

## Original Research Paper

# The Hired gold deposit, Lut block, East Iran: example of a gold deposit related to reduced I-type intrusive bodies

Maryam Emami Jafari<sup>1\*</sup>, Saeed Alirezaei<sup>1</sup>, Iraj Rasa<sup>1</sup>, and Jochen Kolb<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Mineral and Ground Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran<sup>2</sup>Department of Economic Geology, Institute of Applied Geosciences (AGW), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received: 2023 February 14

Accepted: 2023 April 28

Available online: 2023 September 23

### Keywords:

Hired gold deposit

Lut block

East Iran

I-type granitoid

Ilmenite series

## ABSTRACT

The Hired gold deposit in the Lut block, East Iran, is closely associated with an intermediate-mafic intrusive complex consisting of granodiorite to diorite, hornblende quartz-monzonite, and gabbro-diorite intruded into Eocene volcanic rocks. The intrusions are distinguished by high contents of CaO, FeO<sub>p</sub>, and MgO, and rather low K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O implying they crystallized from weakly differentiated magmas. This, and the relatively high Mg# (36.36 to 52.32) imply the involvement of a mantle source in the production of the parent magma. The intrusions are metaluminous, calc-alkaline to high-K calc-alkaline, and distinguished by the occurrence of ilmenite as an accessory mineral. Mineralization occurs in veins and veinlets disseminations in the granodiorite intrusion and the volcanic rocks, closely associated with tourmaline, silicic, and carbonate alterations, and is distinguished by abundant pyrrhotite, arsenopyrite, pyrite, and minor chalcopyrite, galena and sphalerite. Gold occurs mostly as submicroscopic grains in the pyrite and arsenopyrite. The mineralogical and geochemical attributes of the intrusive complex, and the ore mineralogy, allow the Hired to be classified as a gold deposit related to reduced I-type granitoids. The reducing nature of the parent magma can be explained by introduction of reduced crustal materials into the source area, and/or assimilation of carbonaceous metasedimentary rocks.

## 1. Introduction

The Lut block in the east of the CIM (Central Iran Microcontinent) is distinguished by widespread Paleogene volcanic and plutonic rocks, and a variety of ore deposits (Fig. 1-A). Following a detailed regional stream sediment geochemical exploration program in the Basiran quadrangle in southern Lut block during 2000-2006,


several areas including Hired, ~150 km south of the Birjand in the eastern edge of the Lut block (Fig. 1-B) were identified as prime targets for further exploration. The area has been under detailed exploration by diamond drilling since 2019 in two closely spaced zones known as targets 1 and 3.


\* Corresponding author: Maryam Emami Jafari; E-mail: parse916@gmail.com

### Citation:

Emami Jafari, M., Alirezaei, S., Rasa, I., and Kolb, J., 2023. The Hired gold deposit, Lut block, East Iran: example of a gold deposit related to reduced I-type intrusive bodies. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 33(3), 129, 219-242. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.378434.2054>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.378434.2054

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.10.1



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

In this paper, we present data on the ore geology and geochemistry of the Hired intrusive bodies as an example of a gold deposit related to reduced, ilmenite series, I-type granitoids.

## 2. Research methodology

In this study, we investigated the geology of the Hired deposit, focusing on the nature of the intrusive bodies, and the ore and hydrothermal alteration characteristics. Field works and sampling were carried out during 3 field seasons in 2018, 2019, and 2020, when exploration was in progress by “Iran Minerals Production and Procurement Company (IMPASCO). Samples were collected from natural exposures as well as drill cores for petrography, ore microscopy, characterization of the various rock units and hydrothermal alteration-mineralization.

Seven samples (4 from outcrops and 3 from drill cores) from intrusive rocks with least alteration were selected for XRF and ICP-MS analyses. Pulps < 200 mesh were analyzed for major oxides by wavelength-dispersive x-ray fluorescence (WD XRF) on fused beads with S4 Explorer from Bruker AXS in the Laboratory for Environmental and Raw Materials Analysis (LERA) at the Institute of Applied Geosciences (AGW) at Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany. Certain minor and trace elements were measured with energy-dispersive XRF using pressed pellets from the pulps. In addition, the total C and S concentrations were measured by carbon and sulfur analyzer (CSA) (Eltra, CS-2000) at LERA.

The samples were further analyzed for a variety of trace elements using ICP-MS (X-Series 2, Thermo Fisher) at LERA. The preparation procedure was adopted from <https://lura.agw.kit.edu>.

## 3. Results

The oldest rock units in the target 1 are Cretaceous marl, marly limestone, sandstone ( $K_2^{ms}$ ) and limestone and sandy limestone ( $K_2^{ls}$ ) (Behrouzi and Khan-Nazer, 1992, Sahandi et al., 1992; Askari and Safari, 2003; Zarei and Velayati, 2018). The rocks, well exposed in the south, southeast and southwest of target 1, are covered by Eocene dark gray lava flows and pyroclastic materials (Behrouzi and Khan-Nazer, 1992). The volcanic-volcanoclastic rocks are intruded by an intrusive complex with exposures in the west, northeast and central part of target 1, consisting mainly of granodiorite, diorite and gabbro-diorite (Figs. 2 and 3). The target 3 is covered by Eocene andesitic and andesitic-basaltic lava flows and pyroclastic rocks, as well as a hornblende-quartz monzonite (Askari and Safari, 2003; Zarei and Velayati, 2018) (Figs. 5 and 6).

Four major types of hydrothermal alterations occur in Hired, including sericite  $\pm$  quartz, silicic, tourmaline  $\pm$  quartz, and carbonate (dominated by calcite). The alterations appear to be structurally controlled and closely associated with fractures and ore

veins/veinlets. A propylitic alteration has variably affected all rock types and appears to be predating the main hydrothermal alteration-mineralization in the area (Fig. 7).

Mineralization in target 1 occurs in sheeted veins and veinlets, as well as disseminations, hosted by the granodiorite. In target 3, mineralization mostly occurs across a fault in the Eocene volcanic rocks. The ore minerals include arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, and subordinate sphalerite and galena (Figs. 8 and 9). The nonmetallic minerals are quartz, tourmaline, sericite and calcite. From field observation, inspection of surface exposures, drill cores, and microscopic studies, three stages of mineralization were distinguished (Fig. 10).

The intrusive bodies are distinguished by moderate- to low  $\text{SiO}_2$  contents (54.9-60.8 wt%), and low- to medium total alkalis ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=3.91-5.82$  wt%), but relatively high contents of CaO (4.40-8.31 wt%),  $\text{FeO}_t$  (4.70-9.10 wt%), and MgO (2.46-5.04 wt%) (Table 1) implying they crystallized from weakly fractionated magmas. They are metaluminous, and display calc-alkaline to high-K calc-alkaline affinities (Fig. 11-B). This, and variations of oxides/elements in Harker diagrams (Fig. 12) suggest that the intrusive bodies are comagmatic and developed from a common parent magma. In the  $1000*\text{Ga}/\text{Al}$  vs.  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  diagram, they plot in the I-type granitoids domain (Figs. 13-A and B).

## 4. Discussion

The intrusions are marked by low  $\text{SiO}_2$  and  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ , and rather high contents of CaO,  $\text{FeO}_t$ , and MgO implying that they crystallized from weakly differentiated magmas. The intrusive bodies are metaluminous, calc-alkaline to high-K calc-alkaline, and possess geochemical attributes comparable to the I-type granitoid series. The Hired intrusive bodies are distinguished by the occurrence of magmatic ilmenite as an accessory mineral, implying a reduced nature for the parent magma (c.f. Ishihara, 1977; Ishihara et al., 2002).

Many ilmenite series granitoids are known to be peraluminous, two mica S-type intrusions (e.g., Chappell and White, 1992). Reduced granitoids with mineralogical and geochemical characteristics of metaluminous I-type granitoids are not uncommon (Belvin and Chappell, 1992; Ishihara, 2008; Maulana et al., 2013).

The Hired intrusive bodies display relatively high  $\text{Mg}\#$  ( $100*\text{MgO}/[\text{MgO}+\text{FeO}_t]$  molar ratio) ranging from 36.36 to 52.32, implying the involvement of a mantle source in the production of the parent magma (c.f., Rapp and Watson, 1995). This is supported by distinct enrichments in Ni and Cr in the less differentiated gabbro-diorite fraction. Enrichments in LILE, Th and Ba and distinct peaks on Pb in the Hired complex can be explained by contamination with crustal materials (Fig. 15). The features are not uncommon in

intrusive bodies developed in volcanic arc (Zheng, 2019) as well as in post-collisional settings (Pearce et al., 1984; Zhang et al., 2014).

Mineralization in Hired occurs in veins, vein and veinlets, as well as disseminations mostly associated with the more fractionated granodiorite intrusive body. The ore mineralogy is dominated by pyrrhotite and arsenopyrite that are indicative of precipitation from reduced hydrothermal fluids, consistent with the reduced nature of the associated intrusive bodies. Hydrothermal alteration in Hired is structurally controlled and consist of silicic, tourmaline, sericite, carbonate and propylitic.

## 5. Conclusion

The Hired gold deposit is spatially associated with a reduced intrusive complex ranging in composition from gabbro-diorite

to granodiorite. Hydrothermal alteration, dominated by silicic, tourmaline, and sericite, as well as gold mineralization, are structurally controlled, and more closely associated with the more fractionated granodiorite intrusion. The rather high Mg# for the Hired intrusive bodies suggest the involvement of a mantle source for the parent magma. The distinct enrichments in LILE, Th and Ba, and Pb, however, can be explained by contamination of the magma with carbonaceous crustal materials.

The ore mineralogy, and the mineralogical and geochemical attributes of the intrusive bodies, allow the Hired gold deposit to be classified as an ore system related to ilmenite-series I-type granitoids. The key features in the Hired deposit are comparable to those from many other gold deposits associated with reduced granitoids worldwide.

# کانسار طلای هیرد، بلوک لوت، خاور ایران: مثالی از یک ذخیره طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی نوع I

مریم امامی جعفری<sup>۱\*</sup>، سعید علیرضایی<sup>۱</sup>، ایرج رسا<sup>۱</sup> و یوخن کولب<sup>۲</sup><sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی اقتصادی، انستیتو علوم زمین کاربردی (AGW)، انستیتو تکنولوژی کارلسروهه (KIT)، کارلسروهه، آلمان

## چکیده

کانسار طلای هیرد در بلوک لوت، همراهی نزدیکی با یک کمپلکس نفوذی حدواسط-مافیک دارد که در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن جایگزین شده است. توده‌های نفوذی ترکیب گرانودیوریت تا دیوریت، هورنبلند-کوارتزموزنونیت و گابرو-دیوریت دارند و با  $\text{CaO}$ ،  $\text{FeO}$  و  $\text{MgO}$  به نسبت بالا و  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  به نسبت پایین مشخص می‌شوند که نشانگر تبلور از یک ماگمای نه‌چندان تفریق‌یافته است. این ویژگی‌ها و عدد منیزیم به نسبت بالا (۳۶/۳۶ تا ۵۲/۳۲) می‌تواند نشانگر تأثیر منبع گوشته‌ای در زایش ماگمای مادر باشد. توده‌های نفوذی هیرد، متالومین‌اند و سرشت کالک‌آلکان تا کالک‌آلکان پتاسیم-بالا دارند و حاوی ایلمنیت به‌عنوان کانی همراه هستند. کانی‌سازی در هیرد به‌صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و افشان در توده نفوذی گرانودیوریتی و سنگ‌های آتشفشانی میزبان، همراه با دگرسانی‌های تورمالینی، سیلیسی و کربناتی رخ داده است. کانی‌های فلزی شامل پیرویت، آرسنوپیریت، پیریت و کمتر از آن کالکوپیریت، گالن و اسفالریت است. طلا به‌صورت ذرات زیرمیکروسکوپی همراه با کانی‌های سولفیدی به‌ویژه پیریت و آرسنوپیریت نهشته شده است. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی توده‌های نفوذی و کانی‌شناسی کانسنگ، کانسار طلای هیرد را می‌توان مشابه ذخایر مرتبط با گرانیتویدهای احیایی نوع I در نظر گرفت. کاهیدگی ماگمای مولد می‌تواند ناشی از وارد شدن مواد پوسته به محیط منبع و/یا برهمکنش ماگما با سنگ‌های پوسته‌ای غنی از مواد آلی باشد.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسار طلای هیرد

بلوک لوت

خاور ایران

گرانیتوید نوع-I

سری ایلمنیتی

## ۱- پیش‌نوشتار

بلوک لوت در شرق خردقاره ایران مرکزی، با ماگماتیسیم گسترده پالئوژن و طیفی از ذخایر معدنی مشخص می‌شود (شکل ۱- A). به‌عنوان مثال‌هایی از ذخایر فلزی در بلوک لوت، می‌توان به مس-طلای قلعه زری (Karimpour et al., 2005)، مس-طلای پورفیری ماهرآباد و خوچیک (ملکزاده سفارودی، ۱۳۸۸)، طلا-مس پورفیری شادان (Richards et al., 2012)، طلای اپی‌ترمال خونیک (سمعی، ۱۳۹۴)، مس-مولیبدن پورفیری ده‌سلم و چاه شلمچی (Arjmandzadeh and Santos, 2014)، آهن-مس و طلای اسکارنی سرخ کوه (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۰) و ذخیره مس-روی ماهور (Miri-Beydokhti et al., 2015)؛ بومری و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره کرد (شکل ۱- B).

