24	0.20	0.13	0.15	0.24
S	0.03	0.03	0.07	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06
Total	97.47	96.27	96.73	97.08	97.33	97.39	97.15	97.71	97.11	97.63
Number of cations on the basis of 13O										
Si	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

ادامه جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کاوالکترونی از ترکیب آپاتیت‌ها در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 2 (Continued). EPMA results from apatites composition at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00
Mn	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	16.10	16.21	15.74	16.08	16.20	16.08	16.28	16.25	15.85	16.06
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	1.34	1.42	1.37	1.28	1.32	1.36	1.31	1.29	1.32	1.35
Cl	0.06	0.08	0.10	0.11	0.07	0.07	0.06	0.04	0.04	0.08
S	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.10	0.02	0.03	0.04
OH	1.14	1.10	1.12	1.16	1.15	1.13	1.16	1.17	1.15	1.14
Apatite-2 (Kuh-e Belghais)										
Point no.	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P2-6	P2-7	P2-8	P2-9	P2-10
Major oxides (wt.%)										
FeO	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	0.05	0.03
TiO ₂	bdl	0.01	bdl	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl
Cr ₂ O ₃	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl
Na ₂ O	0.02	bdl	bdl	bdl	0.03	0.02	bdl	bdl	0.01	bdl
P ₂ O ₅	41.74	41.36	41.38	41.62	41.45	41.22	41.62	41.68	41.05	41.03
SiO ₂	0.07	0.08	0.06	0.09	0.08	0.14	0.10	0.02	0.05	0.08
MgO	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl
MnO	0.13	0.11	0.07	0.10	0.14	0.14	0.12	0.13	0.17	0.16
K ₂ O	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl
CaO	55.93	55.99	55.96	55.97	55.92	55.89	55.97	55.65	55.93	55.95
F	1.63	1.8	1.44	1.47	1.67	1.87	1.54	1.82	1.73	1.38
Cl	0.65	0.58	0.64	0.59	0.56	0.55	0.52	0.54	0.6	0.54
S	0.04	0.07	0.04	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03
Total	97.90	97.57	97.51	97.81	97.65	97.47	97.88	97.51	97.26	97.25
Number of cations on the basis of 13O										
Si	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Mn	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	16.07	16.21	16.39	16.18	16.20	16.26	16.21	16.01	16.23	16.23
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	1.01	1.10	0.91	0.91	1.03	1.14	0.95	1.12	1.07	0.87
Cl	0.21	0.19	0.21	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	0.18
S	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
OH	1.28	1.24	1.33	1.32	1.27	1.22	1.31	1.23	1.25	1.35

ادامه جدول ۲. نتایج تجزیه ریز کاوا الکترونی از ترکیب آپاتیت‌ها در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران

Table 2 (Continued). EPMA results from apatites composition at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district

Apatite-3 (Qeynarjeh)										
Point no.	P3-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	P3-6	P3-7	P3-8	P3-9	P3-10
Major oxides (wt.%)										
FeO	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.01	bdl	bdl
Cr ₂ O ₃	bdl	0.01	bdl	bdl	0.01	bdl	0.01	bdl	0.01	bdl
Na ₂ O	0.01	bdl	bdl	0.05	0.03	0.05	bdl	0.07	bdl	bdl
P ₂ O ₅	41.51	41.63	41.78	41.32	41.25	41.62	41.68	41.4	41.44	41.33
SiO ₂	0.18	0.18	0.17	0.05	0.19	0.29	0.40	0.07	0.30	0.17
MgO	0.03	0.02	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl
MnO	0.15	0.13	0.15	0.07	0.13	0.15	0.13	0.11	0.14	0.12
K ₂ O	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
CaO	55.98	55.93	55.91	55.90	55.89	55.97	55.91	55.89	55.53	55.86
F	1.15	1.2	1.47	1.71	1.69	1.13	1.52	1.69	1.23	1.6
Cl	0.87	0.74	0.43	0.32	0.37	0.83	0.34	0.63	0.94	0.57
S	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Total	97.89	97.92	98.04	97.43	97.51	98.11	98.16	97.58	97.85	97.51
Number of cations on the basis of 13O										
Si	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04	0.05	0.01	0.04	0.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	16.09	16.07	15.92	16.16	16.23	16.02	16.05	16.05	16.08	16.21
Na	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	0.72	0.75	0.92	1.06	1.04	0.71	0.94	1.05	0.79	0.99
Cl	0.29	0.24	0.14	0.10	0.12	0.28	0.11	0.21	0.31	0.18
S	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
OH	1.40	1.39	1.33	1.27	1.27	1.41	1.33	1.26	1.38	1.29

bdl: below the respective EPMA detection limit

*Calculated based on 12 oxygen atoms per formula unit

بحث

پتروژنز و خاستگاه تکتونوماگمایی

آنچه از بررسی‌های زمین‌شیمی عناصر اصلی و نمودارهای بهنجارسازی گوشته اولیه مشخص می‌شود، ارتباط دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران با محیط‌های کوه‌زایی و پهنه‌های فرورانش است (شکل‌های ۴ و ۵). طبق بررسی‌ها، غنی‌شدگی LREE و LILE در مقابل تهی‌شدگی نسبی HFSE و HREE در مقادیر بهنجارشده به کندریت و گوشته اولیه از شواهد جایگاه‌های زمین‌ساختی محیط‌های فرورانش بوده که این الگوها با نمودارهای عنکبوتی دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران تا حد زیادی سازگار است (شکل ۵). این ویژگی بارز نواحی کوه‌زایی ناشی از فرورانش بوده که طی پژوهش‌های گسترده‌ای در شمال غرب ایران و به ویژه کمر بند فلز زایی تکاب-انگوران گزارش شده است (Hajialioghli et al., 2011; Jamshidi Badr et al., 2013; Azizi et al., 2021; Tale Fazel et al., 2023).

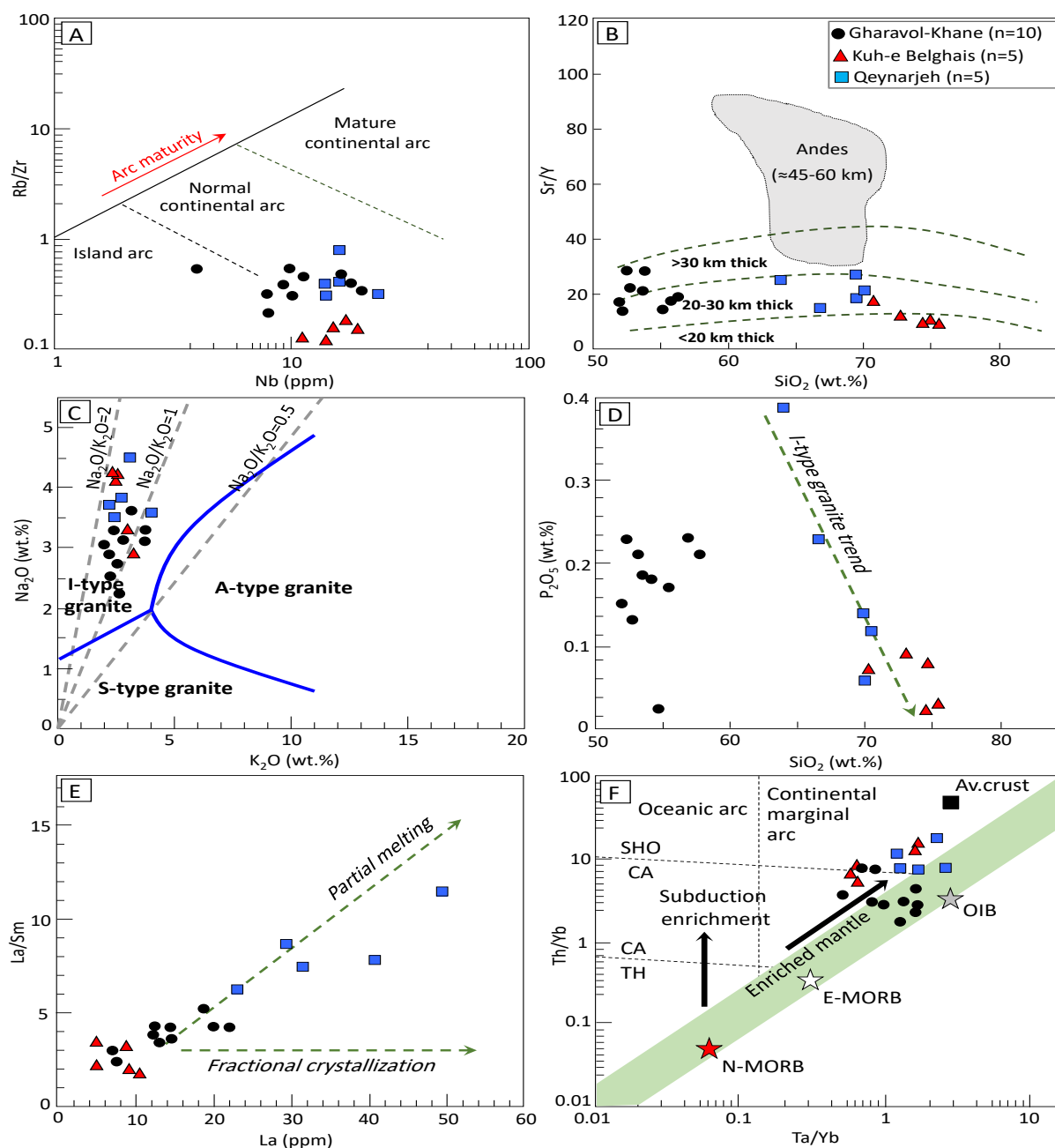
طبق نمودار دوتایی نسبت Rb/Zr در برابر Nb (Brown et al., 1984)، نمونه‌ها در جایگاه کمان قاره‌ای عادی واقع شده‌اند (شکل ۷-۱). از آنجایی که پایداری پلاژیوکلازها و جفت کانی گارنت-آمفیبول تابع عمق جای‌گیری یا تکوین ماگما است (Chiaradia, 2015)، نسبت Sr/Y در زمین‌شیمی سنگ کل می‌تواند برای تخمین ضخامت پوسته استفاده شود. با استفاده از نمودار دوتایی نسبت Sr/Y در مقابل SiO_2 (Chiaradia, 2015)، کوارتز دیوریت فراول‌خانه در عمق بیش از ۳۰ کیلومتر، گرانودیوریت قینرجه بین ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر و توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس در عمق کمتر از ۲۰ کیلومتر شکل گرفته‌اند (شکل ۷-۲). با به کارگیری نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ و رسم آن در نمودار دوتایی Na_2O در مقابل K_2O (Collins et al., 1982; Zhang et al., 2009)، گرانیتوئیدهای نوع I، A و S از یکدیگر قابل تفکیک هستند. بر اساس این نمودار، کلیه نمونه‌ها با نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ بین ۰/۸ تا ۲ در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I جای گرفته‌اند (شکل ۷-۳).

همچنین، پژوهش‌های پیشین (Wu et al., 2003; Li et al., 2008;)

(Zhu et al., 2009) گویای ارتباط ژنتیکی آپاتیت‌ها و شکل‌گیری گرانیتوئیدهای I و S است. بر این مبنا، انحلال آپاتیت در مذاب‌های گرانیتی متاآلمین تا پرآلمین پایین بوده و با افزایش محتوای SiO_2 کاهش می‌یابد. با توجه به ماهیت متاآلمین تا پرآلمین دنباله‌های نفوذی ناحیه مورد بررسی (شکل ۴-۲) و رابطه دوتایی P_2O_5 با SiO_2 (Zhang et al., 2016)، این روند سازگار با روند گرانیتوئیدهای نوع I است (شکل ۷-۲). بر اساس نمودار دوتایی نسبت La/Sm در برابر La (Cocherie, 1986)، همبستگی مثبتی در پی غنی‌شدگی عنصر La در دنباله‌های نفوذی ناحیه مورد بررسی مشاهده می‌شود که گویای شکل‌گیری گرانیتوئیدها ناشی از فرایند ذوب‌بخشی است (شکل ۷-۳). طبق نمودار دوتایی نسبت‌های عناصر کمیاب Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 2008) که در آن سری ماگمایی توده‌های نفوذی و جایگاه تکتونوماگمایی آنها بررسی می‌شود، نمونه‌های سنگی منطقه مورد بررسی با ماهیت کالک‌آلکان تا شوشونیتی در یک محیط گوشته‌ای نسبتاً غنی‌شده متعلق به جایگاه کمان‌های فعال حاشیه قاره است (شکل ۷-۴).

شیمی بلور آپاتیت و پتانسیل کانه‌زایی

آپاتیت با رابطه استوکیومتری $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$ ، یک کانی مهم فرعی در سنگ‌های ماگمایی (Belousova et al., 2002; Bruand et al., 2014)، یک میزبان مهم برای REE و حاوی غلظت نسبتاً بالایی از عناصر Sr، Y، Th و U است (Sha and Chappell, 1999; Prowatke and Klemme, 2006; Xiao et al., 2021). ترکیب شیمیایی آپاتیت به مؤلفه‌های فیزیکو-شیمیایی ماگما نظیر دما، فوگاسیته اکسیژن، محتوای سولفور و ترکیب مذاب بستگی دارد که از این نظر ابزاری مفید در بررسی‌های پتروژنز است (Bruand et al., 2016; Konecke et al., 2017; Li and Costa, 2020). آپاتیت همچنین دارای مقادیر قابل توجهی از عناصر فرار (نظیر F، Cl و S) بوده که عاملی مهم برای بررسی تکوین سامانه‌های گرمایی-ماگمایی است (Parat et al., 2011; Duan and Jiang, 2018; Sun et al., 2019; Duan et al., 2021).



شکل ۷. نمودارهای تحولات زمین‌شیمیایی - تکتونوماگمایی در دنباله‌های نفوذی ناحیه قیرجه-انگوران. A: نمودار دوتایی Rb/Zr در مقابل Nb (Brown et al., 1984), B: نمودار دوتایی Sr/Y در مقابل SiO_2 (Chiaradia, 2015), C: نمودار دوتایی Na_2O در مقابل K_2O (Collins et al., 1982; Zhang et al., 2009) برای تفکیک گرانیتوئیدهای I، A و S، D: نمودار دوتایی P_2O_5 در برابر SiO_2 (Zhang et al., 2016)، E: نمایش رخداد فرایند ذوب‌بخشی در نمودار دوتایی La/Sm در مقابل La (Coherie, 1986) و F: نمودار دوتایی Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 2008) (TH: Tholeiitic، CA: کالک‌آلکال، SHO: شوشونیتی)

Fig. 7. Geochemical-tectonomagmatic evolutions of intrusive suites in the Qeynarjeh-Angouran district. A: Binary diagram of Rb/Zr versus Nb (Brown et al., 1984), B: Binary diagram of Sr/Y versus SiO_2 (Chiaradia, 2015), C: Binary diagram of Na_2O versus K_2O (Collins et al., 1982; Zhang et al., 2009) to discriminated of I-, A-, and S-type granitoids, D: Binary diagram of SiO_2 versus P_2O_5 (Zhang et al., 2016), E: Partial melting process in the La/Sm versus La binary diagram (Coherie, 1986), and F: Binary diagram of Th/Yb versus Ta/Yb (Pearce, 2008) (TH: Tholeiitic, CA: calc-alkaline, SHO: shoshonite)

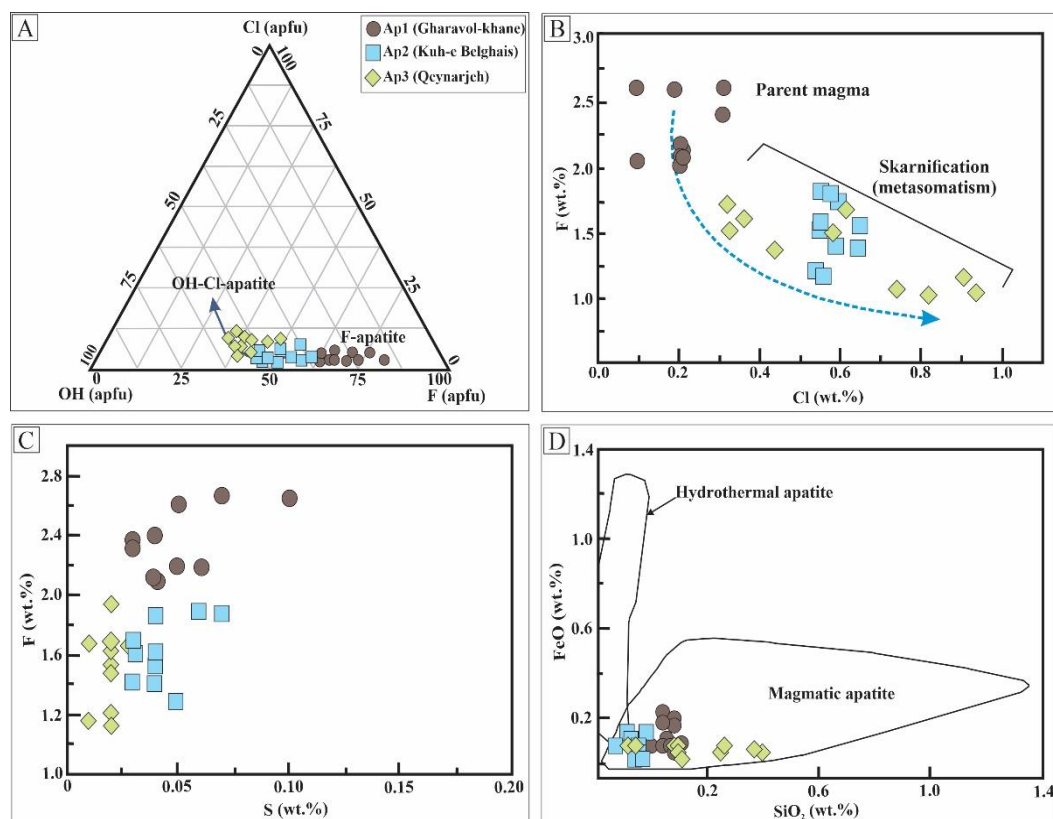
عناصر با ظرفیت بالا مانند REE^{3+} جایگزین Ca^{2+} شده و در نتیجه نسبت Si/S به بالاتر از ۱ (apfu) افزایش می‌یابد. از آنجایی که Si عنصر اصلی در ماگما است، ایزومورف آپاتیت تأثیر محدودی بر محتوای Si دارد. نسبت پایین Si/S نشان‌دهنده محتوای نسبتاً بالای S^{6+} و محیط اکسیدان ماگماست که به ته‌نشست عناصر کانه‌ساز منجر می‌شود (Chen et al., 2023). طبق پژوهش سان و همکاران (Sun et al., 2021) نسبت Si/S یکی از شاخص‌های مطلوب برای تفکیک توده‌های بارور از مولد محسوب می‌شود. بر این مبنا، بیشترین نسبت Si/S (متوسط ۱/۲۶) در ترکیب آپاتیت‌های گرانیت پورفیری کوه بلقیس (Ap2) وجود دارد؛ در حالی که این نسبت در ترکیب آپاتیت‌های کوارتزدیوریت قراول‌خانه (Ap1) و گرانودیوریت قینرجه (Ap3) به ترتیب با متوسط ۰/۲۵ و ۰/۱۹ به دست آمد. بنابراین بر مبنای شواهد شیمی بلور آپاتیت، دنباله‌های نفوذی قراول‌خانه و قینرجه ویژگی‌های یک توده مولد اسکارن را نشان می‌دهند؛ در حالی که توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس پتانسیل فلززایی ناچیزی در مقایسه با آنها دارد. این موضوع نتایج زمین شیمی سنگ کل را نیز تأیید می‌کند.

تحولات ماگمایی-فلززایی و مقایسه با توده‌های مولد اسکارن

ذخایر گرمایی مرتبط با دنباله‌های گرانیتیویدی (نظیر کانسارهای اسکارن و پورفیری)، حاصل وقوع مجموعه‌ای از فرایندها، رویدادها و پالس‌های متوالی سیال حین رخداد یک سامانه ماگمایی یا پس از ماگمایی هستند. محتوای فلزی یک ماگمای گرانیتیویدی همراه با عواملی چون تبلوربخشی، کمپلکس فلز-لیگاند، سازوکار استقرار توده و تحولات تکنونوماگمایی بر تمرکز فلز و تغییرات محتوای عیار-تناژ یک کانسار گرمایی تأثیرگذار هستند. این اثر امکان مهاجرت فلز به فاز سیال از طریق فرایند کمپلکس‌سازی فلز-لیگاند را افزایش داده و در نتیجه تمرکز فلزها به تدریج در کانسنگ افزایش می‌یابد. بر این اساس، طبق پژوهش‌های متعدد پیشین (به طور مثال ماینرت (Meinert, 1995) همواره میان ذخایر اسکارن و توده‌های نفوذی متناظر آن نزدیکی زمین‌شیمیایی معناداری وجود دارد.

طبق نمودار سه‌تایی Cl-OH-F (بر حسب تعداد اتم‌ها در واحد فرمول کانی و احتساب ۱۲ اتم اکسیژن) (جدول ۲)، آپاتیت‌های مورد بررسی در قاعده مثلث و اعضاء انتهایی غنی از F و OH (نوع هیدروکسی-فلوئور آپاتیت) جانمایی شده‌اند (شکل ۸-A). بر این اساس، یک روند غنی‌شدگی در محتوای OH و Cl در Ap2 و Ap3 نسبت به Ap1 در این نمودار مشاهده می‌شود. بر اساس نمودار دوتایی درصد وزنی F در مقابل Cl، منشأ گرفتن Ap1 به طور مستقیم از ماگمای نخستین (وجود بلورهای خوش‌وجه و سوزنی Ap1، شکل ۶-A، B و C) موجب شده تا تمرکز فلوئور (متوسط ۲/۳۹ wt.%) در این نسل از آپاتیت‌ها مقدار اولیه خود را حفظ کرده و نسبت به بلورهای Ap2 و Ap3 (وجود بلورهای بی‌وجه با بافت باقی‌مانده یا Relict، شکل ۶-F و H) از محتوای فلوئور بالاتری برخوردار باشند (شکل ۸-B). علاوه بر این، تغییرات وسیع محتوای کلر در آپاتیت‌های کوه بلقیس (Ap2) احتمالاً به دلیل تبادلات سیال-سنگ وسیع آپاتیت توده نفوذی با سیال گرمایی اسکارن‌ساز صورت گرفته که بافت خورده شده (شکل ۶-F) این آپاتیت‌ها نیز بیانگر این موضوع است. در نمودار دوتایی درصد وزنی F در مقابل S، همبستگی مستقیم بین آپاتیت‌های مختلف مشاهده می‌شود (شکل ۸-C). بر اساس این نمودار، آپاتیت‌های منشأ گرفته از ماگما (Ap1) به تدریج در اثر پدیده متاسوماتیزم و فرایند اسکارنی‌شدن، گوگرد وارد ترکیب کانی‌هایی نظیر پیریت و پیروتیت شده و محتوای گوگرد در Ap2 و Ap3 کاهش یافته است. چنان‌که مشاهده می‌شود، Ap3 به دلیل تشکیل در گرانودیوریت مسبب اسکارن آهن قینرجه (شکل ۲)، از پایین‌ترین محتوای گوگرد (کمتر از ۰/۰۴ wt.%) برخوردار است (جدول ۲ و شکل ۸-C). بر اساس نمودار FeO در مقابل SiO_2 ، آپاتیت‌های ناحیه قینرجه-انگوران منشأ ماگمایی نشان می‌دهند (شکل ۸-D) و از این نظر می‌تواند برای وضعیت باروری یا پتانسیل فلززایی توده‌های نفوذی مورد استفاده قرار گیرد (Ayers and Watson, 1991).

کاتیون‌های Si^{4+} ، P^{5+} و S^{6+} اغلب یک ایزومورف پیوسته در آپاتیت تشکیل می‌دهند. ترکیب $[SiO_4]^{4-}$ عدم تعادل ایجادشده توسط جایگزینی $[PO_4]^{3-}$ توسط $[SO_4]^{2-}$ را جبران می‌کند. هنگامی که $[SO_4]^{2-}$ برای جبران عدم تعادل و تولید بار اضافی منفی کافی نباشد،



شکل ۸. نمودارهای غلظت عناصر کمیاب از انواع آپاتیت در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. A: نمودار سه‌تایی F-Cl-OH (Piccoli and Candela, 1994), B: نمودار دوتایی غلظت F مقابل Cl (Chen et al., 2023), C: نمودار دوتایی غلظت F مقابل S (Ayers and Watson, 1991) و D: نمودار دوتایی غلظت FeO مقابل SiO₂ (Ayers and Watson, 1991)

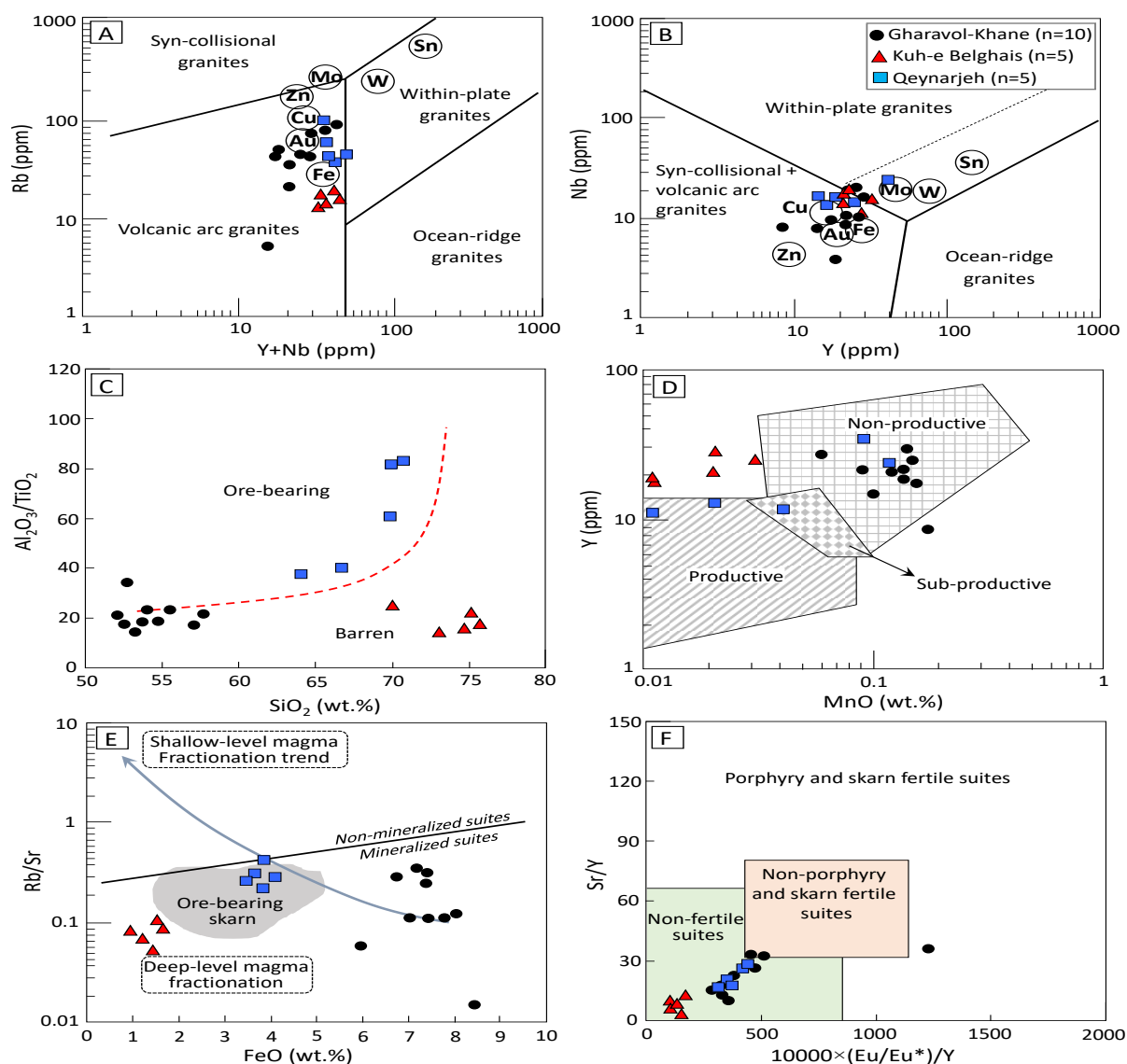
Fig. 8. Diagram of trace elements concentration in various apatites at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district. A: Ternary diagram of F-Cl-OH (Piccoli and Candela, 1994), B: Binary plot of F versus Cl concentration (Chen et al., 2023), C: Binary plot of F versus S concentration (Ayers and Watson, 1991), and D: Binary plot of FeO versus SiO₂ (Ayers and Watson, 1991)

کوارتز دیوریت فراول‌خلنه در مرز توده‌های کلنه‌دار و عقیم جای گرفتند (شکل ۹-C). در نمودار دوتایی Y در مقابل MnO (Baldwin and Pearce, 1982)، گرانیتوئیدها به سه حالت مولد، نیمه مولد و نلبارور رده‌بندی می‌شوند. بر این مبنا، توده گرانودیوریتی قینرجه در بخش گرانیت‌های مولد و کوارتز دیوریت فراول‌خانه اغلب ماهیت نابارور نشان دادند (شکل ۹-D). دلیل پراکندگی بالای نمونه‌ها در این نمودار احتمالاً تحرک منگنز و خروج آن از ترکیب توده‌های سنگی است؛ چراکه عنصر Y به دلیل تحرک پایین از پراکندگی پایینی برخوردار است. برای اطمینان از وضعیت پتانسیل فلز زایی در دنباله‌های نفوذی

پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، گرانیت‌ها را به انواع گرانیت‌های گسترش پوسته اقیانوسی، هم‌زمان با برخورد قاره‌ای، درون صفحه‌ای و کمرنده‌های آتشفشانی محیط فروانش تفکیک کرده‌اند. با استفاده از این تقسیم‌بندی، دنباله‌های نفوذی محدوده مورد بررسی در موقعیت تکتونوماگمایی کمرنده‌های آتشفشانی پهنه فروانش واقع شده‌اند (شکل ۹-A و B). با استفاده از نمودار دوتایی نسبت Al₂O₃/TiO₂ در مقابل SiO₂ (Liu and Peng, 2003)، برای تمایز بین گرانیتوئیدهای کانه‌دار از عقیم، توده گرانودیوریتی قینرجه در بخش کانه‌دار، واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس ماهیت عقیم و

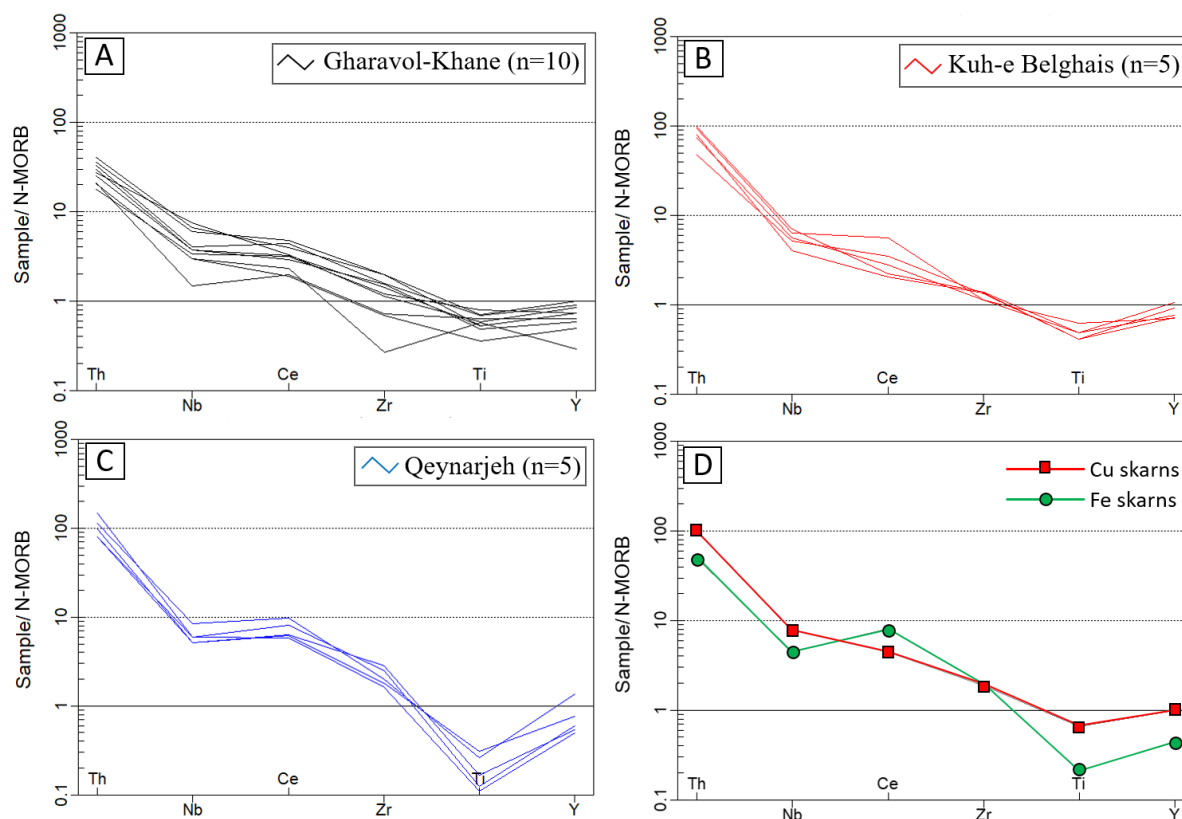
۶/۴ و ۱۱۷/۷) و بیشترین آن در کوارتز دیوریت قراول خانه (به ترتیب متوسط ۱۶/۸ و ۴۴۶/۱) ثبت شده است. توده گرانودیوریتی قینرجه نیز با نسبت Sr/Y (متوسط ۱۲/۰) و نسبت $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ (متوسط ۳۴۴/۶۱) از این نظر بین توده‌های قبلی قرار می‌گیرد. بر این مبنا، کلیه توده‌های مورد بررسی شواهد دنباله‌های نفوذی غیرمولد اسکارن-پورفیری را داشته (شکل ۹-F)؛ هرچند توده‌های کوارتز دیوریت قراول خانه و قینرجه پتانسیل کانه‌زایی بیشتری نشان می‌دهند. یکی از روش‌های مفید برای دستیابی به ماهیت زمین‌شیمیایی-کانی‌سازی توده‌های گرانیتیوئیدی کمریندهای فلززایی، استفاده از الگوی بهنجار سازی عناصر کمیاب در توده‌های مولد اسکارن و مقایسه آن با روند زمین‌شیمیایی عناصر در نمونه‌های مورد بررسی است. به این منظور، بر مبنای زمین‌شیمی سنگ کل از الگوی عناصر کمیاب (شامل عناصر Y, Ti, Zr, Ce, Nb, Th) بهنجار شده با ترکیب بازالت‌های پشته میان اقیانوسی عادی (N-MORB)، بر مبنای داده‌های پیرس (Pearce, 1996)، برای مقایسه دنباله‌های نفوذی مورد بررسی با الگوی گرانیتیوئیدهای مولد ذخایر اسکارن آهن و مس، بر گرفته از ماینرت (Meinert, 1995) استفاده شده است (شکل ۱۰). بر این اساس، در کلیه توده‌های نفوذی مورد بررسی یک ناهنجاری منفی در عنصر Nb نسبت به عناصر Th و Ce و همچنین، ناهنجاری منفی در عنصر Ti نسبت به عناصر Zr و Y مشاهده شد (شکل ۱۰). طبق این نمودارها، توده کوارتز دیوریتی قراول خانه و توده گرانودیوریتی قینرجه بیشترین شباهت را با الگوی بهنجار شده گرانیتیوئیدهای مولد ذخایر اسکارن آهن نشان می‌دهند (شکل ۱۰-A و C). در مقابل، واحد گرانیت پورفیری کوه بلقیس با تهی‌شدگی کمتر در جایگاه عناصر Nb و Ti در مقابل تهی‌شدگی بیشتر در جایگاه عنصر Ce تا حدودی بازگو کننده رفتار زمین‌شیمیایی گرانیتیوئیدهای مولد ذخایر اسکارن مس است (شکل ۱۰-B و D). با این وجود، نمودارهای زمین‌شیمی سنگ کل و شیمی کانی آپاتیت نشان‌دهنده ناباروری آهن در توده گرانیت پورفیری منطقه کوه بلقیس است که استفاده از شواهد نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}Sr/^{86}Sr$ و $^{146}Nd/^{144}Nd$ سنگ کل برای اثبات این موضوع پیشنهاد می‌شود.

منطقه مورد بررسی، از نسبت‌های عنصری که کمترین تحرک شیمیایی در محیط را دارند (نظیر عناصر کمیاب و کمیاب خاکی) استفاده شده که در ادامه اشاره خواهد شد. یکی از کنترل‌کننده‌های مهم فلززایی در توده‌های ماگمایی، عمق جای‌گیری و فرایندهای تفریق ماگمایی در سطوح کم عمق یا عمیق پوسته است (Chelle-Michou and Chiaradia, 2017). تحول دنباله‌های نفوذی عقیق اغلب تحت‌تأثیر فرایندهای AFC در عمق کم صورت می‌گیرد (Nevolko et al., 2022). در نمودار نسبت Rb/Sr در مقابل FeO (Blevin and Chappell, 1992)، دنباله‌های نفوذی کم تفریق‌یافته در محیط‌های عمیق همبستگی مثبت میان نسبت Rb/Sr با مقادیر FeO نشان می‌دهند (شکل ۹-E). در مقابل، دنباله‌های نفوذی گرانیتی با تفریق متوسط تا زیاد در محیط‌های کم عمق همبستگی منفی قوی میان نسبت Rb/Sr و محتوای FeO دارند. آستانه بحرانی مقدار سنگ کل نسبت Rb/Sr کمتر از ۰/۴ با محتوای FeO حدود ۴ درصد وزنی، مرز بین دنباله‌های نفوذی اسکارن-پورفیری کانه‌ساز و غیر کانه‌ساز را ثبت می‌کند (Svetlitskaya and Nevolko, 2022) (شکل ۹-E). این تفاوت‌ها اهمیت تفریق ماگمایی همراه با محتوای آب ماگما را در ذخایر گرمایی مرتبط با توده‌های نفوذی برجسته می‌کند. بر اساس این نمودار، دنباله‌های نفوذی مورد بررسی در محدوده توده‌های تفریق‌یافته دارای پتانسیل کانی‌سازی قرار می‌گیرند که از این میان، توده گرانودیوریتی قینرجه در محدوده اسکارن‌های کانه‌دار قرار می‌گیرد (شکل ۹-E). مقادیر سنگ کل نسبت‌های Sr/Y و $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ (شکل ۹-F)، به عنوان یک رهیافت زمین‌شیمیایی-اکتشافی مفید برای تعیین محتوای آب و ارزیابی پتانسیل فلززایی ذخایر ماگمایی محسوب می‌شود (Chiaradia et al., 2012; Richards, 2011; Nevolko et al., 2022). بسیاری از پژوهش‌ها، اهمیت فرایندهای سنگ‌شناسی را در شکل‌گیری ماگماهای آبدار، اکسیده، غنی از S و فلز و نسبت بالای Sr/Y را در سامانه‌های اسکارن و پورفیری برجسته کرده‌اند (Chelle-Michou and Chiaradia, 2017). بر این اساس، نسبت‌های Sr/Y و $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ با کمترین مقدار در توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس (به ترتیب متوسط



شکل ۹. نمودارهای تحولات زمین‌شیمیایی و ارزیابی پتانسیل فلزایی در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. A: نمودار دوتایی Rb در مقابل Y+Nb (Pearce et al., 1984)، B: نمودار دوتایی Nb در مقابل Y (Pearce et al., 1984)، C: نمودار دوتایی نسبت Al_2O_3/TiO_2 در مقابل SiO_2 (Liu and Peng, 2003)، D: تعیین مولد تا غیرمولد بودن دنباله‌های نفوذی منطقه در نمودار دوتایی Y در مقابل MnO (Baldwin and Pearce, 1982)، E: نمودار دوتایی Rb/Sr در مقابل FeO (Blevin and Chappell, 1992) که رابطه بین درجه تفریق و باروری توده‌های پورفیری-اسکارن را نمایش می‌دهد (Svetlitskaya and Nevolko, 2022)، و F: بررسی شاخص زمین‌شیمی سنگ‌کل برای تعیین باروری یا عقیم بودن دنباله‌های نفوذی توسط نمودار دوتایی Sr/Y در مقابل $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ (Svetlitskaya and Nevolko, 2022)

Fig. 9. Diagrams of geochemical evolutions and evaluation of metallogenic potential at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district. A: Binary diagram of Rb versus Y+Nb (Pearce et al., 1984), B: Binary diagram of Nb versus Y (Pearce et al., 1984), C: Binary plot of Al_2O_3/TiO_2 versus SiO_2 (Liu and Peng, 2003), D: Determination of productive to non-productive of intrusive suites in binary plot of Y versus MnO (Baldwin and Pearce, 1982), E: Binary diagram of Rb/Sr versus FeO (Blevin and Chappell, 1992) highlighting the relationships between the degree of fractionation and the porphyry-skarn productivity of the granitoids (Svetlitskaya and Nevolko, 2022), and F: Whole-rock geochemical indicators of magma fertility by binary plot of Sr/Y versus $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ (Svetlitskaya and Nevolko, 2022)



شکل ۱۰. نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران و مقایسه آن با گرانیتوئیدهای مولد ذخایر اسکارن آهن و مس در دنیا. A, B و C: الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده با بازالت‌های پشته میان اقیانوسی عادی (N-MORB)، بر مبنای داده‌های پیرس (Pearce, 1996) و D: الگوی کلی از عناصر کمیاب در گرانیتوئیدهای مرتبط با ذخایر اسکارن آهن و مس، داده‌ها از ماینرت (Meinert, 1995)

Fig. 10. Spidergram of trace elements at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district and comparing it with the granitoids causative iron and copper skarn deposits in the world. A, B, C: Trace elements pattern of normal mid-ocean ridge basalts (N-MORB), data after Pearce (Pearce, 1996), and D: Trace elements pattern of granitoids causative iron and copper skarn deposits, data from Meinert (Meinert, 1995)

نتیجه‌گیری

بالای LILE و کاهش انحلال‌پذیری HFSE در سیالات آبگین مرتبط با مذاب سیلیکاته رخ داده است. کانی کمیاب آپاتیت با منشأ ماگمایی در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران شناسایی شده که همگی از نوع هیدروکسی-فلوئور آپاتیت هستند. بر این اساس، آپاتیت‌های قراول‌خانه با تمرکز بالای فلوئور به طور مستقیم از ماگمای نخستین و آپاتیت‌های کوه بلقیس با تمرکز بالای کلر در نتیجه تبادلات وسیع سیال-سنگ میان توده گرانیت پورفیری و سیال گرمایی شکل گرفته‌اند. طبق الگوی عناصر کمیاب (شامل عناصر Th, Nb, Ce, Zr, Ti و Y) بهنجار شده با ترکیب بازالت‌های پشته میان اقیانوسی عادی دنباله‌های

دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران با سن تریاس میانی-ژوراسیک بالایی متشکل از سه واحد کوارتز دیوریت قراول‌خانه، گرانیت پورفیری کوه بلقیس و گرنودیوریت قینرجه در سنگ بستر دگرگونی نوپروتروژوئیک-پالئوزوئیک (سازندهای کهر و جانگوتاران) نفوذ کرده‌اند. این گرانیتوئیدها با ماهیت کالک آلکالن و متاآلمین در یک محیط فرورانش متناظر با جایگاه گرانیت‌های اکسیدان نوع I شکل گرفته‌اند. در ترکیب این توده‌ها یک غنی‌شدگی نسبی در LILE نسبت به HFSE مشاهده شده که طی ذوب‌بخشی به دلیل پتانسیل یونی

نفوذی قراول‌خانه و قینرجه بیشترین شباهت را با الگوی بهنجار شده گرانیتوئیدهای مولد ذخایر اسکارن آهن دارند. شواهد این پژوهش نشان می‌دهد طبق نسبت‌های Sr/Y و $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ سنگ کل، کوآرتز دیوریت قراول‌خانه و گرانودیوریت قینرجه پتانسیل کله‌زایی آهن بالاتری نسبت به توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس نشان می‌دهند. استفاده از الگوی پتروژنز-فلززایی در گرانیتوئیدها روش مفیدی برای شناسایی محیط‌های اسکارنی و پیشبرد اهداف اکتشافی در سایر نواحی مشابه خواهد داشت.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از کمک‌های مالی دانشگاه بوعلی سینا و نظرات مفید داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی کمال تشکر را دارند.

