



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 Torkian³

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

³ 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). Σ REE 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 Torkian, 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-metallogensis 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 poulder 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
<p>ناحیه قینرجه-انگوران در محل تلاقی پهنه‌های ساختاری ارومیه-دختر و سهندج-سیرجان، در شمال غرب ایران جای دارد. در این ناحیه دنباله‌های نفوذی با سن تریاس میانی-ژوراسیک بالایی شامل توده کوارتزدیوریت 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 کالک‌آلکالن هستند که شواهد گرانیتوئیدهای نوع I (Na₂O/K₂O = 0.8-2.0) محیط‌های فرورانش (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 کوارتزدیوریت قراول‌خانه با تمرکز بالای فلئور (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 کوارتزدیوریت قراول‌خانه بیشترین شباهت را با الگوی پتروژنز-فلززایی توده‌های مولد ذخایر اسکارن آهن نشان می‌دهند.</p>	<p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳</p> <p>واژه‌های کلیدی زمین‌شیمی سنگ‌کل آپاتیت قینرجه-انگوران غرب زنجان</p> <p>نویسنده مسئول ابراهیم طالع فاضل e.talefazel@basu.ac.ir ✉</p>

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): ۲۳-۵۵. <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 به‌سزایی 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 ، Str/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., 2022). 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-زمین‌گرمایی 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 یلبا (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 کوارتزدیوریت 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 درون‌یابی 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-ساختاری ایران (Aghanabati, 2004)، در محل تلاقی پهنه‌های ساختاری ارومیه-دختر و سندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱-A). واحدهای سنگی منطقه بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان (Babakhani and Ghalamghash, 2001) از قدیم به جدید شامل واحد کوارتز مسکویت شیست (PC_k^{sh}) متشکل از میکاشیست و کوارتزیت است که پس از آن به صورت ناپیوسته واحد سرپانتین شیست (Sr) شامل مجموعه‌ای از سرپانتینیت و سرپانتین شیست، متاکابرو و متابازالت شکل گرفته است. واحد ضخیم لایه (ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ متر) مرمر جانگوتاران (PC_j^i) 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 50-60N زیر افق مرمرجانگوتاران

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

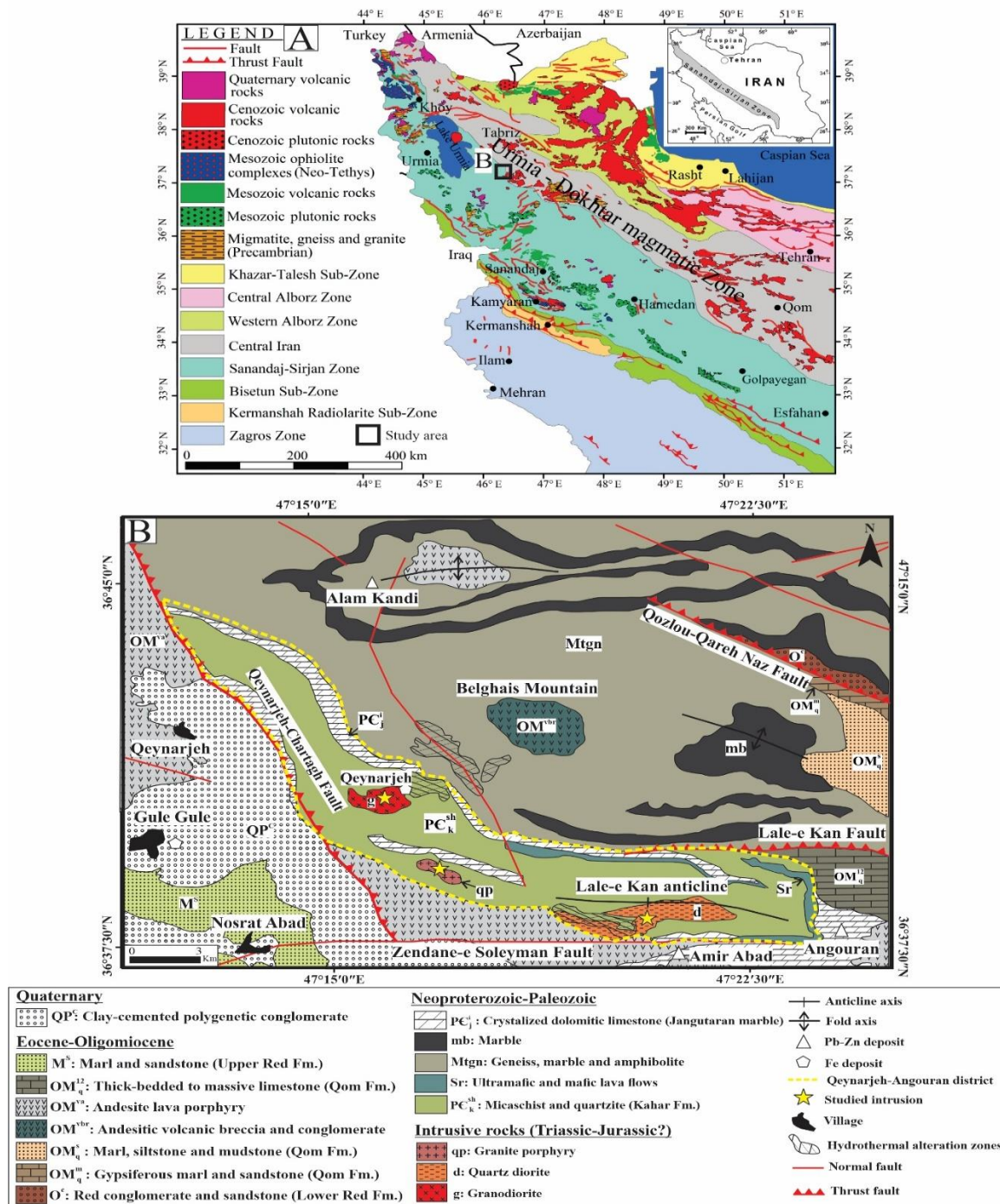
روش پژوهش

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 کوارتزدیوریت 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 میلی‌گرم) در دو مرحله: ۱- توسط ۶ میلی‌لیتر اسید HCl (غلظت ۳۷ درصد)، ۲ میلی‌لیتر اسید HNO₃ (غلظت ۶۵ درصد) و ۱ میلی‌لیتر اسید HF (غلظت ۳۸ تا ۴۰ درصد) و ۲- تخریب کانی‌های مقاوم باقی‌مانده با افزودن ۶ میلی‌لیتر اسید B(OH)₃ (غلظت ۵ درصد)، انجام شده است. تخریب نمونه‌ها در یک بوته 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 نوپروتروزوئیک- پالئوزوئیک (سازندهای کهر و جانگوتاران) توسط دنباله‌های گرانیتوئیدی تریاس- ژوراسیک (جنس‌های گرانیت، گرانیت پورفیری، گرانودیوریت و مونوزودیوریت) 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 کوارتزمونزونیت 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 آاناتکسی سنگ‌های آذرین نوپروتروزوئیک 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