کانسار طلای هیرد در فاصله ۱۵۰ کیلومتری جنوب بیرجند و در لبه خاوری بلوک لوت واقع شده است (شکل ۱- B). این محدوده در بخش شمالی برگه زمین‌شناسی

۱:۱۰۰۰۰ بصیران (بهروزی و خان‌ناظر، ۱۳۷۱) قرار دارد. اکتشافات ژئوشیمیایی و بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی اولیه در این برگه در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ انجام شد (عسکری و صفری، ۱۳۸۰). نتیجه این مطالعات، معرفی چند منطقه امیدبخش در این ورقه بود، از جمله منطقه کانی‌سازی طلا در هیرد که به‌عنوان هدف نخست اکتشافی انتخاب شد. مطالعات اکتشافی اولیه در هیرد به معرفی ۴ محدوده هدف امیدبخش معدنی انجامید (کره‌ای، ۱۳۸۱). بررسی‌های اکتشافی بیشتر در این چهار محدوده، به انتخاب دو منطقه هدف ۱ و ۳ برای اکتشافات بیشتر منجر شد. کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۵، ۱۳۸۶) و کریم‌پور و استرن (Karimpour and Stern, 2009) کانسار هیرد را یک سیستم طلا-قلع مرتبط با توده‌های نفوذی سری ایلمنیتی نوع S معرفی کردند. این کانسار از سوی اشراقی (۱۳۸۵) نمونه‌ای از ذخایر طلای مرتبط با توده‌های گرانیتویدی احیایی معرفی شده است.

\* نویسنده مسئول: مریم امامی جعفری؛ E-mail: parse916@gmail.com

## ماخذنگاری:

امامی جعفری، م.، علیرضایی، س.، رسا، ا. و کولب، ی.، ۱۴۰۲، کانسار طلای هیرد، بلوک لوت، خاور ایران: مثالی از یک ذخیره طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی نوع I. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۳)، ۲۱۹-۲۴۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.378434.2054>

doi: 10.22071/gsj.2023.378434.2054

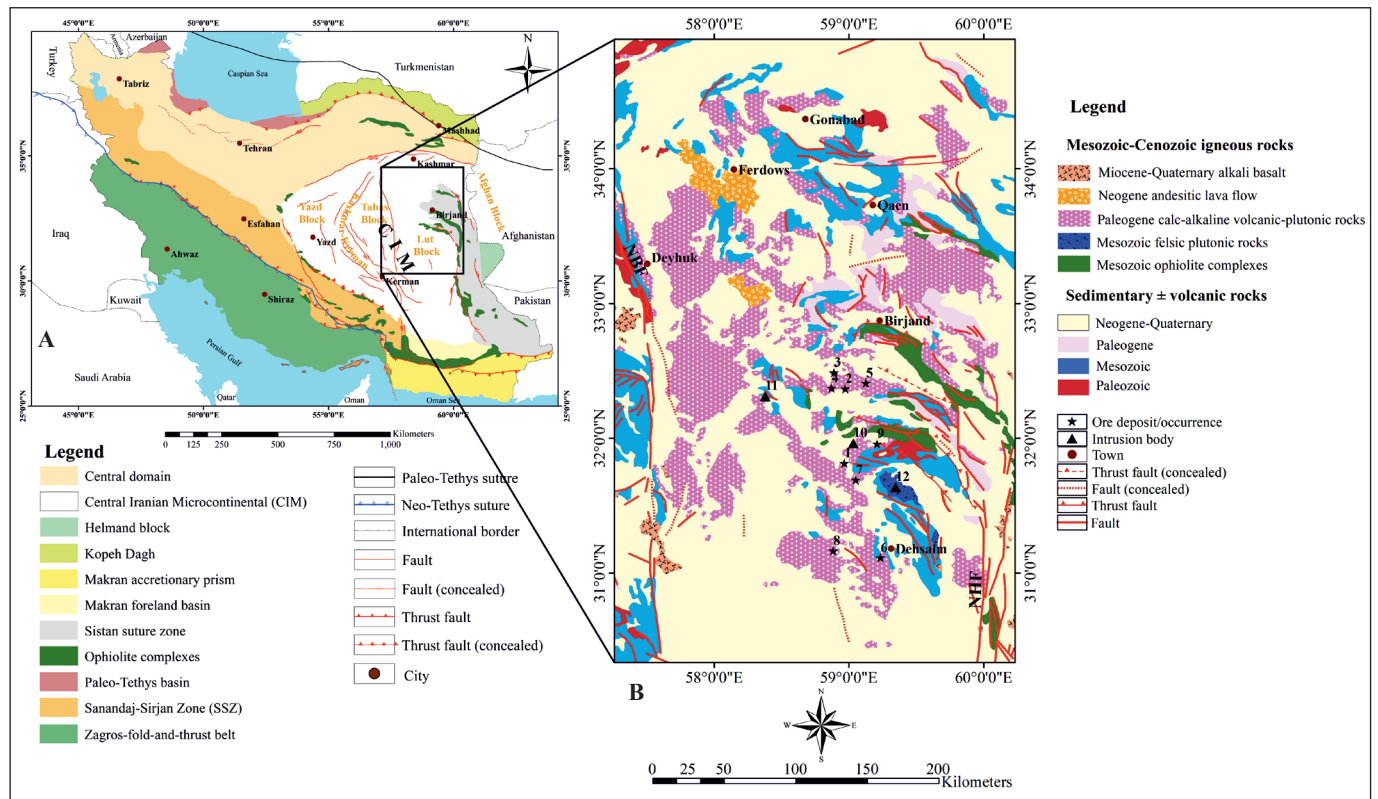
doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.10.1

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شناخته شده‌ترین مثال‌های این ذخایر شامل Fort Knox (آلاسکا) و Dublin Gulch (کانادا) است (Hart et al., 2000; Maloof et al., 2001; Goldfarb et al., 2005; Hart, 2007; Cave et al., 2019). در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌سازی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی کنسار هیرد به عنوان نمونه‌ای از یک سیستم طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی نوع I بررسی شده است. کارهای پیشین بر منطقه هدف ۳ متمرکز بوده است. در این پژوهش، از داده‌های سطحی و زیرسطحی شامل ۷ حلقه حفاری مغزه‌گیری توسط شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران در هر دو منطقه هدف ۱ و ۳ استفاده شده است.

سامانه‌های طلای همبسته با توده‌های نفوذی احیایی (RIRGS): شامل آن دسته از ذخایر طلا است که ارتباط زایشی با توده‌های نفوذی فلیسک دارند (Hart, 2007). کانی‌سازی در این سامانه‌ها، به شکل‌های گوناگون رگه‌ای، استوک‌ورک، برشی، جانشینی و افشان دیده می‌شود (Hart et al., 2000). این سامانه‌ها که عموماً شواهدی از همراهی با گرانیتوئیدهای نوع-I سری ایلمنتیتی نشان می‌دهند (Thompson and Newberry, 2000; Hart, 2007) در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی از آلاسکا (آمریکا) و یوکان (کانادا) گزارش شدند (Thompson et al., 1999; Lang et al., 2000).



شکل ۱- A) نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی ایران که زون‌های ساختاری مختلف را نشان می‌دهد (Richardson et al., 2012; Berberian and King, 1981; Ramezani and Tucker, 2003). B) نقشه زمین‌شناسی بخش شمالی-میانی بلوک لوت، خاور ایران (برگرفته از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ بشرویه (Stöcklin et al., 1969) فردوس (Eftekhar-Nejad et al., 1977) نایندان (Kluyver et al., 1981)، بیرجند (Eftekhar-Nejad et al., 1991) و دهسلم (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱))، با نمایش شماری از توده‌های نفوذی، کنسارها و رخدادهای معدنی در متن؛ ۱: قلعه زری، ۲: ماهرآباد، ۳: خویبک، ۴: شادان، ۵: خونیک، ۶: دهسلم، ۷: چاه شلجیمی، ۸: ماهور، ۹: هیرد، ۱۰: کودکان (گودکان)، ۱۱: سرخ‌کوه، ۱۲: شاهکوه.

Figure 1-A) A simplified geologic map of Iran showing the various tectonic zones (modified after Berberian and King, 1981; Ramezani and Tucker, 2003; Richardson et al., 2012). B) A simplified geological map of the Lut block, East Iran (modified after Stöcklin et al. (1969); Eftekhar-Nejad et al. (1977); Kluyver et al., (1981); Eftekhar-Nejad et al. (1991); Sahandi et al. (1992), showing selected intrusive bodies, ore deposits and occurrence referred to in the text; 1: Qale-Zari, 2: Maher-Abad, 3: Khoopic, 4: Shadan, 5: Khunik, 6: Dehsalm, 7: Chah-Shaljami, 8: Mahoor, 9: Hired, 10: Koudakan (Goudekan), 11: Sorkh-Kuh, 12: Shah-Kuh.

## ۲- روش پژوهش

این پژوهش بر بازدید میدانی و نمونه‌برداری از رخنمون‌ها و ۷ گمانه اکتشافی در محدوده‌های هدف ۱ و ۳ برنامه‌ریزی شده است. بر این مبنای پس از آماده‌سازی حدود ۱۰۰ مقطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی، مطالعات سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری (کانی‌های فلزی، غیرفلزی و پاراژن کانی‌ها) در دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی و دانشکده علوم زمین کاربردی دانشگاه کارلسروهه آلمان انجام شد. تعداد ۷ نمونه سنگی معرف از توده‌های نفوذی با کمترین دگرسانی

(۴) نمونه از رخنمون‌ها و ۳ نمونه از مغزه‌های حفاری) برای تجزیه ژئوشیمیایی سنگ کل به روش‌های طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) و طیف‌سنج فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) انتخاب شدند. نمونه‌های سنگ کل، نخست با استفاده از دستگاه خردایش فکی تا زیر ۱ سانتی‌متر خرد و سپس حدود ۱۰۰ گرم نمونه همگن‌شده با استفاده از آسیاب دیسکی تنگستن کارباید تا زیر ۲۰۰ مش پودر شد. آماده‌سازی نمونه‌ها در مرکز

محدوده هدف ۱، به ترتیب تحت عنوان های  $Q_2'$ ،  $Q_1'$  و  $Q_0'$  نام گذاری شده‌اند (شکل های ۲-۱، D، A، و ۴).

توده‌های نفوذی در این محدوده ترکیبی متفاوت از دیوریت تا گرانودیوریت و گابرو دارند (شکل ۳). با توجه به اهمیت توده‌های نفوذی در کانه‌زایی طلا در محدوده هدف ۱، این توده‌ها با جزئیات بیشتری توصیف می‌شوند.

توده دیوریتی در باختر محدوده هدف ۱ رخنمون دارد. این توده در بخش‌های خاوری و شمالی خود با واحدهای آندزیت و توف آندزیتی با میان‌لایه‌هایی از آگلومرا ( $E^v$ ) و در بخش‌های باختری و جنوبی با واحد توف و آگلومرای ائوسن ( $E^{3a}$ ) همبری دارد (شکل های ۲-۱، B، A، و ۳). رنگ رخنمون طبیعی و همین‌طور سطح تازه این توده، سبز روشن تا تیره است. کانی‌های اصلی این توده، پلاژیوکلاز (۴۵-۵۰ درصد)، کوارتز (۱۰-۱۵ درصد)، فلدسپات قلیایی (۸-۱۰ درصد)، بیوتیت (حدود ۸-۱۰ درصد)، و آمفیبول (کمتر از ۵ درصد) و بافت آن گرانولار تا پورفیری است (شکل ۴-۱). کانی فلزی این توده، مگنتیت مارتیتی شده و مقدار کمتری ایلمنیت است. کانی‌های همراه شامل تیتانیت، زیرکن و آپاتیت است. به‌طور محلی، فلدسپارها تاحدی رسی، سریستی و کربناتی، و کانی‌های مافیگ کلریتی، کربناتی و اپیدوتی شده‌اند.

توده گابرویی در شمال تا شمال خاور محدوده هدف ۱ در همبری با واحد ( $E^v$ ) مشاهده می‌شود و توپوگرافی پست و هموار دارد (شکل ۲-۱). این توده دارای رنگ رخنمون سبز تیره تا روشن بوده و رنگ سطح تازه آن خاکستری تا سبز تیره است. کانی اصلی تشکیل دهنده این توده، پلاژیوکلاز است (شکل ۴-۱) که با توجه به زاویه خاموشی ماکل‌ها، ترکیبی در حد لابرادیوریت دارد. کانی مافیگ چیره سنگ، کلینوپروکسن است که اغلب به‌صورت بلورهای متوسط تا به‌نسبت بزرگ دیده می‌شود (شکل ۴-۱). پلاژیوکلازها به‌طور محلی به سریست و اپیدوت و پروکسن‌ها به اورالیت تبدیل شده‌اند. پلاژیوکلاز حدود ۶۰-۶۵ درصد و پروکسن حدود ۲۵-۳۰ درصد کانی‌های اصلی توده گابرویی را تشکیل می‌دهند. فلدسپات قلیایی و کوارتز کمتر از ۵ درصد از سنگ را تشکیل می‌دهند و اغلب به‌صورت بی‌وجه (انهدرال) در فضای بین کانی‌های دیگر دیده می‌شوند (شکل ۴-۱). کانی فلزی این توده، بیشتر شامل ایلمنیت است که به‌صورت بلورهای وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار با توزیع یکواخت در سنگ حضور دارد. از کانی‌های همراه می‌توان به آپاتیت، تیتانیت و کانی‌های اپک (عمدتا پیریت ریزدانه و کانی‌های اکسید آهن ناشی از دگرسانی کانی‌های مافیگ) اشاره کرد.