1. Intrusive suites
2. Electron Micro probe Analyzer (EPMA)
3. German Research Centre for Geosciences (GFZ)
4. Total Rare Earth Elements (ΣREE)
5. Light Rare Earth Elements to Heavy Rare Earth Elements ratio (LREE/HREE)
6. Large-Ion Lithophile Elements (LILEs)
7. High Field Strength Elements (HFSEs)
8. Partial melting
9. Atoms per formula unit (apfu)
10. Normal Mid-Ocean Ridge Basalts (NMORB)

References

- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 586 pp. (in Persian)
- Aliyari, F., Demir, Y. and Bouzari, F., 2020. Geology, geochemistry, fluid inclusion and genesis of the Guijeh Qaleh IOA-type iron ore deposit, north of Takab district, Northwestern Iran. *Ore Geology Reviews*, 127: 103835. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103835>
- Ayers, J.C. and Watson, E.B., 1991. Apatite chemistry of Late Triassic granitic rocks from Yidun Terrane: Implications for petrogenesis and mineralization. *Mineralogy and Petrology*, 117: 745–759. <https://doi.org/10.1007/s00710-023-00836-z>
- Azizi, H., Daneshvar, N., Mohammadi, A., Asahara, Y., Whattam, S.A., Tsuboi, M. and Minami, M., 2021. Early Miocene Post-collision Andesite in the Takab Area, NW Iran. *Journal of Petrology*, 62(7). <https://doi.org/10.1093/petrology/egab022>
- Babakhani, A.R. and Ghalamghash, J., 2001. Geological map of Takht-e Soleiman, scale 1:100000. Geological survey of Iran.
- Baldwin, J.A. and Pearce, J.A., 1982. Discrimination of productive and non-productive porphyritic intrusions in the Chilean Andes. *Economic Geology*, 77(3): 664–674. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.3.664>
- Bellieni, G., Visentin, E.J. and Zanettin, B., 1996. Use of chemical TAS diagram (total alkali silica) for classification of plutonic rocks. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, UK, Report 157, 35 pp. Retrieved August 21, 2023 from <http://hdl.handle.net/11577/180716>
- Belousova, E.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. and Fisher, N.I., 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, 76(1): 45–69. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00204-2)
- Blevin, P.L. and Chappell, B.W., 1992. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 83 (1–2): 305–316. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007987>
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. Elsevier, 2: 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 413–426. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0413>
- Bruand, E., Storey, C. and Fowler, M., 2014. Accessory mineral chemistry of high Ba–Sr granites from Northern Scotland: 18 C. LI AND J. YAN Constraints on petrogenesis and records of whole-rock signature. *Journal of Petrology*, 55(8): 1619–1651. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu037>
- Bruand, E., Storey, C. and Fowler, M., 2016. An apatite for progress: inclusions in zircon and titanite constrain petrogenesis and provenance. *Geology*, 44(2): 91–94. <https://doi.org/10.1130/G37301.1>
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489–500. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Chelle-Michou, C. and Chiaradia, M., 2017. Amphibole and apatite insights into the evolution and mass balance of Cl and S in magmas associated with porphyry copper deposits. *Contrib Mineral Petrol*, 172(11–12): 105. <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1417-2>
- Chen, Y.H., Lan, T.G., Gao, W., Shu, L., Tang, Y.W. and Hu, H.L., 2023. In-situ texture and geochemistry of apatite from the Jinling and Zhangjiawa iron skarn deposits, eastern North China Craton: Implications for ore-forming processes and formation of high-grade ores. *Ore Geology Reviews*, 158: 105483. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105483>
- Chiaradia, M., 2015. Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: an earth scale perspective. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/srep08115>
- Chiaradia, M., Ulianov, A., Kouzmanov, K. and Beate, B., 2012. Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas?. *Scientific Reports* 2, pp. 685. <https://doi.org/10.1038/srep00685>
- Cline, J. and Bodnar, R., 1991. Can economic porphyry mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? *Journal of Geophysical Research*, 96(B5): 8113–8126. <https://doi.org/10.1029/91JB00053>
- Cocherie, A., 1986. Systematic use of trace element distribution patterns in log-log diagrams for plutonic suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(11): 2517–2522. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90034-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90034-7)
- Collins, W.J., Beams, S.D. and White, A.J.R., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular

- reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189–200.
<https://doi.org/10.1007/BF00374895>
- Duan, D.F. and Jiang, S.Y., 2018. Using apatite to discriminate synchronous ore-associated and barren granitoid rocks: a case study from the Edong metallogenic district, South China. *Lithos*, 310–311: 369–380.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.04.022>
- Duan, D.F., Jiang, S.Y., Tang, Y.J., Wu, Y., Zhou, B. and Zhu, J., 2021. Chlorine and sulfur evolution in magmatic rocks: a record from amphibole and apatite in the Tonglushan Cu–Fe (Au) skarn deposit in Hubei Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 137: 104312.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104312>
- Fallah Karimi, 2013. Mineralogy and geochemistry of Qeynarjeh iron index (NE of Takab, West-Azarbaidjan province). M.Sc. Thesis, Urmia University, Urmia, Iran, 133 pp. (in Persian with English abstract)
- Groves, D.I., Santosh, M., Müller, D., Zhang, L., Deng, J., Yang, L.-Q. and Wang, Q.-F., 2022. Mineral systems: Their advantages in terms of developing holistic genetic models and for target generation in global mineral exploration. *Geosystems and Geoenvironment*, 1(1): 100001.
<https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2021.09.001>
- Hafez, M., Abedini, A., Aliyari, F. and Calagari, A.A., 2019. Mineral chemistry of magnetite and fluid inclusions studies in the Kuh-Baba iron deposit, south of Hashtroud. NW Iran. *Iran. Journal of Crystallography and Mineralogy*, 27(4): 755–766. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.29252/ijcm.27.4.755>
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Jahangiri, A., Oberhänsli, R., Mocek, B. and Altenberger, U.W.E., 2011. Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran. *Geological Magazine*, 148(2): 250–268.
<https://doi.org/10.1017/S0016756810000683>
- Honarmand, M., Wenjiao, X., Nabantian, G., Blades, M.L., dos Santos, M.C., Collins, A.S. and Ao, S., 2018. Zircon U–Pb–Hf isotopes, bulk-rock geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopes from late Neoproterozoic basement in the Mahnesan area, NW Iran: Implications for Ediacaran active continental margin along the northern Gondwana and constraints on the late Oligocene crustal anatexis. *Gondwana Research*, 57: 48–76.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.12.009>
- Irvine, T.N.J. and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5): 523–548.
<https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jamshidi Badr, M., Collins, A.S., Masoudi, F., Cox, G. and Mohajjel, M., 2013. The U–Pb age, geochemistry and tectonic significance of granitoids in the Soursat Complex, Northwest Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22(1): 1–31.
<https://doi.org/10.3906/yer-1001-37>
- Karimpour, M.H., Shirdashtzadeh, N. and Sadeghi, M., 2021. Granitoids of Sanandaj-Sirjan Zone that are concurrent with Cimmerian Orogeny (178–160 Ma) belong to ilmenite series (S-type): investigation of reason for lacking the porphyry tin mineralization. *Journal of Economic Geology*, 13(1): 1–28 (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v13i1.1011>
- Konecke, B.A., Fiege, A., Simon, A.C., Parat, F. and Stechern, A., 2017. Coverability of S^{6+} , S^{4+} , and S^{2-} in apatite as a function of oxidation state: implications for a new oxybarometer. *American Mineralogist*, 102(3): 548–557.
<https://doi.org/10.22067/econg.v13i1.1011>
- Li, W.R. and Costa, F., 2020. A thermodynamic model for F–Cl–OH partitioning between silicate melts and apatite including non-ideal mixing with application to constraining melt volatile budgets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 269: 203–222.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.035>
- Li, J.W., Zhao, X.F., Zhou, M.F., Vasconcelos, P., Ma, C.Q., Deng, X.D., Souza, Z.S.D., Zhao, Y.X. and Wu, G., 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu–Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: geochronological, geochemical, and Sr–Nd–Hf isotopic constraints. *Mineralium Deposita*, 43(3): 315–336.
<https://doi.org/10.1007/s00126-007-0161-3>
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., Günther, D., Xu, J., Gao, C.G. and Chen, H., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. and Peng, M.S., 2003. Advances in the researches on structural substitution of apatite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 413–415. (in Chinese with English abstract) Retrieved August 21, 2023 from <https://www.yskw.ac.cn/yskwxyz/article/pdf/20030478>

- Maanijou, M. and Salemi, R., 2013. Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran. *Jornal of Economic Geology*, 6(2): 355–374. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v6i2.22650>
- Mao, M., Rukhlov, A.S., Rowins, S.M., Spence, J. and Coogan, L.A., 2016. Apatite Trace Element Compositions: A Robust New Tool for Mineral Exploration. *Economic Geology*, 111(5): 1187–1222.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1187>
- Meinert, L.D., 1995. Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits-Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. In: J.F.H.Thompson (Editor), *Magma, fluids, and ore deposits*. Mineral Association of Canada Short Course Series, 23: 401–418. Retrieved August 21, 2023 from
<https://www.researchgate.net/publication/262451126-Meinert-LD-1995>
- Miller, J.S. and Wooden, J.L., 2004. Residence, resorption and recycling of zircons in Devils Kitchen Rhyolite, Coso volcanic field, California. *Journal of Petrology*, 45(11): 2155–2170.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egh051>
- Nevolko, P.A., Svetlitskaya, T.V., Nguyen, T.H., Pham, T.D., Fominykh, P.A., Tran, T.H., Tran, T.A. and Shelepaev, R.A., 2022. Genesis of the Thien Ke tungsten deposit, Northeast Vietnam: Evidence from mineral composition, fluid inclusions, S-O isotope systematics and U-Pb zircon ages. *Ore Geology Reviews*, 143: 104791.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104791>
- Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J. and Kouhestani, H., 2021. Geochemistry and petrogenesis of the Alamkandi granitoid body and Fe skarn (west of Mahneshan, the Zanjan province). *Journal of Economic Geology*, 13(3): 507–536.
<https://doi.org/10.22067/econg.v13i3.86285>
- Parat, F., Holtz, F. and Streck, M.J., 2011. Sulfur-bearing magmatic accessory minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73(1): 285–314. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.2138/rmg.2011.73.10>
- Pearce, J., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams, Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, 12: 79–113. Retrieved August 21, 2023 from
https://www.researchgate.net/publication/238170061_A_User%27s_Guide_to_Basalt_Discrimination_Diagrams
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1–4): 14–48.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- 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>
- Piccoli, P. and Candela, P., 1994. Apatite in felsic rocks: A model for the estimation of initial halogen concentrations in the Bishop Tuff (Long Valley) and Tuolumne intrusive suite (Sierra Nevada Batholith) magmas. *American Journal of Science*, 294(1): 92–135.
<https://doi.org/10.2475/ajs.294.1.92>
- Prowatke, S. and Klemme, S., 2006. Trace element partitioning between apatite and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4513–4527.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.162>
- Richards, J.P., 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: just add water. *Economic Geology*, 106(7): 1075–1081.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.106.7.1075>
- Richards, J.P. and Kerrich, R., 2007. Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537–576.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Rollinson, H., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Routledge, London, 384 pp.
<https://doi.org/10.4324/9781315845548>
- Sahandi, M.R. and Soheili, M., 2014. Geological map of Iran, scale 1:1000000. Geological Survey of Iran.
- Sepahi, A.A., Ghoreishvandi, H., Maanijou, M., Maruoka, T. and Vahidpour, H., 2020. Geochemical description and sulfur isotope data for Shahrak intrusive body and related Fe-mineralization (East Takab), Northwest Iran. *Island Arc*, 29(1): e12367.
<https://doi.org/10.1111/iar.12367>
- Sha, L.K. and Chappell, B.W., 1999. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22): 3861–3881.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00210-0)
- Soloviev, S.G., 2014. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kumbel oxidized W–Cu–Mo skarn and Au–W stockwork deposit in Kyrgyzstan, Tien Shan. *Mineralium Deposita* 50(2): 187–220. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0531-6>

- 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>
- Sun, S.J., Yang, X.Y., Wang, G.J., Sun, W.D., Li, C.Y. and Ding, X., 2019. In situ elemental and Sr-O isotopic studies on apatite from the Xu-Huai intrusion at the southern margin of the North China Craton: implications for petrogenesis and metallogeny. *Chemical Geology*, 510: 200–214.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.02.010>
- Sun, J.F., Yang, J.H., Zhang, J.H., Yang, Y.H. and Zhu, Y.S., 2021. Apatite geochemical and Sr–Nd isotopic insights into granitoid petrogenesis. *Chemical Geology*, 566: 120104.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120104>
- Svetlitskaya, T.V. and Nevolko, P.A., 2022. New whole-rock skarn and porphyry fertility indicators: Insights from Cu–Au–Fe skarn and Cu–Mo–Au porphyry deposits in Eastern Transbaikalia, Russia. *Ore Geology Reviews*, Volume 149: 105108.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105108>
- Tale Fazel, E., Pašava, J., Wilke, F.D., Oroji, A. and Andronikova, I., 2023. Source of gold and ore-forming processes in the Zarshuran gold deposit, NW Iran: Insights from in situ elemental and sulfur isotopic compositions of pyrite, fluid inclusions, and O–H isotopes. *Ore Geology Reviews*, 156: 105382.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105382>
- Tatsumi, Y., Hamilton, D.L. and Nesbitt, R.W., 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and the origin of arc magmas: evidence from high pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1–4): 293–309.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90049-1)
- Wang, R., Richards, J.P., Hou, Z., Yang, Z. and DuFrane, S.A., 2014. Increased magmatic water content—the key to Oligo-Miocene porphyry Cu–Mo ± Au formation in the Eastern Gangdese belt, Tibet. *Economic Geology*, 109(5): 1315–1339.
<https://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1315>
- Warr, L.N., 1994. IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine*, 85(3): 291–320.
<https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Springer, Dordrecht, 466 pp.
<https://doi.org/10.1007/978-94-010-9388-0>
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilder, S.A., Lo, C.H., Lin, Q., Ge, W.C. and Sun, D.Y., 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China. *Geochronology and petrogenesis*. *Lithos* 66(3–4): 241–273.
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0)
- Xiao, B., Pan, Y.M., Song, H., Song, W.L., Zhang, Y. and Chen, H.Y., 2021. Hydrothermal alteration processes of fluorapatite and implications for REE remobilization and mineralization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176(10): 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s00410-021-01849-7>
- Zhang, Y., Sun, J.G., Xing, S.W., Zhao, K.Q., Ma, Y.B., Zhang, Z.J. and Wang, Y., 2016. Ore-forming granites from Jurassic porphyry Mo deposits, east-central Jilin Province, China: geochemistry, geochronology, and petrogenesis. *International Geology Review*, 58(9): 1–17.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1150213>
- Zhang, J., Wang, R. and Hong, J., 2022. Amphibole fractionation and its potential redox effect on arc crust: Evidence from the Kohistan arc cumulates. *American Mineralogist*, 107(9): 1779–1788.
<https://doi.org/10.2138/am-2022-8141>
- Zhang, Q., Yin, X.M., Yin, Y., Jin, W.J., Wang, Y. L. and Zhao, Y.Q., 2009. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan types granite in west Qinling. *Acta Petrolei Sinica* 25: 3103–3122. Retrieved August 21, 2023 from <https://engine.scichina.com/doi/pdf/0FB8129277D0410AA995F96112F4D30E?ipInfo=5.117.210.18>
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Wang, L.Q., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., Zhou, C.Y. and Yang, Y.H., 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Zayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes. *Science in China Series D: Earth Sciences* 52: 1223–1239.
<https://doi.org/10.1007/s11430-009-0132-x>
- Zhu, J., Richards, J., Rees, C., Creaser, R., Dufrane, S.A., Locock, A., Petrus, J. and Lang, J., 2018. Elevated Magmatic Sulfur and Chlorine Contents in Ore-Forming Magmas at the Red Chris Porphyry Cu–Au Deposit, Northern British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 113 (5): 1047–1075.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4581>



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2024.1102



Analytical and Comparative Analysis of Copper Industry Development Programs in Iran

Adel Rouhi Jouybari¹ , Seyed Mohammad Esmail Jalali^{2*}

¹ Ph.D. student, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Kharazmi International Campus, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Professor, Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 09 April 2024
Revised: 19 August 2024
Accepted: 20 August 2024

Keywords

development plans
mining industry
copper industry
strategic document

*Corresponding author

Seyed Mohammad Esmail Jalali
✉ jalalisme@shahroodut.ac.ir

ABSTRACT

Iran is considered one of the countries with a relative advantage in the field of mining and related industries due to its important mineral resources and reserves. This issue increases the importance and priority of development programs in the mining and mineral industries sector. Copper, after steel, ranks second among the major metals in terms of value-added production in the world. Iran, with a reserve of about 34 million tons of copper, owns 4% of the world's copper reserves. This article examines the analytical and comparative analysis of copper industry development programs in Iran and India. Although both countries have started their own development programs in the copper industry almost simultaneously, India was ranked among the top economic powers in Asia in 2018 compared to Iran. On the other hand, with some economic growth indicators surpassing China, some analysts believe that this trend may continue and India may achieve growth similar to China and even replace it. On this basis, India's strategic plans in the field of copper can greatly help in formulating strategic plans in Iran's copper industry. According to studies conducted in Iran, the most important challenges in the copper industry include increasing the amount of government salaries and export duties, non-entry of mining and industrial machinery, round-the-clock laws, and fluctuations in exchange rates and inflation. This research has examined the damage and analysis of the strengths and weaknesses of Iran's copper industry program, reviewed the current situation and copper industry development programs, compared it with India, and addressed the challenges ahead. Finally, solutions have been proposed for the development of this important industry.

How to cite this article

Rouhi Jouybari, A. and Jalali, S.M.E., 2024. Analytical and Comparative Analysis of Copper Industry Development Programs in Iran. Journal of Economic Geology, 16(3): 57–77. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1102>



©2024 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

Iran is located on one of the two copper belts in the world and is considered one of the areas with the economic potential of copper. Evaluations show that Iran's share of the world's 20 million tons of copper production is less than 1.5%. The share of the industry in Iran's gross domestic product is 7%, of which copper covers 1% of the 7%. In fact, the share of the copper industry in Iran's gross domestic product is 1%, which is relatively low given the volume of copper mineral reserves. Therefore, considering the importance of the copper industry in the country's economy as a productive sector and the increasing demand for this metal in the world, having an appropriate industrial strategy to maximize the use of copper mines and related industries is important and necessary.

One of the ways to develop the country quickly is to focus on the mining industry alongside export development. Industrial development is important for national development programs from various aspects. Employment, poverty alleviation, proper use of skilled labor, improvement of regional and international status of the country, meeting internal needs, and enhancing national identity are among the aspects of development that have been tied to industrial development. In this regard, according to the emphasis and statements of the upper-level documents, especially the five-year development plans in the last decade, the subject of drafting an industrial development strategy has been one of the important demands of the government and the relevant ministry so that with the determination of industrial policies at horizontal and vertical levels, the necessary institutional infrastructure for better decision-making by private sector activists can be provided in a more reassuring environment by the government.

Methods

The most important challenges in the copper industry in Iran include problems related to sanctions and the resulting lack of access to modern technologies, lack of support for small and medium-sized businesses, price differences in the commodity exchange and free market and their impact on the trade market and copper products, and the level of access of consumers to the market. The challenges of

downstream industries are among the main challenges of this market. Sanctions have caused severe fluctuations in exchange rates and have affected the government's economic and trade policies, ultimately leading to increased production costs, market fluctuations, declining exports, loss of some export markets, rent-seeking, thriving intermediaries, and numerous problems in the field of financing and capital circulation of mining units and mining industries in the country.

In addition to sanctions, restrictions and obstacles resulting from the government's economic and trade policies such as exchange policies, market intervention, and mandatory pricing of mineral and metal products by the Market Regulation Headquarters, prevention of exports and providing the grounds for rent and intermediation have become a major internal obstacle to production in the country. In the conditions of the domestic market recession, most mineral and mining products have experienced a decline in exports, and among the country's economic activists, it is known as self-sanctioning. One of the most important internal obstacles in the mining and mining industries sector is ambiguity in calculating the amount of government salaries for mines, non-return of government salary revenues for expenses in the mining sector, serious conflicts between mining activities, the environment and natural resources, the intervention of the Market Regulation Headquarters in pricing mineral and metal products, and creating export barriers, inaction in policymaking for mines and mining industries on the verge of bankruptcy such as the cement industry and lack of necessary credits for capital facilities in the circulation of mining units and mining industries.

Another important issue that can be investigated in this area is the creation of mining clusters. There are many small copper mines scattered throughout the country with small reserves that can have a significant impact on the country's production with proper measures. In fact, the role of small mines in domestic production and employment is not prominent and they are not valued. As a support, small mines that are reasonably transportable and have a justifiable relationship between them can be consolidated into a consortium, and each of these dependent mines can be involved in the reserves and grade of this consortium, and then the government can also support them by providing facilities.

Another effect of sanctions is the update of equipment, which has also affected the copper sector. In Iran, since most mining and industrial machinery is imported, production costs are even higher than countries that own these technologies, even under normal conditions. Now, despite the existing erosion sanctions, the entry of non-standard and inappropriate goods through the black market with a delay and at a price several times higher than the real price, plus the inability to export quality products made domestically to target markets and the obligation to stop production or sale of the produced product to the market with low or sometimes negative profit, are all part of the problems of production units. Factors such as US sanctions, severe fluctuations in exchange rates, and a set of economic and trade policies of the government have led to increased production costs, market fluctuations, declining exports, loss of some export markets, rent-seeking, thriving intermediaries, and numerous problems in the field of financing and capital circulation of mining units and mining industries in the country.

In the past, the most important problems in the copper industry in India were mainly related to the shortage and lack of access to mineral reserves and their environmental consequences. This section examines the major problems of the copper industry as well as the causes and factors of change in India's copper industry strategic document.

The analysis shows that there is a huge difference between the processing plant capacity and the copper mine capacity in India. While India's copper processing plants have a capacity of about one million tons per year, only 35,000 tons of refined copper can be extracted from the current production of copper ore in India. Copper mining and production in India only meets 4% of the country's demand.

The growth of India's infrastructure is reflected in the growth of copper consumption in the country. The consumption of refined copper has increased at a compound annual growth rate of 2.4% from 2015 to 2019. The need for copper wire in infrastructure and renewable energy projects, an increase in automobile production (which has grown by 3.7%), and an increase in the production of durable consumer goods (refrigerators and gas coolers have increased by 9.6% and 7.0%, respectively) have led to an increase in copper consumption in the 5 years ending in 2019 (Urvisha, 2019).

Results

After examining and discussing the problems and pathologies of the National Copper Industries Company of Iran for the implementation of its programs, it is faced with some ambiguities and questions that will be discussed below, and solutions have been proposed based on a comparison with India.

Iran, like India, faces a shortage of the necessary concentrate and ore to achieve its development goals. There are several solutions to solve these problems. One of the effective ways to supply the necessary concentrate for the project is to expand the existing mines that are currently active and under operation. 10% of the required concentrate for the copper industry in Iran is supplied by companies that operate small mines in the country. These companies, including Chahar Gonbad Kerman, Mesdarakhtegan Takhtagonbad, Rangin Metal Copper, Kian Copper Jozam, Minakan, and Madvar Mining Production, mostly sell their products as feed to the National Copper Industries Company of Iran.

However, there are still many small copper mines in the country that are inactive. With support and capital, these mines can be revitalized and brought back into the production cycle.

Based on the findings of this research, it is essential for the government and decision-makers in this important area to focus on important issues in order to develop and formulate plans for this industry. In addition to reducing the concentration of investment in a few specific provinces, it is necessary to take important measures and solutions to streamline production, create regulations and laws, remove production and investment barriers, and implement operational solutions. The following are some of these measures:

1. Developing and approving a comprehensive plan for nationwide exploration as an upper-level document and the most important pillar of sustainable supply of mineral materials in the shortest possible time.
2. Allocating a significant and specific budget from the profits of IMIDRO and profitable specialized state-owned companies as a percentage of annual profits to exploration activities and obliging the implementation of exploration operations within the framework of the comprehensive plan for nationwide exploration.

3. Prohibiting the government from engaging in business activities and obliging the transfer of mining management and production units to the qualified private sector.

4. Amending relevant laws and regulations, including; Resolving the problem of blocked areas by government agencies, Amending customs laws for the import of machinery and other mining areas and Amending export laws.

Discussions

Iran and India are among the first growing countries with development plans. In 2018, India was ranked among the top economic powers in Asia compared to Iran. On the other hand, with some economic growth indicators surpassing China, some analysts believe that this trend may continue and India may achieve growth similar to China and even replace it. Therefore, India's strategic plans in the field of copper can greatly help in formulating strategic plans in the copper industry of Iran. Exploration operations in a large part of the country's area have not yet been completed, and there is a need for planning and expanding executive activities in this area. In the mining sector, there is currently no desirable situation in the country, and the production of basic metals such as copper and steel is between 1 to 2 percent of the mineral reserves, which is less than global standards. In general, as mentioned, the existing problems in the country's development plans, especially in mining plans, can be divided into problems in program goals, planning system, approval process of development plans, implementation process of development plans, and how to monitor and evaluate programs. Studies conducted in the copper industry section also show that the capacity of cathode production factories is

not consistent with the amount of mineral extraction, and the extracted mineral material provides almost half of the capacity of the factories. It is also necessary to plan the objectives of the programs for the production of cathode copper based on the existing reserves and the country's potential in supplying concentrate and concentrate.

In addition, the country's internal needs and its potential for exports due to sanctions should be considered in these goals. It seems that solving problems such as easier import of mining machinery, given the country's disorganized transportation fleet, reducing government salaries, freeing up areas, tax exemptions for exploration activities, lack of pricing for copper exports or sales on the commodity exchange, removing and amending cumbersome laws, and developing diplomatic relations can make the future of the copper industry in Iran clearer. Another important issue in this area, compared to India in recent years, has been the problem of feed and concentrate shortages. India's strategy for expanding existing mines, reopening abandoned mines, and exploring new and undeveloped mines has been a factor in growth and development in developing countries such as India. In the eighth development plan In 1992, India seriously invested in private and foreign investment in the copper industry, while in Iran, this issue still seems very distant. Another important issue in this area, compared to India in recent years, has been the problem of feed and concentrate shortages. India's strategy for expanding existing mines, reopening abandoned mines, and exploring new and undeveloped mines has been a factor in growth and development in developing countries such as India. In Iran, this industry has not yet had a clear strategy in planning and production, even in state-owned mines.



واکاوی تحلیلی و تطبیقی برنامه‌های توسعه صنعت مس در ایران

عادل روحی جویباری^۱، سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*} ^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، پردیس بین‌المللی خوارزمی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران^۲ استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
ایران به دلیل داشتن ذخایر مهم معدنی در حوزه معدن و صنایع وابسته به آن، یکی از کشورهای دارای مزیت نسبی در این حوزه محسوب می‌شود. این موضوع بر اهمیت و اولویت برنامه‌های توسعه در بخش معدن و صنایع معدنی می‌افزاید. بهره‌مندی هرچه بیشتر و بهتر از منابع و ذخایر معدنی یکی از راه‌های افزایش ثروت در جامعه است. مس پس از فولاد، رتبه دوم بین فلزهای اصلی از نظر تولید ارزش افزوده در جهان را داراست. ایران با ذخیره حدود ۳۴ میلیون تن مس، صاحب ۴ درصد از ذخایر مس جهان است. در این پژوهش به بررسی تحلیلی و تطبیقی برنامه‌های توسعه صنعت مس در ایران و هند پرداخته شده است. با وجود اینکه هر دو کشور تقریباً هم‌زمان برنامه‌های توسعه‌ای خود در صنعت مس را شروع کرده‌اند؛ اما هند در مقایسه با ایران در سال ۲۰۱۸ بین قدرت‌های برتر اقتصادی آسیا قرار گرفت. بر این اساس، برنامه‌های راهبردی هند در زمینه مس می‌تواند به تدوین برنامه‌های راهبردی در صنعت مس ایران کمک بزرگی کند. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در ایران، افزایش میزان حقوق دولتی و عوارض صادراتی، عدم ورود ماشین‌آلات معدنی و صنعتی، قوانین نوپدید و نوسان‌های نرخ ارز و تورم از جمله مهم‌ترین چالش‌های مطرح در صنعت مس به شمار می‌آیند. در این پژوهش به منظور آسیب‌شناسی و تحلیل نقاط ضعف و قوت برنامه صنعت مس ایران، به بررسی وضعیت موجود و مرور برنامه‌های توسعه صنعت مس و مقایسه آن با کشور هند و چالش‌های پیش رو پرداخته شده است و در نهایت راه کارهایی برای تدوین سند توسعه این صنعت مهم ارائه شده است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰ واژه‌های کلیدی برنامه‌های توسعه صنایع معدنی صنعت مس سند راهبردی نویسنده مسئول سید محمد اسماعیل جلالی jalalisme@shahroodut.ac.ir 

استناد به این مقاله

روحی جویباری، عادل و جلالی، سید محمد اسماعیل، ۱۴۰۳. واکاوی تحلیلی و تطبیقی برنامه‌های توسعه صنعت مس در ایران. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳): ۵۷-۷۷.

<https://doi.org/10.22067/econg.2024.1102>

مقدمه

فلز مس از جمله فلزهایی است که در اغلب صنایع کاربرد فراوان داشته و همواره به عنوان ماده اولیه اصلی در ساخت و تولید کالاهای مختلف شناخته می‌شود. با توجه به کاربرد فراوان این فلز در صنایع مختلف، صنعت مس از جمله صنایع مهم و اصلی در پیشبرد و توسعه کشورها به شمار می‌رود.

ایران از لحاظ زمین‌شناسی بر روی یکی از دو کمربند مس جهان قرار دارد و از مناطق دارای پتانسیل اقتصادی مس دنیا به حساب می‌آید. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که از ۲۰/۵ میلیون تن تولید مس در جهان، سهم ایران کمتر از ۱/۵ درصد است. سهم صنعت در تولید ناخالص داخلی ایران هفت درصد است که مس، یک درصد از هفت درصد را پوشش می‌دهد. در واقع سهم صنعت مس در تولید ناخالص داخلی ایران یک درصد است که با توجه به حجم ذخایر معدنی مس، نسبتاً پایین است. بنابراین با توجه به اهمیت صنعت مس در اقتصاد کشور به عنوان یک بخش مولد و با توجه به نیاز روزافزون به این فلز در جهان، داشتن راهبرد صنعتی مناسب برای کسب بیشترین بهره‌وری از معادن مس و صنایع وابسته به آن امری مهم و ضروری محسوب می‌شود.

سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی در افق ۱۴۰۴، ایران را کشوری توسعه‌یافته با جایگاه نخست اقتصادی در میان کشورهای آسیای جنوب غربی به تصویر کشیده است هرچند بعید به نظر می‌رسد که این موضوع طی یک سال باقی‌مانده محقق شود؛ اما برای اینکه ایران بتواند به بخشی از اهداف پیش‌بینی شده در چشم‌انداز ۱۴۰۴ برسد، باید نه تنها فرصتی را از دست ندهد؛ بلکه باید به دنبال راه‌های میان‌بر نیز باشد. یکی از راه‌های توسعه سریع کشور در کنار توسعه صادرات توجه به صنایع معدنی است. توسعه صنعتی برای برنامه‌های توسعه ملی از جنبه‌های مختلف دارای اهمیت است. اشتغال‌زایی، رفع فقر، استفاده مناسب از نیروهای متخصص، بهبود جایگاه منطقه‌ای و بین‌المللی کشور، رفع نیازهای داخلی و اعتلای هویت ملی از جمله وجوهی از توسعه است که به توسعه صنعتی گره خورده است. در این زمینه بر اساس تأکید و تصریح

اسناد بالادستی به خصوص برنامه‌های پنج‌ساله توسعه دست کم در یک دهه اخیر، موضوع تدوین راهبرد توسعه صنعتی از جمله مطالبه‌های مهم از دولت و وزارتخانه مربوطه بوده است تا با مشخص شدن سیاست‌های صنعتی در سطوح افقی و عمودی، زیرساخت‌های نهادی لازم برای تصمیم‌گیری بهتر فعالان بخش خصوصی در فضایی با اطمینان‌بخشی بیشتر از طرف دولت فراهم شود (Attar, 2016).

در این پژوهش با بررسی وضعیت موجود و مرور برنامه‌های توسعه صنعت مس و مقایسه آن با کشور هند، به آسیب‌شناسی صنعت مس کشور و چالش‌های پیش رو معرفی شده و در نهایت راه کارهایی برای برون‌رفت از این مشکلات ارائه شده است.

مهم‌ترین چالش‌های صنعت مس در ایران

مشکلات مرتبط با تحریم و پیرو آن عدم دسترسی به فناوری‌های روز دنیا، عدم حمایت از کسب و کارهای کوچک و متوسط، اختلاف قیمت‌ها در بورس کالا و بازار آزاد و تأثیر آن در بازار تجارت قراضه و محصولات مسی و میزان دسترسی مصرف‌کنندگان در بازار، چالش‌های موجود در صنایع پایین‌دست از جمله چالش‌های اصلی این بازار است. معدن و صنایع معدنی یکی از بخش‌های مهم و اثرگذار در تولید و تجارت کشور محسوب می‌شود. این محصولات بخش قابل توجهی از تولید و صادرات غیرنفتی کشور را به خود اختصاص داده که در این میان مس از لحاظ ارزشی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و بررسی چالش‌های آن و در ادامه یافتن راه کارهایی برای رفع این موانع می‌تواند تأثیر این حوزه در تولید ناخالص داخلی کشور را دوچندان کند. چالشی مهم که بازار مس و دیگر بازارها را تحت تأثیر قرار داده، موضوع تحریم‌هاست که سبب نوسان‌های شدید نرخ ارز شده و سیاست‌های اقتصادی و تجاری دولت را متأثر کرده و در نهایت به افزایش هزینه‌های تولید، نوسان‌های بازار، افت صادرات و از دست رفتن بخشی از بازارهای صادراتی، ایجاد رانت، رونق واسطه‌گری و بروز مشکلات متعدد در زمینه

تأمين نقدینگی و سرمايه در گردش واحدهای معدنی و صنايع معدنی کشور منجر شده است (Rajabpour et al., 2015).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر عمده تحریم‌ها در افزایش هزینه‌های تولید بوده و بیشتر تولیدکنندگان محصولات معدنی و به ویژه محصولات فلزی موفق شده‌اند تا با روش‌های مختلف بر موانع و محدودیت‌های حاصل از تحریم‌ها فائق آیند و نیازمند حمایت‌های بیشتر دولت هستند؛ اما محدودیت‌ها و موانع حاصل از سیاست‌های اقتصادی و تجاری دولت مانند سیاست‌های ارزی، دخالت در بازار و قیمت‌گذاری دستوری محصولات معدنی و فلزی توسط ستاد تنظیم بازار، جلوگیری از صادرات و فراهم کردن زمینه‌های رانت و واسطه‌گری، به مانع درونی بزرگی در سر راه تولید کشور تبدیل شده و در شرایط رکود بازار داخل، موجب افت صادرات بیشتر محصولات معدنی و صنايع معدنی کشور شده است و در میان فعالان اقتصادی کشور با عنوان خودتحریمی شناخته می‌شود. از مهم‌ترین موانع درون بخشی بخش معادن و صنايع معدنی نیز می‌توان به ابهام در خصوص محاسبه میزان حقوق دولتی معادن، عدم بازگشت درآمدهای حاصل از حقوق دولتی برای هزینه در بخش معدن موضوع تبصره ۴ ماده ۱۴ قانون معادن، تداخلات جدی میان فعالیت‌های معدنی، محیط‌زیست و منابع طبیعی، دخالت ستاد تنظیم بازار در قیمت‌گذاری محصولات معدنی و فلزی و ایجاد موانع صادراتی، انفعال در سیاست‌گذاری برای معادن و صنايع معدنی در آستانه ورشکستگی مانند صنعت سیمان، عدم حمایت از معادن زغال‌سنگ در جهت ارتقای ایمنی معادن و عدم تأمین اعتبارات لازم برای تسهیلات سرمايه در گردش واحدهای معدنی و صنايع معدنی اشاره کرد. یک موضوع مهم دیگر که در این حوزه قابل بررسی است، اقدام به ایجاد خوشه‌های معدنی است. معادن مس بسیار زیادی با ذخایر کوچک به صورت پراکنده در سطح کشور وجود دارد که با تدابیر درست می‌تواند تأثیر قابل توجهی در تولید کشور داشته باشند. در حقیقت نقش معادن کوچک در تولید ناخالص داخلی و اشتغال، پررنگ نبوده و به آنها بها داده نمی‌شود. به عنوان حمایت می‌توان معادن

کوچکی را که با فواصل معقول از لحاظ حمل و نقل هستند و توجیه ارتباطی بین آنها وجود دارد، در قالب یک شرکت جمع کرد و هرکدام از این معادن وابسته، به میزان ذخیره و عیار در این کنسرسیوم سهیم شوند و در ادامه دولت هم با اعطای تسهیلات از آنها حمایت کند. یکی دیگر از آثار تحریم در به‌روزرسانی تجهیزات نمود پیدا می‌کند که حوزه مس را هم تحت تأثیر قرار داده است. در ایران چون عمده ماشین‌آلات معدنی و صنعتی وارداتی است؛ بنابراین هزینه تولید حتی در شرایط عادی بالاتر از کشورهای صاحب این فناوری‌هاست. حال، با وجود تحریم فرسایشی موجود، ورود کالاهای غیراستاندارد و نامناسب از طریق بازار سیاه و با تأخیر زمانی و با قیمتی چند برابر قیمت واقعی و نیز عدم امکان صدور کالای مرغوب ساخت داخل به بازارهای هدف و اجبار به توقف تولید یا فروش محصول تولیدی به بازار با سود کم و گاهی با ضرر، همگی بخشی از مشکلات واحدهای تولیدی هستند. عواملی مانند تحریم‌های ایالت متحده امریکا، نوسان‌های شدید نرخ ارز و مجموعه سیاست‌های اقتصادی و تجاری دولت به افزایش هزینه‌های تولید، تلاطم بازار، افت صادرات و از دست رفتن بخشی از بازارهای صادراتی، ایجاد رانت، رونق واسطه‌گری و بروز مشکلات متعدد در زمینه تأمین نقدینگی و سرمايه در گردش واحدهای معدنی و صنايع معدنی کشور منجر شده است.

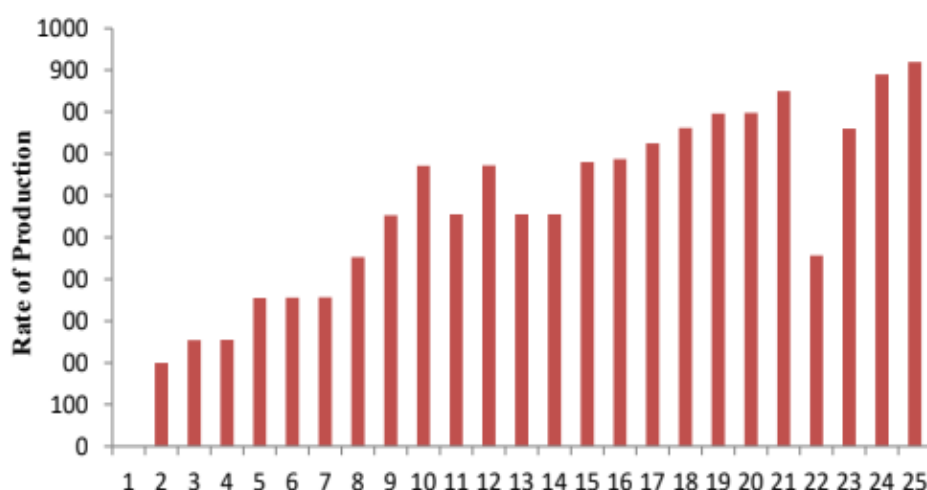
در ادامه به‌صورت تحليلي و تطبيقی برنامه‌های توسعه‌ای کشور هند و ایران و راه کارهای اجرایی لازم برای برطرف کردن چالش‌ها و موانع عنوان شده پیشنهاد شده است.

برنامه‌های توسعه‌ای هند در صنعت مس

از سال ۱۹۹۰ تاکنون هند به یکی از پیش‌روترین کشورهای در حال توسعه در زمینه اقتصادی تبدیل شده است در این مدت اقتصاد این کشور به استثنای چند عقب‌گرد کوچک، همواره رشدی چشمگیر داشته است. کارشناسان سرآغاز پیشرفت‌های اقتصادی هند را در سال ۱۹۹۰ می‌دانند (Azizi, 2019).

در سال ۱۹۹۲ و طی برنامه هشتم توسعه، درهای صنعت مس هند به روی سرمایه‌گذاری بخش خصوصی باز شد. در سال ۲۰۰۸ در برنامه یازدهم توسعه، دولت هند وضعیت مس این کشور را به عنوان شرکت سودده با رتبه یک اعلام کرد. در سال ۲۰۱۷ نیز مس به عنوان رهبر صنعت از برندگان جوایز جهانی پلاتس در سال ۲۰۱۶ شناخته شد. **شکل ۱** روند افزایشی و موفق دولت هند در تولید مس کاتد را در طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲ میلادی را در کشور هند نشان می‌دهد. در این نمودار پیشرفت هندوستان در این صنعت مشهود است.

شروع برنامه‌ریزی برای توسعه صنعت مس کشور هند با طرح برنامه هشتم توسعه، از سال ۱۹۹۲ شروع شده است. پیش از سال ۱۹۹۲، صنعت مس هند تحت تسلط شرکت **هینداستون با مسئولیت محدود** بوده است. HCL در نوامبر ۱۹۶۷ و (طی برنامه سوم توسعه) به عنوان یک شرکت دولتی با مسئولیت محدود با هدف اصلی انجام عملیات معدن کاری تولید مس و محصولات مربوط به آن، ثبت شد. به دنبال آن شرکت HCL، مسئولیت معادن مس را از **شرکت ملی توسعه مواد معدنی** به عهده گرفت. این معادن در شهرهای **ختری و کولیهان** واقع در ایالت **راجستان** و مجتمع مس **راخا** در ایالت **جارکند** واقع بودند.



شکل ۱. تولید مس تصفیه شده داخلی در هند

Fig. 1. Internal refined copper production in India

واردات مس کاتدی

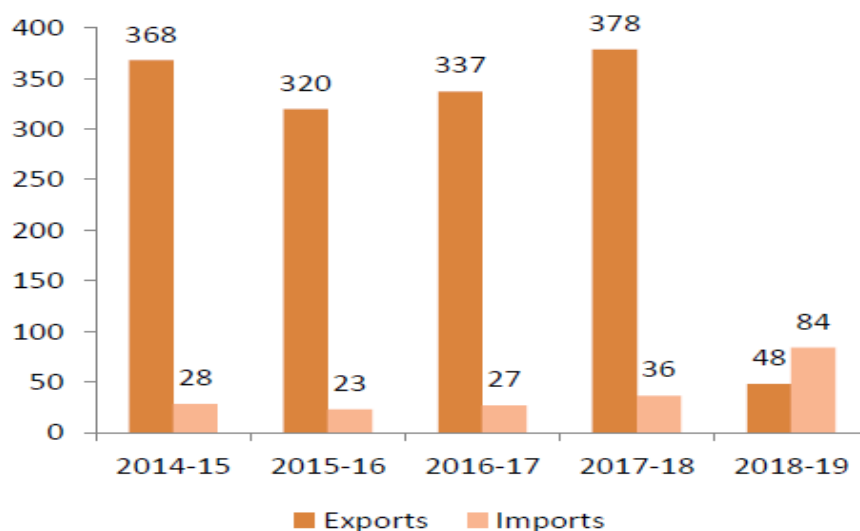
هند تا سال مالی ۲۰۱۸ قصد داشت، صادرکننده ویژه مس کاتدی باشد. بسته شدن کارخانه ذوب توتیکورین و افت در تولید داخلی، موجب افزایش واردات کشور و کاهش صادرات در هند شده است.

مهم‌ترین چالش‌ها و مشکلات صنعت مس کشور هند

مهم‌ترین مشکلاتی که در گذشته در صنعت مس هند وجود داشت، به طور اساسی به کمبود و عدم دسترسی به ذخایر سنگ معدن و پیاپی‌های زیست محیطی مربوط می‌شد. در این بخش مشکلات عمده صنعت مس و همچنین علل و عوامل تغییر در سند راهبردی هند در صنعت مس بررسی شده است.

در طی سال مالی ۲۰۱۹، صادرات مس هند به ۸۷/۴ درصد سقوط کرده است؛ در حالی که در طول سال مالی ۲۰۱۸، صادرات تا ۱۲/۳ درصد افزایش پیدا کرده بود. در سال ۲۰۱۹ واردات تا ۱۳۱/۲ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که طی سال مالی ۲۰۱۸ واردات ۳۵/۶ درصد بوده است. بر اساس **شکل ۲**، هند پس از ۱۸ سال واردکننده ویژه مس تصفیه‌شده، شناخته شده است.

در طی سال مالی ۲۰۱۹، صادرات مس هند به ۸۷/۴ درصد سقوط کرده است؛ در حالی که در طول سال مالی ۲۰۱۸، صادرات تا ۱۲/۳ درصد افزایش پیدا کرده بود. در سال ۲۰۱۹ واردات تا ۱۳۱/۲ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که طی سال مالی ۲۰۱۸ واردات ۳۵/۶ درصد بوده است. بر اساس **شکل ۲**، هند پس از ۱۸ سال واردکننده ویژه مس تصفیه‌شده، شناخته شده است.



شکل ۲. صادرات و واردات مس کاتد کارخانه ذوب توتیکورین در هند طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ (Urvisha, 2019)

Fig. 2. Export and import of cathode copper during the years 2015 to 2019 in India (Urvisha, 2019)

حالی که ظرفیت فعلی معادن مس کشور هند به طور کامل توسط شرکت HCL مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. میزان ذخیره قطعی و ثابت شده معادن مربوط به شرکت HCL، ۴۱۱ میلیون تن و میزان ذخیره احتمالی آن ۶۲۳ میلیون تن است. بر همین اساس، کارخانه‌های ذوب طبق روال گذشته به واردات کنسانتره مس برای تغذیه کارخانه‌های خود متکی هستند (Urvisha, 2019).

افزایش نیاز هند به مس

رشد زیرساخت‌های هند نشان‌دهنده رشد مصرف مس در این کشور است. مصرف مس تصفیه‌شده در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ به ۴/۲ درصد نرخ رشد مرکب سالانه افزایش یافته است. نیاز به سیم و کابل مسی در طرح‌های زیرساختی و طرح‌های انرژی

عدم تناسب بین ذخایر معدنی و ظرفیت‌های کارخانه‌های فراوری

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بین ظرفیت کارخانه‌های فراوری و ظرفیت معادن مس در هند تفاوت فاحشی وجود دارد؛ در حالی که کارخانه‌های فراوری مس هند حدود یک میلیون تن در سال ظرفیت دارد؛ اما فقط ۳۵ هزار تن مس تصفیه‌شده را می‌توان از تولید فعلی کانسنگ مس در هند استخراج کرد. بنابراین میزان کمبود برای جبران این ظرفیت کارخانه حدود ۹۶۵ هزار تن است. باید توجه داشت که حداقل ۱۲۰ میلیون تن سنگ معدن مس (با فرض مس محتوی ۱ درصد) برای تولید یک میلیون تن مس تصفیه‌شده مورد نیاز است. استخراج و تولید سنگ معدن مس در هند تنها ۴ درصد از تقاضای این کشور را برآورده می‌کند؛ در

با پیش‌بینی اینکه چنین رشدی متمرکز بر توسعه زیر ساختارهایی مانند ساخت ۱۰۰ شهر کوچک و توسعه سریع انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه برق خورشیدی خواهد بود، تقاضای مصرف مس در هند به حدود یک میلیون و پانصد هزار تن تا سال ۲۰۲۶ خواهد رسید.

تجدیدپذیر، افزایش در تولید خودرو (که رشد ۷/۳ درصد داشته است) و افزایش تولید در کالاهای مصرفی بادوام (تولید یخچال‌ها و کولرهای گازی به ترتیب ۶/۹ و ۰/۷ درصد افزایش یافته است) باعث افزایش مصرف مس در ۵ سال منتهی به سال ۲۰۱۹ شده که در شکل ۳ نشان داده شده است (Urvisha, 2019).



شکل ۳. میزان مصرف مس تصفیه شده داخلی در هند (هزار تن) (Urvisha, 2019)

Fig. 3. Internal refined copper consumption in India (kilotons) (Urvisha, 2019)

ت) افزایش ظرفیت واحدهای ذوب: شامل احداث واحدهای ذوب بر اساس روش هیدرومتالورژی است.

ث) توسعه پایدار: شامل استفاده از باطله‌های تر و خشک معادن مس است.

ج) ورود به بازارهای کوچک: عموماً بخش‌های کوچکی از بازار وجود دارند که شرکت‌های بزرگ آنها را ندیده‌اند؛ یا نخواسته‌اند یا نتوانسته‌اند محصول مناسبی برای آنها ارائه کنند. این بخش‌ها را به نام گوشه‌های دنج بازار یا «نیچ مارکت» می‌شناسند. تأمین نیاز و ارائه محصول برای آنها، فرصت خوبی برای کسب و کارهای کوچک محسوب می‌شود (Amin Aghaei, 2008).

راه کارهای هند برای حل مشکلات مس

راه‌حلی که دولت هند برای فائق آمدن بر چالش‌ها و مشکلات در نظر گرفت، شامل موارد زیر است:

الف) گسترش معادن موجود: این معادن شامل معدن مالا جند در مادایا پرادش، معادن کولیهان و ختری در راجستان و معدن سورا در جارکند است.

ب) بهره‌برداری مجدد از معادن متروکه: معادن متروکه، شامل معادن راخا و کندادی در جارکند می‌شود.

پ) اکتشاف معادن جدید و توسعه نیافته: با توجه به کمبود کانسنگ مس، شرکت HCL در هند به انجام عملیات اکتشافی جدید در مناطق دارای ظرفیت کانسار مس پرداخته است.

مروری بر برنامه‌های توسعه‌ای ایران با نگاه به صنعت

مس

برنامه‌های توسعه در ایران از سال ۱۳۱۶ که اندیشه برنامه‌ریزی شکل گرفت تا روزی که سازمان برنامه به طور قانونی رسمیت پیدا کرد و برنامه ۷ ساله اول آغاز شد، ۱۲ سال طول کشید و ۱۷ کابینه به علت نابسامانی‌های سیاسی و اقتصادی تغییر کرد؛ زیرا زمان زیادی لازم بود تا دولت‌مردان ایرانی به درکی از توسعه رسیده و با اهمیت برنامه‌ریزی آشنایی ابتدایی پیدا کنند (Arab Mazar and Noormohammadi, 2016).

هفت برنامه عمرانی کشور از سال ۱۳۲۷ تا ۱۳۵۷ را می‌توان به عنوان برنامه صنعتی کشور در نظر گرفت؛ اما نخستین راهبرد توسعه صنعتی کشور در سال ۱۳۷۹ تدوین شد که تعیین می‌کند راهبرد کلی کشور قدم‌نهادن در راه توسعه بوده است. پس از آن، با تغییر

دولت در سال ۱۳۸۰، این راهبرد کنار گذاشته شد و برنامه جامع توسعه با رویکرد تعیین اهداف مشخص در بخش‌های مختلف، جایگزین آن شد (Saifori and Taghavi, 2018). این برنامه در بخش صنعت مس به تهیه طرح جامع مس با هدف تولید سالانه ۷۰۰ هزار تن مس کاتدی توسط شرکت ملی صنایع مس ایران منجر شد. تعیین چنین هدف بزرگی در حالی بود که شرکت ملی صنایع مس ایران هنوز به اهداف تعریف‌شده در فاز دوم توسعه خود و برنامه چهارم توسعه (تولید سالانه ۴۴۰ هزار تن کاتد)، دست‌نیافته بود. در آن زمان ظرفیت تولید کاتد شرکت مس تنها ۲۵۰ هزار تن بود، در چنین شرایطی شرکت یادشده با تعریف ۳۱ طرح، تولید ۷۰۰ هزار تن کاتد را هدف‌گذاری کرد. در جدول ۱ هدف‌گذاری برنامه تولید مس در کشور نشان‌داده شده است.

جدول ۱. هدف‌گذاری برنامه تولید مس در کشور ایران

Table 1. Targeting the copper production program in the Iran country

Actual available capacity (tons)	Cathode production target (tons)	End year	start year	Phases of development	development plan
250000	187500	1388	1379	First phase	third and fourth
	260000			second phase	
About 252500	700000	1394	1390	third phase	the fifth
About 450000	300000	1400	1396	-	the sixth
-	800000	1404	1384	-	20-year vision

به ۳۰۰ هزار تن کاتد افزایش می‌داد. در مجتمع خاتون‌آباد قرار بود کوره ذوب ۸۰ هزار تنی مس با توسعه و اصلاحاتی همراه شده و ظرفیت آن به ۲۰۰ هزار تن افزایش یابد و در کنار آن، یک پالایشگاه ۲۰۰ هزار تنی جدید نیز احداث شود. در مجتمع سونگون نیز مقرر شده بود طرح احداث واحد ذوب ۸۰ هزار تنی

تصمیم بر اینکه تمامی مجتمع‌های تولید شرکت ملی صنایع مس ایران دارای خط تولید کامل از معدن تا کاتد باشند، توسعه در واحد ذوب سرچشمه، شامل تغییر فناوری ذوب و احداث یک کوره ذوب فلش ۲۸۲ هزار تن و توسعه پالایشگاه بود که در نهایت با تولید کاتد هیدرومتالورژی، ظرفیت تولید این مجتمع را

روند اجرای طرح‌های توسعه مس در کشور

روند تولید واقعی مس کاتد در بازه زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. در دو سال اول برنامه پنجم توسعه رشد خاصی نسبت به سال‌های پایانی برنامه چهارم مشاهده نمی‌شود. علت این امر را می‌توان در افزایش هزینه‌ها، افزایش تحریم‌ها و مشکلات مربوط به ورود کالاها و تجهیزات به کشور دانست. مقدار تولید مس کاتد برای ۹ ماه اول سال ۱۴۰۰ است.

مس که در سال ۱۳۸۵ مصوب شده بود، با طرح ذوب و پالایش ۲۰۰ هزار تنی جایگزین شود. با اجرای تمامی این طرح‌ها، ظرفیت ذوب و پالایش شرکت به ۷۰۰ هزار تن مس می‌رسید که رشد تولید قابل توجهی را می‌توانست برای شرکت رقم بزند. در نهایت، طرح ۳۱ با سرمایه‌گذاری هشت میلیارد دلار قرار بود طی برنامه پنجم توسعه کشور و در فاز سوم به اجرا درآید.