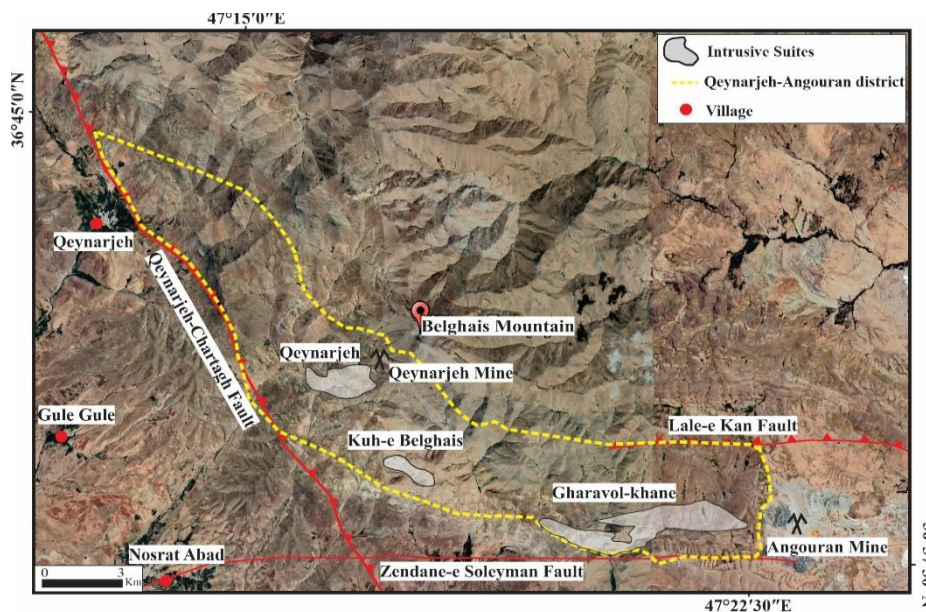


شکل ۱. A: نقشه ساده شده پهنه‌های ساختاری-زمین شناسی شمال غرب ایران، نقشه پایه از سهندی و سهیلی (Sahandi and Soheili, 2014) و موقعیت ناحیه قینرجه-انگوران و B: نقشه زمین شناسی ناحیه قینرجه-انگوران، نقشه پایه از باباخانی و قلمقاش (Babakhani and Ghalamghash, 2001) و موقعیت دنباله‌های نفوذی مورد بررسی

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 گرانیت پورفیری کوه بلقیس با وسعت تقریبی ۲ کیلومتر مربع دارای ترکیب گرانیتی و دارای ضریب رنگی لوکوکراتیک (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

قراول‌خلنه: توده نفوذی قراول‌خلنه 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، پوئی‌کیلپتیک و پورفیروئیدی است. کانی‌های اصلی این واحد شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند (مجموع فراوانی ۵۰ درصد حجمی)، بیوتیت

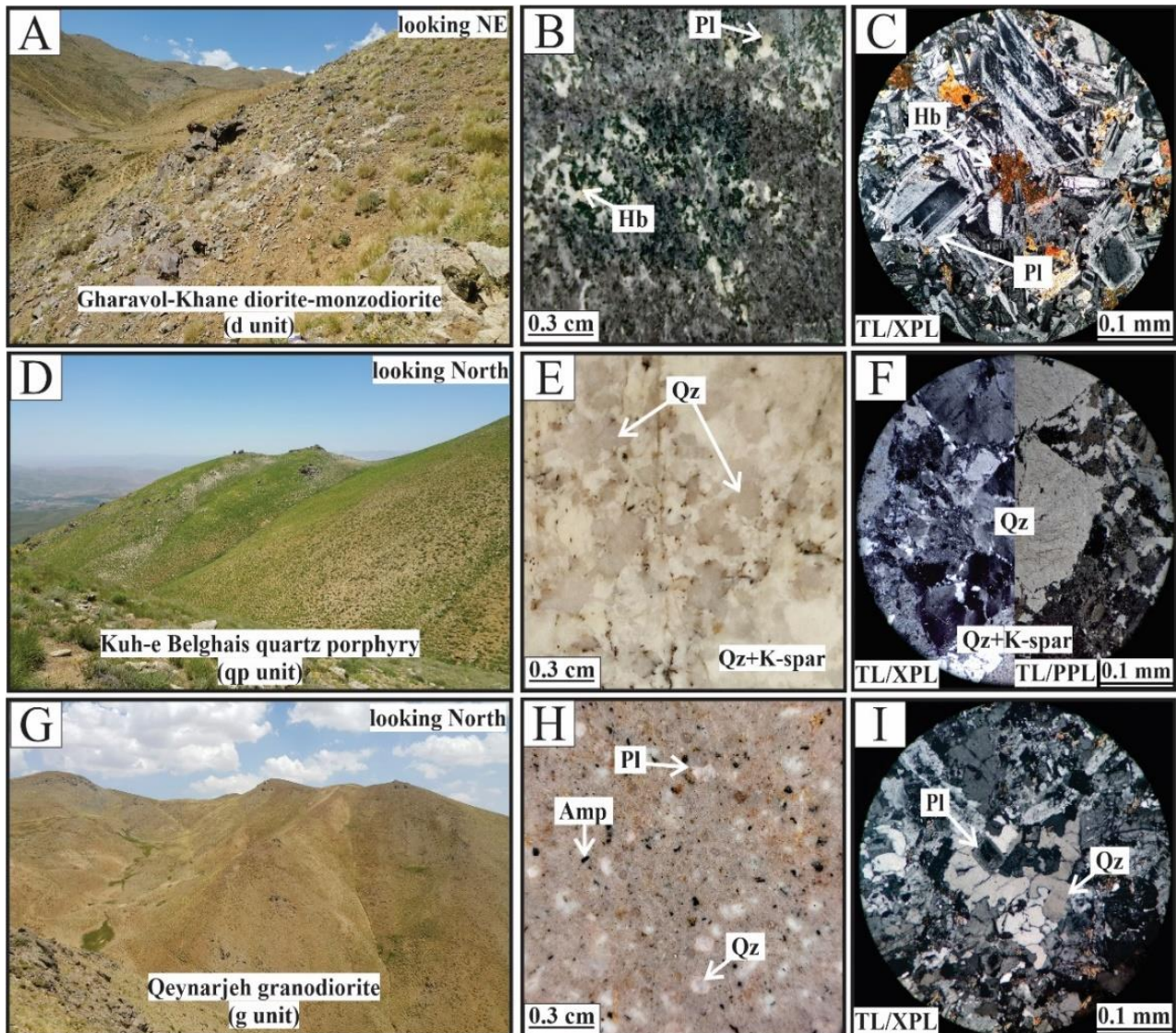
قراول‌خانه، کوه بلقیس و قینرجه، در جدول ۱ ارائه شده است. محتوای SiO_2 در کوارتز دیوریت قراول‌خانه بین ۵۲/۲۱ تا ۵۷/۷۲ wt.% (متوسط ۵۴/۳۰ wt.%)، در واحد گرانیته پورفیری کوه بلقیس بین ۷۰/۱۲ تا ۷۵/۶۵ wt.% (متوسط ۷۳/۷۷ wt.%) و گرانودیوریت قینرجه بین ۶۴/۱۸ تا ۷۰/۴۹ wt.% (متوسط ۶۸/۲۸ wt.%) به دست آمد. بیشترین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