توده گرانودیوریتی در بخش‌های مرکزی تا شمال خاوری محدوده و در بین واحدهای ( $E^v$ ) و ( $E^{3a}$ ) نفوذ کرده است (شکل های ۲-۱، C، A، و ۳). این توده رنگ رخنمون خاکستری تیره تا قهوه‌ای دارد و رنگ سطح تازه آن خاکستری روشن است. توده گرانودیوریتی به‌ویژه در بخش خاوری تحت تأثیر دگرسانی تورمالینی قرار گرفته است. کانی‌های اصلی سنگ شامل پلاژیوکلاز با فراوانی (۴۰-۴۵ درصد)، فلدسپات قلیایی (۲۵-۲۰ درصد) و کوارتز (۲۰-۲۵ درصد) و بافت آن گرانولار متوسط - تا درشت‌بلور است (شکل ۴-۱). برخی بلورهای پلاژیوکلاز منطقه‌بندی ترکیبی به نمایش می‌گذارند. کانی‌های مافیگ که حدود ۱۰ درصد ترکیب مدال سنگ را می‌دهند (شکل ۴-۱) شامل بیوتیت، هورنبلند و اندکی پروکسن است که دو کانی اخیر کم و بیش به کلریت و اورالیت دگرسان شده‌اند؛ بلورهای بیوتیت عموماً سالم هستند. ایلمنیت، به عنوان یک کانی اولیه و ماگمایی، به‌صورت بین دانه‌ای با کانی‌های سیلیکاتی، و نیز همراه با اکسید آهن ناشی از دگرسانی کانی‌های مافیگ دیده می‌شود. کانی‌های همراه سنگ شامل زیرکن، آپاتیت و تیتانیت فراوانی کمتر از ۱ درصد دارند. تورمالین به‌عنوان یک کانی دگرسانی با بلورها و انبوه‌های بلوری به رنگ قهوه‌ای تا آبی در مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود (شکل ۴-۱). همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، افزون بر نمونه‌برداری از توده‌های گرانیتیویدی رخنمون‌یافته در سطح، ۳ نمونه از توده‌های گرانیتیویدی در مغزه‌های حفاری نیز برای

تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام شد. به‌منظور تعیین مقادیر اکسیدهای اصلی به روش XRF، از دیسک مذاب و برای تعیین مقادیر برخی عناصر فرعی و کمیاب، از پودر پرس شده استفاده شد. تجزیه‌ها به ترتیب با استفاده از فناوری‌های Epsilon5، مدل PANanalytical و S4 Explorer، مدل Bruker AXS در آزمایشگاه تجزیه مواد زیست‌محیطی و خام (LERA) دانشگاه کارلسروهه انجام شد. به‌منظور آشکارسازی فراوانی عناصر فرعی و کمیاب به روش ICP-MS، ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم از هر نمونه پودر شده توسط سه اسید  $HNO_3$ -HF-HClO<sub>4</sub> حل و سپس نمونه‌ها با استفاده از اسید  $HNO_3$  ۶۵ درصد اکسید شد. در ادامه نمونه‌ها با اسید HF ۴۰ درصد و  $HClO_4$  ۶۵ درصد در ظروف تفلون در بسته به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. پس از تبخیر اسید، این فرایند تا سه مرتبه تکرار شد. مواد به‌جا مانده نهایی با استفاده از ۵۰ میلی‌لیتر آب خالص حل و توسط فناوری X-Series, Thermo Fisher در آزمایشگاه LERA واکاوی شد. صحت تجزیه‌ها، با سه نمونه استاندارد مقادیر کربن و گوگرد، توسط فناوری CS-2000, ELTRA آزمایشگاه LERA انجام شد. استانداردهای مورد استفاده به‌منظور اطمینان از صحت اندازه‌گیری این فناوری، شامل یک نمونه فولاد (TC: 101%, TS: 103%) و یک نمونه باریت (TS: 99%) استاندارد بود.

### ۳- داده‌ها و اطلاعات

#### ۳-۱- زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری

بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران (بهروزی و خان‌ناظر، ۱۳۷۱)، ۱:۲۰۰۰۰ بصیران (عسکری و صفری، ۱۳۸۲) و ۱:۵۰۰۰ هیرد (زارعی و ولایتی، ۱۳۹۶) و بررسی‌ها و مشاهدات صحرائی، واحدهای رخنمون‌یافته در دو منطقه هدف ۱ و ۳ به شرح زیر است:

#### ۳-۱-۱- زمین‌شناسی واحدهای سنگی محدوده هدف ۱

محدوده هدف ۱ با گستره‌ای حدود ۷ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین محدوده در میان چهار هدف معرفی شده در هیرد است. بخش عمده این محدوده را واحدهای آتشفشانی و نفوذی ائوسن تشکیل می‌دهند. قدیمی‌ترین واحد سنگی این محدوده، واحد  $K_2^{ms}$  کرتاسه‌بالایی است که در جنوب باختری آن رخنمون دارد (شکل های ۲-۱، B و ۴). این واحد شامل مارن زرد رنگ با میان‌لایه‌هایی از ماسه سنگ صورتی تا خاکستری رنگ است. واحد سنگ آهک و سنگ آهک ماسه‌ای  $K_2^{ls}$  در انتهای خاوری محدوده ۱ رخنمون دارد (شکل های ۲-۱، A و ۴). واحد کنگلومرای ( $P^c$ ) حاوی قطعات سنگ آهک و ماسه سنگ است و در دسته کنگلومراهای پلی‌میکتیک قرار می‌گیرد. این واحد به‌صورت هم‌شیب بر روی سنگ آهک و سنگ آهک ماسه‌ای قرار گرفته است (شکل های ۲-۱، A و ۴).

یک واحد توف و توف آهکی ائوسن ( $E^v$ ) در جنوب محدوده هدف ۱ رخنمون دارد که با همبری نامشخص (پوشیده شده) بر روی واحد مارن با میان‌لایه‌هایی از ماسه سنگ  $K_2^{ms}$  قرار گرفته است (شکل های ۲-۱، B و ۴). در بخش جنوب خاوری محدوده، واحد توف و آگلومرا ( $E^{3a}$ ) مشاهده می‌شود (شکل های ۲-۱، A، B، C، و ۴). واحد گدازه و توف آندزیتی ( $E^{3a}$ ) با رنگ مایل به سبز با مرز گسلی بر روی واحد ( $E^{3a}$ ) قرار می‌گیرد و مرز آن با توده نفوذی گرانودیوریتی نیز گسلی است (شکل های ۲-۱، C و ۴). واحد آتشفشانی آندزیت و توف آندزیتی با میان‌لایه‌هایی از آگلومرا ( $E^v$ ) ارتفاعات را تشکیل می‌دهد (شکل های ۲-۱، A و ۴). بخش‌های توفی این واحد عمدتاً توف خرده‌سنگی و توف شیشه‌ای-بلورین است. این بخش در سطح رخنمون، خاکستری تا سبز تیره و در سطح تازه، سبز روشن است. رسوبات عهد حاضر شامل پادگانه‌های (تراس‌های) آبرفتی قدیمی و جدید، رسوبات پنجه آبرفتی، دشت سیلابی و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر هستند که در نقشه زمین‌شناسی

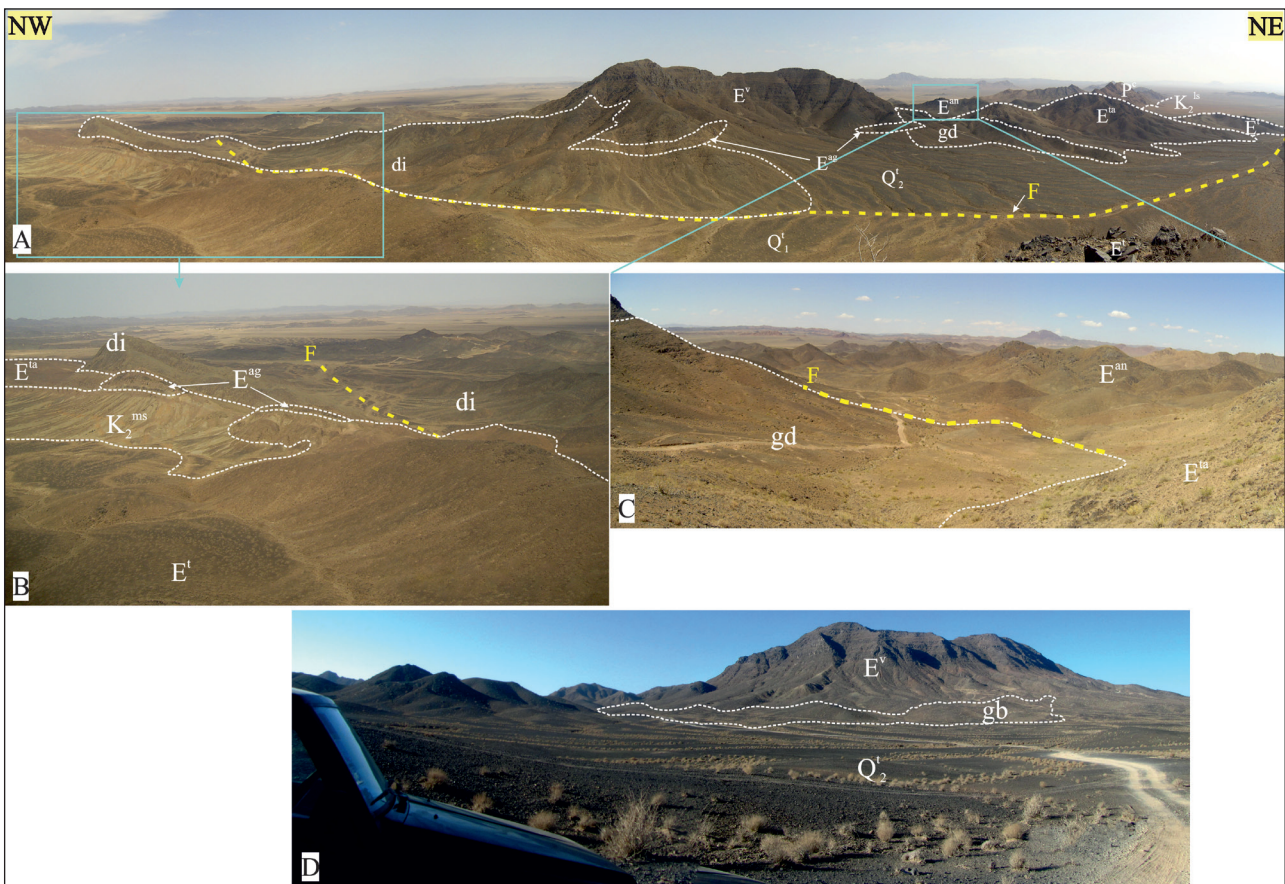
به‌عنوان یک کانی اولیه و ماگمایی، به‌صورت بین دانه‌ای با کانی‌های سیلیکاتی، و هم به‌عنوان یک کانی ثانویه در سنگ دیده می‌شود. افزون بر ایلمنیت، مگنتیت نیز به‌صورت ثانوی و به میزان بسیار کم در سنگ حضور دارد. کانی‌های همراه سنگ شامل آپاتیت و تیتانیت است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، این توده را می‌توان گرانودیوریت در نظر گرفت.

– نمونه HD-1-40 از ژرفای ۱۴۹/۶ متری در گمانه MS16 دارای بافت گرانولار تا پورفیری است. پلاژیوکلاز (حدود ۵۰-۵۵ درصد) کوارتز (حدود ۵-۱۰ درصد)، فلدسپات قلیایی (کمتر از ۱۰-۱۵ درصد)، هورنبلند (حدود ۵-۷ درصد) و بیوتیت (حدود ۲-۳ درصد) کانی‌های سنگ‌ساز را تشکیل می‌دهند. بلورهای هورنبلند و بیوتیت کم و بیش دگرسان و به‌طور بخشی تا کامل با کلریت، اپیدوت و اکسید-هیدروکسید آهن جایگزین شده‌اند (شکل ۴-F). ایلمنیت هم به‌عنوان یک کانی ماگمایی و به‌صورت بین دانه‌ای با کانی‌های سیلیکاتی، و به مقدار کمتر به‌عنوان یک کانی ثانوی در سنگ دیده می‌شود. کانی‌های همراه سنگ شامل زیرکن، آپاتیت و تیتانیت است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، می‌توان این توده را هورنبلند-کوارتز دیوریت نامید.

انجام آنالیزهای ژئوشیمی سنگ کل انتخاب شد. در ادامه، سنگ‌نگاری (پتروگرافی) این نمونه‌ها توصیف شده است.