شکل ۴. روند تولید واقعی مس کاتد در بازه زمانی ۱۳۶۲ تا ۱۴۰۰ در شرکت ملی مس (Fazeli et al., 2019)

Fig. 4. The actual production process of cathode copper in the period 2003 to 2021 (Fazeli et al., 2019)

سرمایه‌گذاری‌های جدید، افزایش ظرفیت تولید، رشد فروش محصولات جدید، رشد سهم بازار، بهبود ساختار هزینه‌ها، استفاده بهینه از دارایی‌های ثابت و تحقق برنامه رسیدن به یک میلیون و ۴۲۷ هزار تن کنسانتره و ۳۰۰ هزار تن کاتد بوده است. در ادامه دلایل عدم تحقق فازهای توسعه و تصمیمات مربوط به آنها

ظرفیت موجود برای تولید مس کاتد و میزان تولید واقعی مس کاتد کشور در شکل ۵، نشان داده شده است. در طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ تولید واقعی مس کاتد تقریباً کمتر از ظرفیت موجود بوده است. این تفاوت بین ظرفیت و توان تولید از سال ۱۳۹۵ به بعد بیشتر خودنمایی می‌کند. مقدار تولید مس کاتد برای ۹ ماه اول سال ۱۴۰۰ است (Fazeli et al., 2019).

دلایل عدم تحقق فازهای توسعه و تصمیمات مربوط به آنها

الف) حذف برخی از طرح‌ها و معادن

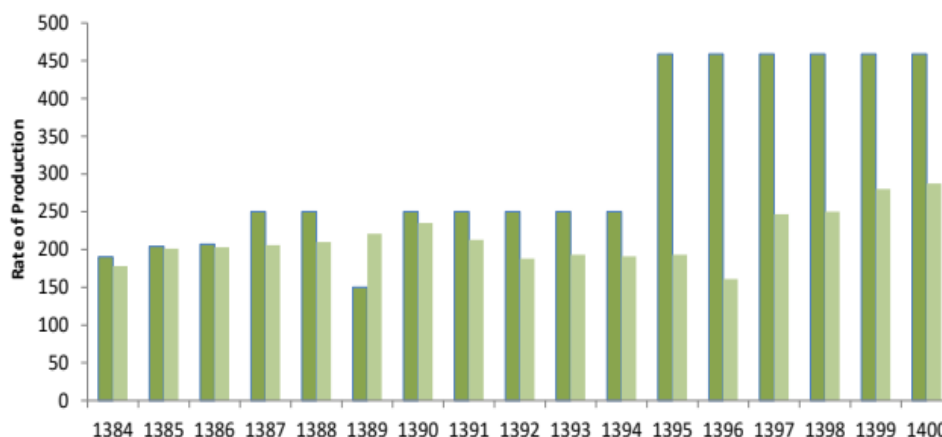
با توجه به قیمت بالای مس (حدود ۱۰ هزار دلار بر تن)، شرکت

آسیب‌شناسی برنامه توسعه حال حاضر صنعت مس ایران با توجه به ترسیم چشم‌انداز توسعه صنعت مس در برنامه ششم توسعه تا افق ۱۴۰۰ و چشم‌انداز ۲۰ ساله تا افق ۱۴۰۴، برنامه‌های شرکت ملی صنایع مس ایران رسیدن به اهدافی شامل: توسعه

ماندند و برخی نیز با توجه به قیمت مس و شرایط زیست محیطی تعلیق و یا حذف شدند.

با توجه به اینکه برخی از طرح‌ها و معادن، توسعه‌ای و برخی دیگر اصلاحی بودند، علت حذف آنها اغلب کاهش قیمت مس و عدم توجیه اقتصادی طرح عنوان شد. از بین ۳۱ معدن جدید که برای فاز سوم توسعه مس در نظر گرفته شدند، تنها چهار معدن دره‌زار، درآلو و چاه فیروزه در استان کرمان و چهل کوره در استان سیستان و بلوچستان در حال ادامه کار هستند و بقیه معادن متوقف شده‌اند تا در آینده به چرخه تولید مس کشور وارد شوند.

مس در سال ۱۳۹۰ و همراه با برنامه پنجم توسعه کشور، تصمیم گرفت ۳۱ طرح (طرح‌های جدید به همراه طرح‌هایی که از فاز دوم باقی ماندند) را برای رسیدن به هدف تولید ۷۰۰ هزار تن کاتد مس به مرحله اجرا درآورد. بسیاری از این طرح‌ها در معادن با عیار پایین و نیز خوش‌بینی در مورد قیمت مس، تنها در آن زمان توجیه اقتصادی داشتند و بنابراین با افت قیمت مس به زیر ۵۰۰۰ دلار، بسیاری از این طرح‌ها غیراقتصادی شدند؛ اما برخی از طرح‌ها با بازنگری‌هایی که در آنها انجام شد، به سرانجام رسیدند و نتایج نسبتاً مناسبی را نیز برای شرکت مس به همراه داشتند. با بازنگری در این طرح‌ها، برخی از طرح‌ها باقی



شکل ۵. میزان ظرفیت موجود و میزان تولید واقعی مس کاتد در شرکت ملی مس

Fig. 5. The amount of available capacity and the amount of actual copper cathode production

پ) بازنگری در طرح‌های فاز سوم توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران

در بازه سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸، قیمت جهانی مس به شدت کاهش یافت و این موضوع مدیران شرکت ملی صنایع مس ایران را بر آن داشت که در اجرای برخی از این طرح‌ها بازنگری کنند. پس از بررسی‌های اولیه و کسب نتایج از طرح‌های در حال اجرا، در نهایت مدیران شرکت ملی صنایع مس ایران تصمیم گرفتند با توجه به شرایط موجود اجرای برخی از طرح‌ها را متوقف کنند، برخی از آنها را ادامه دهند و سایر طرح‌های

ب) تکمیل طرح‌های در دست اجرا

طرح‌های در دست اجرای شرکت ملی مس شامل سه گروه می‌شوند. گروه اول، طرح‌هایی مانند آهک هیدراته اهر که لزوم اجرای آنها برای طرح‌های دیگر مس ضروری است. گروه دوم، طرح‌هایی مانند ذوب سرچشمه که پیشرفت بالایی داشتند و باید به اتمام می‌رسیدند. گروه سوم، طرح‌هایی که جایگزین برخی از طرح‌ها مانند کارخانه هیدرومتالورژی سونگون بودند و جایگزین کارخانه‌های ذوب و پالایشگاه و اسیدسولفوریک سونگون شدند.

سؤال‌هاى روبه‌رو است كه در ادامه ضمن بررسى آنها و مقايسه با كشور هند، راه‌كارهاى مورد نياز براى توسعه اين صنعت پيشنهاده شده است.

تأمين خوراك اوليه براى توليد مس

ايران مانند هند براى تأمين اهداف طرح توسعه با مشكل كمبود كانسنگ و كنسانتره موردنياز روبه‌رو است. براى حل اين مشكلات چندين راه‌حل وجود دارد كه در ادامه شرح داده مى‌شود:

الف) گسترش معادن موجود

يكي از راه‌هاى مؤثر براى تأمين كانسنگ موردنياز طرح، انجام اكتشاف حين بهره بردارى در معادن فعال و افزايش ظرفيت استخراج در اين معادن براى نمونه است. با افزايش حجم اكتشافات در معدن سونگون، حجم ذخاير قابل معدن‌كارى در اين معدن به حدود ۹۰۰ ميليون تن افزايش‌يافته است كه در صورت ادامه فعاليت‌هاى اكتشافى، احتمال پيوستن اين معدن عظيم به باشگاه دارندگان ذخاير عظيم ميلياردى تنى مس، وجود دارد. علاوه بر اين، با تغيير روش استخراج در معادن بزرگ از جمله معدن ميدوك از روباز به زيرزمينى، مى‌توان به ذخاير باقى‌مانده اين معدن دست پيدا كرد.

ب) احياى معادن متروكه و كوچك‌مقياس

ميزان ده درصد از كنسانتره موردنياز كارخانه‌هاى شركت مى صنایع مس ايران، معادن كوچك‌مقياس در حال بهره بردارى تأمين مى‌شود. از جمله اين بهره‌برداران مى‌توان به چهار گنبد كرمان، مس درخشان تخت گنبد، مس فلز رنگين، كيان مس جوزم، ميناكان، توليدى معدنى مدوار و ... اشاره كرد كه اغلب محصول توليدى خود را به عنوان خوراك به شركت مى صنایع مس ايران مى‌فروشد.

با اين وجود هنوز تعداد زيادى از معادن كوچك مس در كشور وجود دارند كه غيرفعال هستند و مى‌توان با حمايت و تأمين سرمايه اين معادن، آنها را به چرخه توليد بازگرداند. براى مثال، معدن مس رمشك در منطقه جنوب كرمان از جمله معادن كوچك‌مقياسى

باقى‌مانده را به حالت تعليق درآورند تا دوباره قيمت مس به سطوح اقتصادى توليد بازگردد.

ت) حذف طرح‌هاى غيراقتصادى فاز سوم توسعه در شركت مى صنایع مس ايران

به دليل بلندپروازى مديران وقت شركت مى مس، بسيارى از طرح‌هاى فاز سوم با وجود اطلاعات نامناسب از وضعيت زمين‌شناسى و اقتصادى معادن مس، استناد به تنها يك منبع اطلاعاتى و همچنين فشارهاى سياسى ناشى از مسئولان محلى استان‌هاى مربوطه، شكل گرفتند. علاوه بر اين، كندى عمليات اجرائى و در نهايت، كاهش شديد قيمت مس، مديران شركت مى را وادار كرد كه بسيارى از طرح‌ها را به حالت تعليق درآورند و يا به طور كامل از دستور كار شركت حذف كنند تا بيش از اين زيانى متوجه شركت مى مس نشود. اين طرح‌ها شامل توسعه تغليظ سرچشمه فاز ۳، كارخانه ذوب و اسيدسولفوريك سونگون، كارخانه پالايشگاه سونگون، كارخانه فلوئاسيون سرباره سونگون، معدن مسجد داغى بودند.

در چنين شرايطى، تكميل طرح ۷۰۰ هزار تنى توليد كاتد در شركت مى مس با ابهامات جدى نظير غيراقتصادى بودن ذوب و پالايش مس، توليد اسيدسولفوريك مازاد و همچنين مازاد عرضه كاتد در بازار مواجه شد و مسئولان شركت بر اساس بررسى‌هاى كارشناسى، تصميم به بازنگرى اين طرح و تغيير هدف تعيين شده براى توليد ۴۰۰ هزار تن مس تصفيه‌شده گرفتند (Golshani, 2015).

ث) عدم توجه به بخش خصوصى و معادن كوچك‌مقياس

عدم توجه و استقبال از بخش خصوصى براى فعاليت در بخش معادن، همچنين عدم توجه به فعال كردن معادن كوچك‌مقياس، يكي ديگر از چالش‌هاى اساسى اين بخش است.

آسيب‌شناسى تحليلى و تطبيقى توسعه صنعت مس در ايران و هند

پس از بررسى و واكاوى مشكلات و آسيب‌شناسى شركت مى صنایع مس ايران براى اجراى برنامه‌هاى خود با برخى ابهام‌ها و

است که قرار است با حمایت‌های امیدوار فعاليت را آغاز کند. توجه ویژه به معادن کوچک‌مقیاس در خراسان جنوبی و زون میامی شاهرود مثال‌های دیگری است که می‌تواند توجه سیاست‌گذاران این حوزه را جلب کند.

بهره‌برداری از معادن کوچک، نیازمند مدیریت و کاهش هزینه‌های عملیاتی است تا از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. هزینه پایین دستمزد، شبکه قدرتمند حمل ریلی در هند، از جمله عوامل کاهش هزینه‌های عملیاتی معدن‌کاری متوسط در این کشور در مقایسه با ایران در سالیان اخیر بوده است. در نتیجه، فعالیت تولیدی این معادن با توجیه‌پذیری اقتصادی همراه شده است. اگرچه زیرساخت ریلی کشور از توسعه قابل‌توجهی جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل برخوردار نیست، بهره‌مندی صحیح از تجهیزات حمل‌ونقل در معادن کوچک، می‌تواند عامل توسعه معدن‌کاری متوسط مقیاس در صنعت مس کشور باشد.

پ) اجرای عملیات اکتشاف در ایران

از آنجا که ایران بر روی کمربند مس قرار گرفته است، لازم است با سرمایه‌گذاری در زمینه اکتشاف، پتانسیل کشور را افزایش داد. از ابتدای سال ۱۳۹۸، بیش از ۶۰ هزار متر حفاری اکتشافی در معادن وابسته به شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است که نسبت به ۴۰ هزار متر فعالیت اکتشافی سال‌های قبل از آن رشد داشته است. ذخایر مس شرکت یادشده نیز از ۲۲ میلیون تن به ۳۶/۵ میلیون تن مس خالص (۸ میلیارد تن کانسنگ) در پایان سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است و ایران جایگاه هفت را در بین کشورهای دارنده ذخایر مس به دست آورده است.

در ارتباط با مشکل کمبود خوراک و کنسانتره، هند در مقایسه با ایران، با انجام اکتشاف حین بهره‌برداری و افزایش ظرفیت استخراج در معادن موجود و بازگشایی معادن متروکه و توسعه فعالیت‌های اکتشافی اقدام کرده است.

تعیین اهداف طرح‌های توسعه با توجه به مصرف کاتد

بررسی‌های انجام‌شده در ارتباط با کشور نشان می‌دهد که از میزان

حدود ۲۵۰ هزار تن کاتد تولیدشده در سال ۱۴۰۰، حدود ۱۶۰ هزار تن آن در کشور به مصرف داخلی رسیده است. مشتریان عمده داخلی، شرکت تولیدی دنیای مس، شرکت گیل‌راد شمال و شرکت مس شهید باهنر و مشتریان خارجی آن **گلنکر** و **مواد معدنی غیر فلزی چین** هستند.

در صورت تولید بالای ۳۰۰ هزار تن کاتد در سال ۱۴۰۲، میزان مصرف داخلی کاتد تقریباً ۱۶۰ هزار تن ثابت باقی خواهد ماند. علاوه بر این، صادرات مس ایران در سال‌های گذشته معطوف به کشورهای هم‌چون چین، هند، ترکیه و امارات متحده عربی بوده است که با اعمال تحریم‌های اقتصادی ایران و تحریم شرکت‌های تولیدکننده مس، شرایط صادرات مس با محدودیت مواجه خواهد شد.

در سال ۱۳۹۷، صادرات از طریق شرکت‌های تراستی انجام می‌شد و به نوعی نیازهای جاری فروش شرکت مس برآورده می‌شد. البته این سازوکار مشکلات خاصی را به همراه داشت و احتمال خطر فروش را بالا برد. در نتیجه آن سازوکار یادشده در افزایش هزینه‌های شرکت نیز تأثیر بسیار زیادی گذاشت (Bazar Noei, 2018).

از دیگر مشکلاتی که تحریم‌ها برای صنعت مس ایجاد کرده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- به دلیل شرایط خاص ایران، یافتن مشتریان مناسب با چالش‌هایی همراه خواهد بود. تا پیش از تحریم‌ها، شرکت‌های ردیف نخست جهان طرف معامله ایران بودند؛ در حالی که با وجود تحریم‌ها، کشور مجبور است با شرکت‌های چند رده پایین‌تر وارد معامله شود (Bazar Noei, 2018).

- به دلیل محدودیت برای ایران، مشتریان می‌توانند شرایط خود را تحمیل کنند. در چنین شرایطی تولیدکنندگان کشور و از جمله شرکت ملی صنایع مس ایران باید برای رعایت حقوق سهام‌داران خود به دنبال بهترین گزینه‌ها باشند. این یعنی تولیدکنندگان ضمن فروش کالاهای خود باید تمام جوانب را در نظر بگیرند که تمامی پول به کشور بازگردد. به طور مثال، باید دقت شود که اگر در این

توجه اقتصادی ندارد. درواقع نرخ بازده داخلی پایین طرح‌های ذوب و پالایش از یک طرف و از طرفی دیگر، بالابودن تورم و به همان نسبت نرخ تنزیل در کشور، باعث می‌شود، ارزش خالص فعلی طرح‌های ذوب و پالایش در کشور، هیچ‌گاه مثبت نشده و این واحدها زیان‌ده باشند. در چنین حالتی بررسی‌های اقتصادی این طرح‌ها با در نظر گرفتن کاتد به عنوان محصول نهایی، سبب انتقال سودبخش تولید کنسانتره به بخش ذوب و پالایش شده و به عبارتی موجب می‌شود زیان‌ده بودن این بخش‌ها موردتوجه قرار نگیرد.

با توجه به مطالب بیان‌شده و در شرایط کنونی، نه تنها صادرات کنسانتره مس، خام‌فروشی محسوب نمی‌شود؛ بلکه محصول اقتصادی کنسانتره مس از بالاترین حاشیه سود در بین کلیه محصولات زنجیره تولید مس برخوردار است. شیلی به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده مس، در سال ۲۰۱۵ حدود ۵/۷۲ میلیون تن مس تولید کرده که افزون بر ۷۰ درصد از آن به صورت کنسانتره بوده است. کل مس کاتد تولیدی شیلی در سال یادشده ۲/۶۰ میلیون تن بوده که قسمت اعظم کنسانتره تولیدی صادر شده و درآمد هنگفتی را نصیب کشور یادشده کرده است. هند برای افزایش ظرفیت تولید، به جای واحدهای ذوب، احداث واحدها بر مبنای روش هیدرومتالورژی را در دستور کار قرار داده است.

علاوه بر موارد گفته‌شده، باید توجه داشت که دستیابی به اهداف کلان شرکت ملی صنایع مس ایران در برنامه ششم توسعه، با چالش‌هایی همراه بود که از آن جمله می‌توان به وابستگی فناوری در برخی زمینه‌ها به سایر کشورها، قدیمی بودن بخشی از فناوری موجود و به دنبال آن پایین بودن مقیاس تولید مس نسبت به رقبای عمده جهانی، وابستگی شدید به قیمت جهانی مس، مشکلات ناشی از عدم امکان فروش محصولات صادراتی، مشکلات تأمین مالی از منابع خارجی برای سرمایه‌گذاری طرح‌های توسعه‌ای، مشکلات ناشی از نظام بانکداری داخلی و بین‌المللی در مواردی ناشی از نقل و انتقال پول، گردش بین‌المللی پول و عدم امکان گشایش LC، نامشخص بودن وضعیت نرخ ارز اشاره کرد. علاوه

شرایط به یک مشتری کالا فروخته شود، آن مشتری به دلیل تحریم‌ها مشکلی در انتقال پول نداشته باشد و شرایط به گونه‌ای پیش نرود که پول جنس فروخته‌شده، در اختیار شرکت ایرانی قرار نگیرد. بنابراین در این شرایط باید با اطمینان گام برداشت و صرف دعوت یک مشتری برای انجام معامله نمی‌توان کالا را به او فروخت (Bazar Noei, 2018).

با اعمال تحریم‌ها، قدرت چانه‌زنی ایران در معاملات بین‌المللی کم می‌شود و کشور ناگزیر از معامله کالا با بهای کمتر از ارزش واقعی است. چیزی که نه درباره مس بلکه درباره سایر اقلام مورد تحریم وجود دارد (Bazar Noei, 2018).

بر این اساس لازم است تولید کاتد کشور مطابق با چشم‌اندازهای مصرف آن هدف‌گذاری شود.

کشور هند در سال مالی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ از حدود ۸۵۰ هزار تن کاتد تولیدی، ۳۷۸ هزار تن آن را صادر کرده است. در واقع در هند میزان دوسوم کاتد تولید شده به مصرف داخلی رسیده و مازاد آن صادرشده است. هند با توجه به تعطیلی و خرابی‌های غیرقابل‌پیش‌بینی برخی از کارخانه‌های ذوب و افزایش مصرف داخلی به کاتد تصمیم گرفته است که در سال ۲۰۱۹، میزان واردات کاتد را افزایش و میزان صادرات را کاهش دهد و پس از ۱۸ سال واردکننده ویژه مس تصفیه‌شده باشد.

بنابراین ایران نیز لازم است در چشم‌اندازهای خود برای تولید مس کاتد مصرف داخلی را در نظر بگیرد. علاوه بر این، ایران می‌تواند مانند هند برای فروش محصولات مسی خود، بازارهایی که هنوز شرکت‌های بزرگ در آن پا نگذاشته‌اند را برای فروش محصولات انتخاب کند.

تغییر محصول نهایی برای فروش

بررسی فنی و اقتصادی دقیق واحدهای ذوب در دنیا نشان می‌دهد که حاشیه سود فرایند ذوب و پالایش مس تک‌رقمی بوده و نرخ بازده داخلی طرح‌های جدید ذوب و پالایش حدود ۵ درصد است که با توجه به نرخ تورم و تنزیل سرمایه در ایران، به هیچ وجه

مشاركت با بخش خصوصي در برنامه‌هاي توسعه

طي چند دهه گذشته، خصوصي‌سازي و تقويت رقابت‌پذيري بنگاه‌هاي اقتصادي، از مهم‌ترين عناصر اصلاح ساختاري كشورهاي توسعه‌يافته و در حال توسعه بوده است. امروزه نمي‌توان كشوري را يافت كه برنامه‌اي براي واگذاري تمام يا بخشي از شركت‌هاي دولتي به بخش خصوصي و يا سهيم كردن اين بخش در مديريت، مالكي و امور مالي اين شركت‌ها در پيش نگرفته باشد. مهم‌ترين هدف‌ي كه خصوصي‌سازي در بسياري از كشورها دنبال مي‌كند، افزايش كارايي در اقتصاد از طريق سپردن فعاليت‌هاي اقتصادي به سازوكار بازار آزاد است (Mirzaei and Golestani, 2016). در اين بخش، واگذاري فعاليت‌هاي زنجيره توليد مس از جمله حضور بخش خصوصي در اكتشاف، بهره‌برداري و فراوري صنعت مس مدنظر است.

كمك‌هاي خارجي

يكي از راه‌حل‌هاي مطرح در سطح بين‌المللي به دليل نبود وجوه سرمايه داخلي كافي براي تأمين منابع مالي در كشورهاي در حال توسعه، واردات سرمايه به شكل وام، اعتبار و كمك‌هاي بدون عوض از كشورهاي توسعه‌يافته است. بررسي اثر كمك‌هاي خارجي به عنوان يك جريان مالي خارجي بر ارتقاي توسعه اقتصادي كشورهاي در حال توسعه، مي‌تواند به تصميم‌گيري درست براي استفاده بهينه از اين كمك‌ها منجر شود (Emami anad Azadvar, 2014).

در اوائل سال ۱۹۹۱، دولت هند دچار بحراني جدي در اقتصاد خود شد. برنامه هشتم توسعه هند (۱۹۹۲ تا ۱۹۹۶) به نقطه آغاز افزايش نقش بخش خصوصي در اقتصاد هند و بهره‌مندی از سرمايه‌هاي خارجي تبديل‌شد كه در نتيجه آن، كشورهاي خارجي به ويژه امريكا، سرمايه‌گذاري‌هاي فراواني را در اقتصاد هند انجام‌دادند و اين مسئله باعث‌شد كه رشد اقتصادي اين كشور بين سال‌هاي ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۲ سالانه به ۶/۵ درصد و بين سال‌هاي ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ سالانه به ۷/۵ درصد افزايش يابد (Mirzaei and Golestani, 2016).

بر مقايسه‌هاي انجام‌شده در بالا كه بيشتر به صنعت مس دو كشور اشاره دارد، براي اينكه كشور بتواند به اهداف خود در برنامه‌هاي توسعه برسد لازم است اقداماتي انجام دهد كه در ادامه شرح داده مي‌شود.

تدوين سند توسعه صنعت مس

اغلب كشورهاي توسعه‌يافته مانند ژاپن، كره جنوبي و چين داراي اسناد راهبردي بخشي (در بخش‌هاي اولويت‌دار) هستند؛ به طوري كه با توجه به محورهاي مهم سند ملي، سندهاي راهبردي براي بخش‌هاي مختلف اقتصادي تهيه كرده‌اند. بررسي‌ها نشان مي‌دهد كه اسناد بخشي در ايران در مقايسه با هند و برخي كشورهاي توسعه‌يافته منطقه، تنها در برخي صنايع به صورت پيش‌نويس تهيه‌شده است. در اين حوزه‌ها نيز ابهام در سند راهبرد توسعه صنعتي كشور، تهيه اسناد راهبردي بخشي را دشوار كرده است.

در واقع، يكي از ضعف‌هاي جدي برنامه‌هاي توسعه كشور در گذشته (به ويژه برنامه‌هاي اول تا سوم) بي‌توجهي به "راهبرد صنعتي كشور" بوده است. هرچند در اوائل دهه ۱۳۸۰، تلاش‌هاي مهمي در اين زمينه انجام‌شد و در نهايت بعد از برخي اصلاحات در طرح اوليه، سند راهبردي توسعه صنعتي كشور (۱۳۸۵-۱۴۰۴) تصويب و منتشر شد؛ اما اين سند نيز داراي ضعف‌هاي جدي بوده است. انتشار سند راهبردي جديد در حوزه صنعت، معدن و تجارت؛ در حالي است كه تدوين چنين سندي سابقه ۱۵ ساله دارد و هيچ‌يك از اسناد تنظيم‌شده تاكنون به صورت كامل اجرائي نشده است. در آخرين ويرايش سند راهبرد توسعه صنعتي ضمن بررسي وضعيت موجود، چشم‌انداز توليد اين صنايع تا افق ۱۴۰۴ نيز اعلام و با بررسي روند شاخص‌هاي مهم اقتصادي ايران و جهان، وضعيت روند ايران از منظر شاخص‌هاي بين‌المللي نيز بررسي شده است؛ اما با توجه به وجود ضعف‌هاي جدي اين سند، حتي در صورت اجرائي دقيق اين سند نيز نمي‌توان انتظار تحول چشمگير در اقتصاد داشت.

مشارکت شرکت‌های خارجی در اکتشاف و تولید بخش نفت و گاز بوده است؛ اما در سال‌های اخیر با خروج ترامپ از برجام و بازگشت دوباره تحریم‌های ایران، شرکت‌های بزرگی نظیر توتال و بیشتر نشان‌های معتبر دنیا و سرمایه‌گذاران خارجی از ایران خارج شدند و قراردادهای خود با ایران را فسخ کردند.

راه کارهای پیشنهادی توسعه صنعت مس ایران

بر اساس یافته‌های این پژوهش، برای توسعه و تدوین برنامه‌های صنعت مس، دولت و مدیران تصمیم‌ساز ضروری است علاوه بر تمرکززدایی سرمایه‌گذاری در چند استان خاص به موارد مهمی در راستای هدفمند کردن بخش تولید، ایجاد مقررات و قوانین و رفع موانع تولید و سرمایه‌گذاری، راه کارها و تدابیر عملیاتی به شرح زیر پیش‌بینی و اجرا نمایند.

الف) تدوین، تصویب و اجرایی کردن طرح جامع اکتشافات سراسری کشور به عنوان یک سند بالادستی و مهم‌ترین رکن تأمین پایدار مواد معدنی در کمتری زمان ممکن توسط وزارت صمت با همکاری سازمان‌های تابعه از جمله سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و سایر ذی‌نفعان از جمله سازمان نظام مهندسی معدن، خانه معدن و شرکت‌های متخصص غیردولتی با تأکید بر پوشش سراسری و اکتشافات عمیق و تجمیع داده‌های اکتشافی در جهت تسریع در دسترسی به اطلاعات و استفاده بهینه سرمایه‌گذاران و در نهایت الزام کلیه دستگاه‌های فعال در این زمینه اعم از وزارت نفت، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، سازمان انرژی اتمی، سازمان نقشه‌برداری و سایر دستگاه‌ها موظفند اطلاعات تولیدی خود را به طور مستمر در اختیار سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی قرار دهند. سازمان مزبور نیز موظف است پایگاه جامع داده‌های علوم زمین و اطلاعات پایه اکتشافی مزبور را با تلفیق با اطلاعات تولیدی خود توسعه داده و اطلاعات یادشده را طبق آئین‌نامه اجرائی که به تصویب هیئت وزیران می‌رسد، در اختیار کاربران قرار دهد.

یکی از منابع اصلی کمک‌های خارجی هند، اتحاد جماهیر شوروی (روسیه) بوده است که تا سال ۱۹۸۳ حداقل ۱/۵ میلیارد دلار به هند کمک کرده است. کشورهای اروپای شرقی و اروپای غربی نیز به اقتصاد هند کمک کرده‌اند. به عنوان مثال، انگلستان و آلمان نیز روی هم‌رفته بیش از شوروی سابق به هند کمک کرده‌اند. سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی در هند بخش مهمی از منابع مالی برای توسعه اقتصادی را تشکیل می‌دهد. شرکت‌های خارجی در این کشور سرمایه‌گذاری می‌کنند تا از مزایای آن مانند دستمزدهای کمتر و محیط تجاری رو به رشد هند سود ببرند. در سال ۲۰۱۳ هند از لحاظ رتبه جهانی در جذب سرمایه خارجی مقام پانزدهم را داشت که این رتبه در سال ۲۰۱۴ به رتبه نهم و در سال ۲۰۱۵ به رتبه نخست ارتقا یافت. این مسئله تا حد زیادی تحت تأثیر انجام اصلاحات در زمینه قوانین جذب سرمایه خارجی در ۲۵ بخش بود که در چهارچوب ابتکارات حکومت در سال ۲۰۱۴ انجام شد. دسترسی به بازار مصرف، در دسترس بودن منابع انسانی بسیار ماهر، سیاست اقتصادی درست، منابع طبیعی فراوان و متنوع، همگی عواملی هستند که هند را قادر به جذب سرمایه‌گذاری خارجی می‌کند. جریان سرمایه‌گذاری خارجی در هند طی سال‌های پس از آزادسازی اقتصادی رو به افزایش بوده؛ ولی هنوز سهم جهانی از سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی در هند به آن اندازه که همه نیازهای خارجی هند را در مقایسه با دیگر کشورها تأمین کند، نبوده است (Mirzaei and Golestani, 2016).

بر اساس گزارش **آنکد** با عنوان «سرمایه‌گذاری خارجی جهان ۲۰۱۹، میزان سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی در ایران طی سال ۲۰۱۸ به ۳ میلیارد و ۴۸۰ میلیون دلار رسیده است. میزان سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی در ایران در سال ۲۰۱۷ به ۵ میلیارد و ۱۹ میلیون دلار رسیده بود؛ یعنی سرمایه‌گذاری خارجی در ایران در طول سال ۲۰۱۸ نسبت به سال قبل از آن با کاهش ۳۳ درصدی مواجه شده است. میزان جذب سرمایه‌گذاری خارجی ایران در سال ۲۰۱۷ نزدیک به ۵۰ درصد افزایش داشته است که به علت

ب) اختصاص بودجه قابل توجه و مشخص از محل درآمدهاى ايميدرو و شركت‌هاى دولتي تخصصى سودده به عنوان درصدى از سود ساليانه به فعاليت‌هاى اكتشافى و الزام اجراى عمليات اكتشافى در چارچوب طرح جامع اكتشافات سراسرى كشور.

پ) منع دولت از فعاليت‌هاى بنگاه‌دارى و الزام به واگذارى راهبرى معادن و واحدهاى توليدى به بخش خصوصى واجد شرايط و فقط دريافت حقوق دولتي از طريق جذب سرمايه‌هاى بخش خصوصى توانمند و سرمايه‌هاى سرگردان عمومى در چارچوب تكاليف قانونى دولت در اجراى سياست‌هاى كلي اصل ۴۴ با تاسيس شركت‌هاى سهامى عام طرح و ايجاد سازوكار قانونى لازم براى پذيرش در بورس با مشاركت دولت به عنوان مالك پروانه بهره‌بردارى و تأمين مالى به وسيله فروش سهام و در نتيجه آن انتفاع عموم ملت از سرمايه‌گذارى در طرح‌هاى معدن و صنايع معدنى و جلوگيرى از ايجاد رانت.

ت) اصلاح موارد مرتبط با قوانين و مقررات شامل:

ت-۱) حوزه معدن‌كارى از جمله رفع مشكل محدوده‌هاى معدنى بلوكه شده توسط سازمان حفاظت از محيط‌زيست و سازمان انرژى اتمى با ذخاير معدنى قابل توجه.

ت-۲) بخش گمرك از جمله تسريع در ترخيص ماشين‌آلات موردنياز بخش معدن و صنايع معدنى و کاهش كاغذبازى موجود در تعاملات گمرك با بانك مركزى و وزارت صمت و همچنين شفافيت قانون ممنوعيت واردات دستگاه‌ها و ماشين‌آلات داراى توليد مشابه داخل مطابق ماده ۱۰۹ آئين‌نامه اجراى معادن كه عدم شفافيت در اين قانون موجب اخلاف در واردات ماشين‌آلات موردنياز خط توليد خواهد شد و در برخى موارد با وجود نداشتن مشابه داخلى موجود از واردات جلوگيرى مى‌شود.

ت-۳) قوانين حوزه صادرات از جمله وضع عوارض صادراتى محصولات معدن و صنايع معدنى متناسب با جريان عرضه و تقاضاى داخل و خوددارى از ممنوعيت صادرات محصولات داراى ارزش افزوده و همچنين تسهيل شرايط صادرات و قانون بازگشت ارز حاصل از صادرات با توجه به نياز ارزى كشور در

خارج جهت تأمين قطعه‌ها و مواد اوليه.

بنابراين مديران تصميم‌ساز در كشور در جهت رشد صنعت مس، مهم‌ترين اقدامات اجرايى كه مى‌توانند براى تحقق اين اهداف انجام دهند بدين شرح است:

۱) تدوين راهبرد توسعه صنعتى مس در ايران

۲) مستندسازى طرح‌هاى انجام شده در قالب توليد محتوا و ارائه در محافل بين‌المللى، منطقه‌اى و فرامنطقه‌اى با استفاده از ظرفيت‌هاى رسانه‌اى و هنرى

۳) تهيه و تدوين **برنامه تجارى** قبل از آغاز طرح و طرح جديد

براى طراحى برنامه‌هاى کوتاه‌مدت، ميان‌مدت و بلندمدت

۴) تهيه و تدوين **بازاريابى صادراتى** براى ارتقاى ميزان صادرات و شناسايى بازار هدف

۵) تهيه و تدوين **طرح بازاریابی** براى گسترش روش‌هاى فروش و افزايش سهم بازار داخلى و بين‌المللى

۶) طراحى و اجراى طرح ارتقاى بهره‌ورى در شركت صنايع ملى مس ايران

۷) تعامل با شركت‌هاى بين‌المللى در خصوص انتقال دانش فنى از جمله؛ اعزام نيروى كار متخصص و كارشناس به شركت‌هاى بين‌المللى براى كسب دانش و روش‌هاى ارتقاى برنامه‌هاى راهبرى

جمع‌بندى

ايران و هند از نخستين كشورهاى در حال رشد داراى برنامه توسعه هستند. هند در مقايسه با ايران در سال ۲۰۱۸ بين قدرت‌هاى برتر اقتصادى آسيا قرار گرفت. از سوى ديگر با پيشى گرفتن برخى شاخص‌هاى رشد اقتصادى هند از چين، برخى تحليل‌گران معتقدند اين روند ممكن است، تداوم داشته باشد و هند به رشدى مانند چين دست يابد و حتى جايگزين آن شود. بر همين اساس، برنامه‌هاى راهبرى هند در زمينه مس مى‌تواند به تدوين برنامه‌هاى راهبرى در صنعت مس ايران كمك بزرگى بكند. بخش صنايع و معادن ايران از مزيت‌ها و ظرفيت‌هاى نهفته قابل توجه براى كمك

تأمین کانسنگ و کنسانتره برنامه‌ریزی شود. علاوه بر این، باید در این اهداف، نیاز داخلی کشور و توان کشور برای صادرات به علت وجود تحریم‌ها در نظر گرفته شود. به نظر می‌رسد حل مسائلی مانند آسان‌تر شدن واردات ماشین‌آلات معدنی با توجه به وضعیت نابسامان ناوگان حمل‌ونقل کشور، بهینه کردن حقوق دولتی معادن و عدم افزایش غیر منطقی آن، آزادسازی محدوده‌ها، معافیت مالیاتی برای فعالیت‌های اکتشافی، عدم قیمت‌گذاری برای صادرات یا فروش محصولات مس در بورس کالا، حذف و اصلاح قوانین دست‌وپا گیر و توسعه روابط سیاسی می‌تواند آینده صنعت مس را در ایران روشن‌تر کند. موضوع دیگر، سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و خارجی است که در کشورهای در حال توسعه مانند هند یکی از عوامل رشد و توسعه محسوب می‌شود. کشور هندوستان در برنامه هشتم توسعه (۱۹۹۲) به صورت جدی سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و خارجی را وارد صنعت مس کرد؛ در حالی که در ایران هنوز هم این مسئله بسیار دور به نظر می‌رسد. موضوع مهم دیگر در این حوزه در مقایسه با کشور هند در سال‌های اخیر، مشکل کمبود خوراک و کنسانتره بوده که راهبرد کشور هند گسترش معادن موجود، بازگشایی معادن متروکه و اکتشاف معادن جدید و توسعه‌نیافته بوده که در ایران تاکنون این صنعت هنوز راهبرد مشخصی در بخش برنامه‌ریزی و تولید، حتی در معادن دولتی ندارد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

به رشد اقتصادی و ایجاد اشتغال در اقتصاد ایران برخورداری است. با توجه به وجود ذخایر گسترده معدنی و با در نظر گرفتن پیوندهای بسیار قوی و طولانی بین فعالیت‌های معدنی با طیف وسیعی از صنایع و خدمات کشور، توسعه معادن و صنایع معدنی می‌تواند سهم تعیین‌کننده در رشد اقتصادی و ایجاد اشتغال ایفا کند و همان‌طور که در برنامه توسعه ششم و هفتم نیز تأکید شده است، این بخش را به یکی از پیشران‌های اصلی رشد اقتصادی تبدیل کند؛ اما دست‌یابی به رشد اقتصادی بدون برنامه‌ریزی و نقشه راه، امکان‌پذیر نیست. عملیات اکتشافی در بخش عمده‌ای از مساحت کشور هنوز تکمیل نشده است و نیاز به برنامه‌ریزی و گسترش فعالیت‌های اجرایی در این بخش وجود دارد. در بخش بهره‌برداری از ذخایر معدنی نیز در حال حاضر وضعیت مطلوبی در کشور وجود ندارد و تولید فلزهای اساسی از جمله مس و فولاد نسبت به ذخایر معدنی بین ۱ تا ۲ درصد است که کمتر از استانداردهای جهانی است. به طور کلی در مقایسه با کشور هند، چنان‌که بیان شد، مشکلات موجود در برنامه‌های توسعه‌ای کشور، به ویژه در برنامه‌های معدنی را می‌توان به اشکال در اهداف برنامه، نظام برنامه‌ریزی، فرایند تصویب برنامه‌های توسعه‌ای، روند اجرای برنامه‌های توسعه و نحوه نظارت و ارزشیابی برنامه‌ها تقسیم کرد. بررسی‌های انجام‌شده در بخش صنعت مس نیز نشان می‌دهد، در حال حاضر ظرفیت کارخانه‌های تولید کاتد با میزان استخراج معادن منطبق نیست و ماده معدنی استخراجی تقریباً نیمی از ظرفیت کارخانه‌ها را تأمین می‌کند. همچنین لازم است اهداف برنامه‌ها برای تولید مس کاتدی با توجه به ذخایر موجود و توان کشور در

1. Gross Domestic Product
2. Hindustan Copper Limited
3. National Mineral Development Corporation
4. Khetri
5. Koliha
6. Rajasthan
7. Rakha
8. Jharkhand
9. PLATTS
10. Malanjkhand
11. Surda
12. Kendadih

13. Niche Product Segment
14. Glencore
15. China Minmetals Non-Ferrous Metals
16. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)
17. Business Plan
18. export marketing
19. marketing plan

References

- Amin Aghaei, M., 2008. Investigation of factors affecting the performance of small industries from the point of view of rural development experts. *Village and Development*, 11(4): 125–146. Retrieved September 17, 2024 from <https://www.sid.ir/paper/446507/fa>
- Arab Mazar, A. and Noormohammadi, Kh., 2016. The Critical Analysis of Economic Goals of Development Planes in Iran. *Quarterly of Social Studies and Research in Iran*, 5(1): 19–42. <https://doi.org/10.22059/jisr.2016.58374>
- Attar, S., 2016. Development planning requirements according to the experience of Japan, South Korea, China and India (case study of Article (150) of the Fifth Development Plan Law. Parliament Research Center Iran, Tehran, Report 15327. Retrieved September 7, 2024 from <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1011990>
- Azizi, E., 2019. Comparison of political and economic development in Malaysia and India. *Economic magazine*, 19(7– 8): 121–140. Retrieved September 17, 2024 <https://ejip.ir/article-1-1120-fa.html>
- Bazar Noei, M., 2018. The National Copper Company is ready to deal with sanctions. *Mine news*, 44590. Retrieved September 7, 2024 from <https://www.akhbaremadan.ir/news/44590/>
- Emami, K. and Azadvar, N., 2014. Investigating the effect of foreign aid on the growth of per capita income in selected developing countries in Asia and Africa. *Economic Sciences Quarterly*, Tehran, Iran, 2(1):32–43. Retrieved September 7, 2024 from <http://ensani.ir/fa/article/351151>
- Fazeli, M.S., Mohaghegh, B. and Ardabili, O., 2019. Statistical report of copper status in Iran. Iran's National Geoscience Database, Tehran, Iran, Report 1, 23 pp. Retrieved September 7, 2024 from <https://amar.org.ir/Portals/0/Articles/2019/mess2%20.pdf?ver=6gOhOWmPOCr-F1gmSkqtxg%3D%3D>
- Golshani, E., 2015. The plane to produce 700,000 tons of copper cathode wastes national funds. *Online metal magazine*. Retrieved September 10, 2024 from <https://metalonline.ir/metal-news/130693>
- Mirzaei, M.M. and Golestani, A., 2016. Analysis of India's development factors focusing on the role of decision makers. *Foreign Policy Quarterly*, 31(2): 53–80. http://fp.ipisjournals.ir/article_28408.html
- Rajabpour, H., Zakeri, Z. and Momeni, F., 2015. Evaluation of the strategic plan of the Ministry of Industry, Mining and Trade. Parliament Research Center, Iran, Tehran, Report 14653. Retrieved September 7, 2024 from <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/952423>
- Saifori, B. and Taghavi, R., 2018. Pathology of Iran's development programs before and after the revolution and presentation of key strategies. *Journal of The horizons of science*, 2(22): 1–24. Retrieved September 10, 2024 from <https://ensani.ir/fa/article/408708/>
- Urvisha, J., 2019. Indian Copper Industry. CARE's Ratings, PP 1–14. Retrieved September 7, 2024 from <https://www.careratings.com/uploads/newsfiles/Copper%20September%202019%20update.pdf>



RESEARCH ARTICLE

10.22067/econg.2024.1120



Petrogenesis of Intrusive body in Northeast of Joveinan, North of Isfahan, Urumieh- Dokhtar magmatic zone

Shahzad Sherafat ^{1*} , Majid Zeidi ², Mahnaz Khodami ³ ¹ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran² M.Sc., Department of Geology, Faculty of Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran³ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Yazd University, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 17 August 2024
Revised: 06 October 2024
Accepted: 07 October 2024

Keywords

Middle Miocene intrusive body
diorite
calc-alkaline
continental margin arc
Joveinan
Isfahan
Urumieh-Dokhtar Magmatic zone

*Corresponding author

Shahzad Sherafat
✉ sh_sherafat@pnu.ac.ir

ABSTRACT

Middle Miocene igneous rocks are located in the Northeast of Joveinan, the middle part of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt. The igneous rocks have intruded into the Eocene volcano-sedimentary units. The rocks consist of diorite, quartzdiorite, and monzodiorite. They contain plagioclase, hornblende, biotite, pyroxene, orthoclase, quartz, and opaque minerals, and have granular to porphyroid textures. Field and petrographic evidence such as a lack of thermal metamorphism and graphic texture suggests that the rocks crystallized at a shallow depth. The rocks exhibit characteristics of I-type granitoids and a calc-alkaline nature with metaluminous affinities. The enrichment of large ion lithophile elements (LILEs) and the negative anomaly of Ta, Nb, and Ti elements in the primary mantle normalized diagram demonstrate subduction-related magmatism in the continental arc setting. The chondrite normalized pattern of the rocks ($La_n/Yb_n = 3.68-5.64$) suggests a low degree of partial melting and the absence of garnet as a permanent phase in the source region. Based on the petrological data, the parental magma has been produced in the subduction setting of the collisional zone. The primary magma resulting from the partial melting of the subducted lithospheric mantle intruded into the continental crust. The magma underwent numerous changes and evolution during ascent and created the intrusive rocks of Northeast Joveinan.

How to cite this article

Sherafat, S., Zeidi, M. and Khodami, M., 2024. Petrogenesis of Intrusive body in Northeast of Joveinan, North of Isfahan, Urumieh- Dokhtar magmatic zone. *Journal of Economic Geology*, 16(3): 79–100. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2024.1120>



©2024 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

The study area is located 130 km north of Isfahan and 10 km northeast of Joveinan which is a part of the Urumieh-Dokhtar magmatic Belt. The Urumieh-Dokhtar magmatic belt resulted from the subduction of the Neotethys oceanic crust under the Central Iranian continental plate (Agard et al., 2005; Mohajjel and Fergusson, 2014).

The Urumieh-Dokhtar zone experienced severe Tertiary magmatism during the Eocene (Alavi, 2004) that persisted until the Quaternary (Agard et al., 2011). The variations in the composition and origins of the melts at different periods have been demonstrated in previous research (Omran et al., 2008; Chiu et al., 2013; Honarmand et al., 2014). However, no geochemical or petrological data have been reported from the Northeast Joveinan intrusive body. The only available information is derived from investigations carried out during the preparation of the Kashan geological map 1:100000 and Ghohroud geological map 1:25000.

The research on the North Jovian intrusive body provides valuable insights into Cenozoic magmatism and the geology of the middle part of the magmatic belt of Zagros orogeny. This study aims to understand the nature, tectonic setting, origin, and various processes involved in the magmatic evolution of the Northeast Joveinan intrusive rocks.

Material and Methods

After field studies and the sampling of outcrops, 52 microscopic thin sections were prepared and studied using an Olympus polarizing microscope model BX-2. Subsequently, 6 samples with the least amount of alteration were chosen and sent to the ACME Canadian laboratory for ICP-OES inductively coupled plasma emission spectroscopy and ICP-MS inductively coupled plasma mass spectrometry analysis. The data from field, petrographic, and geochemical studies were used for the best conclusion.

Result and Discussion

The main rock units found in the research area include sedimentary rocks belonging to the formations of Niur (Early Silurian), Padeha (Late Devonian), Bahram (Late Devonian), Shotori (Middle Triassic), Shemshak (Jurassic), Cretaceous

carbonate rocks, Eocene volcanic rocks, and Neogene intrusive bodies. The widespread intrusive bodies and Cenozoic volcanic rocks are exposed in the area. Eocene volcanic-sedimentary rocks, including andesitic lavas, hyaloclastite tuffs, and sandy tuffs are the Cenozoic units in the area. In the western part of the area, the Ghohroud batholith, consisting of granite, monzonite, and granodiorite, intruded into the Lower Miocene formations, leading to significant contact metamorphism. North Joveinan post Lower Miocene intrusive body intrudes Eocene volcanic and pyroclastic rocks. These rocks comprise diorite, monzodiorite, and quartzdiorite with granular to porphyroid, poikilitic, and micrographic textures. The marginal parts of intrusive rocks are more microcrystalline and have a porphyroid texture, while the middle parts have a granular, poikilitic, and graphic texture. The main minerals of the rocks include plagioclase, clinopyroxene, hornblende, biotite, opaque minerals, minor quartz, sphene, apatite, and zircon, and secondary minerals including calcite, clay minerals, sericite, and chlorite. The igneous rocks exhibit a composition range of amounts of SiO_2 (53.18-59.46 wt.%), Al_2O_3 (15.27-16.14 wt.%), Na_2O (2.79-5.76 wt.%), K_2O (1.42-2.56 wt.%) and variable concentrations of Fe_2O_3^* (7.61-11.13 wt.%), MgO (2.92-3.87 wt.%), CaO (5.15-7.80 wt.%) and LOI (1.4-2.7 wt.%). Geochemical data show these rocks are mainly calc-alkaline diorite, monzodiorite, and quartzdiorite with metaluminous affinities. The primary mantle normalized pattern shows the enrichment of large ion lithophile elements (LILE) and depletion of high field strength elements (HFSE), which is one of the geochemical characteristics of the magma related to the subduction zone (Kuscu and Geneli, 2010). The chondrite-normalized rare earth elements diagrams show a medium enrichment of LREE compared to HREE, a weak negative anomaly of Europium, and a flat pattern of heavy rare earth elements. The rare earth element (REE) patterns indicate low amounts or absence of garnet in the source (Rollinson, 1993), also the magma could be formed at a depth where the garnet is not stable. Based on the discrimination diagrams, the rocks are formed in a magmatic arc setting. Geochemical data, such as the negative anomaly of Ti, Ta, P, and Nb, and the positive anomaly of Rb, Th, and K, along with the enrichment of LILE and LREE, suggest that the North Joveinan intrusive body is comprised of normal calc-alkaline

I-type granitoids, which are produced in an active continental margin. The samples in various diagrams fall within the range of melts formed from the metasomatized mantle (MM) and continental crust (CC). This suggests that the magma results from a mixture of melts from the mantle and crust or a combination of mafic magma with crustal components. The ratio of mantle to crust in the final magma is approximately 50%.