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 میلی‌متر) در خمیره ریزبلور کوارتز و فلدسپارتاسیم است (شکل ۳-E). طبق شواهد سنگ‌نگاری، این واحد سنگی با بافت پورفیری از کانی‌های اصلی کوارتز و فلدسپارتاسیم (مجموع فراوانی ۸۰ درصد حجمی)، کانی‌های فرعی کلریت، هورنبلند، سرسیت 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 فلدسپارتاسیم) و دگرسانی کربناتی (در زمینه سنگ) مشاهده شد.

قینرجه: توده نفوذی قینرجه با وسعت تقریبی ۳ کیلومتر مربع، 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 ماسه‌سنگ سازند لالون) را قطع کرده و توسط توالی کربناتی سازند قم با سن الیگوسن-میوسن به‌طور ناهمساز پوشیده شده است. بر این مبنای زمان نسبی توده نفوذی منطقه قینرجه احتمالاً پس از کامبرین و پیش از الیگوسن است که با توده‌های نفوذی هم‌زمان با فاز کوه‌زایی سیمیرین 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 کانی‌های 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



شکل ۳. تصاویر 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 Rock type Sample no.	Gharavol-Khane									
	Quartz monzodiorite (n=5)					Quartz diorite (n=5)				
	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 Rock type Sample no.	Kuh-e Belghais Granite porphyry (n=5)					Qeynarjeh Granodiorite (n=5)				
	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; $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; $Mg\# = [100 \times \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})]$; $T_Z =$ 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

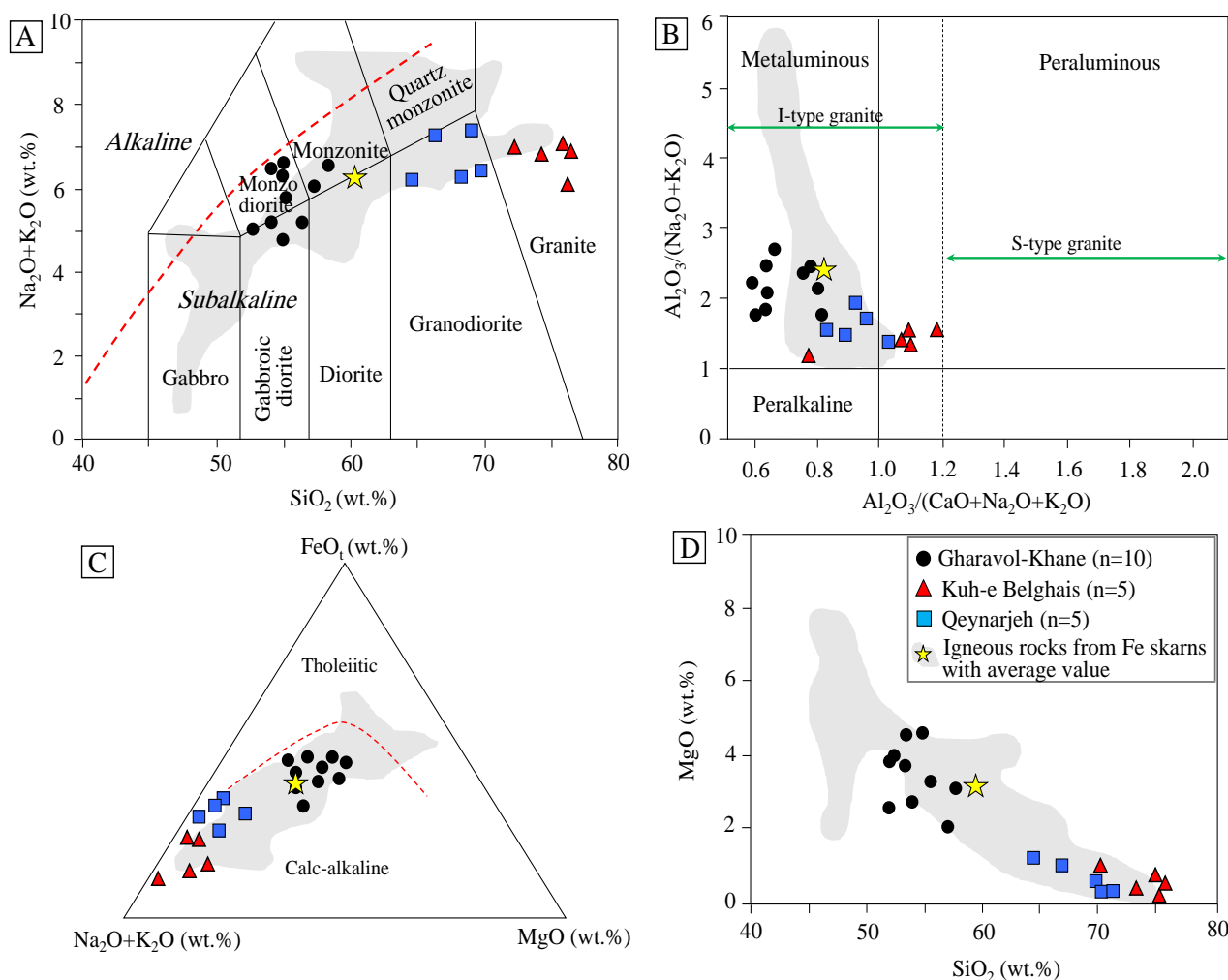
Note: LOI= loss on ignition; Eu/Eu* = $Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; Ce/Ce* = $Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; Mg# = $[100 \times \text{molar Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})]$; T_{Zr}= Zircon saturation temperature calculated from the whole-rock compositions (Miller and Wooden, 2004).