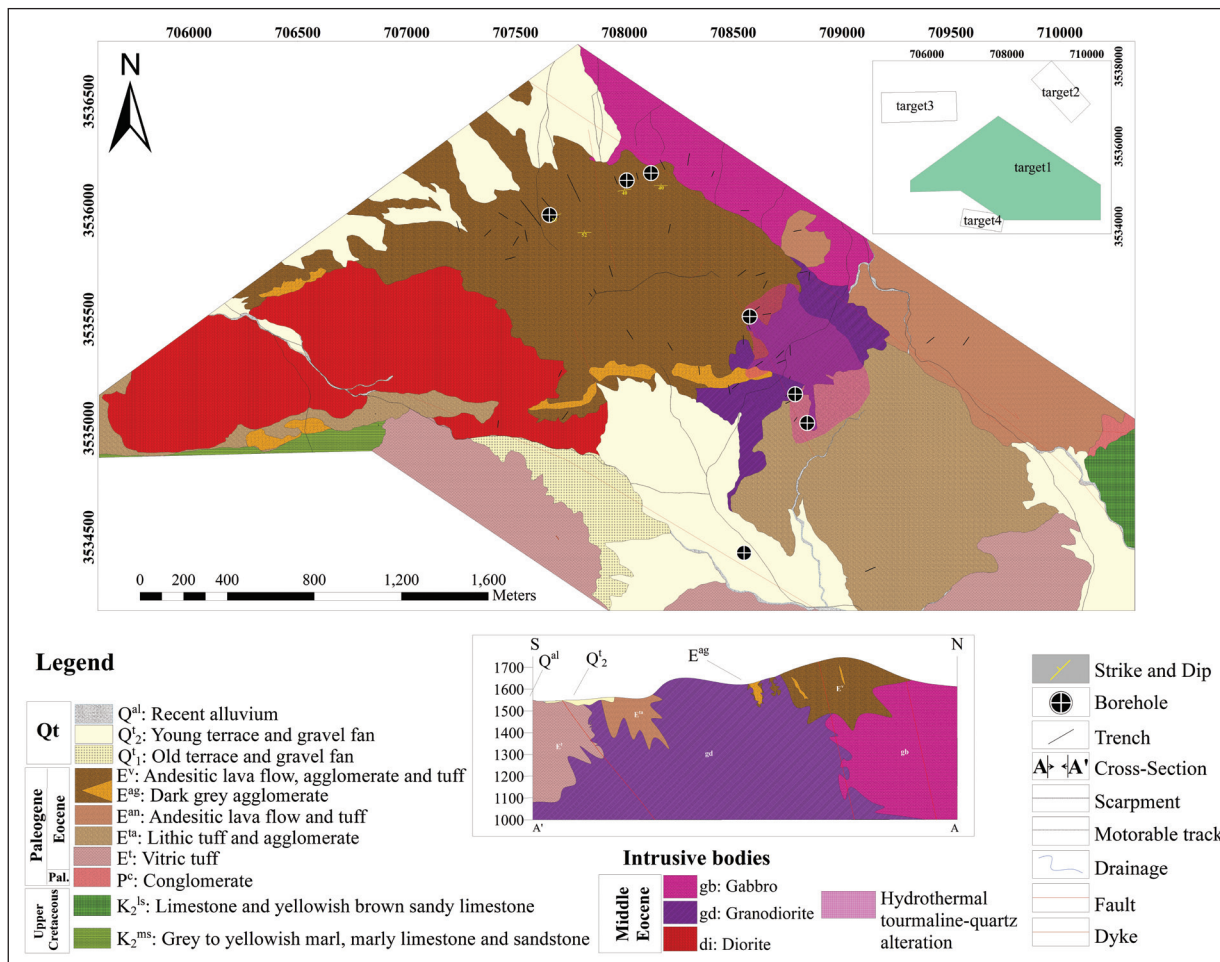
– نمونه HD-1-08 از ژرفای ۴۸۹/۱۵ متری در گمانه MS18 دارای بافت گرانولار تا پورفیری است و به‌طور عمده از پلاژیوکلاز (حدود ۴۵-۵۰ درصد)، کوارتز (حدود ۲۰-۲۵ درصد)، فلدسپات قلیایی (حدود ۱۰-۱۵ درصد) و بیوتیت (حدود ۵-۷ درصد) تشکیل شده است. بلورهای پلاژیوکلاز کم و بیش سرسیتی شده‌اند و برخی منطقه‌بندی ترکیبی نشان می‌دهند. بیوتیت کم و بیش توسط کلریت جانشین شده است (شکل ۴-D). کانی‌های همراه سنگ شامل زیرکن، آپاتیت و تیتانیت است؛ به نظر می‌رسد تیتانیت محصول دگرسانی کانی‌های تیتانیم‌دار همانند ایلمنیت و یا هورنبلند و بیوتیت است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، این توده را می‌توان گرانودیوریت گفت.

– نمونه HD-1-38 از ژرفای ۲۴۵/۴۰ متری در گمانه MS17 دارای بافت گرانولار است. پلاژیوکلاز (حدود ۴۵-۵۰ درصد)، فلدسپات قلیایی (حدود ۲۵-۳۰ درصد)، بیوتیت (حدود ۵-۷ درصد) و کوارتز (حدود ۲۰-۲۵ درصد)، کانی‌های اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. بلورهای پلاژیوکلاز، کم و بیش دستخوش دگرسانی سرسیتی شده‌اند و بیوتیت اغلب توسط کلریت جانشین شده است (شکل ۴-E). ایلمنیت هم



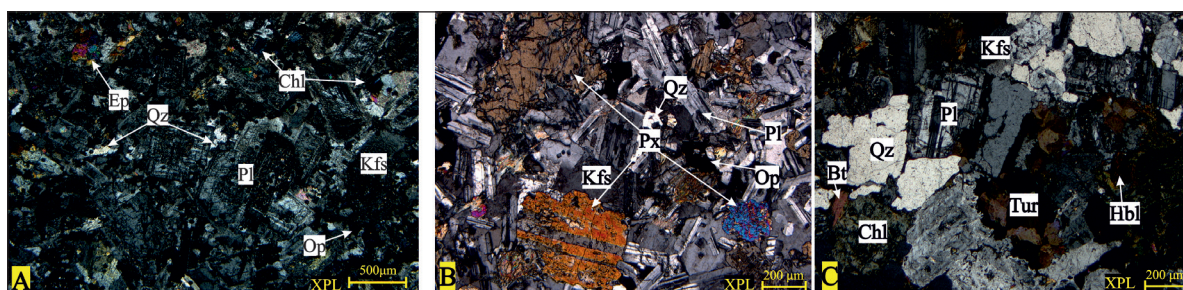
شکل ۲- دورنمایی از توزیع واحدهای سنگی و ارتباط مکانی آنها در محدوده هدف ۱ هیرد. (A) تصویر پانوراما از واحدهای سنگی در بخش مرکزی محدوده (دید به سوی شمال خاور تا شمال باختر)؛ مرز بین توده دیوریت (di) و سنگ‌های آتشفشانی جنوب آن گسلی است. (B) منتهی‌الیه بخش باختری محدوده هدف ۱ که واحد مارن خاکستری تا زرد رنگ، سنگ آهک مارنی و ماسه‌سنگ کرتاسه بالایی  $K_2^{ms}$ ، واحد توف و آگلومرای انوسن ( $E^{ta}$ ) و واحد توف انوسن ( $E^t$ ) را نشان می‌دهد (دید به سوی شمال باختر). (C) حاشیه خاوری محدوده هدف ۱ که توده گرانودیوریتی (gd)، واحد گدازه و توف آندزیتی انوسن ( $E^{an}$ ) و واحد توف و آگلومرای انوسن ( $E^{ta}$ ) را نشان می‌دهد (دید به سوی شمال خاور). (D) تصویر پانوراما از توده گابروی (gb) با ریخت‌شناسی تپه ماهوری در همبری با واحد ( $E^v$ ) (دید به سوی جنوب). خط چین زرد رنگ گسل‌ها را نمایش می‌دهند.

Figure 2. Field photos showing various rock units and their spatial relations. A) Panoramic photo of rock units in the central part of the target 1 (view to NE and NW); B) The west part of the target 1 showing the Upper Cretaceous gray- to yellowish marl, marly limestone, and sandstone  $K_2^{ms}$ , the Eocene tuff and agglomerate ( $E^{ta}$ ), and the Eocene tuff ( $E^t$ ) (view to NW); C) East part of the target 1 showing the granodiorite intrusive body (gd), the andesitic lava flow and tuff ( $E^{an}$ ), and the Eocene tuff and agglomerate ( $E^{ta}$ ); (view to NE) and D) Panoramic photo from the contact of the gabbro and  $E^v$  (view to S). The yellow dotted line is fault.



شکل ۳- نقشه زمین شناسی محدوده هدف ۱ هیرد (با تغییر از عسکری و صفری، ۱۳۸۲؛ زارعی و ولایتی، ۱۳۹۶).

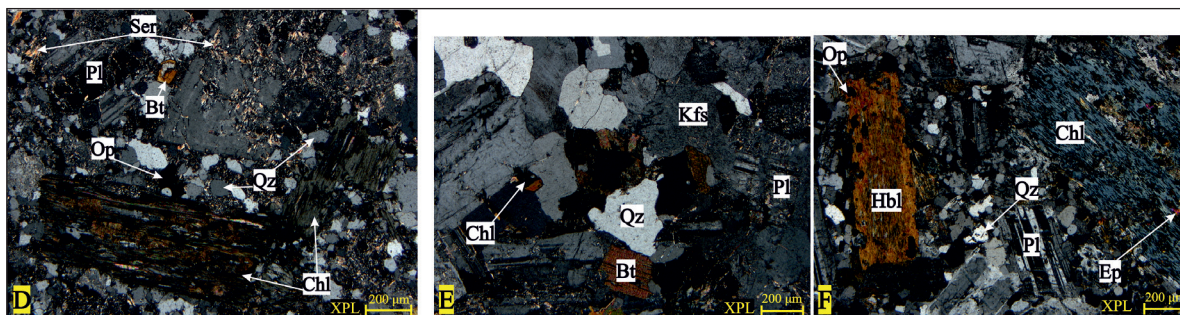
Figure 3. Geological map of the target 1 area in Hired (modified after Askari and Safari, 2003; Zarei and Velayati, 2018).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌هایی از توده‌های نفوذی در منطقه هدف ۱ هیرد که از رخنمون‌ها (A-B-C) و مغزه‌های حفاری (D-E-F) برداشته شده‌اند. تصاویر در نور عبوری متقاطع (XPL) است. A) بلورهای پلاژیوکلاز و فلدسپات قلیایی همراه با کانی‌های کلریت و اپیدوت ناشی از دگرسانی بلورهای مافیکی در توده نفوذی دیوریت؛ B) پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن همراه با اندکی فلدسپات قلیایی در توده گابرویی با بافت ساب‌آفیتییک؛ C) پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، بیوتیت و هورنبلند با بافت گرانولار در توده گرانودیوریتی. D) بلورهای پلاژیوکلاز کم و بیش سرسیتی شده و بیوتیت که به‌طور کامل به کلریت دگرسان شده است در گرانودیوریت (در این نمونه با بافت گرانولار تا پورفیری)؛ نمونه از گمانه MS18؛

Figure 4. Microphotographs of intrusive rocks from outcrops (A-B-C) and drill cores (D-E-F) in transmitted cross-polarized light. A) Plagioclase, alkali feldspar, and mafic minerals (altered to chlorite and epidote) in diorite; B) Plagioclase, clinopyroxene and minor alkali feldspar in sub-ophitic gabbro; C) Plagioclase, alkali feldspar, biotite, and hornblende in granular granodiorite; D) Plagioclase weakly alters to sericite and biotite altered to chlorite in granular to porphyritic granodiorite (sample from borehole MS18);





ادامه شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌هایی از توده‌های نفوذی در منطقه هدف ۱ هیرد که از رخنمون‌ها (A-B-C) و مغزه‌های حفاری (D-E-F) برداشته شده‌اند. تصاویر در نور عبوری متقاطع (XPL) است. E) پلاژیو کلاز، فلدسپات قلیایی، کوارتز و بیوتیت با بافت گرانولار؛ نمونه از گمانه MS17؛ بیوتیت کم و بیش به کلریت دگرسان شده است؛ F) بلورهای پلاژیو کلاز همراه با هورنبلند و بیوتیت در هورنبلند-کوارتز دیوریت با بافت گرانولار تا پورفیری؛ زمینه سنگ حاوی بلورهای ریز کوارتز است؛ نمونه از گمانه MS16؛ دگرسانی ضعیف به کانی‌های رسی، اپیدوت و کلریت دیده می‌شود.  
Pl: پلاژیو کلاز، Bt: بیوتیت، Qz: کوارتز، Kfs: فلدسپات قلیایی، Hbl: هورنبلند، Tur: تورمالین، Ep: اپیدوت، Px: پیروکسن، Ser: سریسیت، Chl: کلریت، Op: کانی کدر. (علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز - Whitney and Evans, 2010).

Continued from Figure 4. Microphotographs of intrusive rocks from outcrops (A-B-C) and drill cores (D-E-F) in transmitted cross-polarized light. E) Plagioclase, alkali feldspar, quartz, and biotite (altered to chlorite) in granular granodiorite; sample from borehole MS17; F) Plagioclase, hornblende and biotite (weakly altered to clay minerals, chlorite and epidote) with fine quartz in the matrix in granular to porphyritic hornblende-quartz diorite; sample from MS16 borehole.

Pl: plagioclase, Bt: biotite, Qz: quartz, Kfs: alkali feldspar, Op: opaque, Hbl: hornblende, Tur: tourmaline, Ep: epidote, Px: pyroxene, Ser: sericite, and Chl: chlorite. (Abbreviations after Whitney and Evans, 2010).