Conclusion

The North Joveinan intrusive rocks in the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic Belt are formed

due to the subduction of the Neo-Tethys oceanic crust. This causes the release of fluids and melts from the subducted slab into the lithospheric mantle, leading to the melting of the mantle and generating primary mafic magma. The heat needed for partial melting and contamination of crustal rocks is provided with the ascent and placement of basic magma in the lower continental crust. The contamination in the magma reservoir caused the primary magma to change, forming intermediate magma.



پتروژنز توده نفوذی شمال شرق جوینان، شمال اصفهان، پهنه ماگمایی ارومیه دختر

شهزاد شرافت^{۱*}، مجید زیدی^۲، مهناز خدای^۳ ID^۱ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران^۲ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶

واژه‌های کلیدی

توده نفوذی میوسن میانی

دیوریت

کالک آلکالن

کمان حاشیه قاره

جوینان

اصفهان

پهنه ماگمایی ارومیه دختر

نویسنده مسئول

شهزاد شرافت

sh_sherafat@pnu.ac.ir ✉

سنگ‌های آذرین نفوذی میوسن میانی شمال شرق جوینان واقع در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه دختر به درون واحدهای آتشفشانی-رسوبی ائوسن نفوذ کرده‌اند. این سنگ‌ها با طیف ترکیبی دیوریت، کوارتز دیوریت تا مونزودیوریت از کانی‌های پلاژیو کلاز، هورنبلند، بیوتیت، پیروکسن، ارتوکلاز، کوارتز و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند و بافت‌های گرانولار تا پورفیروئیدی را به نمایش می‌گذارند. شواهد صحرایی و داده‌های سنگ‌نگاری نظیر عدم رخداد دگرگونی در سنگ‌های مجاور و وجود بافت گرافیکی بیانگر آن است که سنگ‌های گرانیتوئیدی مورد بررسی در عمق نسبتاً کم متبلور شده‌اند. ماگمای مادر این سنگ‌ها دارای ویژگی‌های گرانیتوئیدهای نوع I و سرشت کالک آلکالن و متالومین است. غنی‌شدگی از عناصر لیتوفیل بزرگ یون LIL همراه با ناهنجاری منفی عناصر Ta، Nb و Ti در نمودارهای بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه، شکل‌گیری ماگما در موقعیت زمین‌ساختی فرورانشی از نوع کمان حاشیه قاره را نشان می‌دهد. شیب الگوی بهنجار شده سنگ‌های مورد بررسی نسبت به کندریت (۵/۶۴- $(La_n/Yb_n=3/68)$)، بیانگر درجه پایین تا متوسط ذوب‌بخشی و نبود گارنت به عنوان فاز ماندگار در خاستگاه است. بر پایه شواهد بیان شده، ماگمای مادر این سنگ‌ها از ذوب‌بخشی پوسته قاره‌ای در نتیجه نفوذ ماگمای حاصل از ذوب گوشته لیتوسفری آلاش یافته در پهنه برخوردی ورقه ایران مرکزی و برهم‌کنش دو ماگما حاصل شده است. ماگمای یادشده حین صعود، دچار تغییر و تحولات متعدد شده و توده نفوذی شمال جوینان را به وجود آورده است.

استناد به این مقاله

شرافت، شهزاد؛ زیدی، مجید و خدای، مهناز، ۱۴۰۳. پتروژنز توده نفوذی شمال شرق جوینان، شمال اصفهان، پهنه ماگمایی ارومیه دختر. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳):

۷۹-۱۰۰. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1120>

مقدمه

منطقه مورد بررسی به مختصات جغرافیایی $51^{\circ} 29'$ تا $51^{\circ} 30'$ طول شرقی و $33^{\circ} 42'$ تا $33^{\circ} 44'$ عرض شمالی در ۱۳۰ کیلومتری شمال اصفهان و ۱۰ کیلومتری شمال شرق جوینان واقع شده است و جزئی از پهنه ماگمایی ارومیه دختر به حساب می آید. این پهنه، بخشی از کوهزاد زاگرس متعلق به کمربند کوهزایی آلپ-همالیاست که در نتیجه فرورائش پوسته اقیانوسی نئوتیس به زیر ورقه قاره‌ای ایران مرکزی در پرموتریاس (Shahabpour, 2007; Agard et al., 2011) یا کرتاسه (Mohajjel and Fergusson, 2000) و برخورد ورقه‌های اوراسیا و عربی در میوسن میانی تا پسین شکل گرفته است (Agard et al., 2005; Mohajjel and Fergusson, 2014).

پهنه ارومیه دختر در سنوزوئیک جولانگاه فعالیت‌های ماگمایی متعدد بوده؛ ولی ماگماتیسیم ترشیری آن بسیار چشمگیرتر است. ماگماتیسیم ترشیری پهنه ارومیه دختر که به دو شکل آتشفشانی و توده‌های نفوذی دیده می‌شود، در ائوسن شدت گرفته (Alavi, 2004) و تا کواترنری ادامه یافته است (Agard et al., 2011). به باور پژوهشگران، ماگماتیسیم سنوزوئیک پهنه ارومیه دختر به سه بخش مجزا شامل رویداد اصلی با سن ائوسن (۴۷ تا ۳۵ میلیون سال پیش)، میوسن پیشین (۲۰ میلیون سال قبل و حاصل عقب‌گرد یا شکست اسلب) و اوج ماگمایی فرعی در میوسن پسین (۱۰ میلیون سال و با ویژگی‌های ماگماتیسیم پس از برخورد) قابل تقسیم است (Babazadeh et al., 2019; Babazadeh et al., 2021). پژوهش‌های انجام‌شده، تفاوت ترکیب و خاستگاه مذاب‌های ماگمایی در ادوار مختلف را نشان داده است (Omrani et al., 2008; Chiu et al., 2013; Honarmand et al., 2014).

در منطقه مورد بررسی نیز در پی رخداد کوهزایی آلپی، سنگ‌های آتشفشانی، نیمه عمیق و نفوذی گوناگونی از ائوسن تا میوسن پدید آمده‌اند. زمین‌شناسی و حوادث زمین‌ساختی این منطقه که در بخش میانی پهنه ارومیه دختر واقع شده، در گذشته توسط پژوهشگران متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌های

انجام‌شده، پیکره گرانودیوریتی قهرود در غرب منطقه را حاصل تبلور ماگمای کالک‌آلکان متالومین در محیط مرتبط با حاشیه فعال قاره‌ای (Khaksar et al., 2022) و جای‌گیری آن را با رخداد دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های دربرگیرنده همراه دانسته‌اند (Sherafat and Mackizadeh, 2017; Rezapour et al., 2017; Tabatabaei Manesh et al., 2018). پژوهشی دیگر بیانگر تعلق سنگ‌های آتشفشانی میوپلیوسن شرق کامو (جنوب محدوده) به سری ماگمایی کالک‌آلکان بوده (Sayari et al., 2014) و سرشت سنگ‌های نیمه عمیق نئوژن کامو را متالومین و کالک‌آلکان و خاستگاه آنها را ذوب‌بخشی گارنت آمفیبولیت در عمق پایداری گارنت می‌داند (Sherafat and Khodami, 2024).

با وجود پژوهش‌های متعدد در منطقه، تاکنون داده‌های زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناختی از توده‌ی نفوذی شمال جوینان ارائه نشده و تنها اطلاعات موجود، حاصل بررسی‌های انجام‌شده در قالب تهیه چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان (Radfar and Alai Mahabadi, 1993) و ۱:۲۵۰۰۰ قهرود (Ghahraie pour and Mohammadiha, 2016) است. با توجه به اهمیت اطلاعات حاصل از بررسی توده‌ی نفوذی یادشده در شناخت و درک بهتر فرایندهای پترولوژیکی سنوزوئیک ایران و تکمیل داده‌های زمین‌شناسی بخش میانی کمربند کوهزایی زاگرس، در این پژوهش سعی شده است با بررسی‌های سنگ‌شناختی و به‌کارگیری داده‌های زمین‌شیمیایی به بررسی ماهیت، جایگاه زمین‌ساختی، خاستگاه و نقش فرایندهای مختلف در تحول و تکامل ماگمایی توده نفوذی این منطقه پرداخته شود.

روش مطالعه

در راستای دستیابی به اهداف پژوهش، پس از بازدید میدانی و پیمایش صحرایی، نمونه‌برداری از برون‌زدهای سنگی انجام و از بین نمونه‌های برداشت شده، ۵۲ مقطع نازک میکروسکوپی تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان المپوس مدل BX-2 مورد بررسی

قرار گرفت. پس از بررسی‌های سنگ نگاری، ۶ نمونه با کمترین میزان دگرسانی انتخاب و برای آنالیزهای زمین شیمیایی به روش طیف سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES و ICP-MS) با حدود آشکارسازی ۰/۰۱ درصد برای عناصر اصلی و ۵-ppm برای عناصر کمیاب به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شد. این پژوهش حاصل تجزیه و تحلیل و تلفیق داده‌های حاصل از بررسی‌های صحرایی، سنگ نگاری و زمین شیمیایی است.

بحث و بررسی

منطقه مورد پژوهش در ۱۳۰ کیلومتری شمال اصفهان و بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه دختر قرار گرفته و دستیابی مستقیم به برون زدهای سنگی آن با استفاده از جاده قدیم اصفهان- میمه- کاشان امکان پذیر است. مهم ترین نمود ساختاری در محدوده، گسل فین با روند شمال غربی- جنوب شرقی است که مرز جدایش کمان ارومیه دختر و مثلث ایران مرکزی را تشکیل داده است و توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک در آرایشی خطی به موازات آن برون زد یافته‌اند (Radfar and Alai, 1993).

محدوده مورد بررسی دربرگیرنده سازندهای پالئوزوئیک تا کواترنر بوده (Ghahraie pour and Mohammadiha, 2016) و واحدهای سنگی رخمون یافته در آن شامل سنگ‌های رسوبی متعلق به سازندهای نیور (سیلورین پیشین)، پادها (دونین پسین)، بهرام (دونین پسین)، شتری (تریاس میانی)، شمشک (ژوراسیک)، سنگ‌های کربناته و تخریبی کرتاسه، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و توده‌های نفوذی نئوژن است. بخش‌های جنوبی منطقه اغلب از نهشته‌های رسوبی دوران اول تشکیل شده است؛ در حالی که ارتفاعات شمالی و غربی منطقه را سنگ‌های آذرین دوران سوم به وجود آورده‌اند. سنگ‌های نه چندان مرتفع بخش میانی محدوده به دوران دوم تعلق دارند. توده نفوذی مورد پژوهش به سن بعد از میوسن زیرین (میوسن میانی) در شمال محدوده و در میان واحدهای آتشفشانی- رسوبی ائوسن رخمون یافته است (شکل ۱).

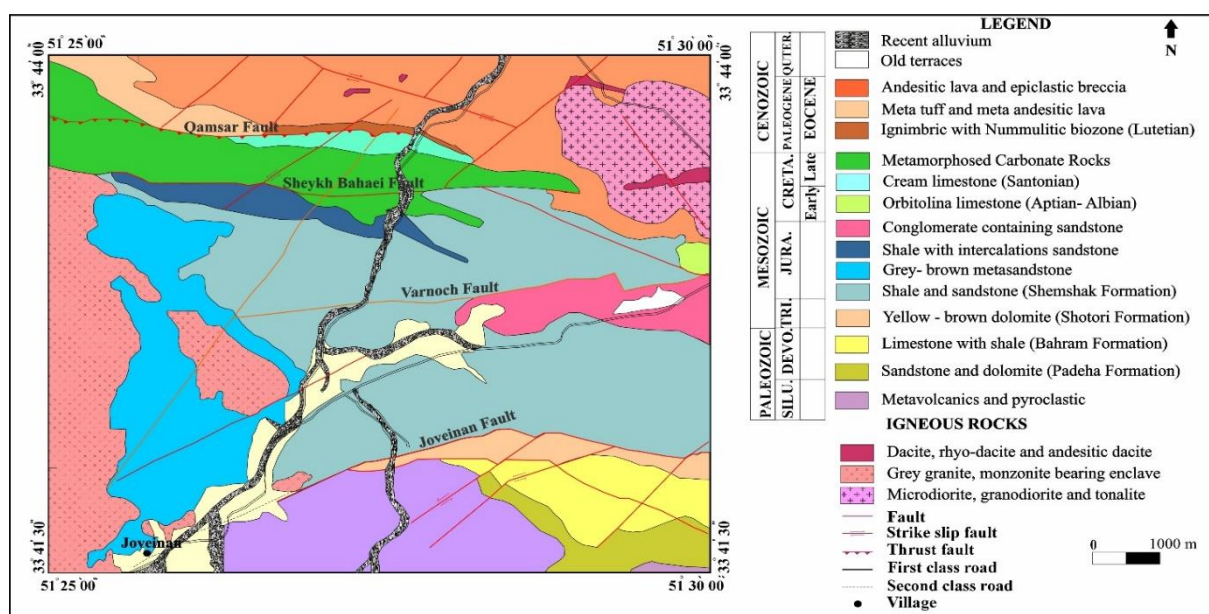
کهن ترین برون زد سنگی منطقه، متاولکانیک‌های سیلورین پیشین (معادل سازند نیور) هستند که در راستای گسل رورانده جوینان رخمون یافته و به گونه‌ای هم شیب توسط شیل ها و دولومیت‌های دونین پسین (سازند پادها) پوشانده می‌شوند. روی این واحد، آهک و آهک‌های دولومیتی سازند بهرام قرار گرفته است. این مجموعه سنگی واقع در جنوب نقشه، هسته طاقدیس بزرگی با روند شمال غربی- جنوب شرقی در شرق دره قهرود- جوینان را تشکیل داده است.

واحدهای سنگ چینه‌ای مزوزوئیک شامل سازندهای هم ارز شتری، شمشک و آهک‌های کرتاسه از گسترش وسیعی برخوردارند. قدیمی‌ترین نهشته‌های مزوزوئیک منطقه را دولومیت‌های ضخیم لایه تریاس میانی (معادل سازند شتری) تشکیل داده است. روی این نهشته‌ها را واحدهای سنگی ژوراسیک (معادل شمشک) شامل تناوبی از سیلستون، ماسه سنگ و شیل زغال دار همراه با میان لایه‌های آهکی- شیلی می‌پوشاند. واحدهای کرتاسه شامل ردیفی از سنگ‌های آواری- کربناتی هستند که به صورت گسله یا ناهمساز بر روی رسوبات سازند شمشک واقع شده‌اند. این واحدهای سنگی با ماسه سنگ و میکرو کنگلومرای قرمز شروع و با آهک‌های اربیتولین دار کرتاسه زیرین (به سن آلبین- آپسین) ادامه می‌یابند. خاتمه بخش رسوب‌های کرتاسه، آهک‌های متوسط تا نازک لایه به سن سانتونین است.

گستره وسیعی از منطقه مورد بررسی را توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک پوشانده است. بیشتر واحدهای سنوزوئیک را سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی ائوسن تشکیل داده‌اند که لایه‌بندی کاملاً واضحی در بخش رسوبی و آذرآواری آن دیده می‌شود. فراوان ترین رخمون سنگی ائوسن به شکل گدازه‌های آندزیتی، توف‌های هیالوکلاستیت و توف‌های ماسه‌ای است که به طور دگرشیب بر روی آهک‌های کرتاسه جای گرفته است. توده باتولیتی قهرود و زبانه‌های آن با گسترش در خور توجه، بخش غربی نقشه را پوشانده است.

سنگ‌های آتشفشانی- پیروکلاستیک ائوسن و در شمال شرق جوینان جای گرفته است. جوان ترین واحد سنگی منطقه شامل پادگانه‌های آبرفتی، رودخانه‌ای قدیمی و مخروط افکنه‌های کواترنری است که به ویژه در بخش میانی منطقه دیده می‌شوند.

این توده با لیتولوژی گرانیت، مونزونیت و گرانودیوریتی، نهشته‌های کهن تا میوسن زیرین را گسسته و باعث رخداد دگرگونی مجاورتی پیرامون خود شده است. توده نفوذی موضوع این پژوهش به سن بعد از میوسن زیرین با ترکیب دیوریت، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت در میان



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده شمال شرق جوینان برگرفته از چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰ قهرود (Ghahraie pour and Mohammadiha, 2016)

Fig. 1. Simplified geological map of the northeast of Joveinan taken from 1:25000 Ghohroud Geological Quadrangle, (Ghahraie pour and Mohammadiha, 2016)

نیز در برخی نمونه‌ها قابل رؤیت است. بخش‌های حاشیه‌ای توده، ریزبلورتر و دارای بافت پورفیروئیدی هستند؛ در حالی که بخش‌های میانی بافت دانه‌ای، پوئی کلتیک و گرافیکی دارند (شکل ۲- A و B).

بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌های اصلی این توده شامل پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، اندکی کلینوپیروکسن، ارتوز، کمی کوارتز و کانی‌های فرعی آن شامل کانی‌های کدر، تیتانیت، آپاتیت و زیرکن است. اورالیت (ترمولیت و اکتیونت)، کلسیت، کانی‌های رسی، سریسیست و کلریت از کانی‌های ثانویه سنگ هستند.

توده نفوذی شمال شرق جوینان هم بعددانه تا ناهم بعددانه بوده و در رخنمون صحرایی به رنگ خاکستری روشن تا تیره و در برخی موارد به علت رخداد دگرسانی کلریتی به رنگ سبز دیده می‌شود. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، انواع سنگ‌های دیوریت، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت در این توده قابل تشخیص هستند. این سنگ‌ها در نمونه دستی متراکم بوده و بلورهای درشت آن با چشم غیر مسلح قابل رؤیت هستند. روابط صحرایی تأثیر حرارتی خاصی از توده‌های نفوذی در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی مجاور نشان نمی‌دهد. این سنگ‌ها بافت گرانولار تا پورفیروئیدی را به نمایش می‌گذارند و بافت‌های پوئی کلتیک و میکرو گرافیکی

دیوریت: فراوانترین کانی در سنگ‌های دیوریتی مورد بررسی، پلاژیوکلاز است که مقدار آن گاهی تا ۴۵ درصد حجمی سنگ می‌رسد. این کانی اغلب خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار و دارای ماکل تکراری و به ندرت ساختار منطقه‌ای است. اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در سنگ متغیر بوده و هم به شکل بلورهای درشت (اندازه بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر) و هم بلورهای کوچک (اندازه ۰/۵ تا ۰/۱ میلی‌متر) دیده می‌شود. حضور بلورهای ریز پلاژیوکلاز درون پلاژیوکلازهای بزرگ‌تر بیانگر حضور دو نسل مختلف پلاژیوکلاز در سنگ‌های نفوذی منطقه بوده و شرایط آشفته مخزن ماگمایی و عدم پایداری آن طی تشکیل پلاژیوکلازها را نشان می‌دهد (شکل ۲-C). وجود میان‌بارهایی از کانی آمفیبول داخل برخی پلاژیوکلازها به تشکیل بافت پوئی‌کلیتیک منجر شده است. در برخی موارد بلورهای پلاژیوکلاز به طور کامل یا بخشی به مجموعه‌ای از کلسیت، کلریت، اپیدوت و آلبیت تجزیه شده‌اند.

کلینوپروکسن (تا ۱۰ درصد حجمی) به صورت بلورهای خودشکل تا نیمه‌شکل‌دار با اندازه تا ۱ میلی‌متر به ویژه در دیوریت‌ها دیده می‌شود. برخی از بلورهای پروکسن دارای ماکل رگه‌ای یا کارلسباد بوده و گاهی اجتماعی از بلورهای پروکسن در سنگ دیده می‌شود (شکل ۲-D).

بلورهای نیمه‌شکل‌دار و سبز رنگ آمفیبول با فراوانی تا ۱۵ درصد حجمی در سنگ دیده شده و حضور آمفیبول داخل پلاژیوکلاز به شکل ادخال بیانگر تشکیل این کانی قبل از پلاژیوکلاز است (شکل ۲-E).

بیوتیت‌های نیمه‌شکل‌دار با چندرنگی زرد-قهوه‌ای با حجم کمتر از ۵ درصد، فراوانی کمتری نسبت به هورنبلند دارند.

کوارتز دیوریت: بخش کوارتز دیوریتی از کانی‌های پلاژیوکلاز (با فراوانی تا ۴۰ درصد حجمی)، آمفیبول (تا ۲۰ درصد حجمی)، بیوتیت (تا ۱۵ درصد حجمی) و کوارتز (تا ۱۵ درصد) تشکیل شده است. کوارتز اغلب به صورت بلورهای ریزدانه و نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل دیده شده است و فضای خالی بین سایر کانی‌ها را پر

می‌کند (کوارتز بین روزنه‌ای). تشکیل کوارتز در آخرین مرحله تبلور ماگما اتفاق افتاده و در برخی موارد هم‌رشدی آن با فلدسپات، به تشکیل بافت گرافیکی منجر شده است (شکل ۲-F). این بافت نشان‌دهنده تبلور سریع و هم‌زمان دو کانی از مذاب باقی‌مانده در اعماق کم است (Clarke, 1992).

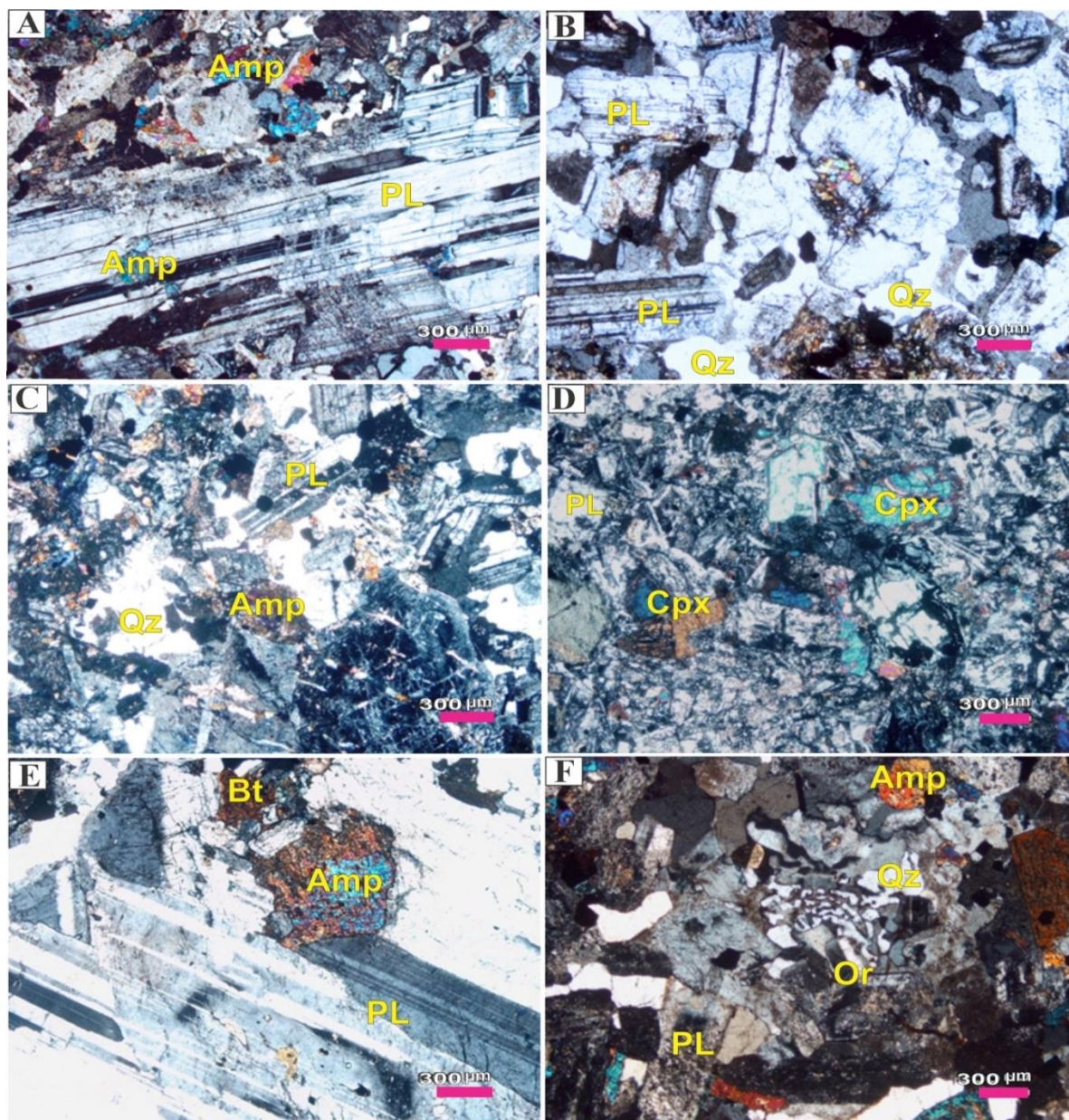
مونزودیوریت: کانی‌های اصلی بخش مونزودیوریتی شامل پلاژیوکلاز (با فراوانی تا ۳۵ درصد حجمی)، آمفیبول (تا ۲۰ درصد حجمی)، بیوتیت (تا ۱۵ درصد حجمی)، ارتوز (تا ۲۰ درصد حجمی) و کوارتز (تا ۵ درصد) است. ارتوز اغلب به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار متوسط‌دانه دیده شده و در نتیجه دگرسانی به کائولینیت تجزیه شده است.

کانی کلریت اغلب به صورت پراکنده یا جانشینی کانی‌های اولیه قابل رؤیت است. این کانی در نتیجه دگرسانی کانی‌های آهن منیزیم‌دار یا به واسطه ورود آهن و منیزیم به سنگ توسط محلول‌های گرمابی و یا وقوع این دو پدیده با هم در سنگ تشکیل می‌شود (Evans, 1992).

با توجه به جزئیات سنگ‌نگاری نظیر طیف ترکیبی سنگ‌شناسی (دیوریت، مونزودیوریت و کوارتز دیوریت)، حضور کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، پروکسن، تیتانیت و مگنتیت و نبود کانی‌های مسکویت و دیگر کانی‌های آلومینوسیلیکاته در توده نفوذی شمال شرق جویان، می‌توان این توده را از دسته گرانیتوئیدهای نوع I دانست.

زمین‌شیمی

در جدول ۱، نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های شمال جویان به روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی آورده شده است. گستره محدود تغییرات SiO_2 (۵۳/۱۸ تا ۵۹/۴۶ درصد وزنی) این سنگ‌ها، سرشت حدواسط آنها را نشان می‌دهد. درصد وزنی Na_2O و K_2O سنگ‌های مورد بررسی به ترتیب از ۲/۸۱ تا ۵/۷۶ و ۱/۴۲ تا ۲/۵۶ درصد وزنی تغییر می‌کند.



شکل ۲. تصویرهای میکروسکوپی سنگ‌های آتشفشانی شمال شرق جوینان در نور قطبیده متقاطع. A: بافت پورفیروئیدی در سنگ‌های دیوریتی حاشیه توده، B: بافت گرانولار در سنگ‌های مونزودیوریتی بخش مرکزی توده، C: حضور دو نسل پلاژیوکلاز در کوارتز دیوریت ها، D: تجمع بلورهای پیروکسن در دیوریت‌ها، E: ادخال آمفیبول داخل پلاژیوکلاز و F: رشد درهم کوارتز با فلدسپات و تشکیل بافت گرافیکی در مونزودیوریت‌ها. علائم اختصاری از ویتنی و ایوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cpx: کلینوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Or: ارتوکلاز، Amp: آمفیبول، Bt: بیوتیت، Qz: کوارتز).

Fig. 2. Microphotographs of the plutonic rocks in the northeast of Joveinan in crossed polarized light. A: Porphyroclastic texture in diorites, B: Granular texture in monzodioritic rocks, C: Two generation of plagioclase in quartz diorite, D: Pyroxene accumulation in diorites, E: Amphibole inclusion in plagioclase, and F: Intergrowth of quartz with feldspar and graphite texture in monzodioritic rocks. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cpx: Clinopyroxene, Pl: Plagioclase, Or: Orthoclase, Amp: Amphibole, Bt: Biotite, Qz: Quartz).

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل توده نفوذی شمال شرق جوینان با روش ICP-OES و ICP-MS (مقادیر اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm است).

Table 1. Whole rock chemical analysis results of the northeast of Joveinan intrusive rocks using the ICP-MS and the ICP-OES method (major elements in Wt.% and trace elements in ppm).

	6-1	7-1	9-1	6-5	7-4	8-2
SiO₂	59.25	56.44	56.93	59.46	53.18	57.60
TiO₂	0.84	0.98	0.88	0.85	1.38	0.83
Al₂O₃	15.54	15.85	15.57	15.65	15.27	16.14
Fe₂O₃*	7.93	8.70	7.61	7.96	11.13	7.82
MnO	0.16	0.17	0.12	0.15	0.19	0.15
MgO	2.93	3.36	2.73	2.92	3.87	3.69
CaO	6.12	6.85	7.80	5.94	5.15	6.03
Na₂O	2.81	3.03	3.24	2.79	5.76	3.46
K₂O	2.56	1.93	1.98	2.26	1.42	1.87
P₂O₅	0.17	0.19	0.17	0.17	0.30	0.15
LOI	1.4	2.3	2.7	1.6	2.1	2.0
Total	99.81	99.82	99.81	99.81	99.78	99.82
Ni	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Co	18.8	21.3	16.8	19.3	25.5	20.2
Sc	21	25	21	21	33	23
V	160	207	181	165	338	179
Sn	2	2	<1	2	<1	1
W	1.4	0.8	1.1	1.3	<0.5	1.1
Rb	80.9	55.9	56.8	73.4	24.5	55.5
Cs	1.5	1.8	1.3	3.2	1.0	2.2
Ba	535	445	410	527	448	385
Sr	263.4	248.9	328.4	279.0	222.0	246.4
Ga	14.9	15.7	15.7	14.8	17.0	14.8
Ta	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4	0.7
Nb	10.4	9.4	9.1	10.2	6.1	7.9
Hf	5.8	5.1	5.0	4.7	3.1	4.3
Zr	206.7	190.7	191.4	194.8	121.3	165.6
Y	29.1	28.9	29.0	28.9	29.9	24.7
Th	9.1	6.3	8.6	10.8	2.6	7.5

ادامه جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل توده نفوذی شمال شرق جوینان با روش ICP-OES و ICP-MS (مقادیر اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر کمیاب بر حسب ppm است).

Table 1 (Continued). Whole rock chemical analysis results of the northeast of Joveinan intrusive rocks using the ICP-MS and the ICP-OES method (major elements in Wt.% and trace elements in ppm).

	6-1	7-1	9-1	6-5	7-4	8-2
U	3.4	2.0	2.8	3.7	0.7	2.6
La	17.8	22.4	25.2	25.0	17.9	21.4
Ce	35.9	45.5	49.8	49.7	38.4	42.4
Pr	4.43	5.37	5.59	5.51	4.65	4.78
Nd	18.6	21.7	23.5	23.0	19.9	19.6
Sm	4.66	4.78	4.78	4.88	4.70	4.27
Eu	1.05	1.11	1.13	1.09	1.53	1.00
Gd	5.09	5.13	4.85	4.99	5.23	4.45
Tb	0.87	0.84	0.80	0.83	0.88	0.73
Dy	5.17	5.20	4.91	4.84	5.12	4.20
Ho	1.16	1.11	1.05	1.06	1.17	0.95
Er	3.38	3.14	2.92	3.17	3.31	2.89
Tm	0.48	0.45	0.42	0.44	0.47	0.40
Yb	3.17	3.02	2.98	2.97	3.24	2.82
Lu	0.49	0.46	0.44	0.48	0.50	0.41
La _n /Yb _n	3.74	4.94	5.64	5.61	3.68	5.06
Gd _n /Yb _n	1.28	1.35	1.30	1.39	1.29	1.34
Gd _n /Yb _n	0.66	0.69	0.72	0.68	0.95	0.71
Dy _n /Yb _n	1.05	1.10	1.06	1.05	1.01	0.95

(1982)، دارای سرشت کالک آلکان هستند (شکل ۳-D). پایین بودن نسبت مولی A/CNK (زیر عدد یک) سنگ‌های مورد بررسی نیز تشابه آنها با گرانیتوئیدهای نوع I را نشان می‌دهد (Clarke, 1981).

در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)، سنگ‌های مورد بررسی از عناصر لیتوفیل درشت یون همانند Cs، K، Sr و Ba غنی شدگی و از عناصر با شدت میدان بالا مانند Nb، Ti و P تهی شدگی نشان می‌دهند (شکل ۴-A). ویژگی یادشده از ویژگی‌های زمین شیمیایی

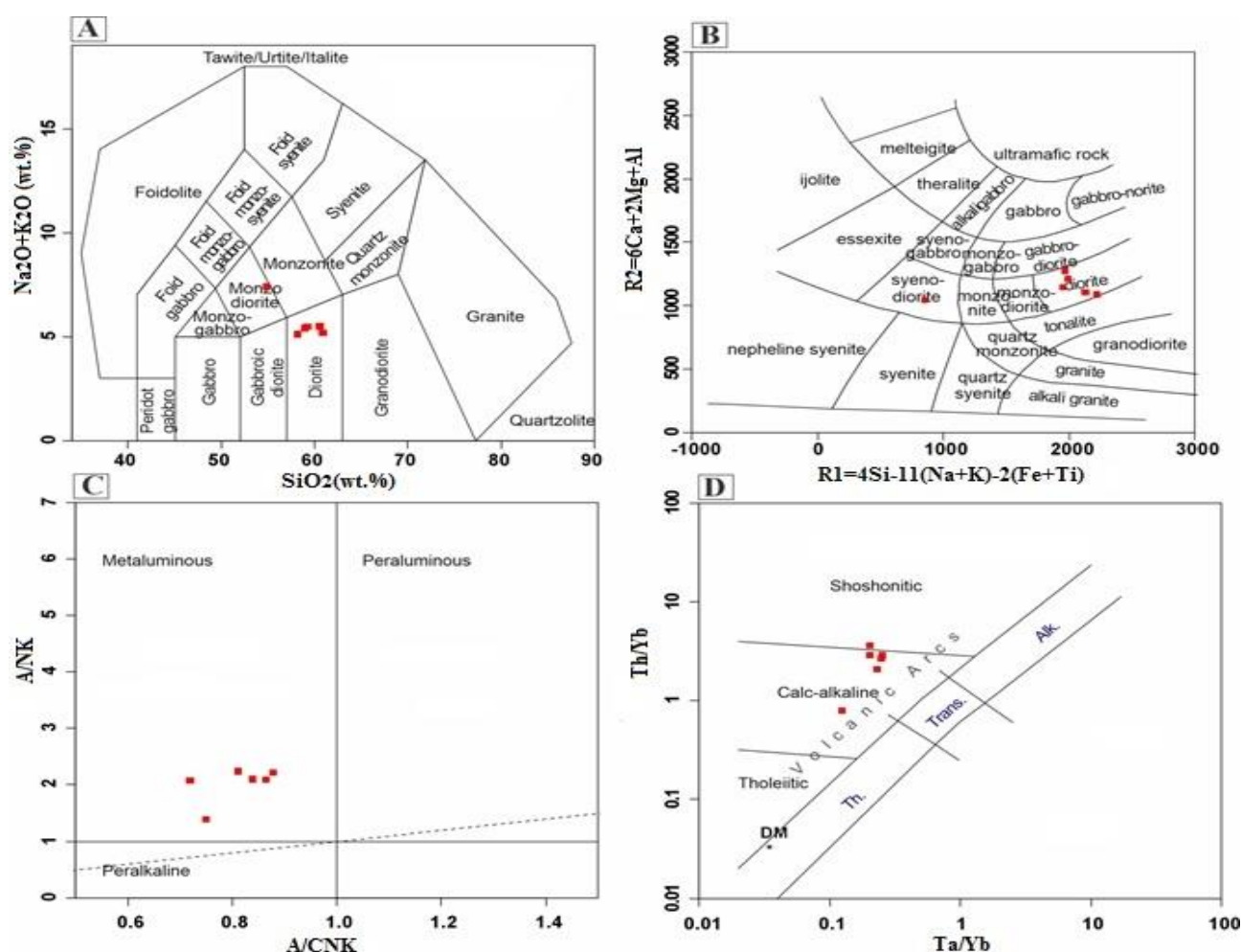
با توجه به محدوده تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی، سنگ‌های مورد بررسی اغلب از نوع دیوریت، مونزوادیوریت و کوآرتزادیوریت هستند.

سنگ‌های مورد بررسی در نمودار رده‌بندی قلیایی‌ها در برابر سیلیس (Middlemost, 1994) و نمودار پیشنهادی دلاروش و همکاران (De La Roche et al., 1980) در گستره ترکیبی دیوریت و مونزو- سینودیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۳-A و B). این سنگ‌ها از نظر شاخص اشباع شدگی از آلومینیوم، متالومین (شکل ۳-C) و بر پایه نمودارهای پیشنهادی پیرس (Pearce,

نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ سنگ‌های تشکیل دهنده توده نفوذی شمال جوینان بالا و از ۱ تا ۴/۰۵ متغیر است. این سنگ‌ها در نمودار Na_2O نسبت به K_2O در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I قرار می‌گیرند (شکل ۵-۱). سنگ‌های مورد بررسی در نمودارهای Rb در مقابل Y و Rb در برابر Th نیز روندی مشابه با گرانیتوئیدهای نوع I را به نمایش می‌گذارند (شکل ۵-۲ و ۵-۳).

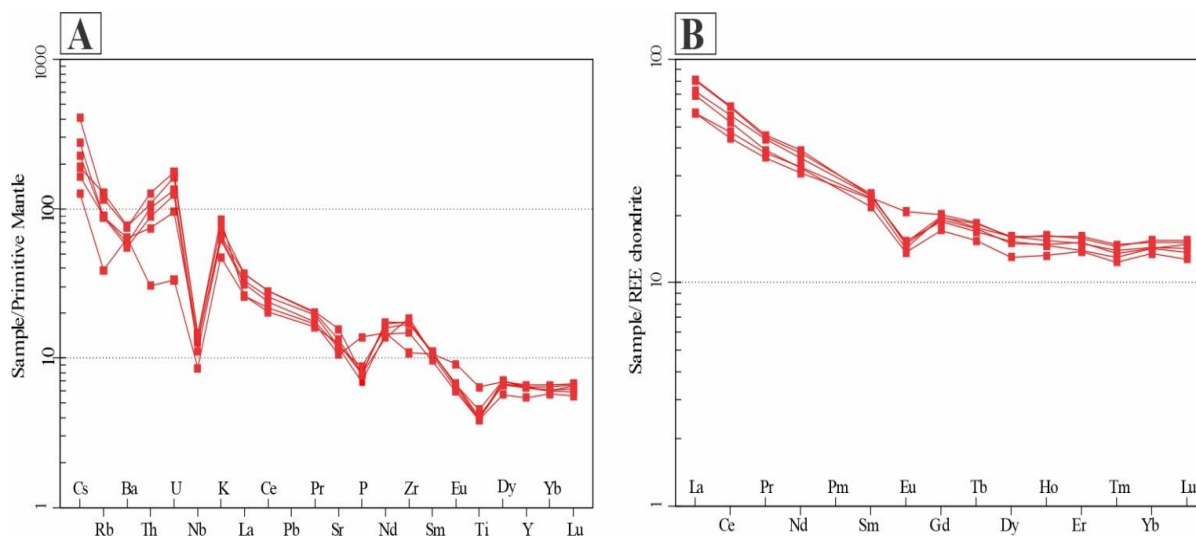
ماگماهای تشکیل شده در پهنه‌های فرورانشی است (Kuscu and Geneli, 2010).

در نمودار پهنجارشده نسبت به عناصر نادر خاکی کندریت (Nakamura, 1974)، تمام نمونه‌ها روندی شیب‌دار با غنی‌شدگی متوسط LREE نسبت به HREE و الگوی مسطح در عناصر نادر خاکی سنگین با بی‌هنجاری منفی ضعیف یورپوم را به نمایش می‌گذارند (شکل ۴-۲).



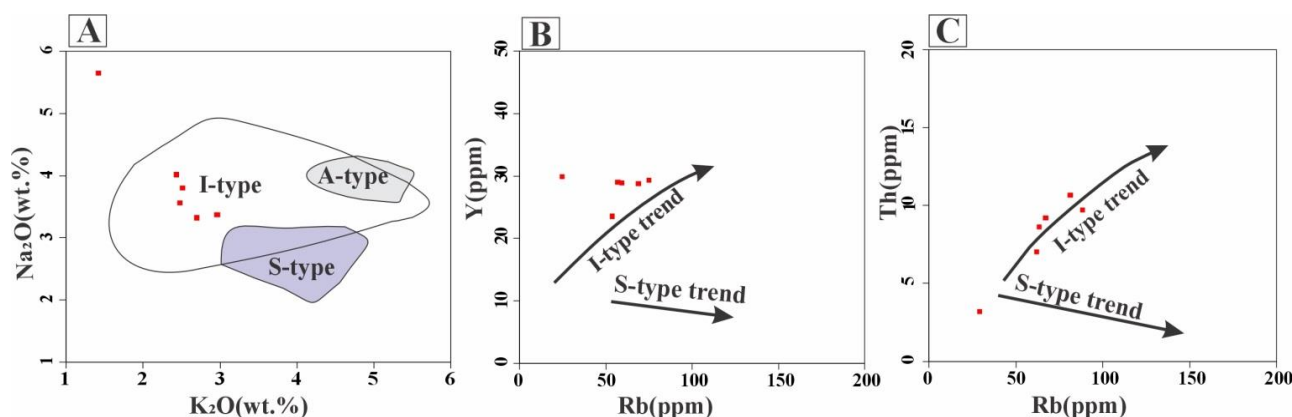
شکل ۳. طبقه‌بندی و سرشت ماگمایی سنگ‌های نفوذی شمال شرق جوینان. A: نمودار مجموع آلکالی به سیلیس (Middlemost, 1994)، B: نمودار رده‌بندی بر اساس R1-R2 (De La Roche et al., 1980)، C: نمودار A/NK در مقابل A/CNK (Shand, 1943) و D: نمودار نسبت Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 1982).

Fig. 3. Classification and magmatic affinity of the northeast Joveinan intrusive rocks, A: Total Alkalis versus Silica diagram (Middlemost, 1994), B: R1-R2 classification diagram (De La Roche et al., 1980), C: A/NK versus A/CNK diagram (Shand, 1943), and D: Th/Yb versus Ta/Yb diagram (Pearce, 1982).



شکل ۴. A: نمودار عنکبوتی سنگ‌های منطقه شمال شرق جوینان که نسبت به گوشته اولیه عادی سازی شده‌اند (Sun and McDonough, 1989) و B: نمودار عادی سازی شده عناصر نادر نمونه‌ها نسبت به کندریت (Nakamura, 1974)

Fig. 4. A: Spider diagram of northeast Joveinan intrusive rocks normalized by primitive mantle (Sun and McDonough, 1989), and B: Chondrite normalized diagram for the samples (Nakamura, 1974)



شکل ۵. موقعیت نمونه‌های شمال شرق جوینان در نمودارهای تشخیصی گرانیتوئیدها. A: نمودار Na_2O در مقابل K_2O (White and Chappell, 1983) محدوده‌های I، S و A-گرانیت از کریستیانسن و کیت (Christiansen and Keith, 1996) اقتباس شده است، B: نمودار Rb در برابر Y و C: نمودار Rb در مقابل Th، روند گرانیتوئیدهای نوع I و S از لیو و همکاران (Liu et al., 2009)

Fig. 5. Position of northeast Joveinan intrusive rocks in granitoids discrimination diagrams, A: Na_2O versus K_2O diagram (White and Chappell, 1983; I-, S- and I-type granitoids are from Christiansen and Keith (1996), B: Rb versus Y diagram, and C: Rb versus Th diagram (I and S granitoid trends from Liu et al., 2009)

نتیجه گیری

توده نفوذی شمال شرق جوینان از دیوریت، کوارتز دیوریت و

بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و زمین‌شیمی نشان می‌دهد که مونزودیوریت تشکیل شده است و ماهیت کالک‌آلکان و

نسبت به عناصر نادر خاکی کندریت، نبود گارنت در تفاله و عدم جدایش HREE (Rollinson, 1993) و تشکیل ماگما در عمق کمتر از گستره پایداری گارنت یا کم بودن مقدار آن در خاستگاه را نشان می‌دهد. ناهنجاری منفی یوروپیوم در نمودار یادشده با حضور مقادیر کم پلاژیوکلاز در خاستگاه یا درگیر نشدن آن در فرایند ذوب (Arslan and Aslan, 2006) و نیز جدایش پلاژیوکلاز طی تبلور تفریقی در شرایط ماگمایی فوگاسیته بالای اکسیژن (آلودگی کمتر با پوسته قاره‌ای) قابل توجیه است (Tepper et al., 1993). همراهی ناهنجاری منفی یوروپیوم با تهی‌شدگی نسبی استرانسیوم در سنگ‌های مورد بررسی می‌تواند بیانگر این واقعیت باشد که پلاژیوکلاز فاز پایدار در خاستگاه یا فاز اصلی حین جدایش بلورین یا تغییر فوگاسیته اکسیژن بوده است (Rollinson, 1993; White, 2005).

همانگونه که پیشتر گفته شد داده‌های ژئوشیمیایی نظیر ناهنجاری منفی Nb و Ti، Ta، P و مثبت Rb، Th و K همراه با غنی‌شدگی از LILE و LREE بیانگر آن است که توده نفوذی شمال جوینان از نوع کالک‌آلکالن عادی مناطق فرورانشی (و با توجه به مقادیر $Yb > 1.9\text{ppm}$ ، $Y > 18\text{ppm}$ ، $Sr < 40\text{ppm}$ بدون ماهیت آداکتی) و مرتبط با حاشیه فعال قاره‌ای با ویژگی‌های مشابه گرانیتوئیدهای نوع I است. ماگماهای نوع I می‌توانند از ذوب بخشی سنگ‌های بازیک تا حدواسط پوسته (Chappell and White, 1974)، اختلاط مذاب‌های مشتق از گوشته با مذاب‌های ناشی از مواد پوسته‌ای (Fang et al., 2017) و هضم یا آلیش با مواد پوسته‌ای (Cobbing, 2000) حاصل شده و تنوع ترکیب سنگ‌شناختی آنها افزون بر تبلور تفریقی، به اختلاط ماگمایی، جدایش مذاب از سنگ مادر، هضم سنگ‌های دیواره و مخلوطی از سازوکارهای یادشده نسبت داده می‌شود (Chappell, 1996). ترکیب حدواسط توده نفوذی شمال شرق جوینان، می‌تواند بیانگر نشأت گرفتن ماگمای مولد آن از تبلور بخشی ماگمای مافیک مشتق از گوشته باشد (Straub et al., 2011).

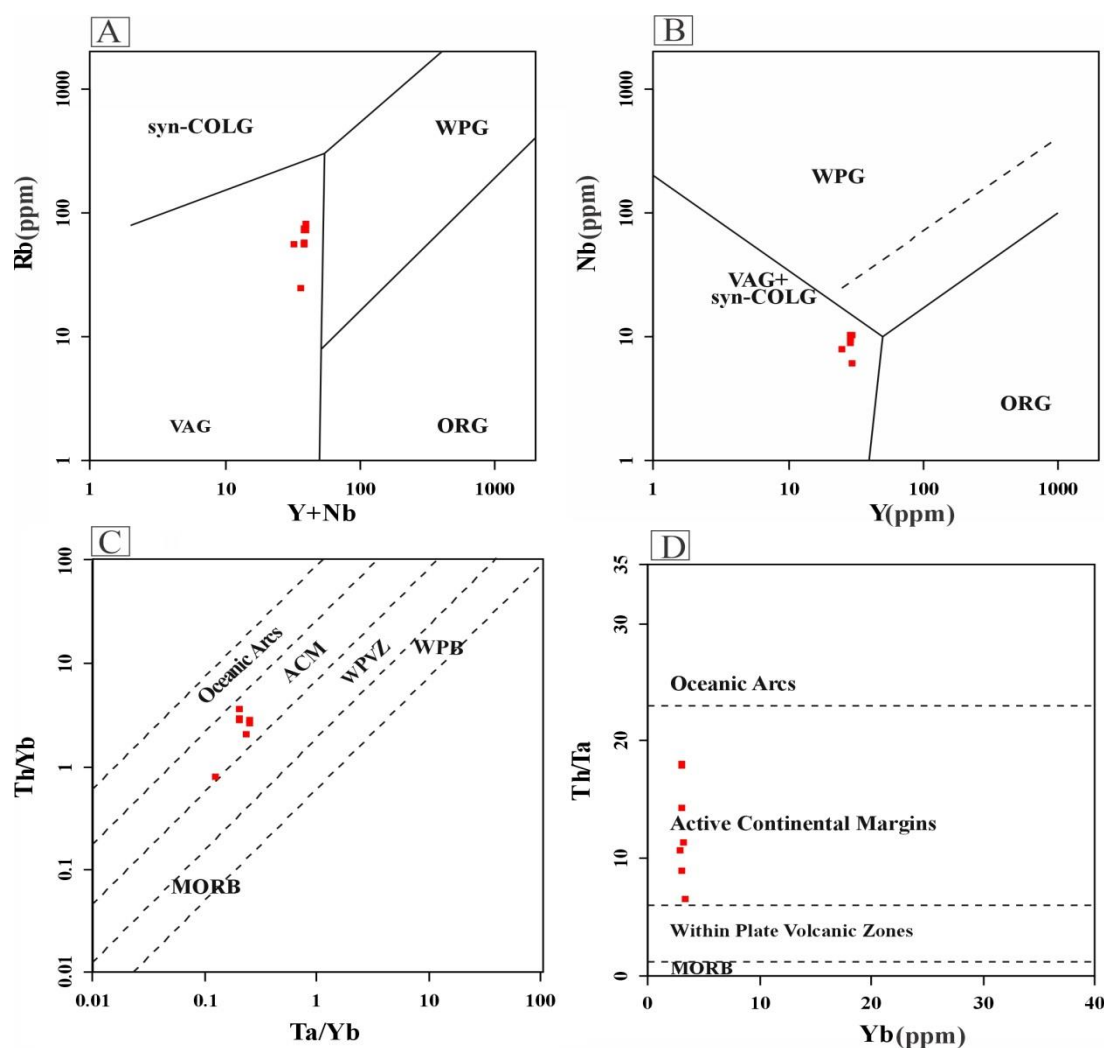
به منظور تفسیر جایگاه زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین حدواسط

متآلومین دارد. این توده دارای ویژگی‌های گرانیتوئیدهای نوع I بوده و علاوه بر نمودارهای تکتونوماگمایی، وجود شواهدی نظیر غنی‌شدگی از LILE و LREE و تهی‌شدگی از HFSE و HREE بر تکوین ماگماتیسیم در یک محیط فرورانشی از نوع کمان قاره‌ای دلالت دارد.