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 ۴-۳).

متآلومین تا کمی پرآلومین و زیرنوع گرانیت I منسوب خواهد بود (شکل ۴-۳). بر اساس نمودار سه‌تایی (Irvine and AFM, Baragar, 1971) کلیه نمونه‌ها متعلق به سری ماگمایی کالک‌آلکان



شکل ۴. نمودارهای زمین‌شیمی عناصر اصلی در دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران. A: نمودار دوتایی Na_2O+K_2O 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: Na_2O+K_2O versus SiO_2 digram, 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)، گرانتیت 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 گرانتیت 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 پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار، تهی‌شدگی در موقعیت Eu اغلب توسط فلدسپارها کنترل می‌شود (Rollinson, 1993). طبق شواهد، مقادیر کم آنومالی Eu/Eu^* در کوارتز دیوریت قراول‌خانه (متوسط ۰/۷۸) و گرانودیوریت قینرجه (متوسط ۰/۶۳) و مقادیر بالای آنومالی در گرانتیت 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.

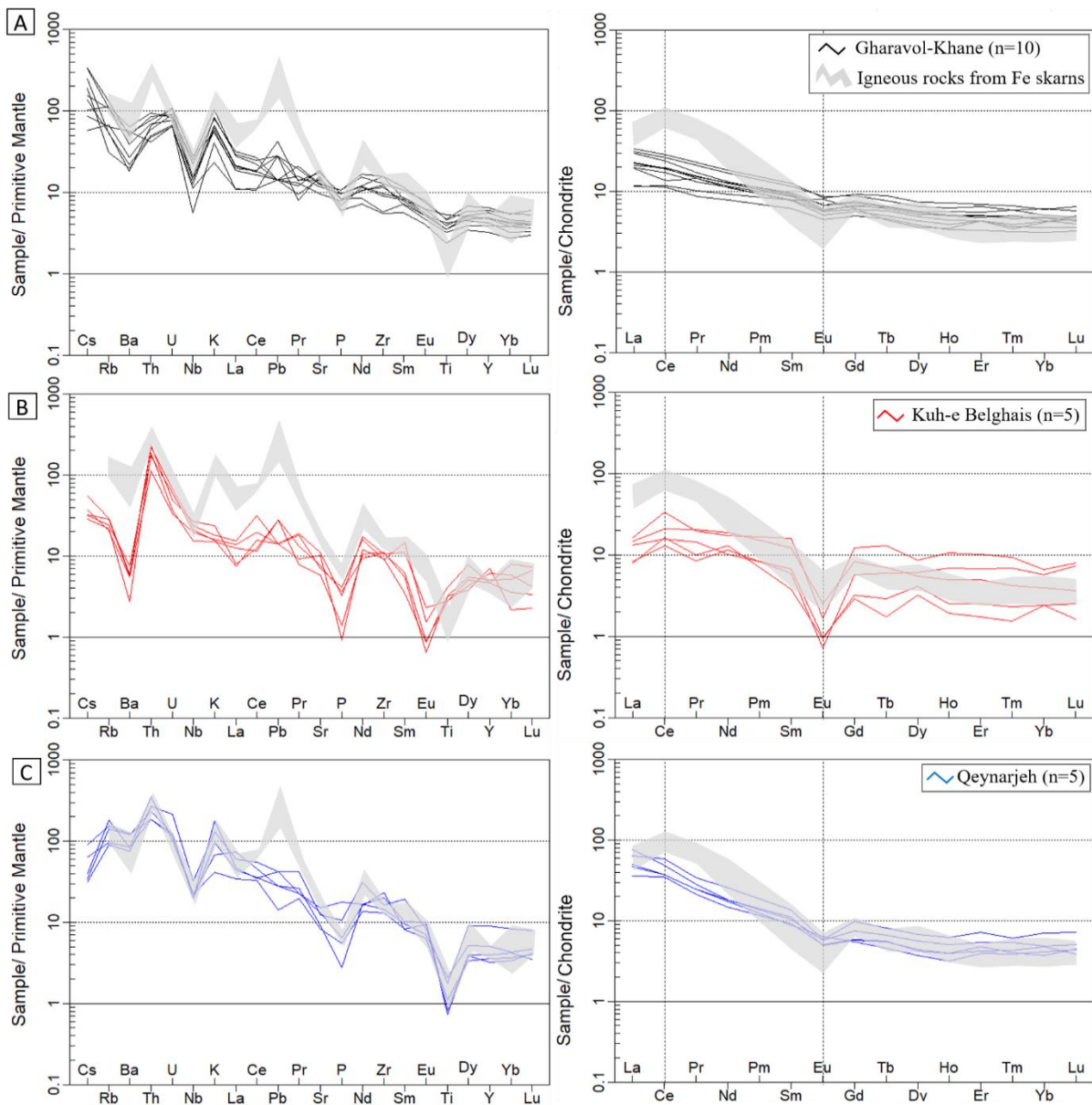
طبق بررسی‌ها، LILE پتانسیل یونی بالایی داشته و در فشار و دمای بالا در مذاب سیلیکاتی حل شده و انتقال می‌یابد؛ اما انحلال‌پذیری HFSE در مذاب پایین بوده و به همین دلیل در هنگام ذوب‌بخشی، LILE نسبت به HFSE غنی می‌شوند (Tatsumi et al., 1986). بر اساس نمودار بهنجار شده با گوشته اولیه، تهی‌شدگی از عناصر Ti 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 آنومالی Ce/Ce^* در واحد گرانتیت 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 و Ap3، نام‌گذاری شده است. بلورهای Ap1 (ابعاد متغیر ۵۰ تا ۴۰۰ میکرون)، با ظاهر کشیده و همگن به صورت بلورهای اداخل در میزبان پیروکسن (شکل ۶-A) یا همراه کانی‌های پلاژیوکلاز 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 پلاژیوکلاز در توده گرانتیت 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