### ۳- زمین‌شناسی و واحدهای سنگی محدوده هدف ۳

محدوده هدف شماره ۳ در شمال باختر محدوده امیدبخش معدنی هیرد مساحتی حدود ۲/۵ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد (شکل ۵). واحد آندزیت، داسیت، آندزیت بازال و توف آندزیتی (E<sup>am</sup>) بخش گسترده‌ای از رخنمون سنگی این محدوده را تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۵ و ۶-A). واحد ایگنمبریت (E<sup>i</sup>) با امتداد شمال باختر- جنوب خاور در بخش میانی محدوده هدف رخنمون دارد و توسط واحد آندزیتی (E<sup>am</sup>) در برگرفته شده است (شکل ۵). بخش عمده‌ای از کانی‌سازی (Ore body) در محدوده هدف ۳، در یک بازه حدود ۷۰۰ متر در امتداد گسلی با طول حدود ۲ کیلومتر رخ داده است (شکل ۷). شیب این گسل بین ۳۰-۵۰ درجه به سوی شمال باختر و عرض پهنه برشی گسل متغیر بوده و بین ۱۵-۳۵ متر است. رسوبات عهد حاضر شامل پادگانه‌های آبرفتی، رسوبات پنجه آبرفتی، دشت سیلابی و رسوبات رودخانه‌ای عهد حاضر است که در نقشه زمین‌شناسی محدوده هدف ۳، به ترتیب با حروف (Q<sup>i</sup>) و (Q<sup>al</sup>) نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۵).

توده نفوذی هورنبلند کوارتز-موزونیت با رنگ رخنمون سبز تا خاکستری روشن (شکل ۶-B) در شمال باختری این محدوده رخنمون دارد (شکل‌های ۵ و ۶-B-A). این توده در واحد آندزیتی (E<sup>am</sup>) نفوذ کرده است. در مطالعات سنگ‌نگاری، کانی‌های اصلی سنگ شامل پلاژیو کلاز (۴۵ تا ۵۰ درصد)، فلدسپات قلیایی (۳۰-۳۵ درصد) و کوارتز (۱۰-۱۵ درصد) و بافت آن گرانولار است. فلدسپات قلیایی اغلب شامل ارتوز با بلورهای بدون وجه (انهدرال) متوسط- تا ریز- بلور در فضای بین پلاژیو کلازها دیده می‌شود. مهم‌ترین کانی مافیک سنگ، هورنبلند است که کم و بیش به کلریت و بیوتیت ثانویه دگرسان شده است (شکل ۶-C). پیروکسن نیز به میزان بسیار کم (۱-۲ درصد) در سنگ دیده می‌شود. اندکی زیرکن و تیتانیت به‌عنوان کانی‌های همراه وجود دارد.

### ۳-۲- دگرسانی در محدوده‌های هدف ۱ و ۳

دگرسانی‌های تورمالینی، آرژیلیک، کربناتی، سیلیسی، سریسیتی و پروپیلیتی در محدوده‌های هدف ۱ و ۳ قابل تشخیص است. دگرسانی تورمالینی یکی از مهم‌ترین دگرسانی‌های همراه با کانی‌سازی، به‌ویژه در محدوده هدف ۱ است و در رخنمون‌های طبیعی و مغزه‌های حفاری مشاهده می‌شود. توده گرانودیوریتی در خاور محدوده هدف ۱ به شدت تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته است. این دگرسانی اغلب به صورت رگچه‌ای، استوک‌ورک و جانشینی نامنظم در سنگ میزبان دیده می‌شود. ستبرای رگچه‌های غنی از تورمالین تا ۳ سانتی‌متر می‌رسد (شکل ۷-A). کوارتز، سریسیت و کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، آرسنوپیریت از همراهان معمول تورمالین در این دگرسانی هستند (شکل ۷-B). بر اساس مشاهدات صحرایی، لاگ مغزه‌های حفاری و مطالعات سنگ‌نگاری، رگچه‌ها و استوک‌ورک‌های تورمالینی با رگچه‌های کوارتز-سریسیت-کربنات، کوارتز-کربنات و رگچه‌های تأخیری کربنات قطع می‌شوند. دگرسانی تورمالینی در محدوده هدف ۳ گسترش بسیار کمتری دارد.

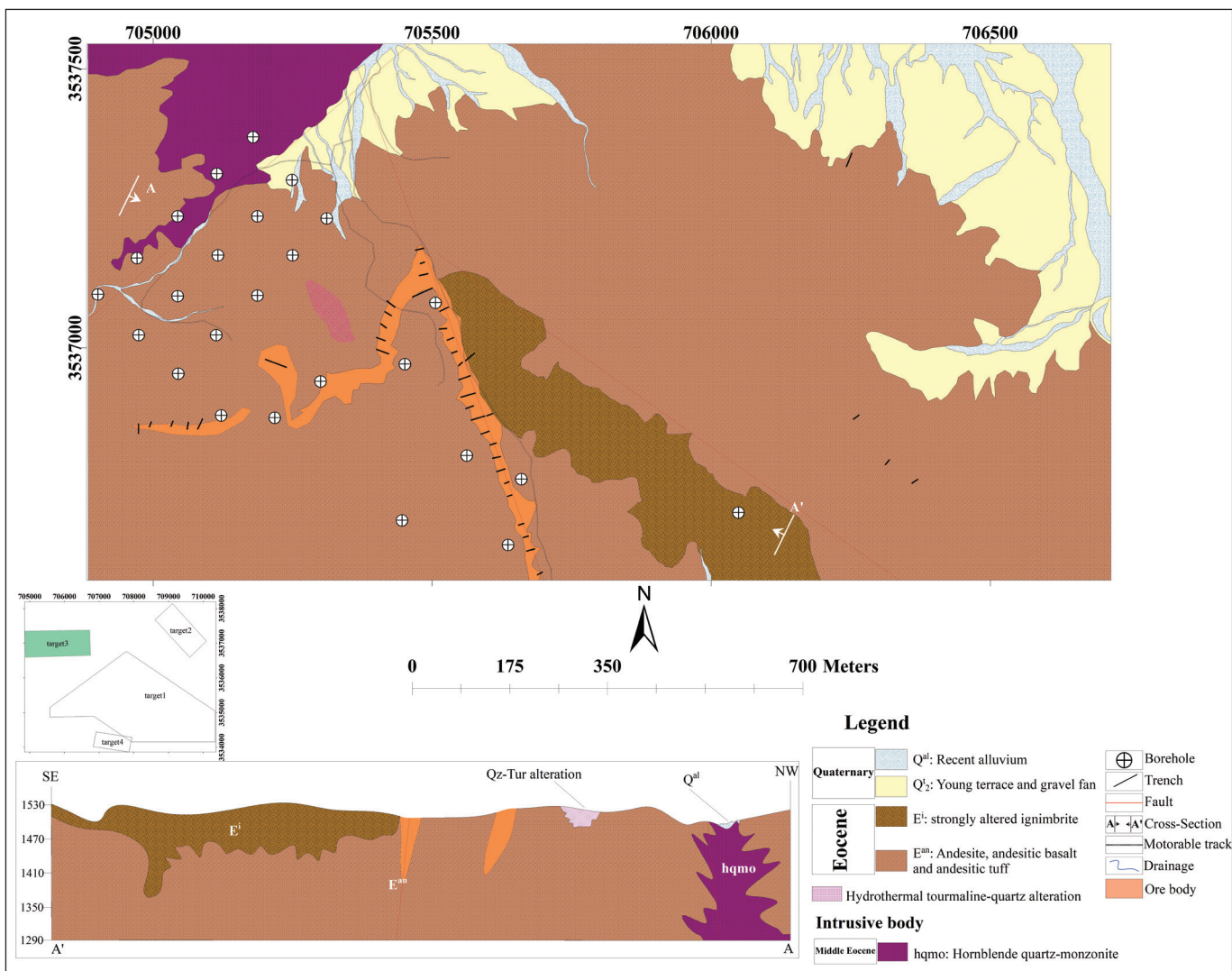
دگرسانی آرژیلیک در محدوده هدف ۳ در امتداد یک زون گسلی با طول حدود ۷۰۰ متر همراه با کانی‌سازی دیده می‌شود. دگرسانی کربناتی در هر دو محدوده از گسترش چشمگیری برخوردار است. این دگرسانی به شکل‌های مختلف رخ داده است، از جمله: (۱) جانشینی کلسیت در کانی‌های پلاژیو کلاز، هورنبلند و پیروکسن در سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی؛ (۲) رخداد کلسیت به صورت رگه-رگچه‌ای که گاه همراه با دگرسانی سیلیسی و سریسیتی است. حضور متداول کانی‌های سولفیدی در رگه-رگچه‌های کربناتی، نشان می‌دهد که دست کم بخشی از دگرسانی کربناتی با کانی‌سازی همراه است (شکل ۷-C)؛ (۳) رگه-رگچه‌های کلسیت تأخیری که معرف مراحل پایانی فعالیت گرمایی در منطقه هستند و سنگ میزبان و

رگه-رگچه‌ای همراه با دگرسانی‌های تورمالینی و سیلیسی، و همین‌طور جانشین فلدسپات‌ها دیده می‌شود (شکل ۷- E).

بیشتر واحدهای سنگی آتشفشانی، به‌ویژه آندزیت‌ها، تحت تأثیر دگرسانی پروپیلیتی قرار گرفته‌اند. در این سنگ‌ها، درشت‌بلورهای هورنبلند، بیوتیت و پلاژیوکلاز و همین‌طور زمینه سنگ کمایش توسط اپیدوت، کلریت و کلسیت جانشین شده است (شکل ۷- F). دگرسانی کلریتی در کانی‌های مافیک متداول است. دگرسانی پروپیلیتی همبستگی آشکاری با کانی‌سازی ندارد.

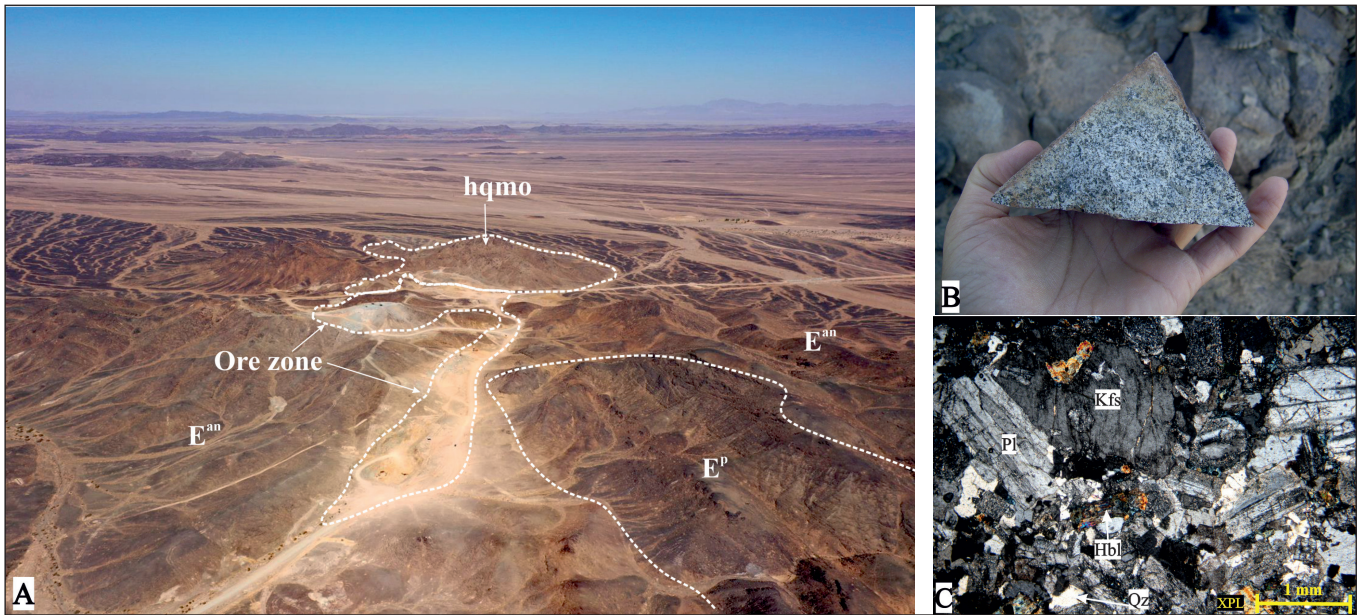
رگه-رگچه‌های کربناتی-سولفیدی را قطع کرده‌اند. این رگه‌ها با کانی‌سازی همراه نیستند. دگرسانی کربناتی، همچنین به‌عنوان بخشی از دگرسانی پروپیلیتی پدید آمده است که در این حالت با کلریت و اپیدوت همراهی می‌شود.

دگرسانی سیلیسی در هر دو محدوده و به‌طور عمده، در قالب رگه-رگچه‌های سیلیسی با اندازه‌های متفاوت رخ داده است که غالباً با تورمالین، کربنات، سریسیت و کانی‌های سولفیدی همراه است (شکل ۷- D). دگرسانی سریسیتی از فراوان‌ترین و مهم‌ترین دگرسانی‌ها در هر دو محدوده هدف است. سریسیت به‌صورت



شکل ۵- نقشه زمین‌شناسی محدوده هدف ۳ (با تغییر از عسکری و صفری، ۱۳۸۲؛ زارعی و ولایتی، ۱۳۹۶).