از آنجایی که غلظت عناصر HFS توسط شیمی خاستگاه و فرایندهای بلور/مذاب در طول تشکیل سنگ کنترل می‌شود (Rollinson, 1993)، تهی‌شدگی این عناصر به ویژه Nb و Ti با پایداری برخی کانی‌های دیرگداز (نظیر اسفن، روتیل، تیتانومگنیت هورنبلند، اسفن و ایلمنیت) در خاستگاه مرتبط بوده (Keppler, 1996) و عدم مشارکت کانی‌های یادشده در فرایند ذوب بخشی، تهی‌شدگی این عناصر در مذاب‌های مناطق فرورانشی و کمان‌های آتشفشانی را به دنبال خواهد داشت (Pearce and Peate, 1995). غنی‌شدگی عناصر LIL اغلب حاصل درجه‌های پایین تا متوسط ذوب بخشی خاستگاه گوشته‌ای، ذوب گوشته دگر نهاد شده و جابه‌جایی توسط سیالات و تحرک حین دگرسانی است؛ زیرا فرایندهای آب‌زدایی در مناطق فرورانشی، این عناصر را از ورقه فرورانده به گوشته بالایی منتقل می‌کنند. بالاتر بودن مقادیر عناصر K، Rb، Th نسبت به عناصر Sr، Ti و P در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه می‌تواند به دلیل آلیش پوسته‌ای طی تحولات ماگمایی باشد. بی‌هنجاری مثبت U و Th نیز به افزوده شدن رسوب‌های پلاژیوک و پوسته اقیانوسی دگرسان به خاستگاه یا آلیش پوسته‌ای نسبت داده شده است (Fan et al., 2003; Kuscu and Geneli, 2010). غنی‌شدگی از عناصر LIL و تهی‌شدگی از عناصر HFS همراه با افزایش نسبت LILE/HFSE از آلیش با مواد پوسته‌ای نیز حاصل می‌شود (Wang et al., 2013). ناهنجاری منفی فسفر توده نفوذی در نمودار بهنجار شده نسبت به گوشته اولیه می‌تواند به سبب جدایش آپاتیت از ماگما باشد (Wu et al., 2003). غنی‌شدگی متوسط LREE نسبت به HREE همراه با بی‌هنجاری منفی ضعیف یوروپیوم در نمودار عادی سازی شده سنگ‌های شمال شرق جوینان

می گیرند (شکل ۶- A و B). نمودارهای Th/Yb در برابر Ta/Yb نیز (Schandl and Gorton, 2002) Yb به نسبت Th/Ta موقعیت حاشیه فعال قاره را برای سنگ های مورد بررسی نشان می دهند (شکل ۶- C و D).

شمال شرق جوینان، از نمودارهای تکتونوماگمایی متنوعی استفاده شده است. در این میان نمودارهایی که در ساختار آنها از عناصر کم تحرک Th ، Yb ، Nb و Ta استفاده شده است، ارزش بیشتری دارند. سنگ های مورد بررسی در نمودارهای پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984) در موقعیت کمان ماگمایی قرار



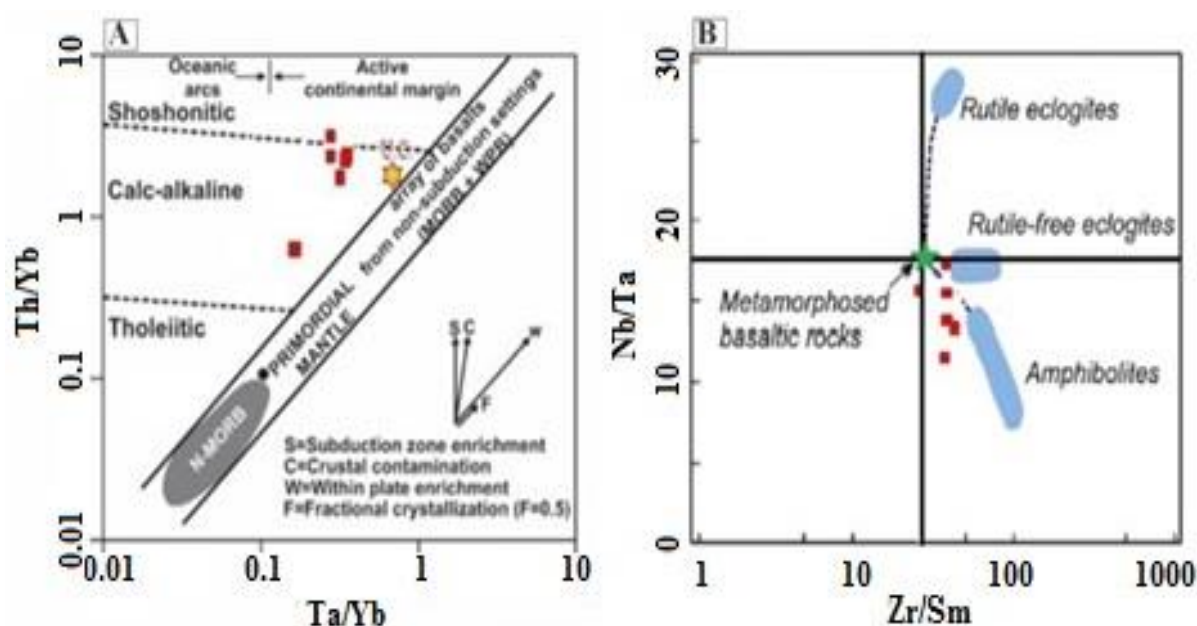
شکل ۶. A و B: موقعیت زمین ساختی سنگ های نفوذی شمال شرق جوینان در نمودارهای پیشنهادی پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، C: نمونه ها در نمودار نسبت Th/Hf در مقابل Ta/Hf و D: نمودار نسبت Th/Ta به Yb (Schandl and Gorton, 2002) محیط زمین ساختی حاشیه فعال قاره ای را نشان می دهند.

Fig. 6. A, B: Tectonic discrimination diagrams of northeast Joveinan intrusive rocks after Pearce et al. (1984), C: Th/Yb versus Ta/Yb (ACM = active continental margin; WPB = within-plate basalt; WPVZ = within-plate volcanic zones), and D: Th/Ta versus Yb discrimination diagrams (Schandl and Gorton, 2002) show active continental margins.

نقش اساسی پوسته زیرین در تولید ماگمای سازنده توده نفوذی شمال شرق جوینان را نشان می‌دهد (شکل ۷-ب). میانگین نسبت Nb/Ta برای ماگماهای مشتق از پوسته بین ۱۱ تا ۱۲ و در ماگماهای حاصل از گوشته ۱۷/۵ است (Green, 1995). این نسبت در سنگ‌های مورد بررسی ۱۴/۱۹ و نشان‌دهنده نشأت‌گیری ماگمای مولد از گوشته و آرایش آن توسط سنگ‌های پوسته‌ای است.

مقادیر بالای نسبت Nb/La نشان‌دهنده خاستگاه گوشته استونوسفری شبیه جزایر اقیانوسی ($Nb/La > 1$) یا حاصل اختلاط مواد لیتوسفری و استونوسفری ($Nb/La > 1$) و مقادیر کمتر آن ($1 - 0.5$) بیانگر خاستگاه گوشته لیتوسفری است. مقادیر پایین نسبت یادشده در سنگ‌های مورد بررسی (زیر ۰/۵)، خاستگاه گوشته لیتوسفری را نشان می‌دهد.

برای تشخیص خاستگاه توده نفوذی شمال شرق جوینان از نمودارهای متعددی استفاده شده است. در نمودار Th/Yb در برابر Nb/Yb، توده نفوذی مورد بررسی بیرون از محدوده آرایه گوشته‌ای و در محدوده حاشیه فعال قاره‌ای قرار گرفته است. توده نفوذی شمال شرق جوینان در مقایسه با مذاب‌های حاصل از گوشته دارای محتوای Th بالاتری است (شکل ۷-ا) و این جابه‌جایی به حضور مواد فرورانشی در خاستگاه یا آرایش با پوسته بالایی نسبت داده می‌شود (Pearce, 2008). نسبت بالاتر Th/Yb در توده نفوذی شمال شرق جوینان نسبت به میانگین پوسته بالایی بیانگر آن است که ماگمای مادر توده نفوذی شمال جوینان تحت تأثیر غنی‌شدگی حاصل از سیالات ورقه فرورو بوده است. جانمایی نمونه‌ها در محدوده سنگ‌های بازالتی دگر نهاد شده در نمودار نسبت Zr/Sm در مقابل Nb/Tb (Foley et al., 2000)،

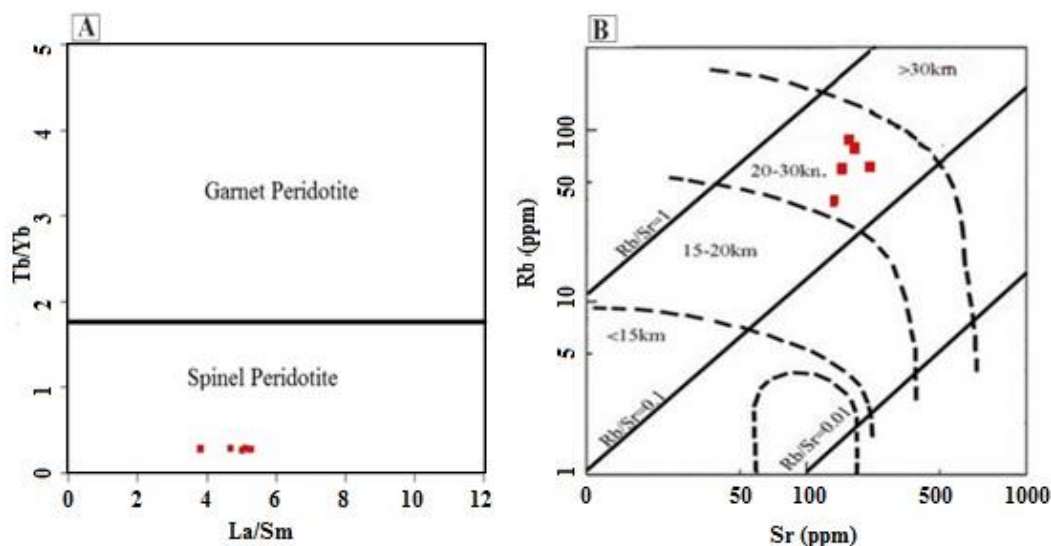


شکل ۷. ا: نسبت عناصر جزئی Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 2008) تأثیر غنی‌شدگی زون فرورانش و نقش آرایش پوسته‌ای در زایش ماگمای مولد توده نفوذی شمال شرق جوینان را نشان می‌دهد، میانگین ترکیب پوسته بالایی (U.C.) از سان و مک‌دوناف (Sun and McDonough, 1989) اقتباس شده است و ب: نمودار نسبت Zr/Sm در مقابل Nb/Ta (Foley et al., 2000)

Fig. 7. A: Th/Yb versus Ta/Yb diagram (Pearce, 2008) show effect of subduction zone enrichment and crustal contamination on genesis of northeast Joveinan magma, the average upper crust (U.C.) is from Sun and McDonough (1989), and B: Zr/Sm versus Nb/Ta diagram (Foley et al., 2000)

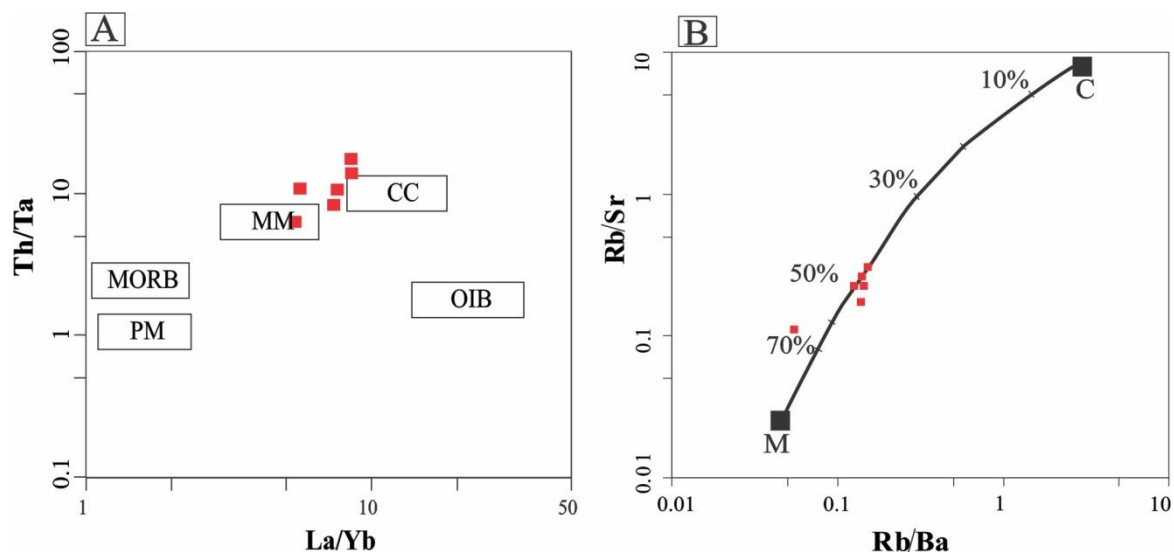
است که ماگمای مولد توده نفوذی شمال جوینان از یک خاستگاه گوشته‌ای حاوی اسپینل (و بدون گارنت) نشأت گرفته است. نمودار نسبت Rb به Sr (شکل ۸-B)، عمق تشکیل ماگمای مولد توده نفوذی شمال شرق جوینان را بین ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر نشان می‌دهد (Condie and Hunter, 1976). نمونه‌های مورد بررسی در نمودار نسبت La/Yb در مقابل Th/Ta (Berzina et al., 2014) اغلب در میان محدوده مذاب‌های مشتق از گوشته دگر نهاد شده (MM) و ماگماهای حاصل از پوسته قاره‌ای (CC) قرار می‌گیرند (شکل ۹-A). جانمایی نمونه‌های مورد بررسی در نمودار Rb/Sr در مقابل Rb/Ba (Koprubasi and Aldanmaz, 2004)، بیانگر این واقعیت است که ماگمای مادر سنگ‌های آذرین شمال جوینان حاصل اختلاط ماگمای مشتق از گوشته با مذاب حاصل از ذوب پوسته (یا آلاش ماگمای مافیک با اجزای پوسته‌ای) است. نسبت مواد گوشته به پوسته حدود ۵۰ درصد است (شکل ۹-B).

از عناصر نادر خاکی می‌توان برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی خاستگاه استفاده کرد (Thirlwall et al., 1994). از آنجایی که عناصر نادر خاکی سنگین ضریب جدایش بالایی برای گارنت دارند، ترکیب ماگمای مشتق از گوشته حاوی گارنت دارای نسبت بالاتر LREE/HREE خواهد بود. با توجه به ضرایب جدایش متفاوت عناصر Dy و Yb برای اسپینل و گارنت، از نسبت $(Dy/Yb)_n$ برای تشخیص ترکیب خاستگاه گوشته و نشأت‌گیری ماگما از میدان پایداری گارنت $(Dy/Yb)_n > 2.5$ یا اسپینل $(Dy/Yb)_n < 1.5$ استفاده می‌شود (Shaw et al., 2003). پایین بودن نسبت $(Dy/Yb)_n$ در نمونه‌های مورد بررسی (۰/۹۵-۱/۰۱)، نشان‌دهنده نشأت گرفتن ماگما از عمق پایداری اسپینل است. در نمودار نسبت Tb/Yb در مقابل La/Sm (شکل ۸-A) مرز جدایش بین محدود خاستگاه حاوی گارنت از گوشته بدون گارنت و دارای اسپینل با معیار Tb/Yb با عدد ۱/۸ مشخص شده است (Wang et al., 2002). پایین بودن نسبت Tb/Yb در سنگ‌های شمال شرق جوینان (از ۰/۲۶ تا ۰/۲۸) بیانگر این واقعیت



شکل ۸. A: نمودار نسبت Tb/Yb در مقابل La/Sm برای نمونه‌های توده نفوذی شمال شرق جوینان (Wang et al., 2002) و B: نمودار نسبت Rb به Sr (Condie and Hunter, 1976)

Fig. 8. A: Tb/Yb versus La/Sm diagram for the samples from the northeast Joveinan pluton (Wang et al., 2002), and B: Rb versus Sr diagram (Condie and Hunter, 1976)



شکل ۹. A: نمودار نسبت La/Yb در مقابل Th/Ta (Berzina et al. 2014)، سنگ‌های آذرین درونی شمال شرق جوینان در میان محدوده ماگماهای مشتق از گوشته دگرنهادشده و مذاب‌های حاصل از پوسته قاره‌ای قرار می‌گیرند و B: نمودار Rb/Sr در برابر Rb/Ba (Koprubasi and Aldanmaz, 2004)

Fig. 9. A: La/Yb versus Th/Ta diagram (Berzina et al. 2014), northeast Joveinan intrusive rocks plot mainly between the field of the metasomatized mantle-derived magmas and the field of continental crust-derived magmas, and B: Rb/Sr versus Rb/Ba diagram (Koprubasi and Aldanmaz, 2004)

ایجادشده در مخزن ماگمایی سبب تغییر ماهیت ماگمای اولیه و تشکیل ماگمای حدواسط شده است. با پیشرفت تفریق بلورین و توسعه آلاینش با مواد پوسته‌ای در ماگماهای حدواسط، انواع سنگ‌های اسیدی‌تر از جمله کوارتز دیوریت‌ها حاصل شده‌اند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

با توجه به جایگاه زمین‌ساختی توده نفوذی شمال جوینان در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه دختر، تشکیل ماگمای مادر سنگ‌های نفوذی را می‌توان چنین به تصویر کشید که با ادامه فروانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس و آب‌زدایی و آزادسازی سیالات به درون گوشته لیتوسفری، این بخش از گوشته ذوب و ماگمای مافیک اولیه ایجادشده است. ضمن صعود و جای‌گیری ماگمای بازیک در پوسته قاره‌ای زیرین، حرارت مورد نیاز برای ذوب‌بخشی و هضم سنگ‌های پوسته‌ای فراهم‌شده و آلاینش

1. LILE
2. HFSE

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3): 401–419.
<https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B. and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazines*, 148(5–6): 692–725.
<https://doi.org/10.1017/S001675681100046X>
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Arslan, M. and Aslan, Z., 2006. Mineralogy, petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2): 177–193.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.03.002>
- Babazadeh, S., D'Antonio, M., Cottle, J.M., Ghalamghash, J., Raeisi, D. and An, Y., 2021. Constraints from geochemistry, zircon U Pb geochronology and Hf Nd isotopic compositions on the origin of Cenozoic volcanic rocks from central Urumieh Dokhtar magmatic arc, Iran. *Gondwana Research*, 90: 27–46.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.010>
- Babazadeh, S., Ghorbani, M.R., Cottle, J.M. and Bröcker, M., 2019. Multi-stage tectono-magmatic evolution of the central Urumieh Dokhtar magmatic arc, south Ardestan, Iran: Insights from zircon geochronology and geochemistry. *Geological Journal*, 54(4): 2447–2471.
<https://doi.org/10.1002/gj.3306>
- Berzina, A.P., Berzina, A.N. and Gimon, V.O., 2014. Geochemical and Sr–Pb–Nd isotopic characteristics of the Shakhtama porphyry Mo–Cu system (Eastern Transbaikalia, Russia). *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(Part B): 655–665. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.028>
- Chappell, B.W., 1996. Magma mixing and the production of compositional variation within granite suites: Evidence from the granites of southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 37(3): 449–470.
<https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.449>
- Chappell, B.J. and White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174. Retrieved August 18, 2023 from <https://typeset.io/papers/two-contrasting-granite-types-2nfxi6nemoc>
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M. and Iizuka, Y., 2013. Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny, *Lithos*, 162–163(24): 70–87.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.006>
- Christiansen, E.H. and Keith, J.D., 1996. Trace element systematics in silicic magmas: a metallogenic perspective. In: D.A. Wyman (Editor), *Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulfide exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12:1 15–151. Retrieved June 10, 2024 from https://www.researchgate.net/publication/304109422_Trace_element_systematics_in_silicic_magmas_A_metallogenic_perspective
- Clarke, D.B., 1981. Peraluminous granites. *The Canadian Mineralogist*, 19(1) :1–2. Retrieved January 21, 2023 from <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/19/1/1/267046/Symposium-Proceedings>
- Clarke, D.B., 1992. *Granitoid rocks*. Chapman & Hall, London, 283 pp.
- Cobbing, J., 2000. *The geology and mapping of granite batholiths: Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer, Berlin Heidelberg, 141 pp.
<https://doi.org/10.1007/3-540-45055-6>
- Condie, K.C. and Hunter, D.R., 1976. Trace element geochemistry of Archean granitic rocks from the Barberton region, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, 29(2): 389–400.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(76\)90144-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(76)90144-8)
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. and Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses- Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1–4): 183–210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
- Evans, L.J., 1992. Alteration products at the Earth's surface- the clay minerals. *Developments in Earth Surface Processes*, 2: 107–125.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89198->

3.50010-6

- Fan, W.M., Gue, F., Wang, Y.J. and Lin, G., 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of orogenic extension in the northern Da Hinggan mountains, northern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1–2): 115–135. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00415-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00415-8)
- Fang, Y., Zhang, Y., Zhang, S., Cao, H., Zou, H. and Dong, J., 2017. Early Cretaceous I-type granites in the Tengchong terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of southwestern China. *Geoscience Frontiers*, 9(2): 459–470. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.04.007>
- Foley, S.F., Barth, M.G. and Jenner, G.A., 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(5): 933–938. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00355-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00355-5)
- Ghahraie pour, M. and Mohammadiha, K., 2016. Geological map of IRAN, 1: 25000 Series, Ghohroud Sheet, NO. 6257 II NE, Geological Survey of Iran.
- Green, T.H., 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical geology*, 120(3–4): 347–359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-X)
- Honarmand, M., Rashidnejad Omran, N., Neubauer, F., Emami, M.H., Nabatian, G., Liu, X., Dong, Y., Quadt, A.V. and Chen, B., 2014. Laser-ICP-MS U-Pb zircon ages and geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic compositions of the Niyasar plutonic complex, Iran: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution. *International Geology Review*, 56(1): 104–132. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.820375>
- Keppler, H., 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*, 380: 237–240. <https://doi.org/10.1038/380237a0>
- Khaksar, T., Rashidnejad-Omran, N., Li, S.Q., Song, S.G., Kananian, A., Chen, F. and Li, S., 2022. Geochronology and petrogenesis of granitoids and associated mafic enclaves from Ghohroud in the Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (Iran): Evidence for magma mixing during the closure of the Neotethyan Oceans. *Geological Journal*, 57(8): 3313–3332. <https://doi.org/10.1002/gj.4480>
- Koprubasi, N. and Aldanmaz, E., 2004. Geochemical constraints on the petrogenesis of Cenozoic I-type granitoids in Northwest Anatolia, Turkey: evidence for magma generation by lithospheric delamination in a post-collisional setting. *International Geology Review*, 46(8): 705–729. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.8.705>
- Kuscu, G.G. and Geneli, F., 2010. Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian Volcanic Province (Turkey), with special reference to the Tepekoy Volcanic Complex. *International Journal of Earth Sciences*, 99(3): 593–621. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0402-4>
- Liu, Sh., Hu, R., Gao, Sh., Feng, C., Huang, Zh., Lai, Sh., Yuan, H., Liu, X., Coulson, I. M., Feng, G., Wang, T. and Qi, Y., 2009. U–Pb zircon, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the age and origin of Early Palaeozoic I-type granite from the Tengchong-Baoshan Block, Western Yunnan Province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2–3): 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.05.004>
- 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)
- Mohajjel, M. and Fergusson, C., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287. <http://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 757–775. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(74\)90149-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(74)90149-5)
- Omran, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>

- Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S. Thorpe (Editor), *Orogenic andesites and related rocks*. John Wiley and Sons, U.K. 528–548. Retrieved January 21, 2023 from <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8625>
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4): 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- 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(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pearce, J.A. and Peate, D.W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–285. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Radfar, J. and Alai Mahabadi, S., 1993. Geology map of Kashan, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Rezapour, M.R., Hajalioghli, R., Moazzen, M. and Vartan, S., 2017. Variety of authomorph quartz crystals from the Qohrud, South Kashan, instance for diverse crystallization conditions of mgmatic hydrothermal liquids, *Iraian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 25(1): 3–12. (in Persian) Retrieved August 28, 2024 from <http://ijcm.ir/article-1-36-fa.html>
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London, 352 pp.
- Sayari, M., Sharifi, M. and Ahmadian, J., 2014. Determining magmatic series and oxygen fugacity of volcanic rocks in the east of Kamu, north of Isfahan, based on biotite chemistry. *Journal of Economic Geology*, 6(10): 149–161. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v6i1.21362>
- 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>
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(5–6): 652–665. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.02.004>
- Shand, S.J., 1943. *Eruptive rocks*. New York, John Wiley.
- Shaw, J.E., Baker, J.A., Menzies, M.A., Thirwall, M. F. and Ibrahim, K., 2003. Petrogenesis of largest intraplate volcanic field on the Arabian plate (Jordan): a mixed lithosphere-asthenosphere source activated by lithospheric extension. *Journal of Petrology* 44(9): 1657–1679. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg052>
- Sherafat, S. and Khodami, M. 2024. Petrogenesis of Neogene subvolcanic rocks in Kamu, North of Isfahan. *Petrological Journal*, 14(4): 101–120. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.140871.1325>
- Sherafat, S. and Mackizadeh, M.A., 2017. Mineralogy and Genesis of Joveinan Iron Skarn (Cenozoic Magmatic Arc, North of Isfahan). *Petrological Journal*, 8(29): 89–108. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22108/ijp.2017.21541>
- Straub, S.M., Gomez-Tuena, A., Stuart, F.M., Zellmer, G.F., Espinasa-Perena, R., Cai, Y. and Iizuka, Y., 2011, Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust: *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.01.013>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Tabatabaei Manesh, M., Mackizadeh, M.A., Ranjbar, S. and Gholinezhad, R., 2018. Mineralogy and determination of thermodynamic conditions at Javinan skarn, South of Kashan. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(109): 327–338. (in Persian) <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.72014.1008>
- Tepper, J.H., Nelson, B.K., Bergantz, G.W. and Irving, A.J., 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(3): 333–351. <https://doi.org/10.1007/BF00286926>
- Thirlwall, M.F., Smith, T.E., Graham, A.M.,

- Theodorou, N., Hollings, P., Davidson, J.P., and Arculus, R.J., 1994. High Field Strength Element Anomalies in Arc Lavas: Source or Process? *Journal of Petrology*, 35(3): 819–838. <https://doi.org/10.1093/petrology/35.3.819>
- Wang, W., Liu, S., Xiang Bai, X., Li, Q., Yang, P., Zhao, Y., Zhang, S. and Guo, R., 2013. Geochemistry and zircon U– Pb– Hf isotopes of the late Paleoproterozoic Jianping diorite– monzonite– syenite suite of the North China Craton: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Lithos*, 162–163: 175–194. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.01.005>
- Wang, K., Plank, T., Walker, J.D. and Smith, E.I., 2002. A mantle melting profile across the Basin and Range, SW USA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B1): 5–21. <https://doi.org/10.1029/2001JB000209>
- White, W.M., 2005. *Geochemistry*. Wiley-Blackwell, London, 660 pp.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1983. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Geological Society of America Memoirs*, 159(1): 21–34. <http://dx.doi.org/10.1130/MEM159-p21>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wu, F.Y., Jahn, B.M., Wilde, S.A., Lo, C.H., Yui, T.F., Lin, Q., Ge, W.C. and Sun, D.Y., 2003. Highly fractionated I-type granites in China (I): geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3–4): 241–273. [http://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00222-0](http://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0)



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2024.1117



Application of Concentration-Area fractal modeling and artificial neural network to identify Cu, Zn±Pb geochemical anomalies in Hashtjin area, NW of Iran

Ali Imamalipour¹ , Hamed Ebrahimi^{2*} , Amir reza Abdollahpur³ ¹ Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran² Ph.D. Student, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran³ M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 01 June 2024
Revised: 01 October 2024
Accepted: 01 October 2024

Keywords

Geochemical anomaly
Machine learning
Fractal modeling
Mineral prospectivity mapping
Hashtjin

*Corresponding author

Hamed Ebrahimi
✉ hamed.ebrahimi@urmia.ac.ir

ABSTRACT

Identification of geochemical anomalies plays an essential role in mineral exploration. Recent research investigations have shown that Machine Learning (ML) algorithms can identify geochemical anomalies associated with mineralization that represent targets for mineral exploration. Machine Learning algorithms are widely used in various fields due to their strong capability to extract and display high-level features of training samples. Autoencoder networks show a high ability to identify geochemical anomalies. In this study, the combined method of autoencoder network with the fractal concentration-area method was used to identify geochemical anomalies. First, using multivariate factor analysis, the elements barium, lead, zinc, copper, gold, iron, gold and arsenic were selected as indicators. Subsequently, the uni-element geochemical maps of these elements were prepared, and to standardize the maps in terms of minimum and maximum values, all maps were fuzzified and scaled. Using the fuzzy gamma operator, uni-element geochemical maps were combined. Then the resulting map applied the deep autoencoder method with eight layers of encoder and decoder were reconstructed. Finally, a mineral prospectively map was prepared for the potential area using the concentration-area fractal method. The mixed model proposed in this study introduces the region with high mineralization potential northeast of the studied area.

How to cite this article

Imamalipour, A., Ebrahimi, H. and Abdollahpur, A.R., 2024. Application of Concentration-Area fractal modeling and artificial neural network to identify Cu, Zn±Pb geochemical anomalies in Hashtjin area, NW of Iran. *Journal of Economic Geology*, 16(3): 101–122. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1117>



©2024 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

Over the past few decades, the identification of geochemical anomalies has played an important role in mineral exploration (Coates et al., 2011; Lecun et al., 2015; Bergen et al., 2019). Various methods have been used to identify geochemical anomalies in the last few decades, including statistical analysis, geostatistical approaches (Nabavi, 1976), fractal modeling (Ziaii et al., 2009; Ziaii et al., 2012) and many other methods. Fractal/multifractal models are powerful tools that have been widely used to detect geochemical anomalies.

Recent developments in machine learning methods have led to significant advances in geoscience. ML-based approaches to mineral prospectivity mapping using geochemical data can more effectively identify statistical correlations between geochemical patterns than other non-ML methods. Recent research shows that machine-learning approaches enable the integration of geochemical data and the successful identification and separation of geochemical anomalies associated with mineralization that may be overlooked using non-machine learning methods (Tukey, 1977; Cheng, 2006; Cheng et al., 2010).

In this study, the combined method of autoencoder network with the fractal concentration-area method was applied to identify geochemical anomalies in the Hashtjin area (Ardabil province), NW Iran.

Materials and methods

The combined method of the autoencoder network with the fractal concentration-area method was used to identify the geochemical anomalies. The flowchart of this study is as follows:

- 1- First single-element geochemical maps of Pb, Zn, Cu, Au, As, Fe, and Ba elements were prepared, and to incorporate the minimum and maximum values, all of them became fuzzy to be in the range of (0 and 1).
- 2- Geochemical maps were combined using the fuzzy gamma operator.
- 3- The deep autoencoder method was implemented on the resulting map, and the reconstructed output was obtained.
- 4- Using the fractal concentration-area method, the final map of mineral prospectivity maps was prepared.

Discussion

An autoencoder is a type of artificial neural network used for learning efficient encoding of unlabeled data

(unsupervised learning). Autoencoder consists of two functions: an encoder function that encodes the input data into a lower-dimensional hidden layer and a decoder function that reconstructs the encoded input data.

The encoder part of an autoencoder network attempts to reduce the dimensionality of the input data while preserving the majority of the information, and it encodes the input data in a blinded space. The decoder part attempts to capture the encoded data and reconstruct the original data with minimal error. The deep autoencoder network is an autoencoder network in which the neural network is designed profoundly, and the number of layers in it is greater. Each layer looks at the data as a new perspective. This neural network automatically and through unsupervised learning identifies patterns, complex structures, and high-level features of the input data.

Considering the evidence of the fractal nature of element distribution, the use of these methods in geochemical exploration for separating anomalous populations from the background with high confidence levels is one of the most potent known methods. The concentration-area fractal method is based on the amount of area occupied by a particular concentration in the study area.

Results

The study area exhibits complex geochemical features. In such a complex setting, it is essential to implement multiple methods in combination to separate anomalies from the background accurately. The combined method introduced in this study is a powerful tool for identifying geochemical anomalies in areas with complex geological history and diverse geochemical backgrounds. According to the results, all three methods used in this study represent a high favorability of ore mineralization in the northeast of the study area; Therefore, further investigations and investigation are recommended in the introduced area during later stages.

The results obtained from applying the fractal method to the output of the deep autoencoder method indicated a potentially favorable area for the mineralization with approximately 9,047,500 m²

In the predictive map obtained in the northeast of the studied area, an area with high mineralization potential is introduced, which is geologically represented by the Upper Jurassic (Lar Formation) and Cretaceous formation controlled by, fault boundaries and in the northeastern part of the Hashtjin.



کاربرد مدل‌سازی فرکتالی عیار-مساحت و شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی $Zn \pm Pb, Cu$ در منطقه هشتجین، شمال غرب ایران

علی امامعلی‌پور^۱، حامد ابراهیمی^{۲*}، امیررضا عبدالله‌پور^۳

^۱ دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی نقش مهمی را در اکتشافات معدنی ایفا می‌کند. پژوهش‌های اخیر نشان داده است که الگوریتم یادگیری ماشین می‌تواند ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی مرتبط با کانی‌سازی را که اهدافی برای اکتشاف مواد معدنی هستند، شناسایی کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین به دلیل قابلیت قوی در استخراج و نمایش ویژگی‌های سطح بالای نمونه‌های آموزشی، به طور گسترده در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شوند. شبکه‌های رمزگذار خودکار توانایی بالایی در شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند. در این پژوهش، از روش ترکیبی شبکه خودکار رمزگذار با روش فرکتالی عیار-مساحت برای شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی استفاده شد. نخست، با استفاده از آنالیز چند متغیره فاکتوری عناصر باریم، سرب، روی، مس، طلا، آهن، طلا و آرسنیک به عنوان شاخص انتخاب شدند. سپس نقشه‌های زمین‌شیمیایی تک عنصری این عناصر تهیه شد و به منظور یکسان‌سازی نقشه‌های به دست آمده از لحاظ مقادیر کمینه و بیشینه، تمام نقشه‌ها به صورت فازی درآمدند. با استفاده از عملگر گامای فازی نقشه‌های زمین‌شیمیایی تک عنصری با هم تلفیق شدند. سپس نقشه حاصل از روش رمزگذار خودکار عمیق با هشت لایه رمزگذار و رمزگشا بازسازی شد. سرانجام، با استفاده از روش فرکتال عیار-مساحت نقشه پتانسیل معدنی برای این منطقه تهیه شد. مدل ترکیبی پیشنهادی در این پژوهش، منطقه‌ای با پتانسیل کانی‌زایی بالا در شمال شرق محدوده مورد بررسی را معرفی می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

واژه‌های کلیدی

ناهنجاری زمین‌شیمیایی
یادگیری ماشین
مدل‌سازی فرکتالی
نقشه پتانسیل معدنی
هشتجین

نویسنده مسئول

حامد ابراهیمی

hamed.ebrahimi@urmia.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

امامعلی‌پور، علی؛ ابراهیمی، حامد و عبدالله‌پور، امیررضا، ۱۴۰۳. کاربرد مدل‌سازی فرکتالی عیار-مساحت و شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی $Zn \pm Pb, Cu$ در منطقه هشتجین، شمال غرب ایران. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳): ۱۰۱-۱۲۲. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1117>

مقدمه

روش های مختلفی برای شناسایی ناهنجاری های زمین شیمیایی در چند دهه اخیر استفاده شده است. از جمله تجزیه و تحلیل آماری (Tukey, 1977)، رویکردهای زمین آماری (Nabavi, 1976)، مدل سازی فرکتالی (Cheng, 2006; Cheng et al., 2010) و بسیاری روش های دیگر. مدل های فرکتال / مولتی فرکتال، ابزارهای قدرتمندی هستند که به طور گسترده برای تشخیص ناهنجاری های زمین شیمیایی استفاده شده اند. روش های آماری فضایی، مانند روش میانگین متحرک، تحلیل عاملی فضایی (Grunsky and Wackernagel, 1988) و زمین آمار چند متغیره (Agterberg, 2003; Zuo and Wang, 2016; Zuo, 2107) برای شناسایی ناهنجاری های زمین شیمیایی چند متغیره با در نظر گرفتن همبستگی های فضایی و تغییرات بین نمونه های همسایه علاوه بر توزیع فراوانی مقدار غلظت استفاده شده اند.

پیشرفت های اخیر در روش های یادگیری ماشین به پیشرفت های قابل توجهی در علوم زمین منجر شده است. رویکردهای مبتنی بر ML برای مدل سازی آینده نگری مواد معدنی با استفاده از داده های زمین شیمیایی می توانند به طور مؤثرتری همبستگی های آماری بین الگوهای زمین شیمیایی را نسبت به سایر روش های غیر ML شناسایی کنند.

یادگیری ماشین زیرمجموعه ای از هوش مصنوعی است که با دریافت داده و با ایجاد الگوریتم هایی می تواند بدون دخالت انسان خود را تغییر دهد تا خروجی مدنظر را ارائه کند. یادگیری ماشین تلفیقی از علوم کامپیوتر و آمار است که در آن الگوریتم ها برای انجام دادن یک کار خاص بدون برنامه ریزی مستقیم استفاده می شوند. الگوریتم های ML معمولاً به دو دسته خلاصه می شوند:

یادگیری تحت نظارت و بدون نظارت. الگوریتم های یادگیری تحت نظارت، مانند رگرسیون لجستیک، ماشین های بردار پشتیبان (Vapnik, 1995)، شبکه های عصبی مصنوعی (Alavi, 1996)، شبکه های باور عمیق (Hinton et al., 2006) و شبکه عصبی

کانولوشنال (CNN) (Lecun et al., 1998)، بر توانمندسازی ماشین ها برای طبقه بندی اشیاء، مسائل یا موقعیت ها بر اساس داده های شناخته شده / برچسب گذاری شده، تمرکز می کنند. در مقابل، الگوریتم های یادگیری بدون نظارت که هدفشان شناسایی الگوهای پنهان یا بالقوه از مجموعه داده ورودی بدون نمونه های برچسب گذاری شده است، به طور گسترده در زمینه های خوشه بندی (Scott and Knott, 1974; Silverman, 1986)، کاهش ابعاد (Redlich, 1993)، و استخراج ویژگی (Coates et al., 2011) به کار گرفته شده اند. در مقایسه با روش های سنتی تجزیه و تحلیل داده ها، الگوریتم های ML توانایی قوی تری در (الف) اجرای پیش بینی های پیچیده، (ب) ایجاد نمایشی از رابطه بین ورودی ها و خروجی ها، (پ) نشان دادن الگوها، ساختارها و روابط جدید و پیش بینی نشده، دارند (Lecun et al., 2015; Bergen et al., 2019). الگوریتم های ML با موفقیت برای شناسایی الگوهای زمین شیمیایی پنهان و ناشناخته مرتبط با کانی سازی در یک محیط پیچیده زمین شناسی به کار گرفته شده اند (Ziaii et al., 2012; al., 2009; Ziaii et al., 2012). سامانه هوش مصنوعی نیازی به برنامه ریزی از قبل ندارد. به جای آن از الگوریتم هایی استفاده می کند که می توانند با هوش خود کار کنند. این الگوریتم ها شامل الگوریتم های یادگیری ماشین مانند الگوریتم های یادگیری تقویتی، شبکه های عصبی و یادگیری عمیق است.

یادگیری ماشین زیرمجموعه ای از هوش مصنوعی است که به ماشین اجازه می دهد به طور خودکار از داده های گذشته بدون برنامه نویسی صریح یاد بگیرد. هدف یادگیری ماشین این است که به ماشین ها اجازه دهد از داده ها یاد بگیرند تا بتوانند خروجی دقیقی ارائه دهند. ما در هوش مصنوعی سامانه های هوشمندی می سازیم تا مانند انسان هر کاری را انجام دهند. در یادگیری ماشین، ما به ماشین ها با داده ها آموزش می دهیم که یک کار خاص را انجام دهند و نتیجه دقیقی ارائه دهند.

فعالیت های آلی پوشیده شده است. زون البرز در امتداد نوار کوه زایی آلپ- هیمالیا قرار دارد و فازهای کوه زایی پرکامبرین موجب تحکیم پی سنگ آن و موجب بالازدگی آن، بدون چین خوردگی شده اند. فازهای کیمبرین پیشین و لارامید بیش از سایر فازها بر البرز تأثیر گذار بوده اند و البرز غربی در ائوسن بالایی از آب خارج شده و در معرض فرسایش قرار گرفته است. فازهای پیرنه، آستیرین و پاسادین موجب خروج کامل از آب شده اند.

محدوده مورد بررسی در ۲۰ کیلومتری جنوب خلخال بخش هشتجین واقع شده است. این محدوده در بین طول های جغرافیایی $48^{\circ} 16' 22''$ و $47^{\circ} 28' 18''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 25' 24''$ و $37^{\circ} 30' 00''$ شمالی در سامانه WGS 84 در نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ اردبیل قرار دارد. همچنین از نظر تقسیم های کشوری، محدوده مورد بررسی در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین واقع شده است (Faridi et al., 2000). **شکل ۱** موقعیت و نقشه زمین شناسی کل محدوده مورد پژوهش را نشان می دهد.

بزرگ ترین واحد رخنمون یافته با ترکیب سنگ های آتشفشانی بازیگ تفکیک نشده (به صورت واحدهای فرعی اغلب از گدازه های آندزیتی تا بازالتی متوسط لایه و گاه آگلومرایی با همان ترکیب بازیگ)، واحدهای ولکانیکی آندزیت تا داسیت (متاولکانیک) به صورت طبقات ولکانیکی اسیدی تا حد واسط، همچنین واحد تراکی بازالت تا تراکی آندزیت قهوه ای بخش اعظم منطقه را تشکیل داده است. بر اساس بررسی های صحرایی انجام شده در گستره اکتشافی هشتجین، کانی سازی مشهودی به صورت ذخیره دیده نشده است؛ ولی آثار وسیع دگرسانی گرمابی در منطقه قابل تشخیص است. این گستره دگرسانی در مناطق تکنونیزه که انتقال سیالات گرمابی با سهولت بیشتری انجام شده، دارای وسعت بیشتری هستند و می توان از آنها به عنوان شاخص اکتشافی استفاده کرد.

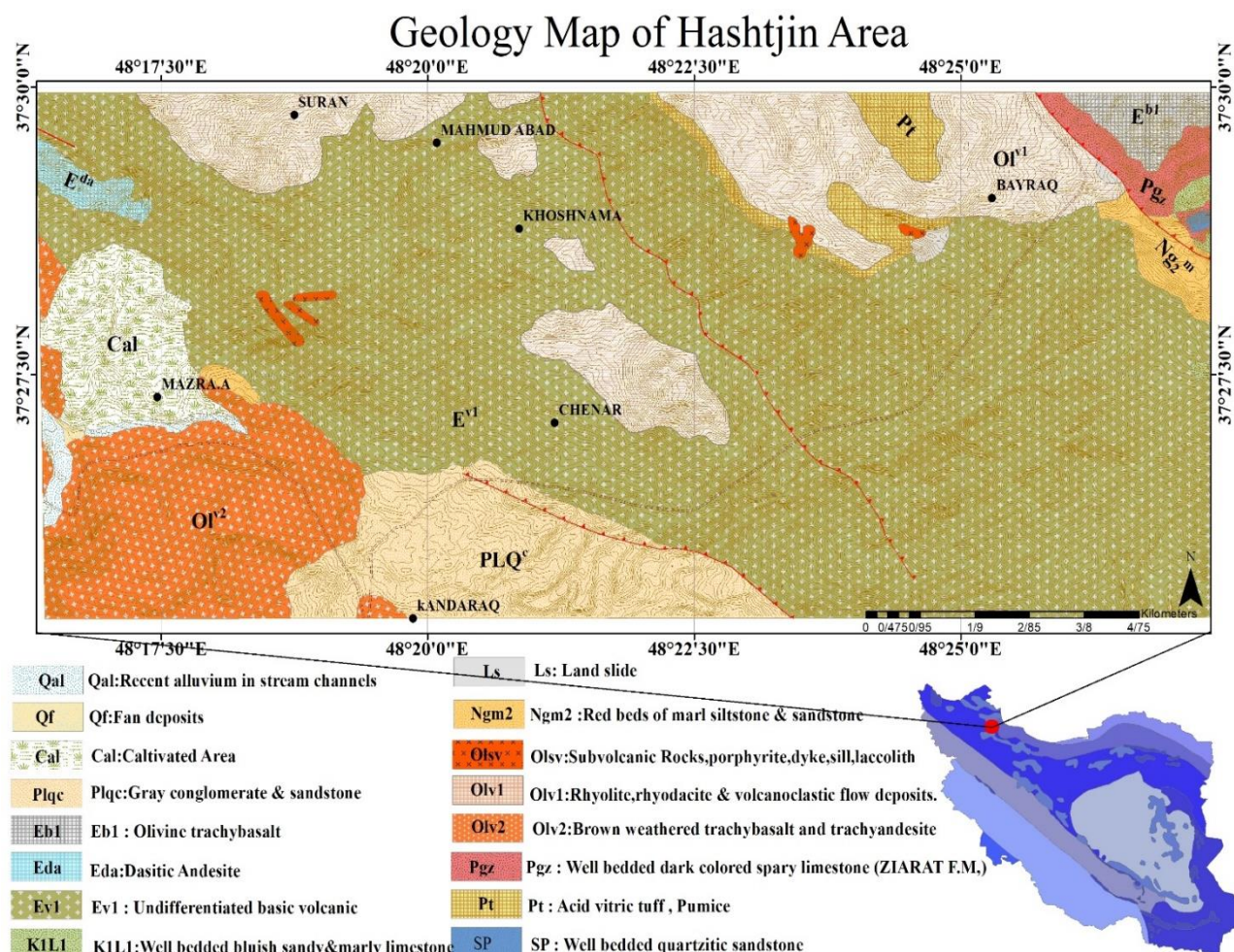
یادگیری ماشین و یادگیری عمیق دو زیرمجموعه اصلی هوش مصنوعی هستند. یادگیری عمیق زیرمجموعه اصلی یادگیری ماشین است. هوش مصنوعی یا AI دامنه بسیار گسترده ای دارد. یادگیری ماشین دامنه محدودی دارد. هوش مصنوعی در حال کار برای ایجاد یک سامانه هوشمند است که می تواند وظایف پیچیده مختلفی را انجام دهد. Autoencoder یک شبکه عصبی خودآموز بدون نظارت است که از دو بخش تشکیل شده است: رمزگذار و رمزگشا. رمزگذار برای تبدیل بردارهای ورودی به نمایش های سطح بالا از طریق خودآموزی با لایه های عصبی متعدد استفاده می شود و رمزگشا اطلاعات پنهان در فضای کم بعد را به بردارهای بازسازی شده در فضای ورودی نگاشت می کند. هدف آموزش به حداقل رساندن خطای بازسازی بین داده های ورودی اصلی و داده های بازسازی شده است. همچنین انتخاب روش های مورد استفاده برای ترسیم ناهنجاری های زمین شیمیایی به الگوی توزیع مجموعه داده ها بستگی دارد. روش های غیر ساختاری (مانند روش های آماری سنتی) این ویژگی را در نظر نمی گیرند؛ اما روش های ساختاری (مانند روش فرکتال) توجه ویژه ای به این مهم دارند. روش های یادگیری ماشین می توانند بسته به معماری شبکه خود ویژگی های پیچیده زمین شناسی و زمین شیمیایی منطقه را شناسایی و استخراج کنند (Zuo et al., 2019). این پژوهش روش ترکیبی از کاربرد روش فرکتالی عیار- مساحت و روش خود رمزگذار خود کار عمیق را پیشنهاد می کند که توانایی بالایی در جداسازی ناهنجاری های زمین شیمیایی از زمینه دارد و مناطق امیدبخشی را در منطقه مورد بررسی معرفی می کند.