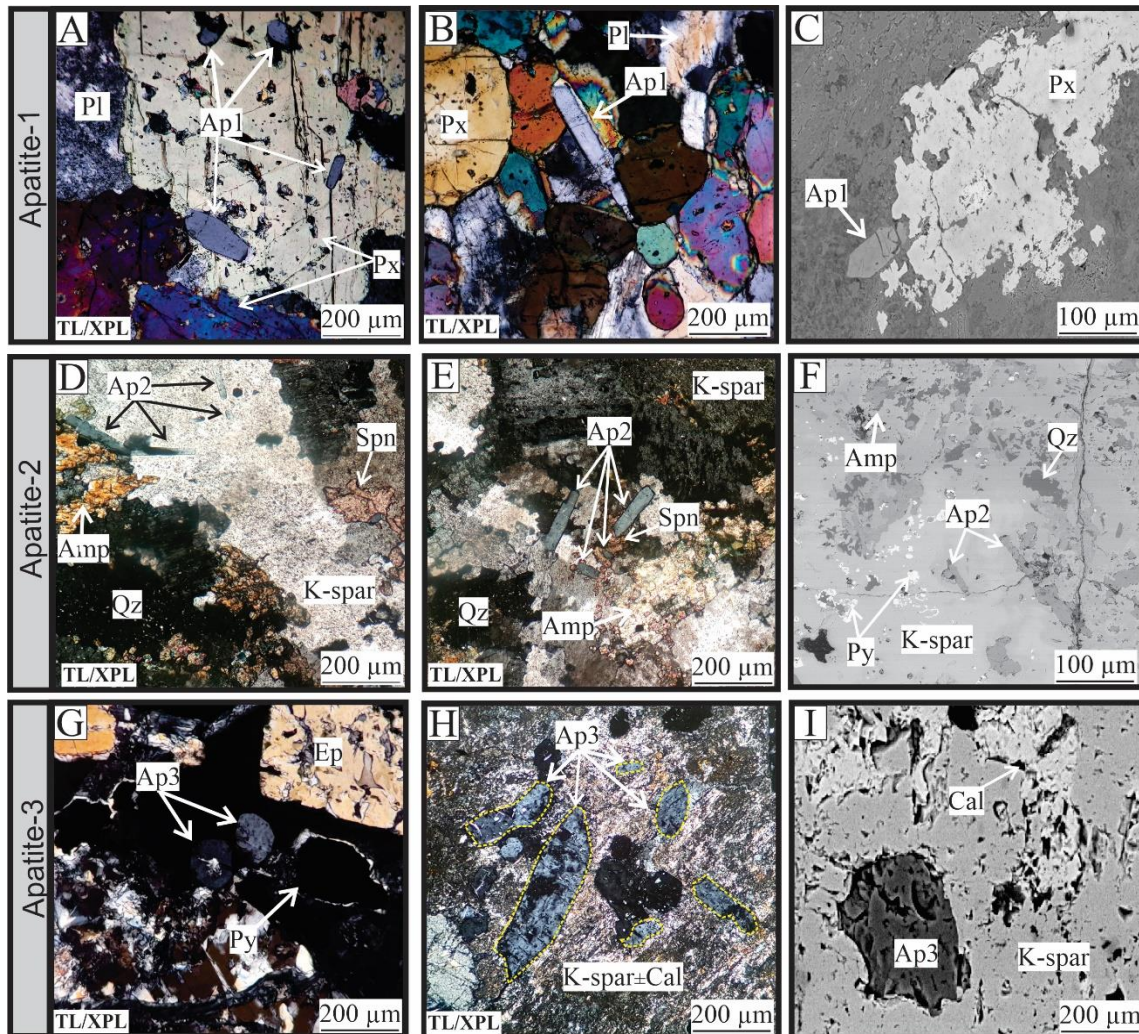
تصویرهای SEM ادخال‌های Ap3 (ابعاد متوسط ۴۰۰ میکرومتر) در میزبان فلدسپارتاسیم مشاهده شد (شکل ۶-I).

پلاژیوکلاز، 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 کندریت (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 A: بلورهای Ap1 به صورت ادخال در میزبان پیروکسن، B: همراهی بلور کشیده Ap1 با کانی‌های پلاژیو کلاز و پیروکسن، C: تصویر SEM از همراهی Ap1 با بلور پیروکسن. تصویر بلورهای Ap2 در گرانیت 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 ادخال 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 فلئوئور 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 فلئوئور 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 ۵۵/۱۳ wt.%)، در Ap2 بین ۵۵/۳۹ تا ۵۵/۶۶ 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 ۴۱/۴۹ 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 فلئوئور 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

Point no.	Apatite-1 (Gharavol-Khane)									
	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 کاواکترونی 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 کاواالکترونی 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

Point no.	Apatite-3 (Qeynarjeh)									
	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 تکنونوماگمایی

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).