Figure 5. Geological map of the target 3 area in Hired (modified after Askari and Safari, 2003; Zarei and Velayati, 2018).

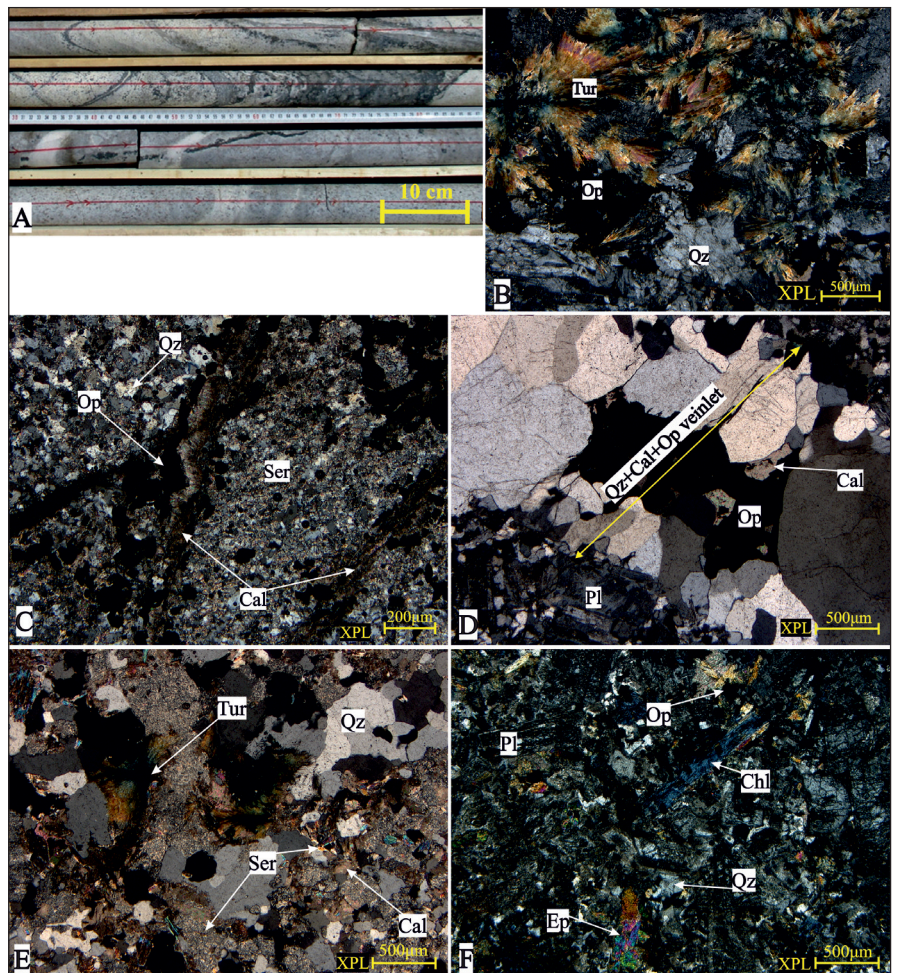


شکل ۶- A) تصویر هلی شات از محدوده هدف ۳، که نمایانگر توده هورنبلند-کوارتز مونزونیت (hqmo)، واحدهای آتشفشانی میزبان، و نیز یک زون کانی سازی است؛ دید به سوی شمال. B) نمونه دستی و C) تصویر میکروسکوپی از توده نفوذی هورنبلند-کوارتز مونزونیت در بخش شمالی محدوده هدف ۳ که شامل بلورهای پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، کوارتز و هورنبلند دگرسان شده است. تصویر در نور عبوری متقاطع. علائم اختصاری کانی ها مانند شکل ۴.

Figure 6- A) A view of the target 3 showing the hornblende-quartz monzonite (hqmo), the host volcanic rocks and an ore zone (view to N). B) Hand specimen and C) transmitted cross-polarized light microphotograph of the hqmo with plagioclase, alkali feldspar, quartz and altered hornblende. Abbreviations same as Fig. 4.

شکل ۷- تصویر مغزه حفاری و تصاویر میکروسکوپ نور عبوری از دگرسانی گرمایی در هیرد. A) تصویر مغزه حفاری که نشانگر رگه های کوارتز- تورمالین- سولفید در توده گرانودیوریتی به شدت سیلیسی شده است؛ B) تورمالین با بافت شعاعی همراه با کوارتز و کانی فلزی (آرسنوپیریت)؛ C) رگچه های کربنات- کوارتز- کانی فلزی (پیریت) در زمینه به شدت سریسیتی- کربناتی- سیلیسی در واحد توف خاکستری؛ D) رگچه کوارتز- کلسیت- کانی فلزی (آرسنوپیریت) در توده گرانودیوریتی؛ E) دگرسانی سریسیت- تورمالین- کوارتز- کربنات در نمونه ای از توده گرانودیوریتی؛ F) جانشینی کانی های مافیک سنگ با کلریت و اپیدوت در توده دیوریتی. تصاویر میکروسکوپی در نور XPL؛ علائم اختصاری کانی ها مانند شکل ۴.

Figure 7. Photograph (A) and microphotographs (B-E) showing hydrothermal alteration in Hired. A) Drill core showing quartz-tourmaline-sulfide in highly silicified granodiorite; B) Tourmaline with radial texture associated with Qz and metallic (opaque) minerals; C) Carbonate-quartz- metallic minerals in highly sericitized-carbonatized-silicic gray tuff; D) A veinlet of quartz-calcite-metallic minerals in granodiorite; E) sericite-tourmaline-quartz-carbonate alterations in granodiorite; F) Replacement of chlorite and epidote in mafic minerals in diorite. All microphotographs in XPL. Minerals abbreviation as in Fig. 4



۳-۳- کانی‌سازی در محدوده‌های هدف ۱ و ۳

و اغلب به صورت رگه-رگچه‌ای رخ داده است (شکل ۸- B). گالن به مقدار بسیار کم و به صورت پراکنده در میان کانی‌های دیگر یا میانبار در پیریت و آرسنوپیریت دیده شد (شکل ۸- C). اسفالریت نیز به مقدار کم و به تنهایی یا به صورت میانبار در کالکوپیریت مشاهده شد (شکل ۸- D). پیروتیت اغلب به صورت پراکنده در متن سنگ، همراه با کالکوپیریت و گاه پیریت، یا بدون آنها، دیده شد (شکل ۸- E). اندکی مارکاسیت به صورت جانشینی پیروتیت وجود دارد. ایلمنیت که به طور عمده در مرحله ماگمایی تشکیل شده است، به عنوان کانی همراه در بیشتر نمونه‌های سطحی و مغزه‌های حفاری قابل تشخیص است (شکل ۸- F). در بخش‌های سطحی و کم ژرفا، کانی‌های بروزناد کالکوسیت، کوولیت و بورنیت به صورت جانشینی کالکوپیریت دیده می‌شود (شکل ۸- G). به طور محلی، کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن وجود دارد که ناشی از اکسایش کانی‌های سولفیدی پیریت و پیروتیت و کمتر از آن کالکوپیریت است.

کانی‌سازی در رخنمون‌های سنگی محدوده هدف ۱ بسیار محدوده است و تنها در بخش خاوری و به طور محلی در توده گرانیتویدی دیده می‌شود که تحت تأثیر دگرسانی کوارتز-تورمالینی قرار گرفته است (شکل ۴). کانه‌زایی فلزی در اینجا به شکل رگه-رگچه‌های تخت و استوک‌ورکی، افشان و جانشینی، همراه با دگرسانی‌های تورمالینی، سیلیسی، کربناتی و سرسیتی و به طور عمده در توده گرانودیوریتی نیمه ژرف رخ داده، که در حفاری‌های مغزه‌گیری مشخص شده است. بررسی ۴ گمانه حفاری در این محدوده نشان می‌دهد که کانی‌سازی درون‌زاد شامل آرسنوپیریت، پیریت، مارکاسیت، کالکوپیریت، پیروتیت، اسفالریت و گالن است که به صورت رگه-رگچه‌های تخت و استوک‌ورکی و پراکنده رخ داده است. پیریت به صورت وجه‌دار تا نیمه‌وجه‌دار اغلب همراه با آرسنوپیریت تشکیل شده است (شکل ۸- A). آرسنوپیریت فراوان‌ترین کانی سولفیدی در مغزه‌های محدوده هدف ۱



شکل ۸- نمونه مغزه حفاری (A) و تصاویر میکروسکوپی در نور انعکاسی (B-G) از کانسنگ در هیرد. (A) رگه‌های تورمالین و پیریت-آرسنوپیریت در توده گرانودیوریتی به شدت سیلیسی؛ نمونه مغزه از گمانه MS18؛ (B) بلورهای آرسنوپیریت در زمینه کوارتز (خاکستری تیره)؛ (C) پیریت همراه با آرسنوپیریت و گالن؛ (D) آرسنوپیریت همراه با اسفالریت حاوی میانبارهای میکروسکوپی کالکوپیریت؛ (E) پیروتیت با حاشیه جانشینی مارکاسیت، همراه با کمی کالکوپیریت؛ (F) بلور ایلمنیت ماگمایی به صورت میانبار در بلور هورنبلند در توده گرانودیوریتی؛ نمونه HD-1-38 و (G) جانشینی کالکوپیریت با کوولیت، کالکوسیت و اندکی بورنیت. تصاویر میکروسکوپی در نور پلاریزه مسطح.

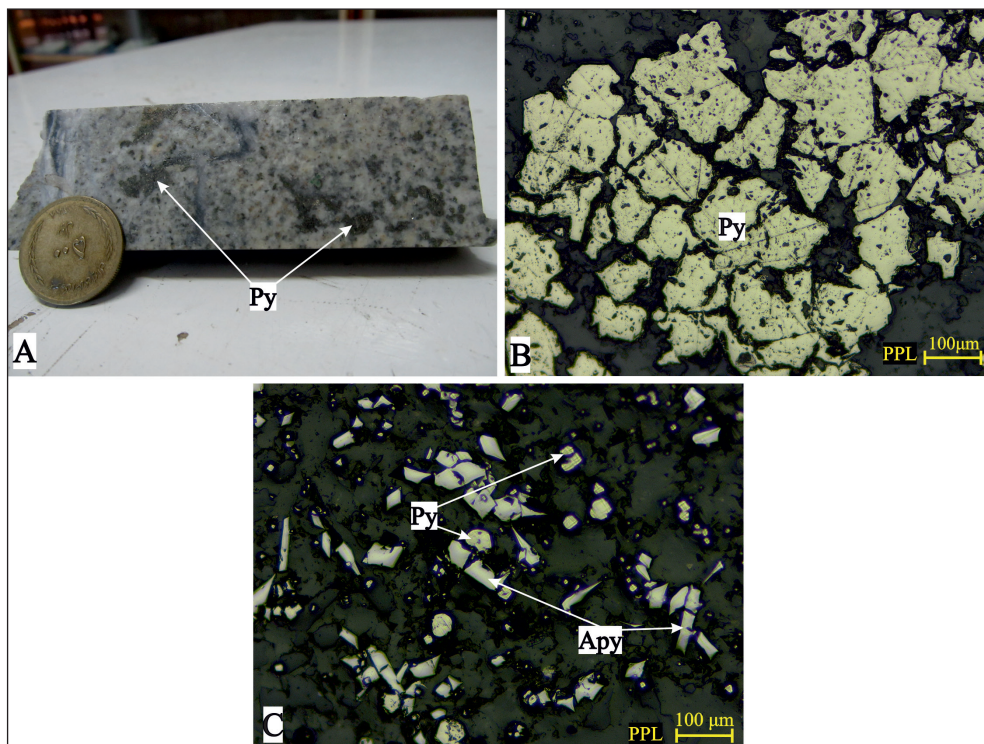
Apy: آرسنوپیریت، Py: پیریت، Gn: گالن، Ilm: ایلمنیت، Po: پیرروتیت، Mrc: مارکاسیت، Hbl: هورنبلند، Ccp: کالکوپیریت، Bn: بورنیت، Cv: کوولیت. (علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز- Whitney and Evans, 2010).

Figure 8. Drill core specimen (A) and reflected-light microphotographs (B-G) from Hired. (A) tourmaline and pyrite-arsenopyrite veins in highly silicified granodiorite; core sample from borehole- MS18; B) arsenopyrite crystals in quartz matrix (dark grey); C) pyrite associated with arsenopyrite and galena; D) arsenopyrite, and sphalerite containing microscopic inclusions of chalcopyrite; E) pyrrhotite replaced at rims by marcasite, associated with minor chalcopyrite; F) ilmenite occurring as inclusion in hornblende in granodiorite body; sample HD-1-38; and G) partial replacement of chalcopyrite by covellite, chalcocite and minor bornite. All microphotographs in plane-polarized light.

Apy: arsenopyrite, Py: pyrite, Gn: galena, Ilm: ilmenite, Po: pyrrhotite, Mrc: marcasite, Hbl: hornblende, Ccp: chalcopyrite, Bn: bornite, Cv: covellite. (Abbreviations after Whitney and Evans, 2010).