زمین شناسی و چینه شناسی منطقه هشتجین در زون البرز غربی - آذربایجان

رشته کوه البرز یک سامانه چند کوه زایی پیچیده است که از شمال و شمال شرق به خط برخوردی پالئوتتیس محدود شده است (Alavi, 1996) که بعد توسط ورقه های رانده مربوط به

بخش های کم ارتفاع اثر گذاشته است. کانه زایی به صورت پهنه سیلیسی شده حاوی رگه- رگچه های کوارتزی کانه دار است که کالکوپیریت، پیریت، گالن، اسفالریت، هماتیت به عنوان کانی های اصلی و مالاکیت، کالکوسیت، گوتیت در اثر فرایندهای برون زاد تشکیل شده اند. بافت مواد معدنی و باطله از نوع پراکنده، رگه- رگچه ای، برشی و پرکننده فضاهای خالی است. ویژگی های زمین شناسی، کانی شناسی ماده معدنی در رخدادهای منطقه مورد بررسی شباهت زیادی به کانسارهای اپی ترمال فلزهای پایه (نوع سولفیداسیون متوسط) دارد.

این دگرسانی ها به صورت نواری از شمال غرب تا جنوب شرق کشیده شده و مهم ترین آنها عبارتند از دگرسانی سرپسیتی، آرژلیک، سیلیسی شدگی، کلریتی و همچنین زون های آغشته به اکسیدهای آهن (Afzal et al., 2015). نیروها و فرایندهای زمین ساختی که به طور قابل توجهی بر منطقه اثر داشته، باعث ایجاد گسل هایی با سازوکار متعدد از جمله راستالغز، عادی و معکوس با روند شمال غرب- جنوب شرق شده است. پهنه های دگرسانی گسترده که به نظر می رسد اغلب با گسل ها و شکستگی های منطقه در ارتباط هستند، بر بیشتر نهشته های



شکل ۱. موقعیت و نقشه زمین شناسی منطقه هشتجین در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (Faridi et al., 2000)

Fig. 1. Location and geological map (1:100000) of the Hashtjin area (Faridi et al., 2000)

منتهی می شود نیز آثار دگرسانی در میان واحدهای موجود که اغلب کائولینیتی تا بنتونیتی شده اند و کانی های کوارتز و پیریت دیده می شود (شکل ۳-۳A).

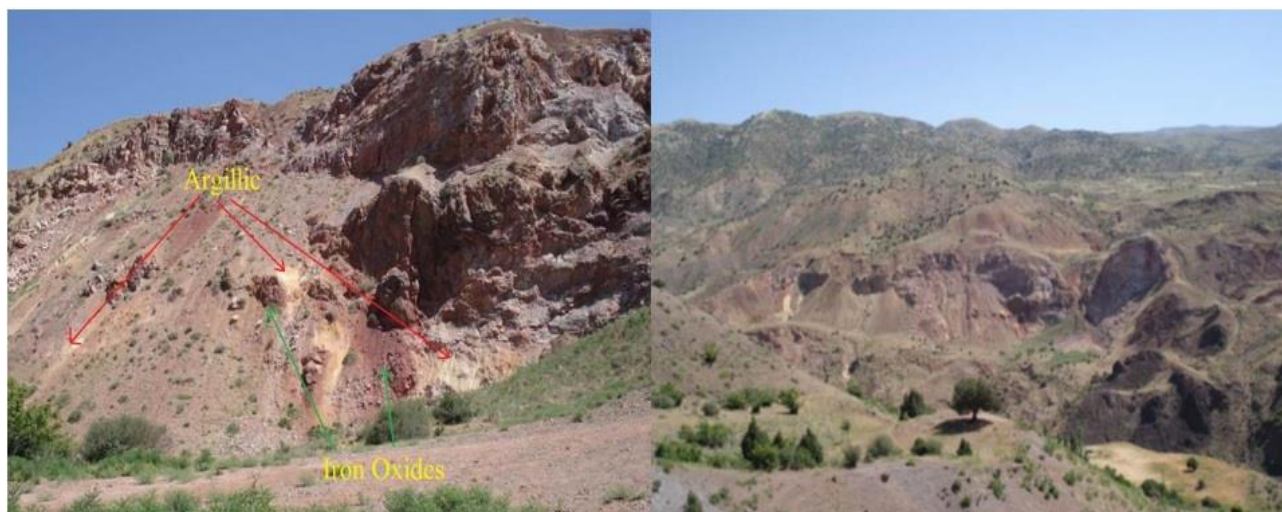
مواد و روش ها آماده سازی داده ها

در این پژوهش از داده های مربوط به اکتشافات زمین شیمیایی انجام شده به روش رسوبات آبراهه ای به تعداد ۲۱۱ نمونه در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است (داده ها مربوط به سازمان زمین شناسی اردبیل). نمونه های زمین شیمیایی به روش رسوب های آبراهه ای با تراکم ۲ نمونه در کیلومتر مربع برداشت شده است (شکل ۴). نمونه ها برداشت شده پس از آماده سازی به روش تجزیه شیمیایی ICP-MS ۴۴ عنصری و ۱۲ اکسید به روش XRF در آزمایشگاه سازمان زمین شناسی مرکز اردبیل مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه ها نیز توسط نرم افزارهای SPSS، GIS10 و EXCEL مورد تحلیل قرار گرفته است.

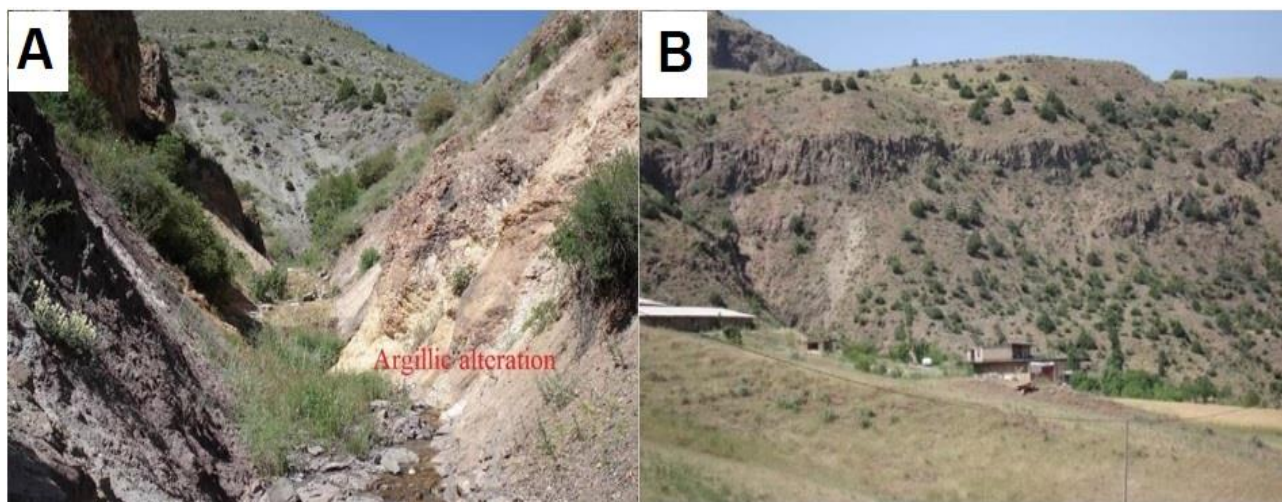
کانی سازی و دگرسانی های محدوده مورد بررسی
محدوده دگرسانی غرب چنار: سنگ میزبان دگرسانی جزو واحد ولکانیک تفکیک نشده است که اغلب از تراکی آندزیت تا الوین تراکی بازالت بر اساس مشاهدات صحرایی گسترش این دگرسانی دارای یک روند شمال غرب- جنوب شرق است و در بررسی های آزمایشگاهی در حد آرژیلیک پیشرفته با کانی های کوارتز، کائولن، هماتیت ارزیابی شده است (شکل ۲). بخش هایی از واحد سنگی دگرسانی به دلیل وجود هماتیت به رنگ قهوه ای تا قرمز اخراهی دیده می شود بخش های روشن تر اغلب از کانی های کائولن تشکیل شده است.

محدوده دگرسانی خوشنامه: این محدوده چون در امتداد یک گسل تراستی تشکیل شده است، علاوه بر محدوده اصلی در چندین محل دیگر در مجاورت گسله یاد شده دیده می شود. سنگ میزبان همان واحد سنگ های آتشفشانی تفکیک نشده است که اغلب از گدازه های تراکی آندزیت و آگلومرا تشکیل شده است (شکل ۳-۳B).

وسعت این دگرسانی در محل حدود ۵۰ تا ۱۵۰ متر است. البته در مسیر آبراهه اصلی که به محدوده دگرسانی شرق خوشنامه

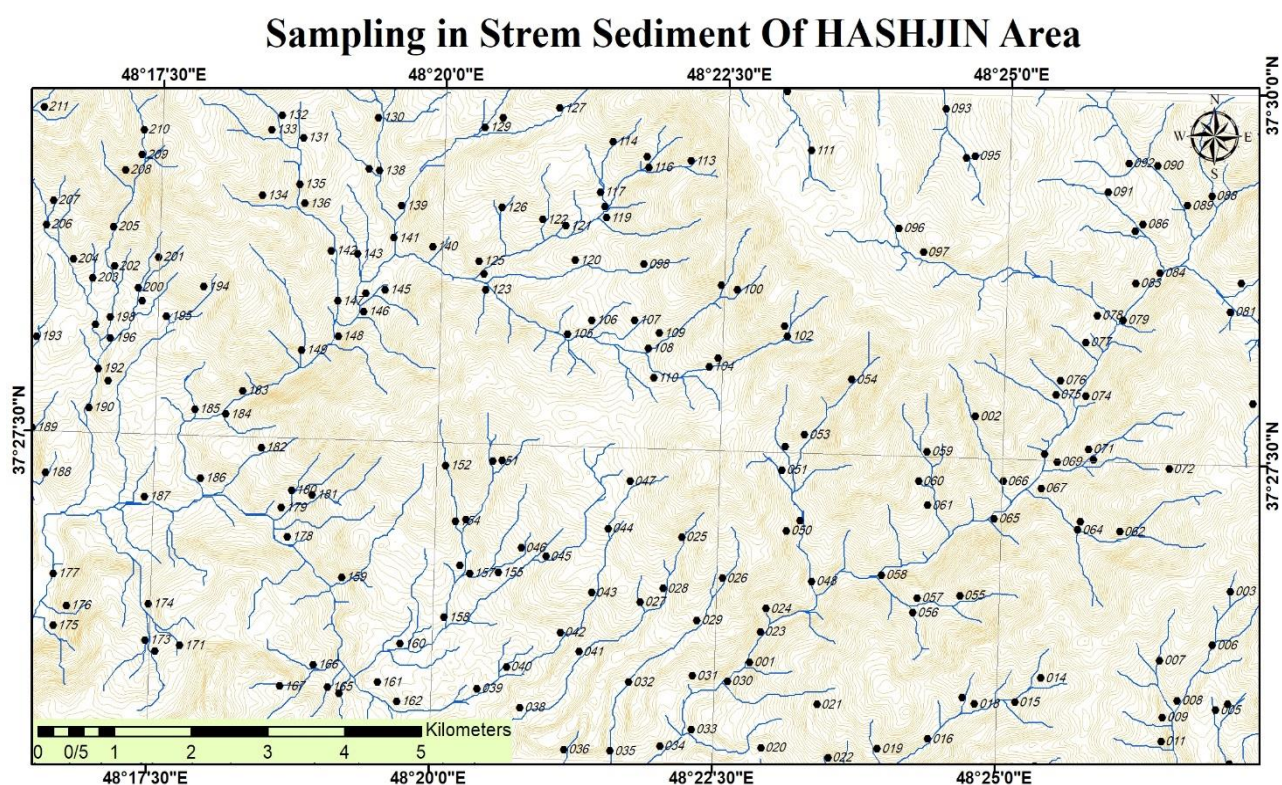


شکل ۲. نمای کلی از محدوده دگرسانی غرب چنار و دگرسانی آرژیلیک به همراه اکسید آهن در منطقه هشتجین
Fig. 2. An overview of the alteration zone west of Chanar, argillic alteration with iron oxide in the Hashtjin area



شکل ۳. A: نمایی از محدوده دگرسانی خوشنامه و B: رخنمون سنگ های آتشفشانی بازیک در منطقه هشتجین

Fig. 3. A. view of Khoshnameh alteration zone, and B. outcrop of the basic volcanic rocks in the Hashtjin area



شکل ۴. نقشه محل نمونه برداری رسوب آبراه ها در منطقه هشتجین

Fig. 4. The location map of the stream sediments samples in the Hashtjin area

روش جداسازی آنومالی های زمین شیمیایی

این پژوهش در محدوده شمال غرب هشتجین (استان اردبیل) انجام شد. در فاز نخست، ابتدا پیش پردازش های آماری لازم (جایگزینی مقادیر سنسورد و مقادیر خارج از ردیف و عادی سازی) بر روی داده ها انجام شد. برای ترسیم نقشه ناهنجاری های چند فلزی از طریق شناسایی ناهنجاری های زمین شیمیایی با کمک آنالیز چند متغیره فاکتوری، عناصر سرب، روی، مس، طلا، آرسنیک، آهن و باریم به عنوان شاخص انتخاب شدند. سپس نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری این عناصر تهیه شد و به منظور یکسان سازی نقشه های حاصل از لحاظ مقادیر کمترین و بیشترین، تمام نقشه ها به صورت فازی درآمدند و در دامنه (۰ و ۱) قرار گرفتند (شکل ۵-A تا G). به منظور انجام ادامه بررسی ها با استفاده از عملگر گامای فازی، نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری با هم تلفیق شدند (شکل ۱۲-A). در این پژوهش پیش پردازش های آماری بر روی داده ها در نرم افزار اکسل انجام شد. انجام آنالیزهای آماری تک متغیره و چندمتغیره به منظور تشخیص عناصر شاخص و مرتبط با کانی سازی، با نرم افزار SPSS مورد جستجو قرار گرفت. نقشه های رستری زمین شیمیایی با اندازه پیکسل ۵۰ * ۵۰ با کمک نرم افزار ARCGIS 10.8 تهیه شدند. کدنویسی های لازم برای اجرای الگوریتم خودرمزگذار عمیق در محیط اسپایدر (SPYDER=5.4.3) در آنکوندا ۳ انجام شد. نمودار لگاریتمی عیار- مساحت در محیط اکسل و نقشه ی پیشگوی نهایی در ARCGIS ترسیم شد.

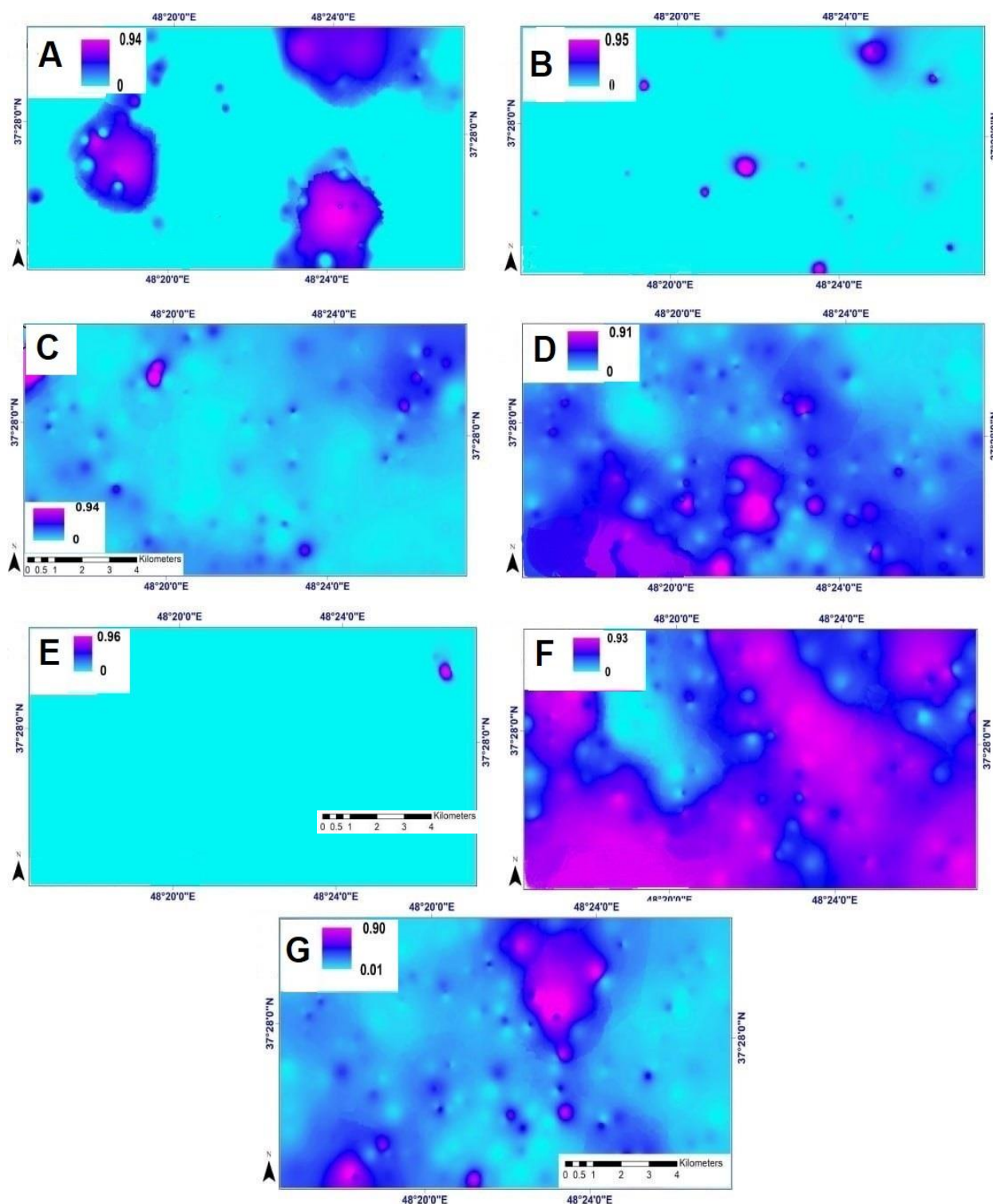
روش درون یابی توزیع عناصر و دسته بندی آنومالی ها

یکی از مباحث بسیار کاربردی در بسیاری از علوم درون یابی است. با کمک درون یابی می توانید برای نقاطی که ارزش یا داده ای وجود ندارد، بر اساس نقاطی که ارزش آنها برداشت شده است، مقادیر آنها را تخمین زد. شرط اصلی استفاده از روش درون یابی پیوسته بودن متغیر است. اگر متغیر پیوسته

نباشد، نمی توان از درون یابی استفاده کرد. پیوسته بودن یعنی ارزش یک نقطه وابسته به نقاط یا تحت تأثیر نقاط اطراف است. به صورت کلی، دو روش برای درون یابی استفاده خواهد شد. روش اول، روش های زمین آمار و روش دوم، روش های قطعی است.

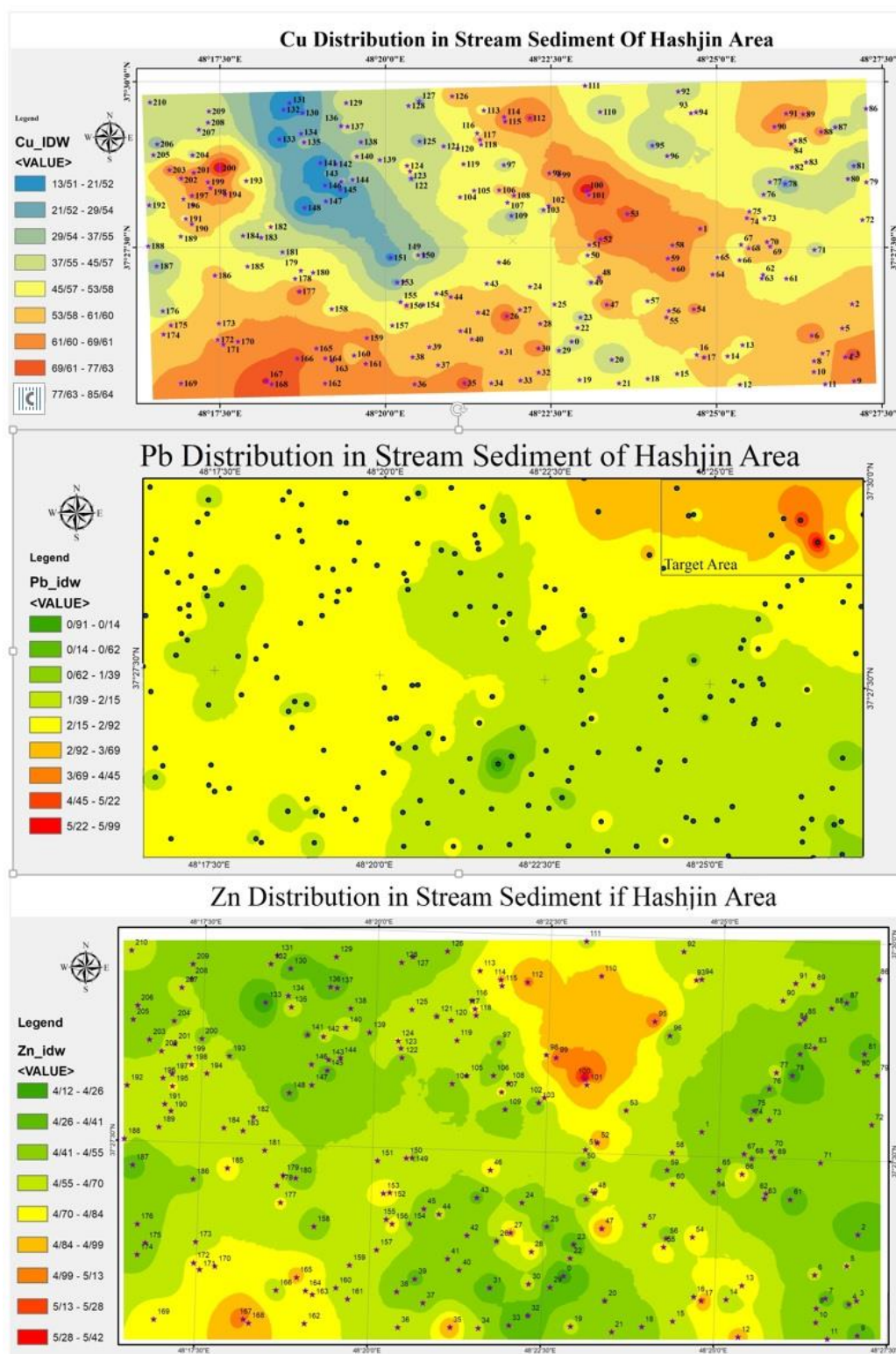
در روش های قطعی از الگوریتم های ریاضی برای تخمین مقادیر بر اساس نزدیکی نقاط نمونه استفاده می شود. روش هایی مانند وزن دهی معکوس فاصله و درون یابی اسپلاین، دو نوع معروف از این نوع درون یابی هستند. در روش زمین آمار برای تولید سطوح درون یابی دقیق تر، خودهمبستگی مکانی را در نظر می گیرند. معروف ترین روش کریجینگ است که از وابستگی فضایی متغیر را مدل سازی می کنند. البته هر کدام از این روش ها متغیرهای خود را داراست و باید با دقت بالا آنها را پیاده سازی کرد.

روش استفاده در این پژوهش، روش درون یابی فاصله معکوس است یکی از معروف ترین روش های درون یابی در دنیاست. از این روش برای تخمین مقدار یک سطح پیوسته در مکان های نمونه برداری نشده بر اساس مقادیر نقاط نمونه اطراف استفاده می شود (شکل ۶). این روش بر اساس فاصله است (Farhadi et al., 2022)؛ به این معنی که نمونه هایی که فاصله نزدیک تر دارند، باید ارزش و تأثیر بیشتری داشته باشند. درون یابی فاصله معکوس با تخصیص وزن به هر نقطه نمونه بر اساس فاصله آن تا محل مورد نظر کار می کند و وزن نهایی بر اساس فاصله نقاط اطراف و مقدار وزن نیز بر اساس فاصله خواهد بود. اساس درون یابی فاصله معکوس این است که در مواردی که نقاط نمونه پراکنده هستند یا توزیع نقاط نمونه نشان دهنده الگوی اساسی نیست؛ نمونه نزدیک تر تأثیر بیشتری بر تخمین نسبت به نقاط نمونه دورتر خواهد داشت و وزن تخصیص داده شده به هر نقطه نمونه متناسب با فاصله معکوس بین نقطه نمونه و محل هدف است.



شکل ۵. نقشه‌های زمین‌شیمیایی تک متغیره: A: آرسنیک، B: طلا، C: باریم، D: مس، E: آهن، F: سرب و G: روی در منطقه هشتجین

Fig. 5. Univariate geochemical maps: A: Arsenic, B: Gold, C: Barium, D: Copper, E: Iron, F: Lead, and G: Zinc in the Hashtjin area



شکل ۶. نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری مس، سرب، روی به روش درون یابی فاصله معکوس در منطقه هشتجین

Fig. 6. Single-element geochemical maps of Cu, Pb, Zn elements using IDW Method in the Hashtjin area

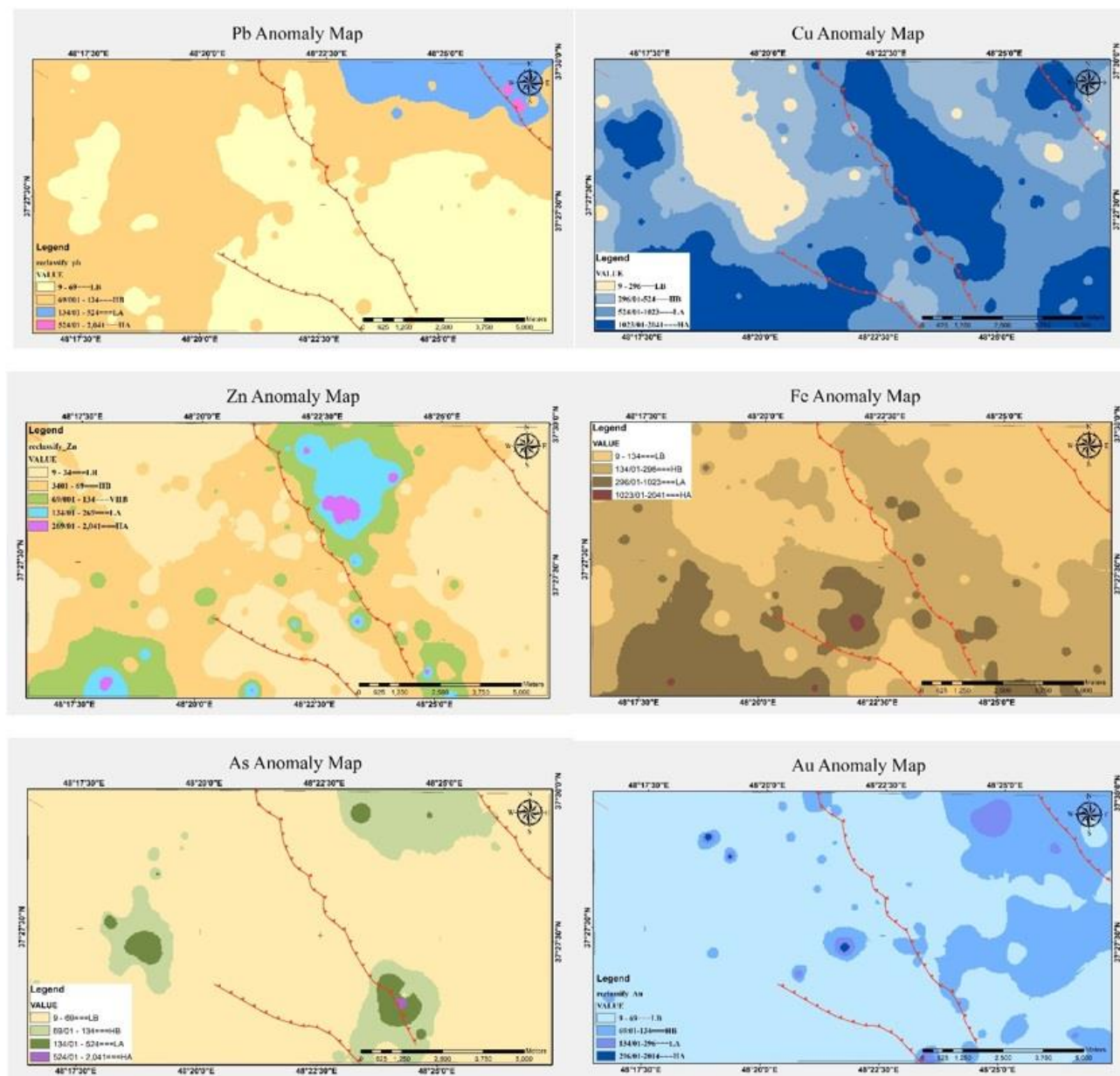
این جدول شامل اطلاعاتی مانند نام هر رده، بازه مقداری ارزش های پیکسل های متعلق به هر رده و همچنین رنگ مربوط به هر رده برای نمایش بهتر در نقشه است. از جمله الگوریتم های طبقه بندی شده مورد استفاده می توان به روش های **تقسیم مقادیر، برش طبیعی، کوانتیل، روش های کاستی تحمیلی** و روش های مبتنی بر مقایسه ارزش های پیکسل ها با معیارهای ثابت مانند میانگین، مد و انحراف معیار اشاره کرد. روش استفاده در این پژوهش، الگوریتم برش طبیعی است (شکل ۷).

روش **دسته بندی** آنومالی ها به معنای تبدیل مقادیر پیکسل های یک لایه رستری به دسته های مختلف با استفاده از یک الگوریتم طبقه بندی شده مشخص است. با اعمال این الگوریتم بر روی لایه رستری، هر پیکسل به یک دسته خاص از دسته های تعریف شده نسبت داده می شود. این دسته بندی می تواند برای اهداف مختلف مانند تحلیل ویژگی های زمین شناسی، تحلیل تغییرات زمین شناسی در زمان و ... استفاده شود. بعد از اعمال الگوریتم بر روی لایه رستری، یک جدول ایجاد می شود که شامل اطلاعات دسته بندی شده برای هر رده است (جدول ۱).

جدول ۱. مقادیر غلظت ها و مساحت های مربوط به هر عنصر در منطقه هشتجین

Table 1. Concentration and area values of each element in the Hashtjin area

Pb			Zn			Cu		
VALUE	area	cumarea	VALUE	area	cumarea	VALUE	area	cumarea
2041	95000	95000	2041	45000	45000	2041	5250000	5250000
1023	380000	475000	1023	195000	240000	1023	85145000	90395000
524	2027500	2502500	524	1920000	2160000	524	114112500	204507500
269	17955000	20457500	269	15115000	17275000	296	61142500	265650000
134	148342500	168800000	134	36802500	54077500	134	13020000	278670000
69	123930000	292730000	69	110035000	164112500	69	8862500	287532500
34	5157500	297887500	34	118435000	282547500	34	7455000	294987500
18	617500	298505000	18	15455000	298002500	18	3245000	298232500
9	185000	298,690,000	9	687500	298690000	9	457500	298690000
As			Au			Fe		
VALUE	area	cumarea	VALUE	area	cumarea	VALUE	area	cumarea
2041	55000	55000	2041	35000	35000	2041	127500	127500
1023	145000	200000	1023	192500	227500	1023	475000	602500
524	957500	1157500	524	1137500	1365000	524	4847500	5450000
296	5332500	6490000	296	2895000	4260000	296	38540000	43990000
134	34902500	41392500	134	9127500	13387500	134	131525000	175515000
69	74112500	115505000	69	51865000	65252500	69	79467500	254982500
34	126802500	242307500	34	59895000	125147500	34	37065000	292047500
18	53430000	295737500	18	57075000	182222500	18	6217500	298265000
9	2952500	298690000	9	116467500	298690000	9	425000	298690000



شکل ۷. نقشه های داده های زمین شیمیایی برای عناصر مس، سرب، روی، آهن، طلا و آرسنیک در منطقه هشتجین

Fig. 7. The generated maps geochemical data for Cu, Pb, Zn, Fe, Au, and As elements in the Hashtjin area

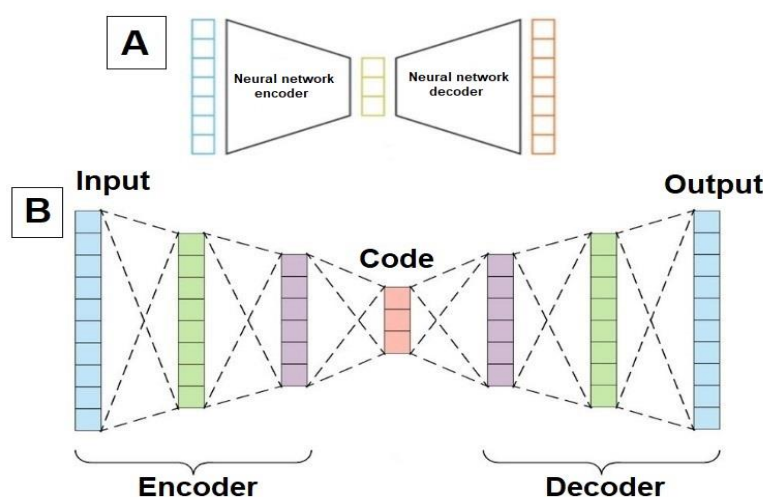
یاد می گیرد: یک تابع رمز گذاری که داده های ورودی را در یک لایه پنهان با ابعاد کمتر از لایه ورودی کد گذاری می کند و یک تابع رمز گشایی که داده های ورودی رمز گذاری شده را بازسازی می کند. رمز گذار خود کار یک نمایش (رمز گذاری) کارآمد را

شبکه خود رمز گذار خود کار

خود رمز گذار خود کار نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که برای یادگیری کد گذاری کارآمد داده های بدون برچسب (یادگیری بدون نظارت) استفاده می شود. رمز گذار خود کار دو عملکرد را

الگوریتم به صورت خودکار الگوها و ساختار داده‌ای را شناسایی کند. (شکل ۸-۸). ساختار کلی شبکه خودرمزگذار خودکار را نشان می‌دهد. شبکه خودرمزگذار عمیق یک شبکه خودرمزگذار است که در آن شبکه عصبی به صورت عمق‌دار طراحی شده است و تعداد لایه‌ها در آن بیشتر است. هر لایه به عنوان چشم‌انداز جدید به داده نگاه می‌کند. این شبکه عصبی به صورت خودکار و به صورت یادگیری بدون نظارت، الگوها، ساختار پیچیده و ویژگی‌های سطح بالای داده‌های ورودی را شناسایی می‌کند (شکل ۸-۸-B).

برای مجموعه‌ای از داده‌ها، معمولاً برای کاهش ابعاد به کار می‌برد. ابعاد لایه ورودی و لایه خروجی با هم برابر است. بخش رمزگذار شبکه خودرمزگذار خودکار سعی می‌کند با حفظ بخش عمده اطلاعات داده‌های ورودی، ابعاد داده‌ها را کاهش دهد و داده‌های ورودی را در فضای پنهان کدگذاری کند و بخش رمزگشا تلاش می‌کند تا داده‌های رمزگذاری شده را بگیرد و با کمترین خطا داده‌های اولیه را بازسازی کند (Reichstein et al., 2019; Sun et al., 2019). بر خلاف یادگیری با نظارت، در یادگیری بدون نظارت، داده‌ها بدون برچسب هستند و هدف این است که



شکل ۸. ساختار A: شبکه خودرمزگذار خودکار ساده و B: شبکه خودرمزگذار عمیق با سه لایه رمزگذار و سه لایه رمزگشا در منطقه هشتجین

Fig. 8. Structure of A: simple autoencoder network, and B: deep autoencoder network with 5 encoder layers and 5 decoder layers in the Hashtjin area

فضایی نمونه در تعیین مناطق آنومال تأثیر دارد، نسبت به روش‌های غیرساختاری برتری دارند. با توجه به اثبات وجود ماهیت فرکتالی در توزیع عناصر، می‌توان در اکتشافات زمین‌شیمیایی برای جدایش جوامع ناهنجاری از زمینه از این روش به عنوان یکی از قوی‌ترین روش‌های شناخته‌شده برای تعیین حد آستانه با ضریب اطمینان بالا، استفاده کرد. (Farhadi et al., 2024; Pourgholam et al., 2024). روش فرکتال عیار- مساحت مبتنی بر میزان مساحتی است که هر عیار خاص در

تحلیل فرکتال

امروزه جدایش ناهنجاری از زمینه و جداسازی ناهنجاری‌های با درجه‌های شدت گوناگون، مهم‌ترین کار در بررسی‌های زمین‌شیمیایی است. برای جداسازی ناهنجاری در اکتشاف زمین‌شیمیایی از روش‌های آماری گوناگون مانند روش‌های آنالیز تک متغیره و چند متغیره استفاده شده است. روش‌های فرکتالی عیار- مساحت، عیار- تعداد جزو روش‌های ساختاری جداسازی ناهنجاری از زمینه هستند و با توجه به اینکه در آنها موقعیت

از V و مساحت های محصور با هر خط $[A(\geq V)]$ رابطه زیر برقرار است:

$$[A(\geq v) \propto v^{-\alpha}] \quad (1)$$

توان α در رابطه نشان دهنده شیب خط مستقیم رسم شده توسط کمترین مربع ها در نمودار $\log - \log$ است.

نتایج و بحث

برای دست یافتن به نقشه مناطق پتانسیل دار کانی سازی چندفلزی در منطقه مورد پژوهش، نقشه های تک عنصری عناصر شاخص شامل سرب، روی، باریم، آهن، مس، طلا و آرسنیک با به کارگیری عملگر گامای فازی ($\text{Gamma} = 0.9$) با هم تلفیق شدند (شکل ۱۲- A). سپس از الگوریتم یادگیری عمیق خودرمزگذار خودکار برای بازسازی نقشه به دست آمده، استفاده شد. ساختار شبکه خودرمزگذار استفاده شده در این پژوهش با هشت لایه پنهان، شامل چهار لایه رمزگذار و چهار لایه رمزگشا به صورت ۵۰۰۰ و ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ با ابعاد ورودی و خروجی ۵۰۰۰۰۰ و با تعداد دوره ۴۰۰ ($\text{epochs} = 400$) طراحی شد (جدول ۲).

منطقه مورد بررسی اشغال کرده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، میزان مساحت اشغالی توسط آن کاهش می یابد. در این روش، نمودار لگاریتمی عیار در برابر مساحت تجمعی رسم می شود (Aramesh Asl et al., 2015). این نمودار در نقاطی می شکند یا به عبارتی تغییر شیب تند می دهد که این نقاط نشان دهنده تغییر از زمینه به ناهنجاری های درجه های مختلف و به دنبال آن تغییرات در شرایط زمین شناسی به خصوص کانی سازی است. به طور کلی داده های زمین شیمیایی رفتار چند فرکتال دارند که این نشان دهنده میزان تغییرات در شرایط زمین شناسی، زمین شیمیایی، دگرسانی، هوازدگی سطحی، کانی سازی و به دنبال آن مراحل غنی شدگی یک عنصر است (Qaderi, 2014; Daneshvar Saein et al., 2020).

روش عیار- مساحت برای نشان دادن رابطه بین نتایج به دست آمده و اطلاعات زمین شناسی، زمین شیمیایی و کانی شناسی عمل می کند. کاربردی ترین ویژگی آن پیاده سازی آسان و توانایی محاسبه آستانه های غیرعادی کمی است (Zuo et al., 2009). برای مجموعه ای از خطوط غلظت های تک عنصری، خطوط غلظت V و مساحت غلظت های تک عنصری مساوی یا بزرگ تر

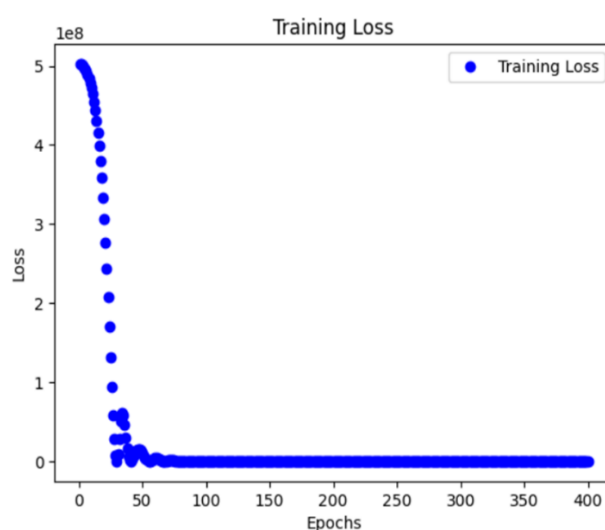
جدول ۲. مشخصات لایه های رمزگذار و رمزگشای تعریف شده برای اجرای الگوریتم خودرمزگذار خودکار عمیق محدوده هشتجین

Table 2. Specifications of the encoder and decoder layers defined for the implementation of the deep autoencoder algorithm Hashtjin Area

Layers name	Unites	Activation	Input
Encoded1	50000	Relu	Input image
Encoded2	5000	Relu	Endoded1
Encoded3	1000	Relu	Encoded2
Encoded4	500	Relu	Encoded3
Decoded1	1000	Relu	Encoded4
Decoded2	5000	Relu	Decoded1
Decoded3	50000	Relu	Decoded2
Decoded4	500000	Sigmoid	Docoded3

بالای کانی سازی چندفلزی را در بخش شمال شرقی منطقه مورد بررسی نشان می دهد (شکل ۱۲- B). شبکه تعریف شده در این بررسی با ورودی نقشه حاصل از انجام تلفیق فازی نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری و خروجی بازسازی شده و تابع بهینه ساز آدام تشکیل شد.

نمودار خطا برحسب تعداد، دوره های آموزش را نشان می دهد که در epoch=75 به طور تقریبی به مقدار ۰/۰۰۴۱ رسیده است و از دوره ۷۵ تا ۴۰۰ میزان خطا تقریباً ثابت مانده است (شکل ۹). خروجی بازسازی شده حاصل از اجرای روش خودرمزگذار خودکار عمیق را بر روی نقشه به دست آمده از تلفیق فازی نقشه های تک عنصری عناصر شاخص نشان می دهد که احتمال



شکل ۹. نمودار خطا برحسب تعداد دوره های آموزش در آموزش روش خودرمزگذار عمیق در منطقه هشتجین

Fig. 9. Error graph according to the number of training courses in training the deep autoencoder method in the Hashtjin area

(۱) تبدیل نقشه به دست آمده از الگوریتم خودرمزگذار عمیق به شیب فایل (قالب عمومی داده های برداری در نرم افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی است).
(۲) به دست آوردن فراوانی مربوط به هر نقطه (هر نقطه در واقع نماینده سلولی با ابعاد ۵۰*۵۰ است)؛
(۳) مرتب سازی مقادیر احتمال در حالت نزولی و سپس محاسبه مساحت و مساحت تجمعی هر سطح در نرم افزار اکسل؛
(۴) ترسیم نمودارهای log-log احتمال در مقابل مساحت و برازش خطوط مستقیم روی نقاط؛

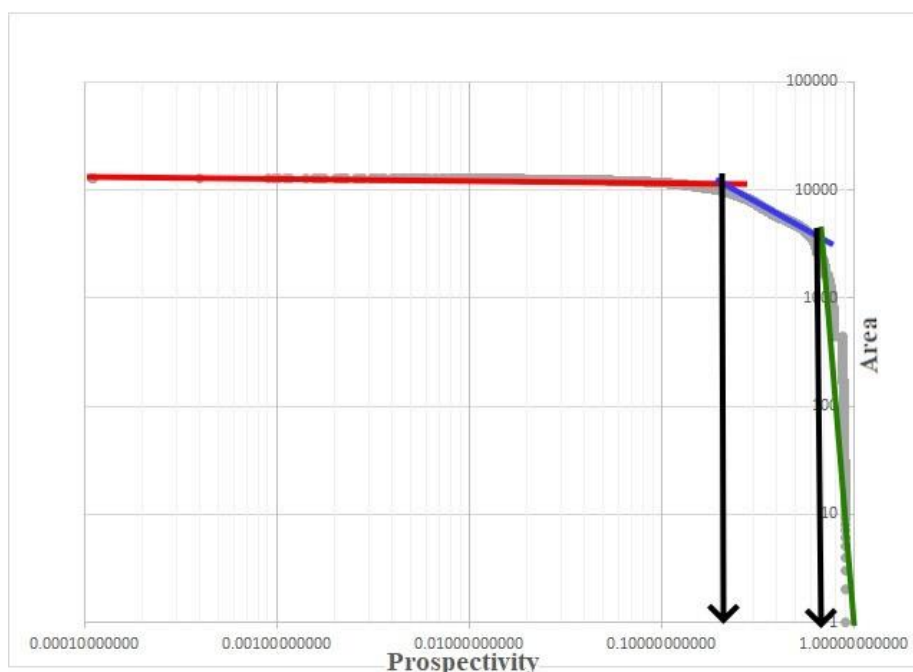
این روش برای تجزیه و تحلیل انواع مختلف داده های زمین شیمیایی از جمله نمونه های رسوب آبراهه ای (Cheng et al., 1996)، نمونه های سنگ (Cheng et al., 1994) و هوموس (Sim et al., 1999) استفاده شده است. در این پژوهش، روش عیار- مساحت پیشنهاد شده توسط چنگ و همکاران (Cheng et al., 1994) برای جداسازی سطوح مختلف، احتمال مربوط به کانی سازی در نقشه حاصل از الگوریتم خودرمزگذار خودکار استفاده شد. مراحل تفکیک جوامع با احتمال متفاوت با این روش را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۵) تعیین نقاط شکست نمودار و

۶) تهیه نقشه ناهنجاری بر اساس مرز احتمالات به دست آمده از نقاط شکست در نمودار لگاریتمی احتمال- مساحت.

نمودار احتمال- مساحت حاصل وجود سه جامعه با رفتار متفاوت را نشان داد. نقاط شکست مشخص شده مرز جدایش جوامع با احتمال کانی سازی متفاوت هستند. این نمودار در دو نقطه شکسته یا تغییر شیب تند می دهد (شکل ۱۰) که در جدول ۳، مقادیر نقاط شکست و در نمودار لگاریتمی (شکل ۱۱)، احتمال کانی سازی بر حسب مساحت آورده شده است. نتایج حاصل از انجام روش فرکتال بر روی خروجی به دست آمده از روش خودرمزگذار خودکار عمیق نشان می دهد که مساحتی حدود ۹۰۴۷۵۰۰ مترمربع از منطقه مورد پژوهش به عنوان منطقه احتمال کانی سازی معرفی می شود (شکل ۱۲-C). نقشه پیشگوی مناطق مستعد کانی سازی چندفلزی سرب، روی و مس را بر اساس مدل ترکیبی

پیشنهادی خودرمزگذار خودکار عمیق- فرکتالی (عیار- مساحت) نشان می دهد. در نقشه پیشگوی به دست آمده در شمال شرق منطقه مورد پژوهش، محدوده ای با پتانسیل بالای کانی سازی معرفی می شود که از نظر زمین شناسی با نهشته های ژوراسیک بالایی (سازند لار) و کرتاسه که اغلب با مرز گسله و به صورت ورقه های رانده و نابرجا رخنمون دارند و روی آن سازند آهکی کرتاسه زیرین (سازند تیز کوه) در آغ داغ مشاهده می شود، انطباق دارند. در هر سه نقشه پیشگوی حاصل از روش های تلفیق فازی (شکل ۱۲-A)، نقشه بازسازی شده با الگوریتم یادگیری عمیق خودرمزگذار خودکار (شکل ۱۲-B) و نقشه حاصل از اجرای روش ترکیبی پیشنهادی (شکل ۱۲-C) منطقه امیدبخش با احتمال بالای کانی سازی چند فلزی در بخش شمال شرقی منطقه معرفی شده است.