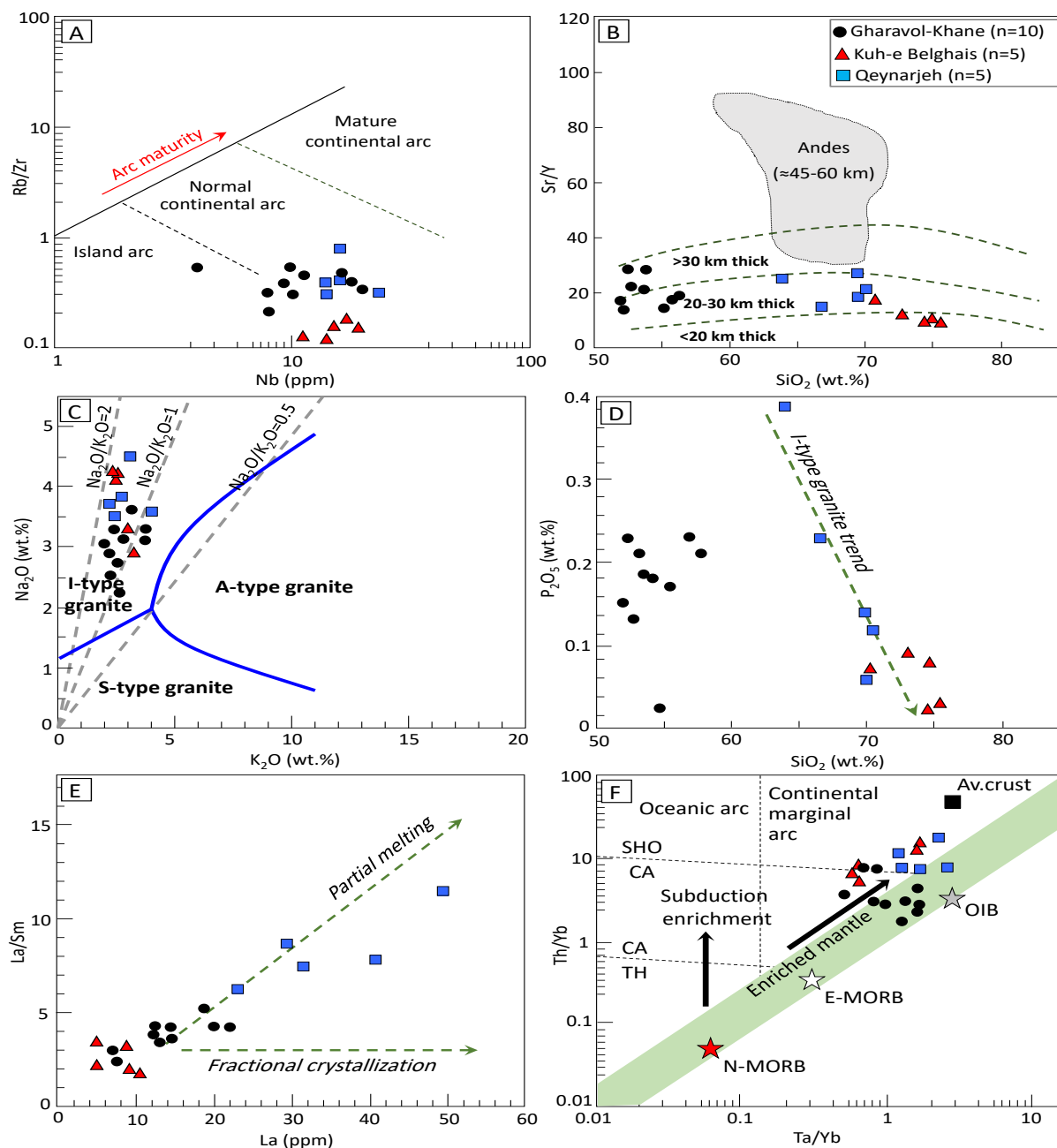
طبق نمودار دوتایی نسبت Rb/Zr در برابر Nb (Brown et al., 1984)، نمونه‌ها در جایگاه کمان قاره‌ای واقع شده‌اند (شکل ۷-۱). از آنجایی که پایداری پلاژیوکلازها و جفت کانی گارنت-آمفیبول تابع عمق جای‌گیری یا تکوین ماگما است (Chiaradia, 2015)، نسبت Sr/Y در زمین‌شیمی سنگ کل می‌تواند برای تخمین ضخامت پوسته استفاده 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 SiO_2 گرانیتی متاآلومین تا پرآلومین پایین بوده و با افزایش محتوای SiO_2 کاهش می‌یابد. با توجه به ماهیت متاآلومین تا پرآلومین دنباله‌های نفوذی ناحیه مورد بررسی (شکل ۴-۲) و رابطه دوتایی SiO_2 با P_2O_5 (Zhang et al., 2016)، این روند سازگار با روند گرانیتوئیدهای نوع I است (شکل ۷-۴). 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 ۷-۵). طبق نمودار دوتایی نسبت‌های عناصر کمیاب Th/Yb در برابر Ta/Yb (Pearce, 2008) که در آن سری ماگمایی توده‌های نفوذی و جایگاه تکنونوماگمایی آنها بررسی می‌شود، نمونه‌های سنگی منطقه مورد بررسی با ماهیت کالک‌آلکانل تا شوشونیتی در یک محیط گوشته‌ای نسبتاً غنی‌شده متعلق به جایگاه کمان‌های فعال حاشیه قاره است (شکل ۷-۶).

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, 2019; Prowatke and Klemme, 2006; Xiao et al., 2021). ترکیب شیمیایی آپاتیت به مؤلفه‌های فیزیکی 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 زمین شیمیایی - 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 ذوب بخشی در نمودار دوتایی La/Sm در مقابل La (Coherie, 1986)، F: نمودار دوتایی Th/Yb در مقابل Ta/Yb (Pearce, 2008) (TH: Tholeiitic، CA: کالک آلکالن، 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)

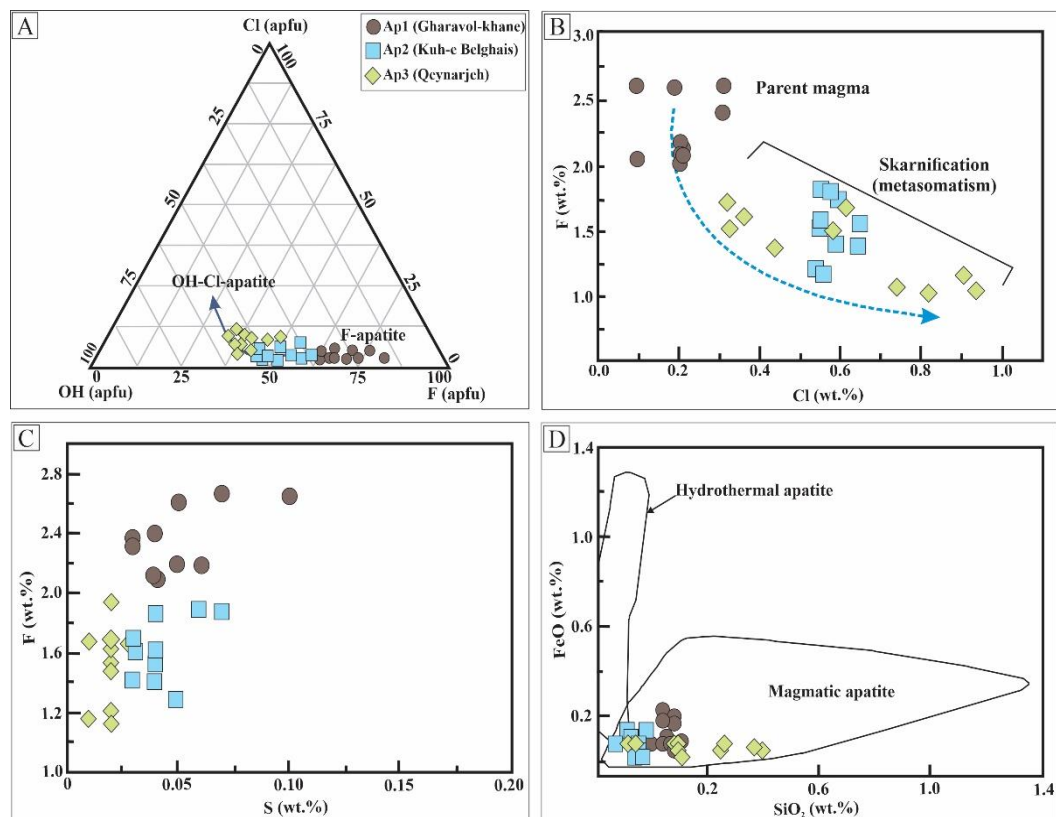
عناصر با ظرفیت بالا مانند REE^{3+} جایگزین Ca^{2+} شده و در نتیجه نسبت Si/S به بالاتر از ۱ (apfu) افزایش می‌یابد. از آنجایی که Si عنصر اصلی در ماگما است، ایزومورف آپاتیت تأثیر محدودی بر محتوای Si دارد. نسبت پایین Si/S نشان‌دهنده محتوای نسبتاً بالای S^{6+} و محیط اکسیدان ماگماست که به ته‌نشست عناصر کانه‌ساز 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 مبنای 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 کوارتزیدوریت قراول‌خلنه (Ap1) و گرانودوریت 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 گرانیتوئیدی (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 گرانیتوئیدی 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 تأثیر گذار 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) جنمایی 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 گرانودوریت 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 در مقابل Cl (Chen et al., 2023)، C: نمودار دوتایی غلظت F در مقابل S (Ayers and Watson, 1991) و D: نمودار دوتایی غلظت FeO در 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 مبنای، 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 فلزایی در دنباله‌های نفوذی