کانی سازی در محدوده هدف ۳، در امتداد یک زون گسلی با طول بیش از ۷۰۰ متر در گدازه‌ها و مواد آذر آواری و آندزیتی ائوسن رخ داده است. با توجه به مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های مغزه از ۳ گمانه حفاری در این محدوده اکتشافی، کانی‌های سولفیدی به ترتیب فراوانی شامل پیریت، آرسنوپیریت (شکل‌های ۹-A, B, C)، پیروتیت، کالکوپیریت و اسفالریت است. افزون بر کانی‌های سولفیدی، کانی اکسیدی ایلمنیت نیز در سنگ میزبان دیده می‌شود؛ مطالعات کانی‌شناسی نشان‌دهنده تشکیل این کانی در مرحله ماگمایی است. در بخش‌های سطحی و کم‌ژرفا، کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن ناشی از اکسیداسیون سوپرژن پیریت و پیروتیت تشکیل شده است.

مهم‌ترین کانی‌های غیر فلزی همراه با کانی‌های سولفیدی شامل تورمالین، کوارتز، سریست و کلسیت است. سریست همراه با رگه-رگچه‌های تورمالین-کوارتز-سولفید و کوارتز-سولفید و نیز به صورت جانشینی فلدسپات هادر سنگ میزبان پدید آمده است. کوارتز به شکل رگه-رگچه‌های تخت و استوک ورکی و اغلب همراه با تورمالین، سریست، کربنات و سولفید دیده می‌شود. کلسیت به صورت رگه-رگچه‌ای، جانشینی در کانی‌های سیلیکاتی (به‌طور عمده پلاژیوکلاز) و پراکنده در متن سنگ حضور دارد. اغلب رگه-رگچه‌های کلسیت همراه با کوارتز و سولفید است. اگرچه کلسیت به صورت رگچه‌های تأخیری تک کانی نیز دیده می‌شود که به نظر می‌رسد معرف آخرین نمودهای فعالیت گرمایی در هیرد است.

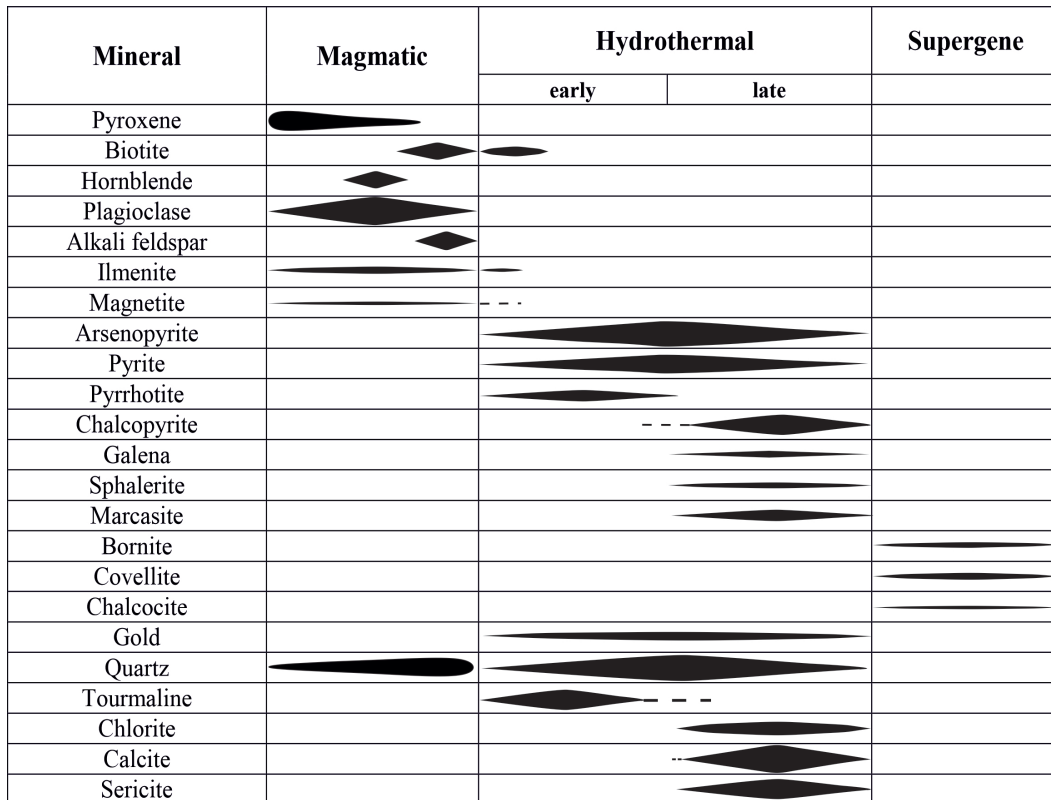


شکل ۹ - تصاویری از کانسنگ در محدوده هدف ۳. (A) نمونه مغزه حفاری از گمانه MS38، ژرفای ۱۲۶/۵۰ متری، که نشانگر کوارتز مونزونیت سیلیسی با تجمع‌های پراکنده پیریت است؛ (B) پیریت با بافت برشی (کاتا کلاستی)؛ (C) بلورهای ریز آرسنوپیریت و بلورهای کمایش گرد پیریت در کوارتز مونزونیت سیلیسی. تصویر میکروسکوپی در نور PPL.

Figure 9. Photograph and microphotographs of ore specimens in the target 3. A) A drill core from borehole MS38 (depth: 126.50 m) showing scattered patches of pyrite grains in silicified quartz-monzonite; B) Pyrite aggregate with cataclastic texture; C) fine arsenopyrite crystals and subrounded pyrite grains in silicified quartz monzonite. Microphotographs in reflected plain polarize light (PPL).

کوارتز-تورمالین-سریست، و نیز به صورت پراکنده و جانشینی رخ داده است. مرحله گرمایی پسین، با دگرسانی‌های کربناتی، سیلیسی، سریستی و کمتر از آن آرژلیک و تشکیل کانی‌های سولفیدی آرسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت بوده است. مارکاسیت در این مرحله و بر اثر دگرسانی‌های کانی‌های سولفیدی، به‌ویژه پیریت و کمتر پیروتیت تشکیل شده است. کانی‌سازی همراه با دگرسانی تورمالینی در مرحله پیشین و همین‌طور دگرسانی کربناتی و سیلیسی در مرحله پسین رخ داده است. غنی‌سازی برون‌زاد گسترش بسیار محدودی در منطقه دارد و تنها در چند نمونه از مغزه‌های حفاری محدوده هدف ۱ کانی‌های بورنیت و کالکوسیت به‌صورت جانشینی کالکوپیریت مشاهده شد. تجزیه ریز کاو الکترونی نشان داده که طلا در درون شبکه سولفیدها (پیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت و گالن) جانشین شده است (اشراقی، ۱۳۸۵).

بر اساس مشاهدات صحرائی، نمونه‌های دستی، مطالعات میکروسکوپی و بررسی ساخت و بافت و کانی‌شناسی، می‌توان سه مرحله برای کانه‌زایی در محدوده هیرد در نظر گرفت (شکل ۱۰) نخستین مرحله مربوط به نفوذ توده‌های نفوذی گرانیتویدی در درون واحدهای آتشفشانی است؛ در این مرحله، کانی‌های سیلیکاتی همانند پیروکسن، هورنبلند، بیوتیت، پلاژیوکلاز و کوارتز تشکیل شده است. ایلمنیت که کانی شاخص در گرانیتویدهای سری احیایی است و مقدار کمی مگنتیت به عنوان کانی‌های همراه نیز در این مرحله تشکیل شده است. مرحله دوم، گذار از مرحله ماگمایی به مرحله گرمایی است. این مرحله خود به دو زیرمرحله پیشین و پسین تقسیم می‌شود. در مرحله گرمایی پیشین، دگرسانی‌های تورمالینی، سیلیسی و سریستی به همراه کانی‌های سولفیدی آرسنوپیریت، پیریت و پیروتیت در قالب رگچه‌های



شکل ۱۰- پاراژنز و توالی پاراژنتیکی کانی‌ها در کانسار هیرد.

Figure 10. Mineral paragenesis and paragenetic sequences in the Hired deposit.

اکتشافی هیرد متعلق به سری I و S هستند (شکل ۱۳- A). این توده‌ها بر اساس شاخص اشباعی آلومینیم در نمودار A/CNK در برابر A/NK (Maniar and Piccoli, 1989) ماهیت متاآلومین دارند (شکل ۱۳- B). در همین شکل محدوده گرانیتویدهای سری I و S بر اساس چپل و وایت (Chappell and White, 1992) مشخص شده که نشان می‌دهد توده‌های نفوذی هیرد در محدوده گرانیتویدهای سری I قرار می‌گیرند.

#### ۴- بحث

توده‌های نفوذی در محدوده هیرد از نظر کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی، شامل گابرو، دیوریت، مونزونیت و گرانودیوریت با گرایش کالک-آلکان تا کالک-آلکان پتاسیم بالا است. ترکیب کانی‌شناسی و همین‌طور توزیع اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی در برابر  $SiO_2$  نشانگر همبستگی زایشی بین توده‌های نفوذی و تشکیل آنها از یک منبع ماگمای مشترک است. توده‌های نفوذی منطقه هیرد متالومین هستند و در محدوده گرانیتویدهای سری I قرار می‌گیرند. توده‌های نفوذی هیرد با رخداد ایلمنیت به‌عنوان یک کانی ماگمایی همراه مشخص می‌شوند و از این نظر می‌توان آنها را در ردیف گرانیتویدهای سری ایلمنیتی بر اساس رده‌بندی ایشی‌هارا (Ishihara, 1977; Ishihara et al., 2002) در نظر گرفت. رخداد کانی‌سازی گرمایی با فراوانی نسبی آرسنوپیریت و پیرویت در زون‌های کانی‌سازی همراه با توده‌های نفوذی در هیرد نیز گواهی بر کاهیده بودن ماگمای مادر و سیال‌های گرمایی برخاسته از آنها است.

بسیاری از گرانیتویدهای سری ایلمنیتی، پرآلومین و نوع S هستند و در زون‌های برخورد قاره‌ای پدید آمده‌اند (برای مثال Chappell and White, 1992). گرانیتویدهای کاهیده یا سری ایلمنیتی، محدود به زون‌های برخوردی نیستند؛ مثالی از گرانیتویدهای ایلمنیتی متالومین نوع I که در جایگاه زمین‌ساختی مشابهی با هم‌ارزهای اکسیدی خود پدید آمده‌اند، از بسیاری جاها گزارش شده است (Belvin and Chappell, 1992; Ishihara, 2008; Maulana et al., 2013).

#### ۳-۴- ژئوشیمی توده‌های نفوذی در محدوده هیرد

فراوانی  $SiO_2$  در توده‌های نفوذی بین ۵۴/۹۱-۶۲/۷۸ درصد وزنی متغیر است که بیشترین مقدار مربوط به نمونه HD-1-08 از توده گرانودیوریتی در گمانه MS18 و کمترین مقدار مربوط به نمونه HD-1-01 از توده گابرویی رخنمون یافته در شمال خاور محدوده هدف ۱ است (جدول ۲). فراوانی به نسبت بالا برای CaO (4.12-8.31 wt%) و  $FeO_3$  (4.70-9.10 wt%) و MgO (1.52-5.04 wt%) و به نسبت پایین برای مجموع اکسیدهای سدیم و پتاسیم ( $K_2O+Na_2O=3.91-6.01$  wt%)، نشانگر تبلور از یک ماگمای نه چندان تفریق یافته است (جدول ۱).

در نمودار  $Na_2O+K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Cox et al., 1979)، توده‌های نفوذی هیرد در منطقه مرز گرانودیوریت-دیوریت، داخل محدوده دیوریت و در مرز بین گابرو و دیوریت قرار می‌گیرند (شکل ۱۱- A). در نمودار  $K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976) سنگ‌های نفوذی هیرد در محدوده کالک-آلکان تا کالک-آلکان پتاسیم بالا و شوشونیتی جای گرفته‌اند (شکل ۱۱- B).

توزیع اکسیدهای اصلی نسبت به  $SiO_2$  در نمودارهای هارکر (شکل ۱۲- A-F) نشانگر نوعی همبستگی بین توده‌های نفوذی و همخوان با تبلور تفریقی و تحول ماگما در یک منبع مشترک است. به‌طور عام، فراوانی عناصر سازگار با افزایش میزان  $SiO_2$  کاهش، و فراوانی عناصر ناسازگار افزایش پیدا می‌کند. میزان متفاوت پتاسیم در نمونه‌های گرانودیوریت به دلیل تفاوت در میزان فلدسپات پتاسیم در این سنگ‌ها است. فرایندهای پس از انجماد، مانند واکنش سیال-سنگ نیز می‌تواند بر فراوانی و توزیع برخی عناصر تأثیر داشته باشد. فراوانی برخی عناصر از جمله مس در دو نمونه HD-1-08 و HD-1-40 به دلیل تأثیر این نمونه‌ها از کانی‌سازی و حضور کانی‌های سولفیدی است که این هماهنگی با فراوانی گوگرد نیز هست (جدول ۱). فراوانی سرب در بیشتر نمونه‌ها بیش از فراوانی عادی این فلز در توده‌های نفوذی گرانیتویدی است.

جانمایی نمونه‌ها در نمودار تفکیک جایگاه زمین‌ساختی بر اساس  $Na_2O+K_2O$  در برابر  $10000 Ga/Al$  (Whalen et al., 1987) نشان می‌دهد که توده‌های نفوذی منطقه

سری ایلمنیتی کمتر از  $SI3.0 \times 10^{-3}$  و برای گرانیت‌های سری مگنتیتی بیشتر از  $SI3.0 \times 10^{-3}$  است (Ishihara, 1977). پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های معرف از توده‌های نفوذی هیرد، نشانگر همبستگی آنها با گرانیتویدهای سری ایلمنیتی است (Karimpour et al., 2009).