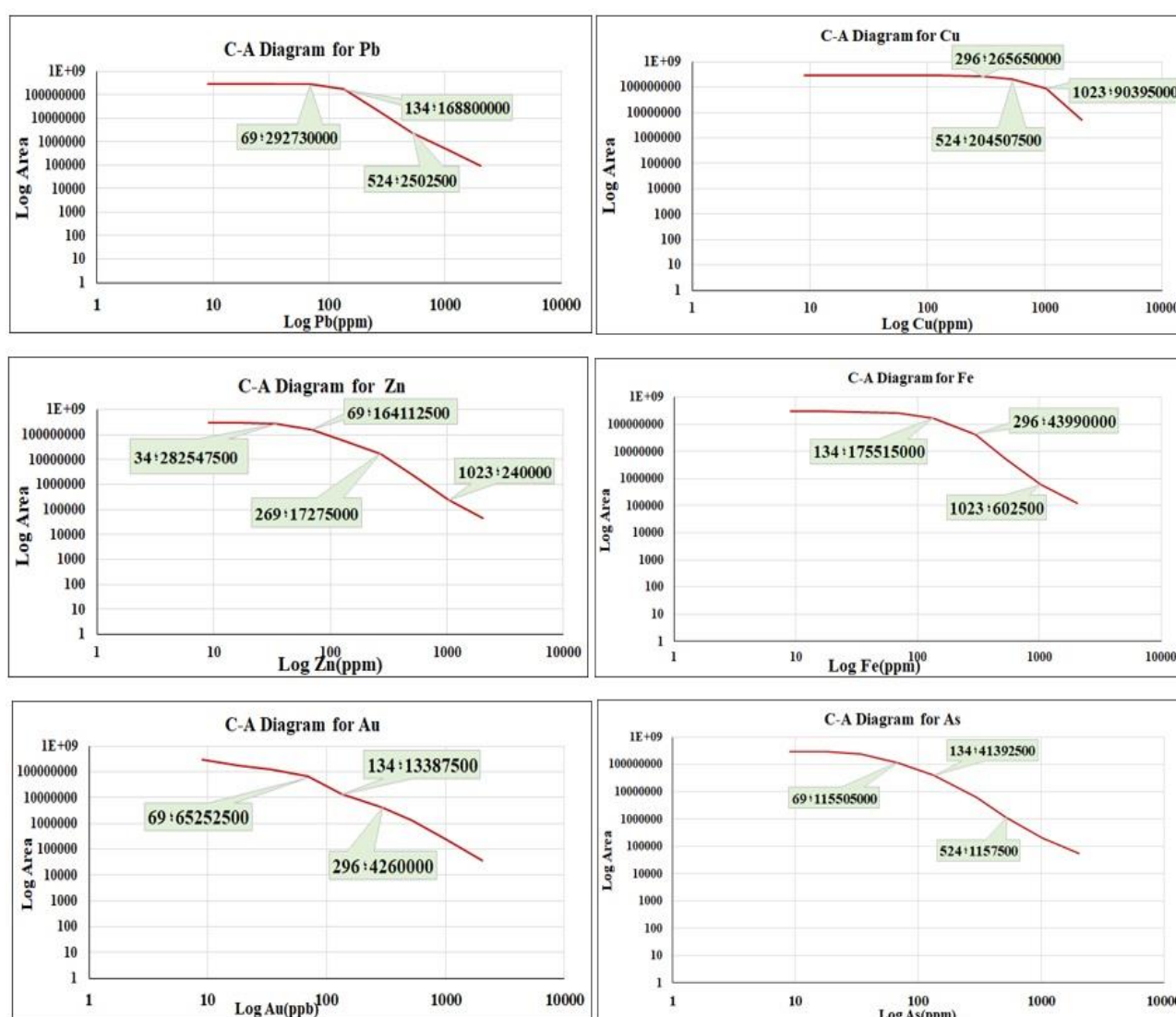
شکل ۱۰. نمودار احتمال کانی سازی بر حسب مساحت برای کانی سازی چندفلزی سرب و روی و مس در منطقه هشتجین

Fig. 10. Mineralization probability diagram by area for lead, zinc, and copper polymetallic mineralization in the Hashtjin area

جدول ۳. مقادیر نقاط شکست در نمودار احتمال- مساحت در منطقه هشتجین

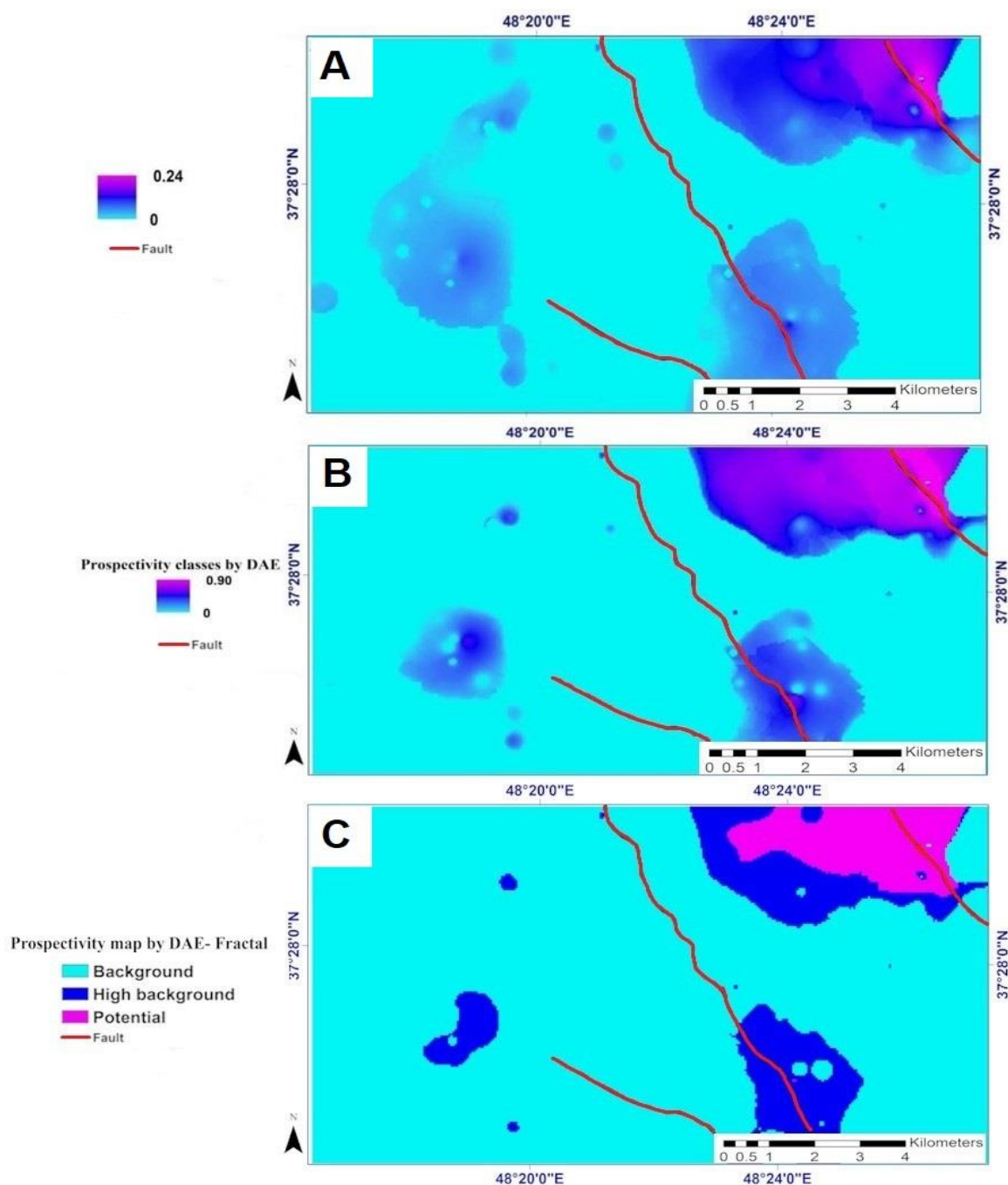
Table 3. Breakpoints values in the probability-area diagram in the Hashtjin area

Breakpoints	Breaking point 1	Breaking point 2
probability	0/22	0/61
Number of cells	9672	3619
Area (square meter) = number of cells 50*50	24180000	9047500



شکل ۱۱. نمودار لگاریتمی مدل چند فرکتالی عیار- مساحت و مقادیر شکست برای عناصر سرب، مس، روی، آهن، طلا و آرسنیک در منطقه هشتجین

Fig. 11. The logarithmic diagram of the C-N multifractal model and breakdown values for Pb, Cu, An, Fe, Au and As elements in the Hashtjin area



شکل ۱۲. نقشه های پتانسیل یابی معدنی به دست آمده بر اساس A: تلفیق فازی نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری با عملگر گامای فازی (Gamma=0.9)، B: بازسازی نقشه به دست آمده از تلفیق فازی با روش خودرمزگذار عمیق و C: اجرای روش فرکتالی عیار- مساحت بر روی نقشه بازسازی شده توسط خودرمزگذار عمیق در منطقه هشتجین

Fig. 12. Mineral prospectivity maps generated by A: Fuzzy integration of univariate geochemical maps with fuzzy gamma operator (Gamma=0.9), B: Reconstruction of the map resulting from fuzzy integration with the deep autoencoder method, and C: Implementation of fractal concentration-area method on the reconstructed map by deep autoencoder in the Hashtjin area

نتیجه گیری

منطقه مورد پژوهش دارای ویژگی های پیچیده زمین شیمیایی است. در چنین منطقه پیچیده ای، باید چندین روش را با هم پیاده سازی کنیم که در آنها بتوانیم به طور دقیق ناهنجاری را از زمینه جدا کنیم. بر اساس نقشه های به دست آمده، روش ترکیبی پیشنهاد شده منطقه ای با مساحت ۹۰۴۷۵۰۰ متر مربع را در شمال شرق منطقه مورد بررسی به عنوان هدف اکتشافی با احتمال بالای کانی سازی معرفی می کند که معرفی آن با شرایط زمین شناسی منطقه همخوانی دارد. در این پژوهش، روش ترکیبی خودرمزگذار خودکار عمیق- فرکتال بهتر از روش های کلاسیک و خودرمزگذار خودکار (در بازسازی نقشه حاصل از انجام تلفیق فازی بر روی نقشه های زمین شیمیایی تک عنصری) توانسته است اهداف اکتشافی را معرفی کند. روش ترکیبی معرفی شده در این پژوهش ابزاری قدرتمند برای شناسایی ناهنجاری های زمین شیمیایی در مناطقی است که محیط پیچیده زمین شناسی و زمینه زمین شیمیایی متنوع

دارند. با توجه به نتایج، هر سه روش به کار برده شده در این پژوهش احتمال بالای کانی سازی چندفلزی در شمال شرق منطقه مورد بررسی را نشان می دهند. از این رو، انجام بررسی ها و مطالعات بیشتر در منطقه معرفی شده در پژوهش های بعدی توصیه می شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت های سازمان زمین شناسی شمال غرب کشور، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اردبیل، همچنین از آقای مهندس داریوش گلابی و از ارائه نظر ها و پیشنهادهای ارزنده و سازنده داوران محترم نشریه زمین شناسی اقتصادی تشکر و قدردانی می نمایند.

1. Machin Learning
2. Deep autoencode
3. unsupervised learning
4. Interpolation
5. Geostatistical
6. Deterministic
7. (IDW) Inverse Distance Weighting
8. Classified
9. Equal Interval
10. Natural Breaks
11. Quantile
12. Geometrical Interval
13. Input image
14. Decoded
15. Adam
16. Shapefile
17. GIS

References

- Afzal, P., Aramesh Asl, R., Adib, A. and Yasrebi, A.B., 2015. Application of fractal modelling for Cu mineralisation reconnaissance by ASTER multispectral and stream sediment data in Khoshname area, NW Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43: 0255–660. <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0384-6>
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountains system northern Iran. *Journal of Geodynamic*, 21(1): 1–33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Aramesh, Asl, R., Afzal, P., Adib, A. and Yasrebi, A.B., 2015. Application of multifractal modeling for the identification of alteration zones and major faults based on ETM+ multispectral data. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 2997–3006. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1366-2>
- Bergen, K.J., Johnson, P.A., De Hoop, M.V. and Beroza, G.C., 2019. Machine learning for data-driven discovery in solid earth geoscience, *Science*, 363(6433). <https://doi.org/10.1126/science.aau0323>
- Cheng, Q., 2006. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*. 32(1–2): 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.002>
- Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 51(2): 109–130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)
- Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Bonham Carter, G.F., 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*. 56(3): 183–195. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00035-0)
- Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R. and Wang, W., 2010. Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China. *Biogeosciences*. 7(10): 3019–3025. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3019-2010>
- Coates, A., Lee, H., and Ng, A. Y., 2011. An analysis of singlelayer networks in unsupervised feature learning. 14th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS) 2011, Fort Lauderdale, FL, USA
- Daneshvar Saein, L., Afzal, P., Shahbazi, S. and Sadeghi, B., 2020. Application of an improved zonality index model integrated with multivariate fractal analysis: epithermal gold deposits. *Geopersia*, 12(2): 379–394. <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2022.339864.648652>
- Farhadi, S., Afzal, P., Boveiri Konari, M., Daneshvar Saeini, L. and Sadeghi, B., 2022. Combination of machine learning algorithms with concentration-area fractal method for soil geochemical anomaly detection in sediment-hosted Irankuh Pb-Zn deposit, Central Iran. *Minerals*, 12(6): 689. <https://doi.org/10.3390/min12060689>
- Farhadi, S., Tatullo, S., Konari, MB. and Afzal, P., 2024. Evaluating Stacking C and ensemble models for enhanced lithological classification in geological mapping. *Journal of Geochemical Exploration* 260: 107–441. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107441>
- Faridi, M., Anvari, A. and Ghassemi, M.R., 2000. Geological map of Hashtchin, scale 1:100000, Geological Organization of the country. Sheet Index 5664.
- Grunsky, E.C. and Agterberg, F.P., 1988. Spatial and multivariate analysis of geochemical data from metavolcanic rocks in the Ben Nevis area, Ontario. *Mathematical Geology*, 20(7): 825–861. <https://doi.org/10.1007/BF00890195>
- Hinton, G.E., Osindero, S. and Teh, Y.W., 2006. A fast-learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation* 18(7): 1527–54. <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>
- LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G., 2015. Deep learning. *Nature*, 521: 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P., 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11). <https://doi.org/10.1109/5.726791>
- Nabavi, M., 1976. An introduction to the geology of Iran. *Geological Survey of Iran*, 109: 104–109. (in Persian)
- Pourgholam, M.M., Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K. and Gholinejad, M., 2024. Recognition of REEs anomalies using an image Fusion fractal-wavelet model in Tarom metallogenic zone, NW Iran. *Geochemistry*, 84(2): 126093.

- <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126093>
- Qaderi, S., 2014. Survey of Remote sensing and geochemical exploration of a region in Kermanshah 1:100000 sheet. Master thesis, Urmia University, Urmia, Iran. Retrieved September 26, 2024 from <https://elmnet.ir/doc/10927102-41181>
- Redlich, A.N., 1993. Redundancy reduction as a strategy for unsupervised learning. *Neural Computation*, 5(2): 289–304. <https://doi.org/10.1162/neco.1993.5.2.289>
- Reichstein, M., Camps Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J. and Carvalhais, N., 2019. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science. *Nature*, 77(43): 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Scott, A.J. and Knott, M., 1974. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, 30(30): 507–512. <https://doi.org/10.2307/2529204>
- Silverman, B.W., 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall, London – New York, 175 pp. <https://doi.org/10.1002/bimj.4710300745>
- Sim, B.L., Agterberg, F.P. and Beaudry, C., 1999. Determining the cutoff between background and relative base metal smelter contamination levels using multifractal methods. *Computers & Geosciences*, 25(9): 1023–1041. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00064-3)
- Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W. and Wang, Y., 2019. GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: a case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 109: 26–49. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.003>
- Tukey, J.W., 1977. Some thoughts on clinical trials, especially problems of multiplicity. *Science*. 198(4318): 679–684. <https://doi.org/10.1126/science.333584>
- Vapnik, V., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, New York. 188 pp. <http://doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0>
- Wackernagel, H., 2003. *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*. Springer Science & Business Media, Mathematical Geology, 388 pp. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5>
- Ziaii, M., Ardejani, F.D., Ziaei, M. and Soleymani, A.A., 2012. Neuro-fuzzy modeling based genetic algorithms for identification of geochemical anomalies in mining geochemistry. *Applied Geochemistry*, 27(3): 663–676. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.12.020>
- Ziaii, M., Pouyan, A.A. and Ziaei M., 2009. Neuro-fuzzy modelling in mining geochemistry: Identification of geochemical anomalies. *Journal of Geochemical Exploration*. 100(1): 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.03.004>
- Zuo, R., 2017. Machine learning of mineralization-related geochemical anomalies: a review of potential methods. *Natural Resources Research*, 26: 457–464. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9345-4>
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Xia, Q., 2009. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.003>
- Zuo, R. and Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*. 164: 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.010>
- Zuo, R., Xiong, Y., Wang, J. and Carranza, E., 2019. Deep learning and its application in geochemical mapping. *Earth- Science Reviews*, 192: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.023>



Analysis of some error-causing factors in two-dimensional geoelectrical studies and providing a solution to minimize them

Hosein Moghaddasi^{1*}, Mohsen Moghaddasi², Ahmad Neyamadpour³

¹ Exploration geophysicist, Jarfabkavosh Co., Tehran, Iran

² Exploration geophysicist, Jarfabkavosh Co., Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geophysics, Masjed-Soleiman Branch, Islamic Azad University, Masjed-Soleiman, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History

Received: 21 August 2024
Revised: 19 October 2024
Accepted: 21 October 2024

Keywords

dipole-dipole
pole-dipole
geoelectric
electrical resistivity
chargeability
RES2DINV

In recent years, two-dimensional geoelectrical surveys have become one of the common and conventional methods in mineral exploration, groundwater resources investigations, engineering geophysics, archeology, etc. However, in some cases, these studies could not reach the targeted and expected results, and sometimes the geophysical results obtained have had a significant distance from the results obtained from direct studies such as drilling, etc. In this article, authors try to comprehensively analyze some factors that cause errors in two-dimensional geoelectrical studies, and on the other hand, state solution for minimizing the amount and severity of the discussed errors. Also, it has been tried to provide practical solution and approach for minimizing the error factors by a deep understanding of the source and mechanism of error factors. Finally, a case study in which geoelectrical data has been acquired by applying that new approach has been presented.

*Corresponding author

Hosein Moghaddasi

✉ moghaddasihosein@yahoo.com

How to cite this article

Moghaddasi, H., Moghaddasi, M. and Neyamadpour, A., 2024. Analysis of some error-causing factors in two-dimensional geoelectrical studies and providing a solution to minimize them. *Journal of Economic Geology*, 16(3): 123–136. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2024.1123>



©2024 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

2d geoelectrical investigations are one of the most important and effective methods for the study and exploration of different minerals, groundwater, etc (Moghaddasi, et al., 2020). They are also used for geotechnical and engineering geophysics analyses. But in some projects, the final validation test results such as drilling don't correspond so much with geoelectrical results so the output of the project didn't satisfy the clients. In this article, we will discuss error-causing factors and will provide a solution to minimize them.

Discussion

Pole-dipole and dipole-dipole arrays are two of the most used arrays for 2d geoelectrical studies. Figure 1 shows these arrays. The spacing between the current electrodes pair, C2-C1, is given as "a" which is the same as the distance between the potential electrodes pair P1-P2. These arrays have another factor marked as "n". This is the ratio of the distance between the C1 and P1 electrodes to the C2-C1 (or P1-P2) dipole length "a" (Loke, 2023).

But one of the main questions is what is the maximum and reasonable "n" for each array and why data acquisition by the large amount of "n" is wrong and leads to bad data?

First of all, we consider the sensitivity function meaning. The sensitivity function tells us the degree to which a change in the resistivity of a section of the subsurface will influence the potential measured by the array. The higher the value of the sensitivity function, the greater the influence of the subsurface region on the measurement (Loke, 2023). Now we discuss about those arrays:

Pole-dipole array

The pole-dipole array also has relatively good horizontal coverage, but it has a significantly higher signal strength than the dipole-dipole array and is not as sensitive to telluric noise as the pole-pole array (Loke, 2023).

By following figures, we analyze the effect of the large "n" on the acquired data in this array:

Figure 2 sensitivity sections show that the area with the greatest sensitivity lies beneath the P1-P2 dipole pair, particularly for large "n" factors. For "n" values of 4 and higher, the high positive sensitive lobe

beneath the P1-P2 dipole becomes increasingly vertical (Loke, 2023).

It can be understood based on Figure 3 what will happen when the 'n' factor jumps from 6 to 12 to 18. Here, the dipole length is kept constant at 1 meter. When 'n' is equal to 6 there are reasonably high sensitivity values to a depth of about 3 to 4 meters between the C1 current and the P1 potential electrode. When 'n' is increased to 12, the zone of high sensitivity values becomes increasingly more concentrated below the P1-P2 dipole in an even shallower region. This means that the array with 'n' equal to 12 is less sensitive to deeper structures than the array with 'n' equal to 6. This effect is even more pronounced when 'n' is increased to 18. (Loke, 2023).

Figure 4 shows the apparent resistivity anomaly due to a small near-surface high resistivity block for the pole-dipole array for 'n' values of up to 28. Note that the amplitude of the high resistivity anomaly due to the near-surface block increases with the 'n' value, i.e., the array becomes increasingly more sensitive to the near-surface block as the separation between the electrodes increases. In field surveys with the pole-dipole array where the 'n' factor is monotonically increased in the belief that this increases the survey depth, the pseudosection is frequently dominated by a series of parallel slanting high-amplitude anomalies due to near-surface inhomogeneities. The anomalies due to the near-surface structures frequently mask the anomalies due to deeper structures that are of interest. (Loke, 2023).

Dipole-dipole array

This array has been, and is still, widely used in I.P. surveys because of the low EM coupling between the current and potential circuits.

Figure 5 shows dipole-dipole sensitivity sections for n: 1, 2, 4, and 6 (Loke, 2023). Again, as can be seen for this array by increasing the "n" factor sensitivity tends to be beneath of dipole position on the surface and the sensitivity of the deeper part (which is our target zone for investigation), decreases dramatically

Now we can understand how much lateral resistivity inhomogeneities, rough topography, presence of high contact resistance, etc., (which are all unavoidable factors in IP/Rs data acquisition), will have an adverse effect on final data when data is acquired by larger.

Also, during the inversion process, even those

correct data which was acquired by smaller 'n' will be badly affected in the final sections.

Loke, as the creator of Res2dinv software, states that acquired data with "n" higher than 6-8 are so susceptible to noises, etc., and can cause wrong data (Loke, 2023). However, according to the authors of this article, even these values should be considered with caution and we suggest data acquisition with an even lower "n".

In fact, in the real world, and especially in IP/Rs investigation, many factors are the source of noise and we should use lower "n" factors to get the correct and real data.

Unfortunately, in some projects using larger "n" is routine and this is the main reason for failing the 2d geoelectrical project.

Suggested and optimal method

According to the mentioned sensitivity sections, it can be seen that the best scenario for geoelectrical surveys is when the surveys are done by $n=1$, and for increasing the exploration depth, the electrode distance (a) is gradually increased instead of increasing the "n" factor. The most favorable state of the sensitivity cross-section, the highest amount of signal to noise, and the least impact of noises and surface inhomogeneities occur in $n=1$. Nowadays with the introduction of newer technologies such as

automatic electrode switching geoelectric equipment and also switch boxes, the suggested optimal method can be implemented more easily.

Geoelectrical surveys with this method ($n=1$ and intermittent increase of the electrode distance) may reduce the speed of the operation and be less economical for contractors, but the results of the geoelectrical studies conducted with this method are much more reliable

Figure 6Fig.. shows one of the case studies in which authors used above suggested method and the results were excellent and RMS was very low.

Conclusion

In this article, it was tried to present a kind of pathology regarding the reasons of the failure of some two-dimensional geoelectrical studies with an analytical view and by the results obtained from the modeling and also the field analysis of the authors. It was clarified how much measurements with high "n" values can cause errors.

Finally, it was stated that the maximum reasonable and reliable number for n is 6-8 and it was stated that due to the presence of noise sources, also these numbers should be considered with caution.

Finally, the optimal method from which the best results are obtained was proposed.



تحلیلی آسیب‌شناسانه بر برخی عوامل ایجادکننده خطا در بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی و ارائه راهکاری برای کمینه‌کردن آنها

حسین مقدسی^{۱*}، محسن مقدسی^۲، احمد نیامدپور^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئوفیزیک اکتشافی، شرکت مهندسی ژرفاب کاوش، تهران، ایران

^۲ کارشناس ارشد ژئوفیزیک اکتشافی، شرکت مهندسی ژرفاب کاوش، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه ژئوفیزیک، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
در سال‌های اخیر برداشت‌های ژئوالکتریک دوبعدی به یکی از روش‌های متداول و مرسوم در بررسی‌های اکتشاف معادن، اکتشاف منابع آب زیرزمینی، بررسی‌های ژئوفیزیک مهندسی، باستان‌شناسی و ... تبدیل شده است؛ اما بر حسب بازخوردهای حاصل شده، در پاره‌ای از موارد این بررسی‌ها به نتیجه مطلوب و مورد انتظار منجر نشده است و گاهی نتایج به دست آمده فاصله معناداری با واقعیت‌های به دست آمده از بررسی‌های مستقیم نظیر حفاری و ... داشته است. در این مقاله سعی می‌شود به تحلیل جامعی از عوامل ایجادکننده خطا در بررسی‌های دوبعدی ژئوالکتریک پرداخته شود و از سوی دیگر، با بیان استانداردهای برداشت استنباط‌شده از این تحلیل‌ها، میزان و شدت خطاهای مورد بحث را کمینه کرد. همچنین سعی شده با شناخت ملموس و شهودی نسبت به ایجاد عوامل خطا، پیشنهادی بهینه و اجرایی برای حذف عوامل خطا ارائه شود که در نهایت با نتایج به دست آمده از یک مثال موردی به آن پرداخته شده است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰
	واژه‌های کلیدی دوقطبی - دوقطبی قطبی - دوقطبی ژئوالکتریک مقاومت ویژه الکتریکی شارژپذیری نرم‌افزار RES2DINV
	نویسنده مسئول حسین مقدسی moghaddasihosein@yahoo.com✉

استناد به این مقاله

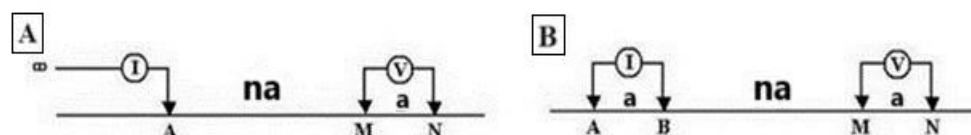
مقدسی، حسین؛ مقدسی، محسن و نیامدپور، احمد، ۱۴۰۳. تحلیلی آسیب‌شناسانه بر برخی عوامل ایجادکننده خطا در بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی و ارائه راهکاری برای کمینه‌کردن آنها. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۶(۳): ۱۲۳-۱۳۶. <https://doi.org/10.22067/econg.2024.1123>

مقدمه

فاصله بین جفت الکتروود جریان و پتانسیل و فاصله الکتروودی است، در آرایه‌هایی نظیر دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و ... تا اعدادی گاه ۱۵، ۲۰ و حتی بیشتر برداشت می‌شود که در این مقاله با تحلیل فنی بیان می‌شود که این داده‌ها، غیر قابل استناد بوده و حتی داده‌های صحیح برداشت شده در n های پایین‌تر را در حین فرایند **وارون‌سازی** تحت تأثیر قرار داده و مقطع نهایی به دست آمده غیر قابل تطابق با واقعیت زمین است. در نهایت با تحلیل صورت گرفته و درک مفهومی و شهودی موضوع راهکاری برای کمینه کردن این خطای رایج ارائه می‌شود.

بیان صورت مسئله

قبل از ورود به بحث ابتدا برای آشنایی خوانندگان محترم ابتدا به صورت شماتیک آرایه دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی نمایش داده می‌شود و عامل n معرفی می‌شود (Kalagari, 1992; Moghaddasi, et al., 2020) (شکل ۱- A و B).



شکل ۱. A: آرایه قطبی-دوقطبی و B: آرایه دوقطبی-دوقطبی

Fig. 1. A: Pole-dipole array, and B: dipole-dipole array

در این مقاله با دلایل زیر بیان می‌شود که در محیط واقعی، قرائت‌های صورت گرفته با مقادیر n بالای ۶ (یا در نهایت ۸) قابل استناد نیستند و بالابودن شدت سیگنال تأثیری بر روی قابل استناد بودن داده ندارد. در حقیقت ممکن است داده به دست آمده از لحاظ دقت و تکرارپذیری درست باشد؛ اما داده‌ای مناسبی برای انجام فرایند برگردان (Meju, 1986) نیست.

نرم‌افزار RES2DINV از اصلی‌ترین نرم‌افزارهای مورد استفاده برای وارون‌سازی داده‌های ژئوالکتریک دو بعدی بوده که

روش‌های ژئوفیزیکی کاربرد گسترده‌ای در بررسی‌های اکتشافی، مهندسی و ... دارند (Moshtaghi, et al., 2022; Moghaddasi, et al., 2024). در سال‌های اخیر، ژئوالکتریک به عنوان یکی از شاخه‌های ژئوفیزیک بسیار مورد توجه قرار گرفته و با رویکردهای مختلف از آن بهره گرفته شده است (Neyamadpour, et al., 2010; Ghanbari, et al., 2020). این علم همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی دارای محدودیت‌های ذاتی نظیر عدم یکتایی جواب، تفکیک پذیری پایین به خصوص با افزایش عمق کاوش و ... است (Samadi, 2012) که به طور طبیعی بخشی از آنها به فیزیک موضوع برمی گردد و اجتناب‌ناپذیر است. بعضی از خطاهای ایجاد شده و به دنبال آن نتایج غیر قابل استناد به دست آمده، به این علت است که فهم جامع و عمیقی نسبت به آرایه‌های برداشت ژئوالکتریک و نحوه برداشت آنها از طرف بعضی مجریان وجود ندارد. به عنوان مثال در برداشت‌های ژئوالکتریک دو بعدی قرائت‌هایی با عامل n که بیانگر نسبت

در حقیقت طبق شکل، عامل n بیانگر نسبت فاصله بین جفت الکتروود جریان و پتانسیل و فاصله الکتروودی (a) است (Milsom and Eriksen, 2011). نویسندگان این مقاله در سال‌های فعالیت خود مشاهده کرده‌اند که در طرح‌های بررسی ژئوالکتریک دو بعدی در داخل کشور، عامل n تا مقادیر بالایی حتی تا ۱۵ تا ۲۰ قرائت می‌شود. وقتی از بعضی از مجریان سؤال می‌شود، بیان می‌دارند که با توجه به استفاده از ژنراتور و بالابودن سیگنال به نویز، پس به طور اساسی، داده به دست آمده قابل استناد است؛ اما

می‌توان گفت که هرچه تابع حساسیت در یک نقطه از مقطع مقدار بیشتری داشته باشد، آن نقطه تأثیر بیشتری در مقدار مقاومت ویژه ظاهری قرائت‌شده خواهد داشت. با استفاده از این مقاطع می‌توان آرایش‌های الکترودی مناسبی را در شرایط مختلف زمین‌شناسی برای برداشت‌های یک بعدی و دوبعدی بررسی‌های ژئوالکتریک تشخیص داد.

برای انجام برداشت‌های ژئوالکتریک، بهترین چینش الکترودها در حالتی است که توزیع همگونی از مقدار تابع حساسیت در فضای نیم صفحه زمین وجود داشته باشد. هرچه این توزیع ناهمگون‌تر باشد و به عنوان مثال در زیر جفت الکترودهای جریان یا پتانسیل متمرکز باشد، از هدف مطلوب فاصله گرفته‌ایم. به زبان ساده، در چنین شرایطی یک ناحیه هرچند کوچک با مقدار بالای حساسیت، تأثیر زیادی روی داده قرائت‌شده می‌گذارد و نیاز به فرایندهای وارون‌سازی را که در اصل دارای عدم قطعیت بوده، بالا می‌برد. در شکل ۲، مقاطع حساسیت مربوط به آرایه قطبی - دوقطبی ارائه شده است.

با بررسی این مقاطع مشخص می‌شود که هرچه مقدار n افزایش می‌یابد، نواحی بیشینه حساسیت (یعنی نواحی که بیشترین تأثیر را بر روی داده قرائت‌شده دارند)، به سمت جفت الکترودهای پتانسیل P1-P2 و تک الکترودهای C1 متمایل می‌شوند. به عنوان مثال اگر در زیر جفت الکترودهای پتانسیل P1-P2 نویزهایی نظیر ناهمگنی‌های سطحی، مقاومت تماسی بالا، توپوگرافی خشن و ... وجود داشته باشد، این شرایط بی‌هنجاری کاذبی ایجاد می‌کند که به وجود یک توده بی‌هنجار عمیق در مرکز آرایه نسبت داده می‌شود؛ در صورتی که این بی‌هنجاری در اثر وجود یک توده سطحی کوچک و یا نویز در زیر جفت الکترودهای پتانسیل ایجاد شده است.

همچنین با بررسی مقاطع حساسیت این آرایه در مقادیر n بالا (شکل ۳) مشاهده می‌شود، محلی در مرکز آرایه که داده برداشت شده به این محل نسبت داده می‌شود، مقدار تابع حساسیت بسیار پایینی داشته و به عبارتی تأثیر بسیار کمی در مقدار مقاومت ویژه

پدیدآورنده این نرم‌افزار لوک (Loke, 2023) است. وی فایل آموزشی تحلیلی با عنوان 2-D and 3-D electrical imaging survey ارائه کرده است. بسیاری موارد فنی مربوط به بررسی‌های ژئوالکتریک که بر اساس آن نرم‌افزار را طراحی کرده است، در این فایل آموزشی بیان شده است. در این نرم‌افزار با ذکر دلایل فنی، به محدودیت‌ها و پیش‌شرط‌هایی که باید برای برداشت هر آرایه در نظر داشت، اشاره کرده است. این فایل به طور مرتب از سال ۱۹۹۶ تاکنون بازنگری شده و نسخه نهایی آن مربوط به سال ۲۰۲۳ است (Loke, 2023). بدیهی است تحلیل داده‌های ژئوالکتریک بدون فهم کامل این موضوعات امکان‌پذیر نیست. حال در اینجا با بهره‌گیری از محتوای این فایل آموزشی، به بررسی دو آرایه متداول در بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی می‌پردازیم.

آرایه قطبی - دوقطبی

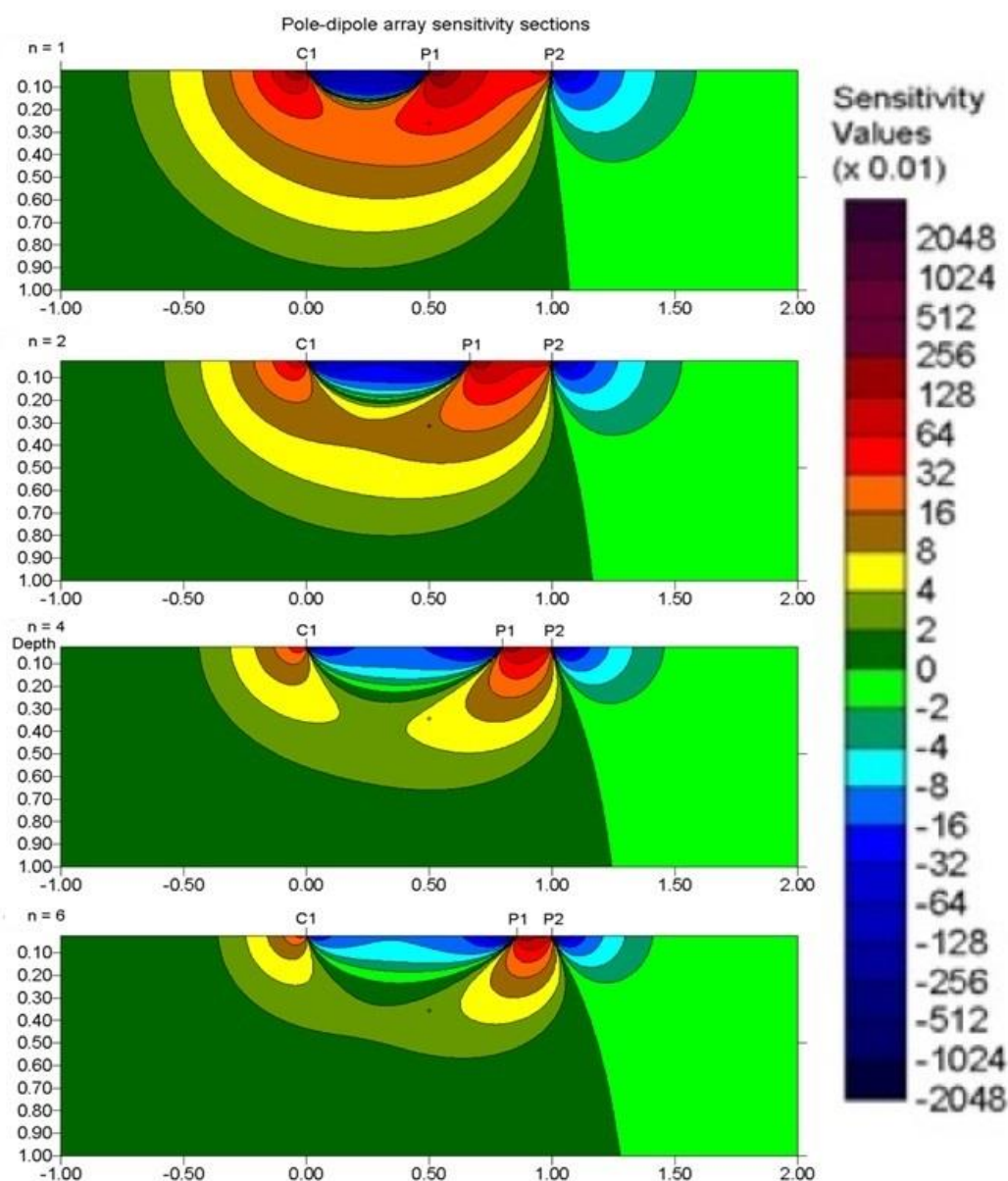
یکی از رایج‌ترین آرایه‌ها برای برداشت دوبعدی آرایه قطبی - دوقطبی است (Dentith and Mudge, 2014) که آرایه‌ای نامتقارن بوده و نسبت سیگنال به نویز بالاتری نسبت به آرایه دوقطبی - دوقطبی داشته و کمتر تحت تأثیر جریان‌های تلوریک قرار می‌گیرد و از آن به صورت رایج برای بررسی‌های IP/Rs استفاده می‌شود (Loke, 2023). این آرایه مانند دیگر آرایه‌ها، از مزیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود برخوردار است؛ اما سؤال اصلی این است که برای برداشت با آرایه قطبی - دوقطبی می‌توان بیشینه تا چند پرش (n) اقدام کرد؟

قبل از ورود به مبحث برای درک بهتر موضوع به معرفی موضوعی مهم در بررسی‌های ژئوالکتریک به نام تابع حساسیت می‌پردازیم (Loke, 2023).

تابع حساسیت به بررسی میزان حساسیت و تأثیرگذاری هر نقطه از فضای نیم صفحه زیر زمین بر روی مقدار مقاومت ویژه ظاهری قرائت‌شده می‌پردازد. با استفاده از این تابع می‌توان مقطع حساسیت در راستای خط چینش الکترودها برای هر آرایه الکترودی را به صورت جداگانه محاسبه و ترسیم کرد. در توضیح این مقاطع

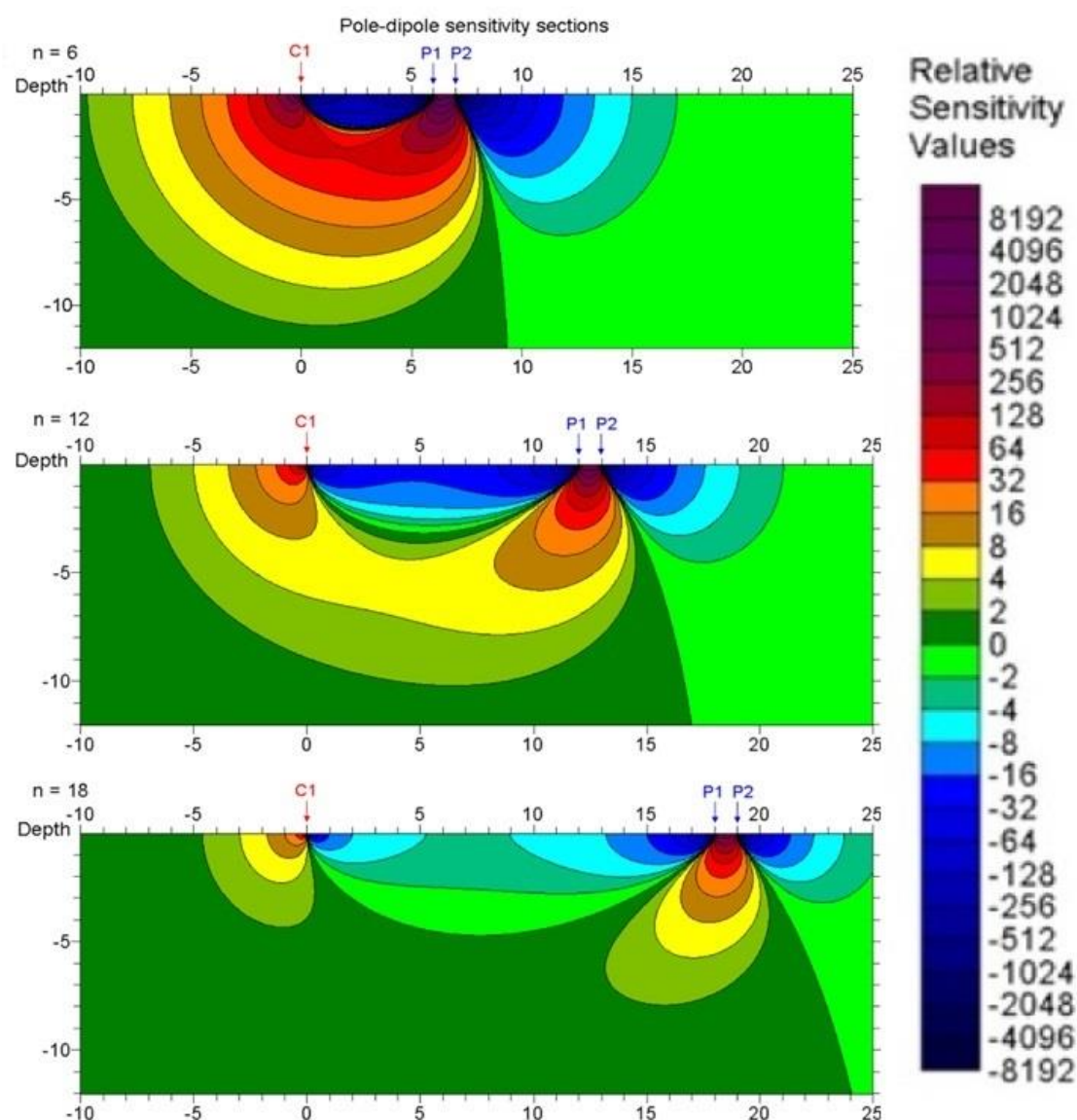
توپوگرافی، خطای مقاومت تماسی و ناهمگنی جانبی در زیر جفت الکتروود جریان یا پتانسیل به حتی یک هزارم واحد خطا منجر شود، این خطا در اثر مقادیر بسیار بالای حساسیت زیر جفت الکتروودها بسیار دچار بزرگ‌نمایی شده و در عدد نهایی قرائت شده تأثیر منفی فراوانی دارد.

ظاهری یا شارژپذیری قرائت شده داشته است که این باعث گمراهی در تحلیل نتایج می‌شود. برای درک بهتر موضوع می‌توان بیان داشت، همان‌گونه که قابل ملاحظه است، مقادیر تابع حساسیت در n های بالا (۱۲ و ۱۸) به بیش از هشت هزار واحد می‌رسد و اگر فرض شود حضور مقداری



شکل ۲. مقاطع حساسیت آرایه قطبی - دوقطبی برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶

Fig. 2. Pole-dipole sensitivity sections for n : 1, 2, 4 and 6



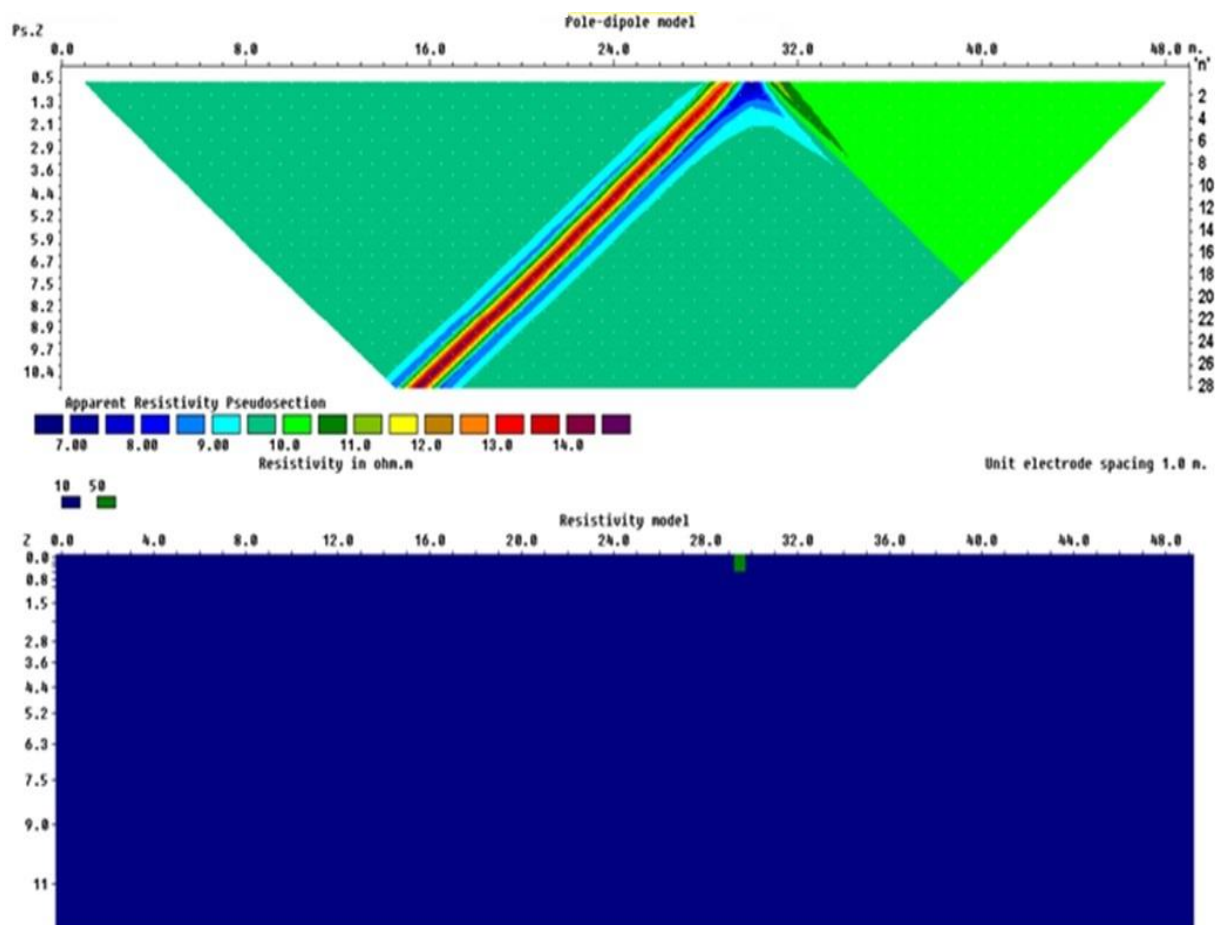
شکل ۳. مقاطع حساسیت آرایه قطبی-دوقطبی برای n های ۶، ۱۲ و ۱۸

Fig. 3. Pole-dipole sensitivity sections for n : 6, 12 and 18

مدل‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار Res2dmod رسم شده است.

حتی در n های بالا که با هدف نفوذ به اعماق بالا برداشت انجام می‌شود، اثر کاذب این بی‌هنجاری قابل مشاهده است و در حقیقت این بی‌هنجاری کاذب در عمل می‌تواند بی‌هنجاری‌های واقعی را مخفی کند.

در مدل‌سازی شکل ۴، به صورت واضح نمایش داده شده است که در شبه مقاطعی که برداشت‌ها تا مقادیر n بالایی انجام شده است، بی‌هنجاری مقاومت ویژه ظاهری به خاطر بلوک سطحی کوچک با مقاومت الکتریکی متفاوت از زمینه، تا چه حد کل مقطع را تحت تأثیر منفی خود قرار می‌دهد. در حقیقت، در این شبه مقطع n تا عدد ۲۸ برداشت شده است. این شبه مقطع با استفاده از



شکل ۴. مثالی از مدل‌سازی شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری برداشت‌شده با آرایه قطبی-دوقطبی با مقادیر n بالا. مشخص است که مقدار بی‌هنجاری (کاذب) با افزایش n بیشتر می‌شود که علت این امر همان حساسیت به بی‌هنجاری‌های سطحی بین جفت الکترود پتانسیل است.

Fig. 4. An example of apparent resistivity pseudo-section modeled with a pole-dipole array with high n values. The amount of anomaly (false) increased with the increase of n , because of the sensitivity to surface anomaly which is positioned between the pair of potential electrodes.

اقدام کرد؟

برای تحلیل موضوع، ابتدا مقاطع حساسیت مربوط به آرایه دوقطبی-دوقطبی برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶ نمایش داده می‌شود (شکل ۵).