پیرس و همکاران (Pearce et al., 1984)، گرانیت‌ها را به انواع گرانیت‌های گسترش پوسسته اقیانوسی، هم‌زمان با برخورد قاره‌ای، درون صفحه‌ای و کمربندهای آتشفشانی محیط فرورانش تفکیک کرده‌اند. با استفاده از این تقسیم‌بندی، دنباله‌های نفوذی محدوده مورد بررسی در موقعیت تکتونوماگمایی کمربندهای آتشفشانی پهنه فرورانش 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

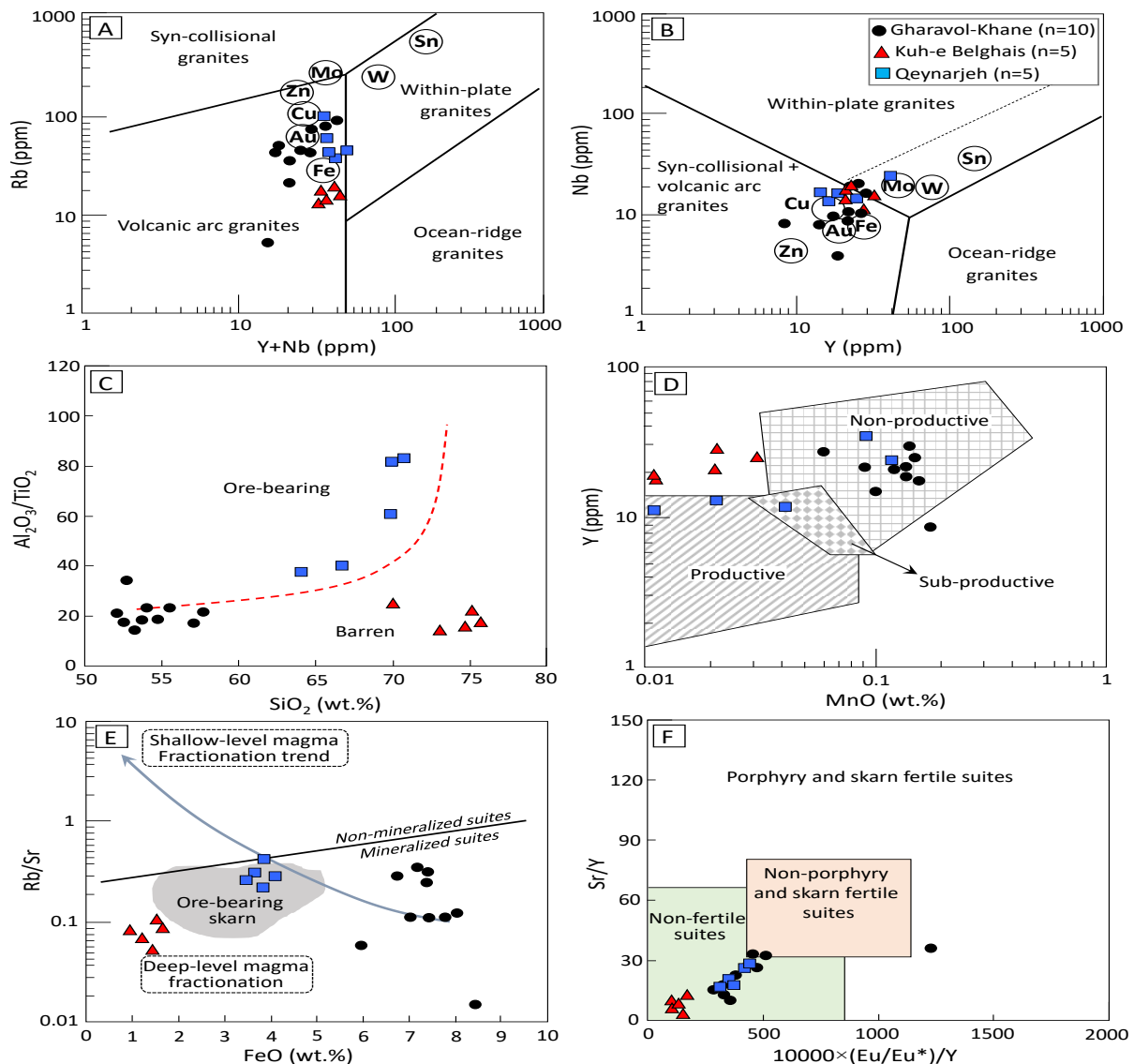
منطقه مورد بررسی، از نسبت‌های عنصری که کمترین تحرک شیمیایی در محیط را دارند (نظیر عناصر کمیاب و کمیاب خاکی) استفاده شده که در ادامه اشاره خواهد شد.

یکی از کنترل‌کننده‌های مهم فلزایی 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 عقیم 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 گرانیته 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 $10000 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Y}$ (شکل ۹-F)، به عنوان یک رهیافت زمین‌شیمیایی-اکتشافی مفید برای تعیین محتوای آب و ارزیابی پتانسیل فلزایی 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 $10000 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Y}$ با کمترین مقدار در توده گرانیت پورفیری کوه بلقیس (به ترتیب متوسط

۶/۴ و ۱۱۷/۷) و بیشترین آن در کوارتزدیوریت قراول‌خانه (به ترتیب متوسط ۱۶/۸ و ۴۴۶/۱) ثبت شده است. توده گرانودیوریتی قینرجه نیز با نسبت Sr/Y (متوسط ۱۲/۰) و نسبت $10000 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Y}$ (متوسط ۳۴۴/۶۱) از این نظر بین توده‌های قبلی قرار می‌گیرد. بر این مبنای کلیه توده‌های مورد بررسی شواهد دنباله‌های نفوذی غیر مولد اسکارن-پورفیری را داشته (شکل ۹-F)؛ هرچند توده‌های کوارتزدیوریت قراول‌خانه و قینرجه پتانسیل کانه‌زایی بیشتری نشان می‌دهند.

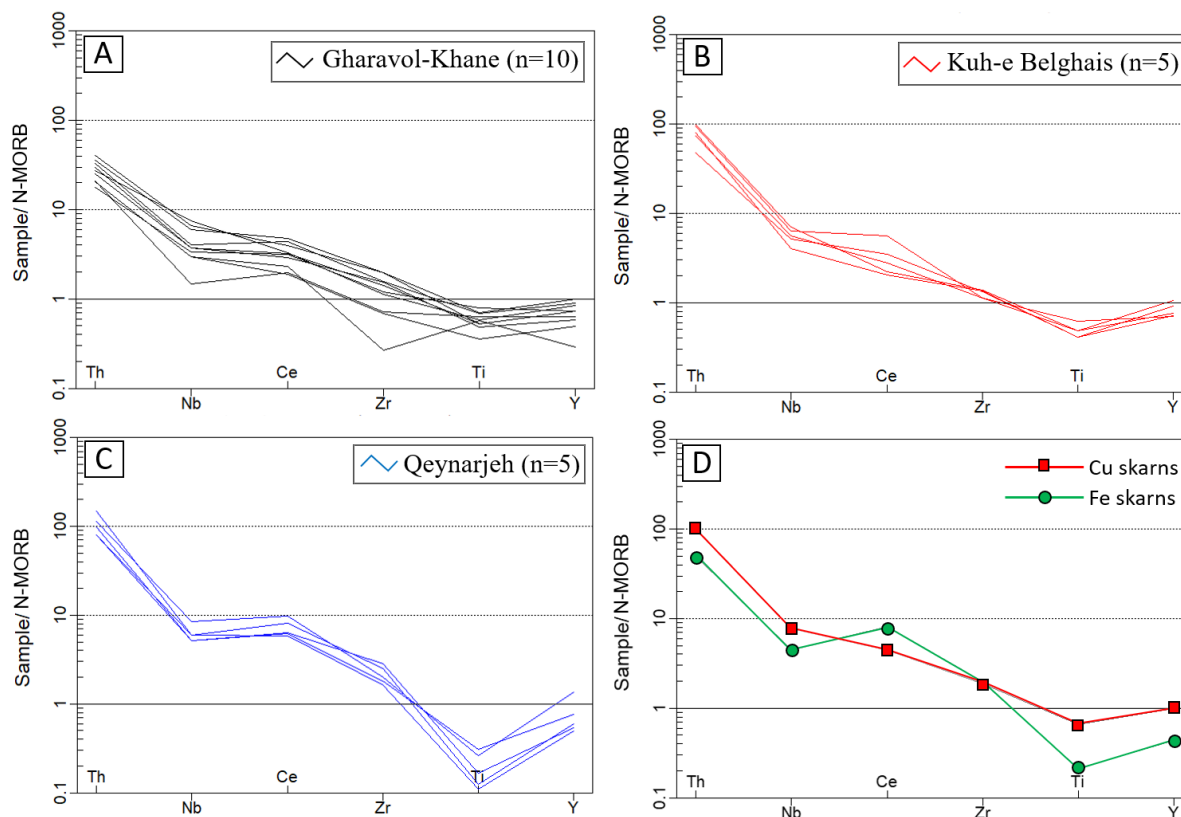
یکی از روش‌های مفید برای دستیابی به ماهیت زمین‌شیمیایی-کانی‌سازی توده‌های گرانیتیوئیدی کمریندهای فلزایی، استفاده از الگوی بهنجارسازی عناصر کمیاب در توده‌های مولد اسکارن و مقایسه آن با روند زمین‌شیمیایی عناصر در نمونه‌های مورد بررسی است. به این منظور، بر مبنای زمین‌شیمی سنگ کل از الگوی عناصر کمیاب (شامل عناصر Th, Nb, Ce, Zr, Ti و Y) 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، برگرفته 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 کوارتزدیوریتی قراول‌خانه 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 Ti و Nb در مقابل تهی‌شدگی بیشتر در جایگاه عنصر Ce تا حدودی بازگوکننده 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 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ سنگ کل برای اثبات این موضوع پیشنهاد می‌شود.

زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴۰۳، دوره ۱۶، شماره ۳



شکل ۹. نمودارهای تحولات زمین شیمیایی 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)، F: بررسی شاخص زمین شیمی سنگ کل 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)

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

نتیجه‌گیری

دنباله‌های نفوذی ناحیه قینرجه-انگوران با سن تریاس میانی-ژوراسیک بالایی متشکل از سه واحد کوارتزدیوریت قراول‌خانه، گرانیت پورفیری کوه بلقیس و گرلنودیوریت قینرجه در سنگ بستر دگرگونی نئوپروتروزویک-پالئوزویک (سازندهای کهر و جانگوتاران) نفوذ کرده‌اند. این گرانیتوئیدها با ماهیت کالک آلکالن و متآلومین 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 Si/Y و $10000 \times (Eu/Eu^*)/Y$ سنگ کل، کوآرتز دیوریت قراول‌خانه و گرانودیوریت قینرجه پتانسیل کانه‌زایی 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

هیچ‌گونه تعارض منافی 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., Nabatian, 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 Mahneshan 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/yskwxzz/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. *Journal 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>