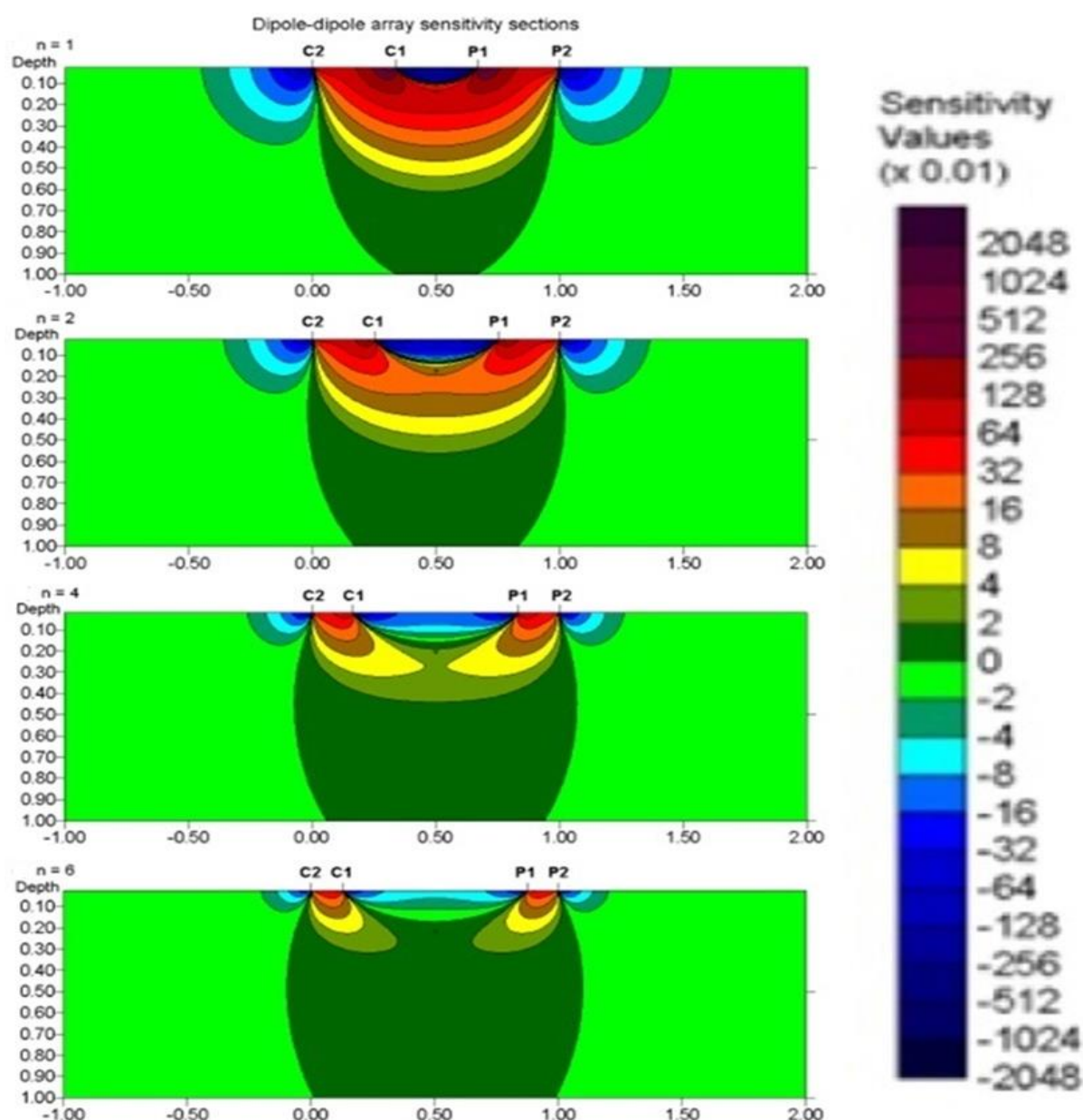
با تحلیل این مقاطع استنباط می‌شود که در این آرایه هم با افزایش n ، نواحی با مقادیر بالای حساسیت، متمایل به نواحی سطحی زیر جفت الکترودهای جریان C2-C1 و پتانسیل P1-P2 می‌شوند. به عنوان مثال اگر در محل جفت الکترود پتانسیل و جریان، نویزهایی

آرایه دوقطبی-دوقطبی

یکی دیگر از رایج‌ترین آرایه‌ها برای برداشت دوبعدی آرایه دوقطبی-دوقطبی است (Telford, et al., 1990; Moghaddasi and Moghaddasi, 2023) که آرایه‌ای متقارن بوده و شدت جفت‌شدگی الکترومغناطیسی کمتری دارد (White et al., 2003). این آرایه هم از مزیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود برخوردار است؛ اما سؤال اصلی این است که برای برداشت با آرایه دوقطبی-دوقطبی می‌توان بیشینه تا چند پرش (n)

مرکز آرایه که داده برداشت شده به این محل نسبت داده می‌شود، مقدار تابع حساسیت بسیار پایینی داشته و به عبارتی تأثیر بسیار کمی در مقدار مقاومت ویژه ظاهری یا شارژپذیری قرائت شده داشته که این باعث گمراهی در تحلیل نتایج می‌شود.

نظیر بی‌هنجاری‌های سطحی، مقاومت تماسی بالا، توپوگرافی خشن و ... حضور داشته باشد، اثر آن به عنوان یک بی‌هنجاری با شدت بالا در مقطع نمایان می‌شود. همچنین با بررسی مقاطع حساسیت این آرایه در مقادیر n بالا مشاهده می‌شود، محلی در



شکل ۵. مقاطع حساسیت آرایه دوقطبی - دوقطبی برای n های ۱، ۲، ۴ و ۶

Fig. 5. Dipole-dipole sensitivity sections for n : 1, 2, 4 and 6

حال با تحلیل‌های انجام‌شده، مشخص می‌شود که تا چه حد برداشت‌ها و قرائت‌های با n بالا، داده‌های کاذب و غیر قابل استناد به مفسر می‌دهد. از سوی دیگر، به علت اینکه این داده‌ها وارد نرم‌افزار شده است و نرم‌افزار به صورت یکپارچه اقدام به انجام عمل وارون‌سازی روی آن می‌کند، حتی داده‌های صحیح برداشت‌شده با n های پایین هم در فرایند وارون‌سازی دچار پیچیدگی شده و مقطع غیر قابل استنادی حاصل می‌شود. بر حسب تجربه‌های نویسندگان این مقاله، تحلیل‌های بیان‌شده از اصلی‌ترین عوامل شکست نتایج به دست آمده از بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی چه به صورت مقاومت ویژه Rs و چه IP/RS است.

ارائه راهکار برای کمینه کردن خطاهای بیان‌شده

بر اساس تحلیل بیان‌شده، لوک (Loke, 2023) به عنوان پدیدآورنده نرم‌افزار Res2dinv، بیان می‌دارد که داده‌های برداشت‌شده با n بالا (بیش از ۶ تا ۸) مستعد نویز شده و به شدت از استناد آن کاسته می‌شود؛ هرچند به نظر نویسندگان این مقاله حتی به این مقادیر هم باید با دیده احتیاط نگریست. در حقیقت و در عالم واقع و به خصوص در برداشت‌های IP/RS ، عوامل متعددی منشأ نویز هستند که به دلیل وجود این نویزها، به صورت نرم‌افزاری و با اعمال ابزار ریاضی نظیر عملیات وارون‌سازی، نمی‌توان شبه مقاطع را به واقعیت زمین برگرداند. در حقیقت توپوگرافی‌های خشن، وجود مقاومت تماسی بالا به خصوص در مناطق خشک ایران و ...، همگی عوامل موجود و اجتناب‌ناپذیری در بررسی‌های IP/RS هستند که در برداشت‌های با n بالاتر، اثر نامطلوب این عوامل بیشتر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود، نتایج بررسی‌ها در برداشت‌های با تعداد n های بیان‌شده هم تحت تأثیر منفی این عوامل قرار گیرد. همچنین به منظور به کمترین حد رساندن اثر نامطلوب توپوگرافی بر روی نتایج، تا حد امکان باید راستای برداشت پروفیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شود که کمترین میزان توپوگرافی در مسیر برداشت پروفیل وجود داشته باشد.

یکی از مواردی که شاید برای مجریان عملیات ژئوالکتریک دوبعدی غیر اتوماتیک مهم باشد، این است که ممکن است با برداشت‌های n با تعداد بالا، تعداد قرائتی که در روز انجام می‌دهند را افزایش دهند و نفع اقتصادی بیشتری حاصل کنند؛ یعنی با یک‌بار تزریق جریان، چندین برداشت را انجام‌دهند که در واقع صرفه اقتصادی طرح‌ها را بالا می‌برد؛ اما این موضوع باعث ایجاد نتایج منفی و غیر قابل استناد از بررسی‌های ژئوالکتریک می‌شود.

در حقیقت، همان‌گونه که بیان شد بسیاری از مجریان بررسی‌های ژئوالکتریک با گمان اینکه می‌توان با افزایش شدت جریان و به دنبال آن افزایش شدت سیگنال، برداشت‌های تکرارپذیر و صحیح انجام دهند، اقدام به برداشت‌های با n های بالا (حتی بالاتر از ۱۵) می‌کنند؛ اما با مطالب بیان‌شده، مشخص می‌شود که نتایج حاصل از این داده‌ها به هیچ وجه قابل استناد نیستند.

بهینه‌ترین روش برای برداشت‌های ژئوالکتریک دوبعدی

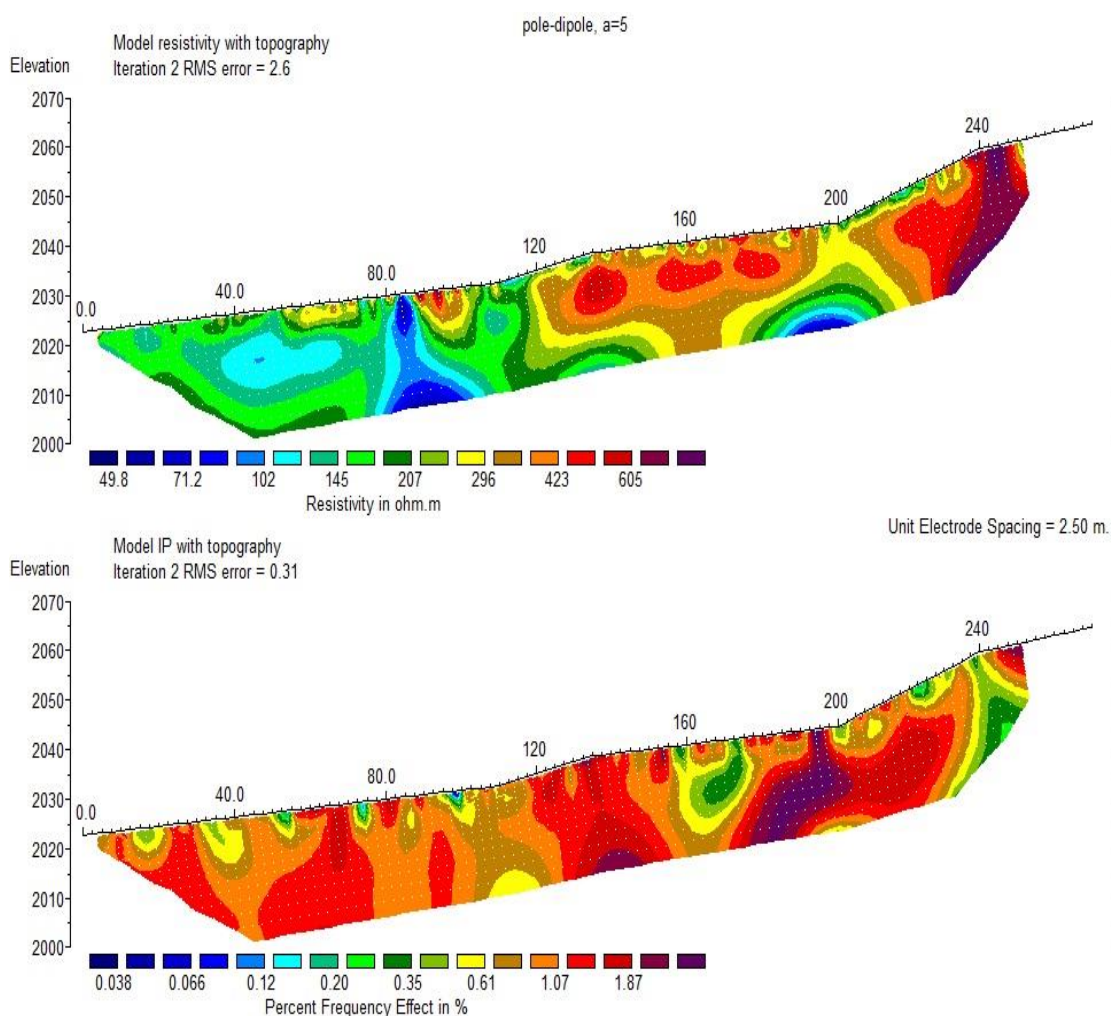
با توجه به موارد بیان‌شده، مشاهده می‌شود که بهترین روش برداشت‌های ژئوالکتریک در حالتی است که برداشت‌ها در حالت $n=1$ انجام شده و برای افزایش عمق کاوش، فاصله الکترودی (a) به تدریج افزایش یابد. در حقیقت، مطلوب‌ترین حالت مقطع حساسیت، بیشترین مقدار سیگنال به نویز، کمترین تأثیر نویزها و بی‌هنجاری‌های سطحی در حالت $n=1$ رخ می‌دهد.

در صورتی که از تجهیزات ژئوالکتریک چند الکترود با برداشت اتوماتیک استفاده شود، برداشت به این روش بسیار راحت بوده و می‌توان این کار را به آسانی انجام داد. در حالتی که برای برداشت‌های دوبعدی از تجهیزات غیر اتوماتیک استفاده شود، برای جابه‌جایی محل الکترودها می‌توان از سوئیچ باکس استفاده کرد. استفاده از سوئیچ باکس سرعت عملیات برداشت را افزایش خواهد داد.

ممکن است برداشت‌های ژئوالکتریک با این روش ($n=1$) و افزایش متناوب فاصله الکترودی، سرعت عملیات را کاهش داده

به این روش را با تجهیزات سوئیچ باکس در یکی از طرح‌ها به انجام رسانده و اجرایی بودن آن و کیفیت داده‌ها مورد تایید قرار گرفت (شکل ۶).

و از لحاظ اقتصادی برای مجریان صرفه کمتری داشته باشد؛ اما نتایج بررسی‌های ژئوالکتریک انجام‌شده با این روش قابل استنادتر بوده و تغییر دید منفی بعضی از کارفرمایان نسبت به نتیجه‌بخش بودن آن را به همراه خواهد داشت. نویسندگان این مقاله برداشت



شکل ۶. مثال موردی از مقاطع نهایی مقاومت ویژه و قطبش القایی (IP) با اعمال توپوگرافی که با روش پیشنهادی برداشت شده است.

Fig. 6. An example of final resistivity and induced polarization (IP) sections with applied topography by the suggested method.

نمایش داده شده که با $n=1$ برداشت شده‌اند، پایین بوده که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل نرم‌افزاری با داده‌های صحرایی و

چنان‌که قابل مشاهده است، مقدار خطای RMS (که به عنوان مهم‌ترین معیار ارزیابی درستی بررسی‌هاست)، در مقاطع

در نتیجه درستی و دقت داده‌های برداشتی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد با نگاه تحلیلی و منطبق بر نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های صورت گرفته و همچنین تحلیل‌های میدانی نویسندگان، نوعی آسیب‌شناسی نسبت به دلایل عدم موفقیت بعضی از بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی ارائه شود. در حقیقت، با بیان دلایلی که باعث بروز خطا در برداشت‌های با مقادیر n بالا می‌شود، سعی شد برای خواننده دید جامعی از علل ایجاد خطا در بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی حاصل شود. در نهایت پیشنهاد شد که بیشینه منطقی و قابل استناد برای n در آرایه دوقطبی - دوقطبی عدد ۶ و برای قطبی - دوقطبی عددی بین ۶ تا ۸ است و

بیان شد که به خاطر وجود منابع نویز، به این اعداد هم باید با دید احتیاط نگریست و حتی مقدار n را برای بررسی‌های ژئوالکتریک دوبعدی، کمتر از مقادیر بیان‌شده در نظر گرفت تا بتوان نتایج مستند و صحیحی به دست آورد.

در نهایت، روش بهینه‌ای که بهترین نتایج از آن به دست می‌آید، پیشنهاد شد و تحلیل شد که با ورود فناوری‌های جدیدتر نظیر تجهیزات اتوماتیک برداشت‌های ژئوالکتریک و همچنین سوئیچ باکس می‌وان روش بهینه بیان‌شده را راحت‌تر اجرایی کرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

1. Inversion
2. Tutorial
3. Sensitivity Function
4. EM Coupling
5. Multielectrode

References

- Dentith, M. and Mudge, S., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, New York, 454 pp.
- Ghanbari, H., Arab Amiri, A., Ebrahimi, S. and Mehri, M., 2020. Modeling and Interpretation of the Induced Polarization and Resistivity Data in Sharifabad Exploration Area, Northwest of Bardaskan. *Journal of Research on Applied Geophysics*, Volume 6(1): 12–23. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22044/jrag.2018.5782.1123>
- Kalagari, A.A., 1992. *Principles of Geophysical Exploration*. Tabriz University Press, Tabriz, 558 pp. (in Persian)
- Loke, M.H., 2023. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, s.l.: Geotomo Software, Res2dinv Software. Retrieved September 16, 2023, from
http://www.researchgate.net/publication/264739285_Tutorial_2D_and_3D_Electrical_Imaging_Surveys
- Meju, M., 1986. *Geophysical data analysis: Understanding inverse problem theory and practice*, SEG Press, Houston, 130 pp.
- Milsom, J. and Eriksen, A., 2011. *Field geophysics*. Wiley Press, New Jersey, 304 pp.
- Moghaddasi, M. and Moghaddasi, H., 2023. A new method for IP/Rs data acquisition in the frequency domain on a network. 15th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, University of Damghan, Damghan, Iran. (in Persian with English abstract) Retrieved September 1, 2023, from
https://www.researchgate.net/publication/373916659_abda_rwsh_nwyn_brdasht_IPRs_bh_swrt_s_hbkh_ay_A_new_method_for_IPRs_data_acquisition_on_a_network
- Moghaddasi, H., Moghaddasi, M. and Abbasinia, M., 2020. The role of correct delineation of bedrock topography in successful groundwater exploration using Electrical resistivity tomography. 19th Iranian Geophysics Conference, University of Tehran (Institute of geophysics), Tehran, Iran. Retrieved November 1, 2020 from
https://www.researchgate.net/publication/345490809_The_role_of_correct_delineation_of_bedrock_topography_in_successful_groundwater_exploration_using_Electrical_resistivity_tomography
- Moghaddasi, H., Moghaddasi, M. and Masnabadi, M., 2024. Integrated use of analytical signal and upward continuation for exploration of porphyry deposits and also separation and delineation of alterations related to these deposits (case study from the south of Kerman province). 16th Symposium of Iranian Society of Economic Geology. university of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Persian with English abstract) Retrieved September 1, 2024, from
https://www.researchgate.net/publication/382889454_bh_kargyry_tlfyqy_mlgrhay_sygnal_thlyly_w_adamh_frasw_dr_aktshaf_kansarhay_pwrfyry_w_tfkyk_dgrsany_hay_mrtbt_ba_anha_mthal_mwrdy_az_jnwb_krman_Integrated_use_of_analytical_signal_and_upward_continuati
- Moshtaghian, K., Abtahi, M., Esadi, H., Haj Heydari, M. and Jangarban, G., 2022. Inversion modeling of magnetic and IP/RS data with the aim of exploration of the northern porphyry copper-gold deposit of Dali. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 33(3): 79–92.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2021.272272.1886>
- Neyamadpour, A., Wan Abdullah, W., Taib, S. and Neyamadpour, B., 2010. Comparison of Wenner and dipole–dipole arrays in the study of an underground three-dimensional cavity. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7(1): 30–40.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/7/1/003>
- Samadi, L., 2012. *Basic Applied Geophysics*. Jahad Daneshgahi Kharazmi University Press, Tehran, 620 pp.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, New York, 751 pp.
- White, R., Collins, S. and Loke, P., 2003. Resistivity and IP arrays, optimised for data collection and inversion. *Exploration Geophysics*, 34(4): 229–232. <http://dx.doi.org/10.1071/EG03229>

- مقاله‌ای که برای بررسی و چاپ به نشریه ارسال می‌شود، نباید قبلاً در نشریه داخلی و خارجی دیگری به چاپ رسیده باشد، همچنین هم‌زمان (تا اعلام نظر نهایی این نشریه) به نشریه‌های دیگر داخلی و یا خارجی ارسال نشود. چاپ خلاصه مقاله ارائه شده در کنگره‌ها، سمپوزیوم‌ها و سمینارهای داخلی و خارجی این محدودیت را ندارد.
- در مقاله‌هایی که از پایان‌نامه ارشد یا دکتری استخراج شده است، اسامی اساتید راهنما و مشاور ذکر شود.
- در صورتی که مقاله برگرفته از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه یا طرح پژوهشی مراکز تحقیقاتی است، باید اسامی پژوهشگران و محل انجام پژوهش ذکر شود.
- نشریه در رد، قبول و ویراستاری مقاله آزاد است.
- دریافت مقاله فقط از طریق وب‌سایت نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، به آدرس <https://econg.um.ac.ir> امکان‌پذیر است.
- مقاله‌ها توسط متخصصان موضوعی داوری می‌شوند و در صورت تصویب و پذیرش مقاله، در فهرست مقاله‌های آماده انتشار سایت نشریه قرار می‌گیرند و بعد از ویراستاری و صفحه‌آرایی به نوبت به شماره‌ای خاص اختصاص داده می‌شوند.
- داوری مقاله دوسو ناشناس است (در کلیه مراحل بررسی مقاله، داوران و نویسندگان از اسامی یکدیگر مطلع نخواهند شد).
- تکمیل و ارسال فرم تعهدنامه، تعارض منافع و مشخصات نویسندگان الزامی است (برای دریافت فرم‌ها به سایت نشریه، منوی نویسندگان و زیرمنوی **فرم** مراجعه‌شود).
- ایمیل نویسنده مسئول حتی‌الامکان، ایمیل سازمانی باشد.
- اطلاعات بیشتر و کامل‌تر را در سایت نشریه (منوی نویسندگان و زیرمنوی **شرایط و ضوابط ارسال مقاله**) مشاهده نمایید.

سیاست دسترسی آزاد

این نشریه تحت مجوز بین‌المللی **Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)** است و به صورت دسترسی آزاد و بدون هزینه در دسترس خوانندگان و نویسندگان قرار می‌گیرد. تمام هزینه‌های نشریه توسط دانشگاه فردوسی مشهد تأمین می‌شود.

انواع مقاله قابل پذیرش

- مقاله پژوهشی
- مقاله مروری
- یادداشت پژوهشی
- نقد علمی

بخش‌های مقاله

مقاله شامل بخش‌های زیر باشد. اطلاعات کامل درباره هر بخش را در [راهنمای نگارش](#) (سایت نشریه، منوی نویسندگان و زیرمنوی [راهنما](#)) مشاهده نمایید.

- عنوان (فارسی و انگلیسی)
- نام نویسندگان و وابستگی سازمانی (فارسی و انگلیسی)
- چکیده (فارسی و انگلیسی)
- واژه‌های کلیدی (فارسی و انگلیسی)
- مقدمه
- روش مطالعه
- بحث و بررسی
- نتیجه‌گیری
- تعارض منافع
- قدردانی
- منابع

تدوین مقاله

در زیر خلاصه‌ای از راهنمای تدوین مقاله آورده می‌شود. اطلاعات کامل درباره نگارش مقاله را در [راهنمای نگارش](#) موجود در سایت نشریه (منوی نویسندگان و زیرمنوی [راهنما](#)) مشاهده نمایید.

- مقاله با نرم‌افزار WORD تایپ شود.
- متن مقاله به زبان فارسی باشد.
- مقاله دارای چکیده فارسی و چکیده مبسوط انگلیسی (طبق ساختار مشخص شده در [راهنمای نگارش](#)) باشد.
- نسخه اولیه به صورت تک ستونی تهیه شود.
- تعداد صفحه‌های مقاله از ۲۵ صفحه (شامل متن، شکل، جدول و منابع) تجاوز نکند.
- حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۲/۵، از راست و چپ ۲ سانتی‌متر باشد. ساین صفحه A4 و فاصله سطرها ۱/۵ (1.5 lines) تنظیم شود.
- اندازه و فونت قلم‌هایی که در نوشتن مقاله استفاده می‌شود را در فایل [راهنمای نگارش](#) موجود در سایت نشریه مشاهده نمایید.
- هنگام تنظیم مقاله از به کار بردن واژه لاتین که هم‌ارز فارسی دارد، خودداری شود.
- منابع انتهای مقاله با نیم سانتی‌متر فرورفتگی (Hanging) تنظیم شوند و از آوردن عدد و خط تیره در کنار منابع خودداری شود.
- تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.
- تمام عددها در متن مقاله، فارسی باشد و در صورت اعشاری بودن، ممیز به صورت (/) نوشته شود (عدد فقط در جدول و شکل به انگلیسی است).
- توضیح شکل (زیرنویس) و توضیح جدول (بالانویس) به دو زبان فارسی و انگلیسی باشد (در فارسی و انگلیسی مطابق هم باشند).
- در توضیح شکل و جدول به نام منطقه مورد بررسی اشاره شود.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

شکل

- شکلی که برای نشان دادن موقعیت جغرافیایی منطقه در ایران، استان و یا بخش کوچک‌تری نشان داده می‌شود، باید طول و عرض جغرافیایی، جهت شمال و مقیاس خطی داشته باشد و موقعیت (طول و عرض جغرافیایی) به درجه، دقیقه و ثانیه تنظیم شود.
- نقشه راهنما داشته باشد و در راهنما ترتیب سنی واحدهای سنگی از قدیم به جدید رعایت شود.
- به صورت رنگی و با کیفیت مناسب و مطلوب تهیه شود.
- کلمه، حرف، عدد و ... به کار رفته در داخل شکل، فقط به زبان انگلیسی باشد.
- علائم اختصاری شکل در زیرنویس آن شکل توضیح داده شوند (با ذکر منبع).
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

جدول

- در نرم افزار WORD تایپ شود.
- جدول در صفحه عمودی تایپ شود (Portrait).
- موقعیت باید به درجه، دقیقه و ثانیه ذکر شود.
- کلمه و حرف به کار رفته در داخل جدول به زبان انگلیسی (با سایز ۱۰ و فونت Times New Roman) باشد و در صورت اعشاری بودن اعداد، ممیز به صورت نقطه (.) نوشته شود.
- جدول به دلیل انگلیسی بودن باید از چپ به راست تنظیم شود.
- فاقد خط‌های عمودی باشد.
- در توضیح جدول (بالانویس)، واحد اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و فرعی ذکر شود.
- ترتیب اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی استفاده شده در جدول‌ها به ترتیب ظرفیت شیمیایی باشد.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

فرمول

- معادله و فرمول چپ‌چین شود.
- شماره‌گذاری فرمول، یک سطر بالاتر از فرمول قرار گیرد.

منابع

- منابع استفاده شده در مقاله، از منابعی باشند که به صورت کتاب، نشریه علمی، پایان‌نامه و ... بوده و قابل دسترسی توسط خواننده باشد. از منابع غیرقابل دسترسی و منابع غیرعلمی مانند درسنامه، جزوه استفاده نشود.
- استناد به منبع در متن مقاله (استنادهای درون متنی) و همچنین منابع انتهایی مقاله (برون متنی) باید به انگلیسی نوشته شوند (اگر در مقاله از منبع فارسی استفاده شده باشد، باید اطلاعات منبع به زبان انگلیسی برگردانده شود).
- اگر منبع مورد استفاده در مقاله، فارسی باشد؛ برای تبدیل اطلاعات کتابشناختی آن به انگلیسی، باید تمام اطلاعات آن (مانند نام نویسنده (نویسندگان)، عنوان منبع (نام نشریه، کتاب، گزارش) و سایر اطلاعات موردنیاز) از صفحه عنوان انگلیسی یا سایت اینترنتی منبع گرفته شود. از ترجمه شخصی اطلاعات منابع فارسی خودداری نمایید.
- سال‌های شمسی به میلادی تبدیل شوند (در استنادهای درون متنی و منابع برون متنی).
- اطلاعات کامل همه استنادهای درون متنی (طبق نمونه‌های ذکر شده) در انتهایی مقاله آورده شود. هر منبعی که در متن مقاله، شکل و جدول و توضیح آنها آمده باشد، اطلاعات کامل آن حتماً باید در انتهایی مقاله ذکر شود و همچنین هر منبعی که در انتهایی مقاله آمده باشد، باید در درون متن نیز به آن استناد شده باشد.
- نحوه نوشتن منابع برون متنی و استنادهای درون متنی در ادامه آمده است.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

ارجاع درون‌متنی (استناد درون‌متنی):

به دلیل این که منابع فارسی به کار رفته در مقاله باید به انگلیسی برگردانده شوند، لازم است ارجاع درون‌متنی منابع فارسی نیز به انگلیسی ذکر شوند. ارجاع در متن مقاله طبق موارد زیر باشد:

- ارجاع به منبعی با یک نویسنده: بین نام خانوادگی نویسنده و سال نشر ویرگول قرار می‌گیرد. مانند: (Sheikhi, 1995)
- ارجاع به منبعی با دو نویسنده: بین نام خانوادگی دو نویسنده کلمه and قرار می‌گیرد و بعد از ویرگول، سال نشر منبع ذکر می‌شود. مانند: (Salavati and Fahim Guilani, 2014)
- ارجاع به منبعی با بیش از دو نویسنده: بعد از نام خانوادگی نویسنده اول، عبارت et al. و سپس بعد از ویرگول سال نشر می‌آید. مانند: (Ghourchi et al., 2014)
- ارجاع به بیش از یک منبع: اگر بخواهیم در یک محل به چند منبع ارجاع دهیم، ارجاع مانند نمونه‌های بالا صورت می‌گیرد؛ با این تفاوت که همه داخل یک پرانتز قرار می‌گیرند و با نقطه ویرگول از هم جدا می‌شوند و ترتیب آوردن آنها بر اساس سال نشر از قدیم به جدید است. مانند: (Bardossy and Aleva, 1990; Arehart, 1996; Habibzadeh et al., 2014)
- هرگاه در متن، توضیح شکل و جدول (زیرنویس و بالانویس)، به طور مستقیم به منبع و نویسنده‌ای اشاره شود، باید ابتدا نام نویسنده منبع به فارسی و بعد در داخل پرانتز همراه با سال نشر به انگلیسی (سال میلادی) بیاید. مثال: کریم پور و همکاران (Karimpour et al., 2012)

ارجاع برون‌متنی (منابع انتهایی مقاله):

- منابع استفاده شده در کل مقاله فقط به زبان انگلیسی و سال میلادی باشد.
- برای استناد به مقاله‌های فارسی، از عنوان، نام نویسندگان و سایر اطلاعات کتابشناختی مورد نیاز در صفحه عنوان انگلیسی، چکیده انگلیسی و یا صفحه انگلیسی سایت منبع استفاده کنید و از ترجمه شخصی آن خودداری نمایید:
- برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین دارند، به صفحه انگلیسی سایت منبع مراجعه کنید.
- برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین ندارند، به صفحه عنوان انگلیسی و مشخصات انگلیسی پشت جلد مراجعه نمایید.
- برای استناد به آثار خارجی ترجمه شده به فارسی، نام نویسندگان فرنگی و عنوان انگلیسی یا عنوان اصلی اثر ذکر شود و سپس نام مترجم پس از عبارت (Translated by) بیاید و بعد سایر اطلاعات کتابشناختی منبع ترجمه شده به زبان انگلیسی آورده شود (لازم است محل نشر و ناشر کتاب یا اثر ترجمه شده بیاید و نه اثر اصلی).
- منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می‌شود.
- نام همه نویسندگان ذکر شود و از آوردن عبارت "et al." و others به جای آوردن نام سایر نویسندگان منبع، خودداری شود.
- نام منبع (نشریه، کتاب و ...) و ناشر مخفف نباشد و به طور کامل آورده شود.
- برای استناد به مقاله‌هایی که هنوز منتشر نشده‌اند، به جای سال نشر از in press استفاده شود.
- برای مقاله منتشر شده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.

- منابعی که در اصل به زبان فارسی و دارای چکیده انگلیسی هستند، بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت (in Persian with English abstract) در انتها مشخص شوند.
- منابعی که در اصل به زبان فارسی هستند و چکیده انگلیسی ندارند، بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت (in Persian) در انتها مشخص شوند.
- برای مقاله‌های منتشر شده که DOI دارند، آوردن DOI در پایان هر منبع الزامی است (DOI با آدرس دقیق ذکر شود).
مثال: <https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.80951>
- برای سایر منابعی که از سایت‌های اینترنتی گرفته شده‌اند و DOI ندارند، آدرس صفحه اینترنتی را بیاورید. بدین صورت که مانند دیگر منابع همه اجزاء را با توجه به نوع منبع آورده و در پایان آدرس اینترنتی را بعد از تاریخ بازیابی بیاورید. تاریخ بازیابی را به شکل زیر بیاورید:

Retrieved September 26, 2018 from <http://.....>

Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2013. Geochemistry of stream sediments, waters and Uranium and Thorium anomalies on Nyshabour turquoise mine and its environmental impacts in the lives of rural areas. Iranian Journal of Mineralogy and Crystallography, 21(1): 3–18. (in Persian with English abstract) Retrieved April 22, 2021 from <http://ijcm.ir/article-1-326-fa.html>

- اطلاعات هر منبع با توجه به نوع منبع، دقیقاً مانند **نمونه‌های زیر** نوشته شود. همه اجزاء مشخص شده در نمونه‌ها ذکر شوند. از آوردن اجزاء اضافی خودداری شود و اجزاء نیز در جای مشخص شده قرار گیرند. علائم نگارشی نیز دقیق و طبق فرمت باشد (به اجزاء، علائم نگارشی، فاصله و طرز قرار گرفتن هر جزء در نمونه‌ها توجه شود).

منابع برون متنی (با اطلاعات کامل) طبق نمونه‌های زیر تنظیم شوند:

برای نشان دادن بهتر، اجزاء و علائم نگارشی منابع با رنگ‌های متفاوت اعمال شده است.

مقاله منتشر شده در نشریه (Journal Article)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان مقاله، نام نشریه، دوره نشریه (جلد)، شماره نشریه، شماره صفحه ابتدایی و انتهای مقاله در نشریه، DOI یا آدرس اینترنتی

توضیح: برای مقاله، آوردن شماره ابتدایی و انتهای مقاله در نشریه، شماره دوره و شماره نشریه (Issue) الزامی است. در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.

Ghourchi, N., Karimpour, M.H., Farmer, G.L. and Stern, S., 2014. Geology, alteration, age dating and petrogenesis of intrusive bodies in Halak Abad prospect area, NE Iran. Journal of Economic Geology, 6(1): 23–48. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V6I1.23015>

مقاله ارائه شده در همایش (سمپوزیوم، کنگره، میتینگ و ... علمی) (Conference Article)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان مقاله، نام همایش، محل برگزاری، نام شهر محل برگزاری، نام کشور محل برگزاری، DOI یا آدرس اینترنتی

Majidifar, M., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2013. Geology, mineralization and geochemistry of Koli prospect area, northeast of Ghaen, South Khorasan province. 5th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Retrieved September 26, 2018 from https://www.researchgate.net/publication/273575902_Geology_mineralization_and_geochemistry_of_Koli_prospect_area_northeast_of_Ghaen_South_Khorasan_province

بخشی (فصلی) از کتاب، انتشارات ویژه (به طوری که هر بخش دارای نویسنده جداگانه باشد) (Book Section)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان بخش (فصل) کتاب، ویراستار، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره صفحه ابتدایی و انتهایی بخش کتاب، DOI یا آدرس اینترنتی

توضیح: در صورتی که یک ویراستار اصلی داشته باشد، به جای (Editors) از (Editor) استفاده می شود. در این قسمت ابتدا حرف اول نام کوچک ویراستاران و سپس نام خانوادگی می آید و صفحه نیز، صفحه ابتدایی و انتهایی بخش یا فصل کتاب مورد نیاز است.

Lentz, D.R., 1994. Exchange reactions in hydrothermally altered rocks: examples from biotite-bearing assemblages. In: D.R. Lentz (Editor), *Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 69-99. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_128

کتاب (Book)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره کل صفحه ها توضیح: برای کتاب، آوردن شماره کل صفحه های کتاب الزامی است.

Bardossy, G. and Aleva, G.J.J., 1990. Lateritic bauxite. Elsevier, Amsterdam, 624 pp.

ترجمه کتاب (Book Translated)

نویسنده (نویسندگان)، مترجم (مترجمان)، سال نشر، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره کل صفحه ها توضیح: برای محل نشر و ناشر، باید اطلاعات ترجمه کتاب بیاید و نیازی به محل و ناشر اثر اصلی نیست.

Mason, B. and Moore, K.B. (translated by Moore, F. and Sharafi, A.A.), 2003. Principles of Geochemistry. Shiraz University Press, Shiraz, 566 pp.

پایان نامه (Thesis)

نویسنده، سال نشر، عنوان پایان نامه، درجه پایان نامه، نام دانشگاه، نام شهر، کشور، شماره کل صفحه ها
توضیح: برای رساله دکتری به جای M.Sc. از Ph.D. استفاده می شود.

Sheikhi, R., 1995. Study of economic geology of Shahrak fe deposit, east of Takab. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 161 pp.

کارگاه علمی (Workshop)

برگزار کننده (برگزار کنندگان)، سال برگزاری، عنوان، نام کارگاه، محل برگزاری، نام شهر محل برگزاری، نام کشور محل برگزاری،
تاریخ برگزاری، DOI یا آدرس اینترنتی

Calvin, W.M., Kratt, C. and Faulds, J.E., 2005. Infrared spectroscopy for drillhole lithology and mineralogy. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, United States (21 February 2005). Retrieved September 26, 2018 from <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2005/calvin.pdf>

نقشه (Map)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان نقشه، ناشر

توضیح: در صورت داشتن محل نشر، می توانید آن را بعد از ناشر بیاورید.

Karimpour, M.H., Ashouri, A. and Saadat, A., 2009. Geological map of Taherabad, scale 1:100,000. Geological Surver of Iran.

گزارش (Report)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان گزارش، ناشر، محل نشر، شماره گزارش، شماره کل صفحه ها

Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmandzadeh, A.M., 1966. Geology of Tarom district western part (Zanjan area, northwest Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 40 pp.

منابع اینترنتی (Internet Resources)

هر منبع اینترنتی را با توجه به نوع منبع به شکل های ذکر شده قبل در آورده و در پایان، آدرس صفحه اینترنتی آن منبع بعد از تاریخ بازیابی آورده شود. مثال:
Retrieved September 26, 2018 from <https://.....>

این نشریه عضو کمیته بین‌المللی اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیروی می‌کند.

منشور اخلاق نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، بر مبنای رهنمودهای ارائه‌شده توسط کمیته اخلاق انتشار (COPE) طراحی شده است و از کلیه کاربران انتظار می‌رود به اصول اخلاقی ذکر شده پایبند باشند. بدیهی است هرگونه سرقت علمی یا سایر رفتارهای غیر اخلاقی به حذف مقاله از فرایند داوری منجر خواهد شد. این منشور جهت تعیین وظایف و تعهدات نویسندگان، سردبیر، اعضای هیئت تحریریه و داوران تنظیم شده است.

انتشار و تألیف

- مقالات پژوهشی در فرایند داوری به‌وسیله هیئت‌داوران و کارشناسان علمی که از طرف سردبیر یا مدیر مسئول یا هر دو انتخاب می‌شوند، به‌صورت محرمانه و بی‌نام ارزیابی می‌شوند.
- ملاک ارزیابی مقالات بر اصالت، کیفیت علمی، صحت ارائه و اهمیت پرداختن صحیح به سبک نگارش فارسی است.
- بر اساس تصمیم داوران و کمیته تحریریه، مقالات پذیرفته، تجدیدنظر و یا رد می‌شوند.
- نسخه تجدیدنظر شده به کمیته تحریریه مربوطه ارائه و تصمیم‌گیری نهایی بر اساس تصمیم کمیته انجام می‌شود.
- مقالات رد شده در پایگاه اطلاعاتی نشریه نگهداری می‌شوند.
- پذیرش مقاله منوط به تأیید الزامات قانونی و تسلیم تعهدنامه نویسندگان (شامل پذیرفتن مسئولیت، کپی‌رایت و سرقت علمی) است و پس از آن به‌عنوان مقاله پذیرفته شده در فهرست مقالات پیش از انتشار قرار گرفته و به‌صورت آنلاین نمایش داده می‌شود.
- سرقت علمی به‌وسیله گروه تحقیق در دانشگاه و ارجاع متقابل آن، قبل از پذیرش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نویسندگان

- گواهی اصالت مقاله توسط نویسندگان در هنگام ارسال مقاله به صورت الکترونیکی تسلیم می‌شود، همچنین باید گواهی شود که مقاله ارسال‌شده در نشریه دیگری چاپ نشده است و یا در دست بررسی برای چاپ نیست.
- اصلاحات و دیدگاه‌های پیشنهادی کمیته داوران ظرف مدت ۳۰ روز از تاریخ ابلاغ، به مدیر مسئول نشریه ارجاع داده شود.
- تقدیر و تشکر و وابستگی سازمانی نویسندگان در مقاله آورده شود و هرگونه مغایرت منافع بین نویسندگان و یا سازمان‌ها ذکر شود.
- از گزارش خطا و اشتباه در آثار منتشرشده که به بهبود کیفیت مقالات کمک می‌کند، استقبال می‌شود.
- نویسندگان بعد از تکمیل فرایند ارزیابی مقاله، حق انصراف از چاپ را ندارند.

داوران

- رازداری و محرمانه‌بودن اطلاعات مقاله در همه زمینه‌ها رعایت شود. فرایند داوری مقالات به صورت مخفیانه و بی‌نام انجام می‌شود؛ درحالی‌که حفظ اصالت مقالات در اولویت قرار می‌گیرد.
- فرایند داوری باید در اسرع وقت انجام شود و دیدگاه‌های مربوط به اصالت مقاله، صرف‌نظر از پیشنهادها در مورد تجدیدنظر، رد

- و یا پذیرش مقاله، به سردبیر فرستاده شود.
- پیشنهاد‌های داوران در خصوص مقالات منتشر شده باید در قالب فرم‌های داوری و در بخش دیدگاه‌های مربوط به نویسنده و سردبیر، به آنها ارائه شود.
- سرقت علمی شامل هم‌پوشانی مقاله با دیگر مقالات چاپ شده، باید به اطلاع برسد؛ به طوری که هیئت تحریریه بتواند تصمیم نهایی را در مورد رد یا پذیرش مقاله اتخاذ کند.
- داوران باید از داوری مقالاتی که تضاد منافع دارند، امتناع کنند.

سردبیران

- همه سردبیران مسئول (سردبیر، مدیر مسئول و هیئت تحریریه) اختیار تام در رد یا قبول هر مقاله داشته و کیفیت کلی مقالات منتشر شده بر عهده آنهاست.
- سردبیران همیشه باید استراتژی‌هایی را به منظور بالا بردن کیفیت مقالات، پیشنهاد داده و اجرا کنند.
- صحت و سقم سابقه تحصیلی نویسنده قبل از بررسی مقاله باید ارزیابی شود.
- اصالت و کیفیت مقاله، صحت مطالب ارائه شده و مرتبط بودن با زمینه انتشارات باید تنها ویژگی برای پذیرفتن یا رد مقالات باشد.
- تصمیم نهایی نباید بدون ادله محکم لغو شود.
- ناشناس بودن هویت داوران و نویسندگان تا زمانی که تصمیمی در مورد مقاله اتخاذ نشده است، باید حفظ شود.
- ویراستاران راه حلی برای مسائل اخلاقی و مشکلاتی از قبیل تقابل نویسندگان در ارتباط با مقالات چاپ شده یا چاپ نشده آنها، پیدا کنند.
- رد مقالات بر اساس سوءظن امکان پذیر نیست.
- تضاد منافع میان اعضای هیئت تحریریه، نویسندگان و داوران باید به درستی و بر اساس دستورالعمل کمیته اخلاق نشر (COPE) حل و فصل شود.

بیانیه سرقت علمی آثار

- همه قوانین تعریف شده توسط کمیته اخلاق نشر (COPE) باید توسط اعضای هیئت تحریریه، داوران و نویسندگان اجرایی شود.
- مقاله در مرحله اول (فرایند بررسی سردبیر) می‌تواند از روند خارج شود؛ اما زمانی که در فرایند داوری قرار می‌گیرد، انصراف از روند داوری مشمول پرداخت جریمه به هیئت تحریریه است.
- هر تغییر عمده در مقاله پذیرفته شده با ارائه ادله قابل انجام است.
- همه اعضای هیئت تحریریه و نویسندگان، باید هر نوع اصلاحی را صادقانه و به طور کامل انجام دهند.
- اخلاق نشر باید در مقاله رعایت شود. سرقت علمی و یا ارائه داده‌های تقلبی موجب می‌شود که نویسندگان به عنوان ناقضان قوانین کمیته اخلاق نشر (COPE) تلقی شوند و نام آنها در فهرست سیاه این کمیته قرار گیرد که اتخاذ تصمیم بر عهده هیئت تحریریه است.

Contents

Geological, alteration, mineralogy and geochemical studies of the Copper deposit in the Kalatehno prospect area, northwest of Gonabad (Khorasan Razavi province)	1
Sedigheh Zirjanizadeh, Roohollah Miri Bydokhti	
Whole-rock geochemistry and crystal chemistry of apatite at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district (west of Zanzan): an approach to the identification of skarn-causative granitoids and magmatic-metallogenic evolutions	23
Afsoon Dastour, Ebrahim Tale Fazel, Ashraf Tourkian	
Analytical and Comparative Analysis of Copper Industry Development Programs in Iran	57
Adel Rouhi Jouybari, Seyed Mohammad Esmail Jalali	
Petrogenesis of Intrusive body in Northeast of Joveinan, North of Isfahan, Urumieh- Dokhtar magmatic zone	79
Shahzad Sherafat, Majid Zeidi, Mahnaz Khodami	
Application of Concentration-Area fractal modeling and artificial neural network to identify Cu, Zn±Pb geochemical anomalies in Hashtjin area, NW of Iran	101
Ali Imamalipour, Hamed Ebrahimi, Amir reza Abdollahpur	
Analysis of some error-causing factors in two-dimensional geoelectrical studies and providing a solution to minimize them	123
Hosein Moghaddasi, Mohsen Moghaddasi, Ahmad Neyamadpour	

Journal of Economic Geology as Quaterly in the field of economic geology and related sciences is published in Persian with English abstract.

Aims

- The publication of Scientific- Research papers;
- Development of research and promotion of knowledge geological and geochemical exploration;
- Dissemination of latest scientific achievements of universities and academic institutions.

Scope

- Economic Geology
- Geochemical Exploration
- Geophysical Exploration
- Remote Sensing and Mineral Exploration
- Environmental Geology
- Petrology
- Mining Engineering Sciences

Indexing and Abstracting

Scopus®

GeoRef

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

Google
Scholar

EBSCOhost

ISC
پایگاه اطلاعاتی علوم جهان اسلام

SID
پایگاه اطلاعات علمی
جهاد دانشگاهی

magiran®





Journal Information

Print ISSN: 2008-7306

Online ISSN: 2423-5865

Publication: Quarterly

Publication authorization

(Ministry of Culture and Islamic Guidance)

No. 21124, 23 November 2009

Scientific- Research grade

(Ministry of Science, Research and Technology)

No. 4143, 31 July 2010

Contact Us

Mailing Address: Ferdowsi University of Mashhad (FUM) campus, Azadi Sq., Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

P.O. Box: 9177948973

Email: econg@um.ac.ir

Website: <https://econg.um.ac.ir>

Phone: +98 (51) 38804050

Fax: +98 (51) 38807352

Publisher

Ferdowsi University of Mashhad

Director-in-Charge

Editor-in-Chief

Mohammad Hassan Karimpour

Professor, Ferdowsi University of Mashhad

karimpur@um.ac.ir

Editorial Board

Dr. Mohammad Hassan Karimpour

(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Charles R. Estern

(Prof., University of Colorado, U.S.A.)

Dr. Mohammad Hossein Adabi

(Prof., Shahid Beheshti University)

Dr. Ebrahim Rastad

(Associate Prof., Tarbiat Modares University)

Dr. Gholam Reza Lashkaripour

(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Abbas Moradian

(Associate Prof., Shahid Bahonar University)

Dr. Seyed Reza Moussavi Harami

(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Seyed Ahmad Mazaheri

(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Majid Ghaderi

(Prof., Tarbiat Modares University)

Dr. Farhad Bouzari

(Research Associate, The University of British Columbia)

Dr. Amir Morteza Azim Zadeh

(Senior Researcher, Luleå University of Technology)

Executive Director

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)

Consultant

Dr. Azadeh Malekzadeh Shafaroudi (Ferdowsi University of Mashhad)

Persian Editor

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)

Page Designer

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)



ISSN (P): 2008-7306

ISSN (E): 2423-5865

JOURNAL OF ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 16, No. 3, 2024, Serial No. 42

CONTENTS

Geological, alteration, mineralogy and geochemical studies of the Copper deposit in the Kalatehno prospect area, northwest of Gonabad (Khorasan Razavi province) Sedigheh Zirjanizadeh, Roohollah Miri Bydokhti	1
Whole-rock geochemistry and crystal chemistry of apatite at intrusive suites of the Qeynarjeh-Angouran district (west of Zanjan): an approach to the identification of skarn-causative granitoids and magmatic-metallogenic evolutions Afsoon Dashtour, Ebrahim Tale Fazel, Ashraf Tourkian	23
Analytical and Comparative Analysis of Copper Industry Development Programs in Iran Adel Rouhi Jouybari, Seyed Mohammad Esmail Jalali	57
Petrogenesis of Intrusive body in Northeast of Joveinan, North of Isfahan, Urumieh- Dokhtar magmatic zone Shahzad Sherafat, Majid Zeidi, Mahnaz Khodami	79
Application of Concentration-Area fractal modeling and artificial neural network to identify Cu, Zn±Pb geochemical anomalies in Hashtjin area, NW of Iran Ali Imamalipour, Hamed Ebrahimi, Amir reza Abdollahpur	101
Analysis of some error-causing factors in two-dimensional geoelectrical studies and providing a solution to minimize them Hosein Moghaddasi, Mohsen Moghaddasi, Ahmad Neyamadpour	123