توده‌های نفوذی هیرد را می‌توان در این گروه قرار داد. ویژگی‌های مغناطیسی سنگ با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی مشخص می‌شود. سنگ‌های گرانیتویدی توسط ایشی‌هارا (Ishihara, 1977) به دو گروه سری مگنتیتی و سری ایلمنیتی تقسیم شده‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی برای گرانیت‌های

جدول ۱- نتایج تجزیه ژئوشیمیایی سنگ کل از نمونه‌های معرف توده نفوذی منطقه هیرد.

Table 1. Whole-rock geochemical analysis of representative samples from intrusive rocks of the Hired.

Sample no.	HD-1-01	HD-1-32	HD-1-69	HD-3-01	HD-1-08	HD-1-38	HD-1-40
Rock type	Gabbro	Diorite	Granodiorite	Monzonite	Granodiorite	Granodiorite	Diorite
SiO <sub>2</sub> (wt%)	54.9	58.4	60.8	60.0	62.8	59.2	58.2
TiO <sub>2</sub>	0.73	0.58	0.53	0.62	0.36	0.54	0.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.6	16.4	16.3	15.3	14.4	15.8	15.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.10	7.05	4.70	6.06	5.27	5.94	6.78
MnO	0.16	0.13	0.06	0.11	0.03	0.12	0.10
MgO	5.04	2.86	2.46	2.74	1.52	2.21	2.37
CaO	8.31	5.44	6.27	4.40	4.12	4.75	5.50
Na <sub>2</sub> O	2.22	3.57	2.70	2.58	2.49	2.24	3.05
K <sub>2</sub> O	1.69	1.81	3.12	3.24	2.15	3.70	2.95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.14	0.13	0.14	0.10	0.12	0.12
Total Carbon	0.15	0.21	0.11	0.061	0.34	0.43	0.18
Total Sulfur	0.052	0.025	0.026	0.050	1.37	0.69	0.51
LOI*	1.27	2.96	2.00	2.46	2.78	3.00	2.24
Sum	99.45	99.51	99.24	97.84	97.67	98.68	98.75
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	3.91	5.38	5.82	5.82	4.66	5.94	6.00
Mg#**	52.32	44.56	50.91	47.25	36.36	42.43	40.92
Ba (ppm)	777	486	699	567	367	514	532
Rb	58.0	45.7	109	134	96.8	145	97.6
Sr	286	276	329	423	313	259	348
Zr	26.9	62.2	16.9	26.5	37.2	17.7	25.9
Nb	6.21	3.20	6.91	10.00	6.30	7.47	6.84
Ni	28.8	5.76	8.56	12.4	4.03	7.10	8.71
Ga	16.8	16.4	16.9	17.7	15.9	17.1	16.3
Pb	20.3	13.1	39.7	29.5	11.9	52.5	29.0
Co	28.6	16.5	10.3	15.0	8.54	14.3	17.0
Cu	93.1	25.2	15.2	32.7	1074	81.8	418
Cr	101	31.3	43.5	49.9	84.4	53.7	64.2
V	229	159	118	142	66	120	125
Cs	4.82	1.74	5.48	6.98	7.68	23.0	7.68
Ta	0.53	0.28	0.50	0.82	0.64	0.79	0.58
Hf	0.93	1.87	0.70	1.12	1.32	0.84	1.02
Th	5.70	3.92	15.7	15.3	0.20	0.29	0.25
U	1.29	1.12	2.63	3.47	2.89	5.11	3.18
Y	20.1	18.5	15.7	22.4	12.4	18.3	16.9
Yb	1.96	1.95	1.50	2.14	1.28	1.88	1.65
La	14.6	11.3	21.0	24.7	20.3	18.6	16.1
Ce	30.0	22.2	39.9	52.0	36.1	37.7	31.7
Pr	3.53	2.58	4.32	5.61	3.69	4.22	3.57
Nd	14.1	10.5	15.9	20.8	12.7	15.5	13.3
Sm	3.24	2.48	3.09	4.25	2.37	3.20	2.86
Eu	0.84	0.80	0.79	0.86	0.71	0.76	0.73
Dy	3.39	2.98	2.67	3.78	0.42	0.63	0.57
Lu	0.30	0.30	0.23	0.32	0.20	0.29	0.25

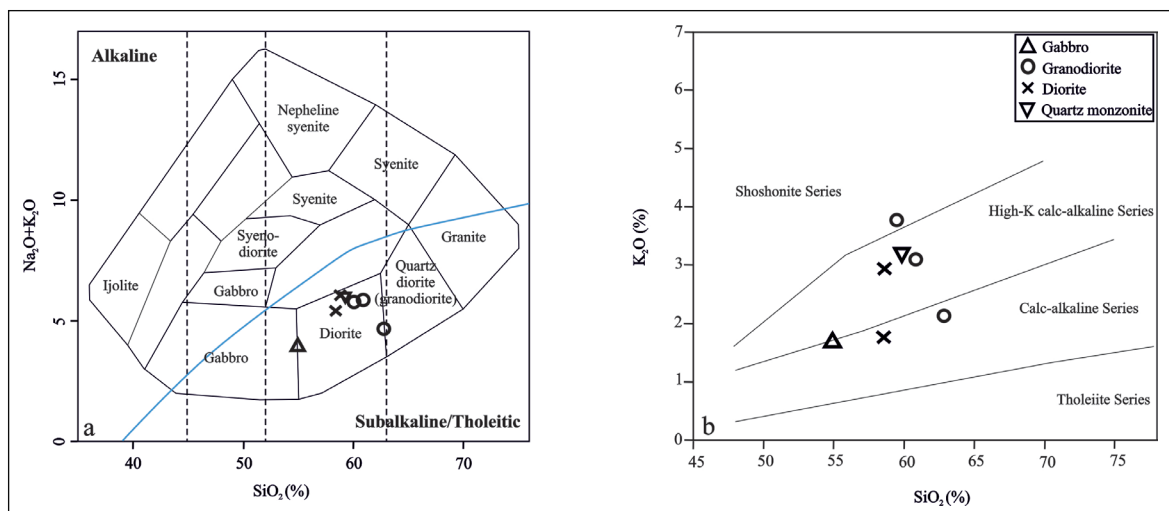
\*Loss on Ignition

\*\* Mg/[Mg+Fe] × 100

جدول ۲ - مقایسه برخی ویژگی‌های کلیدی کانسار طلای هیرد با مثال‌های دیگری از ذخایر طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی.

Table 2. A comparison of the key features in the Hired gold deposit with several other reduced intrusion-related gold deposits.

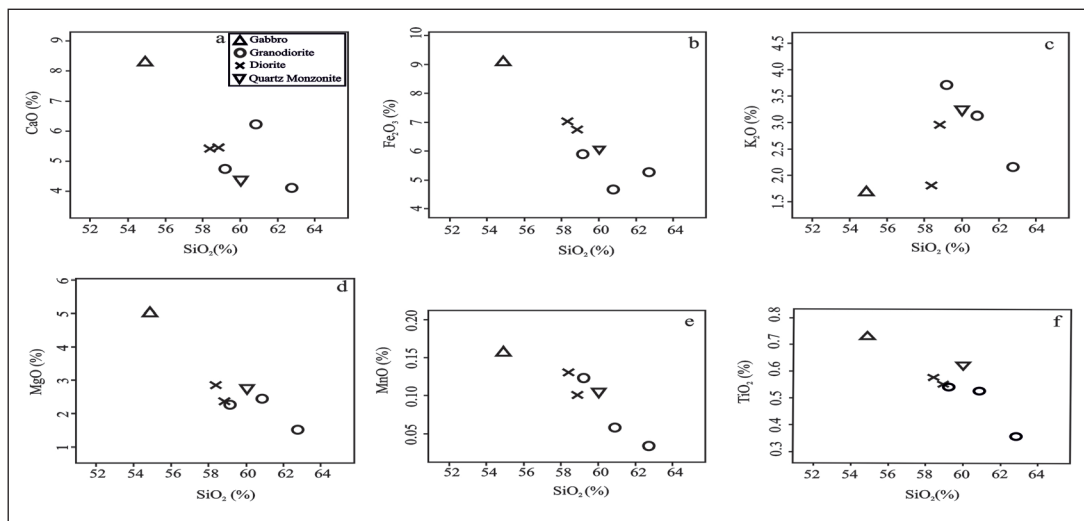
منبع	دگرسانی	کانه‌نگاری	مشخصات توده نفوذی	موقعیت زمین‌ساختی	نشته معدنی
Rodríguez-Terente et al. (2018)	آلبیتی، سریستی شدید در اطراف شکستگی‌ها، کلریتی- پروپیلیتی	کالکوپیریت، پیریت، ارسنوپیریت، استینیت، طلا، سولفوسالت‌های آنتیموان و شلیت	گرانودیوریت نوع I به نسبت احیایی، متالومین تا اندکی پرآلومین	برخورد قاره‌ای	Salave (Spain)
McCoy et al. (1997); Goldfarb et al. (2005)	آلبیتی، کوارتز-سریست- کربنات و دگرسانی ناحیه‌ای پروپیلیتی	پیریت، مارکاسیت، پروتیت، ارسنوپیریت، بیسموتینیت، شلیت، تلورید و مولیبدنیت	گرانیت تا گرانودیوریت پورفیری نوع I احیایی	حاشیه قاره‌ای (مرتبط با فروانش)	Fort Knox (Alaska/USA)
Maloof et al. (2001); Goldfarb et al. (2005); Cave et al. (2019)	سریست-کربنات ± مجموعه کانی‌های دگرسان پروپیلیتی	ارسنوپیریت، پروتیت، پیریت، شلیت، مولیبدنیت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، بیسموتینیت، سولفوسالت‌های بیسموت ± آنتیمونی	گرانودیوریت نوع I به نسبت احیایی، متالومین	پس-برخوردی	Dublin Gulch (Yukon/Canada)
Vikenteva et al. (2018)	سریست، گرازن، کالک-سیلیکات، سیلیسی، کوارتز-سریست، پیریت-کربنات	ارسنوپیریت، پروتیت، پیریت، مولیبدنیت، کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، بیسموتینیت	-	حاشیه فعال قاره‌ای	Gold deposits in North-east Asia (Russia)
This study	کوارتز-تورمالین، سریست-کوارتز-سولفید، کلسیت-کوارتز-سولفید و دگرسانی ناحیه‌ای پروپیلیتی	ارسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت، پروتیت، اسفالریت و گالن	گرانودیوریت نوع I به نسبت احیایی، متالومین	پس-برخوردی	Hired



شکل ۱۱ - جانمایی سنگ‌های نفوذی هیرد بر روی (A) نمودار TAS (Cox et al., 1979) (B) نمودار  $K_2O$  در برابر  $SiO_2$  (Peccerillo and Taylor, 1976).

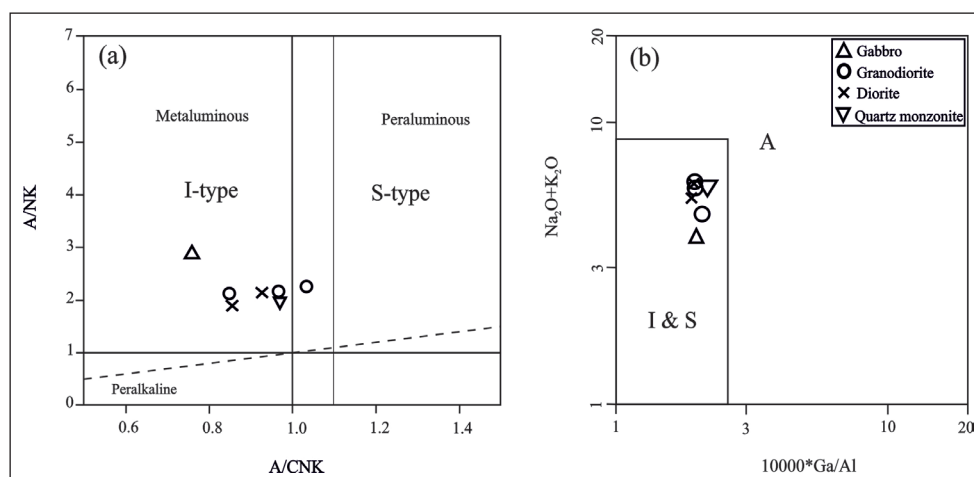
Figure 11. Plots of the Hired intrusive rocks in: A) TAS diagram (Cox et al., 1979); B)  $SiO_2$  vs.  $K_2O$  diagram (Peccerillo and Taylor, 1976).





شکل ۱۲- فراوانی اکسیدهای اصلی نسبت به  $SiO_2$  در نمودارهای هار کر برای نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی هیرد.

Figure 12. Harker diagrams showing variations of major oxides vs  $SiO_2$  for the Hired intrusive rocks.



شکل ۱۳- جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی محدوده اکتشافی هیرد در نمودار (A)  $A/CNK$  ( $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ ) (molar) vs.  $A/NK$  ( $Al_2O_3/(K_2O + Na_2O)$ ) (molar) diagram (after Maniar and Piccoli, 1989). Boundaries for S-type and I-type granites from Chappell and White (1992); B)  $10000*Ga/Al$  vs.  $Na_2O+K_2O$  discrimination diagram of (Whalen et al., 1987).

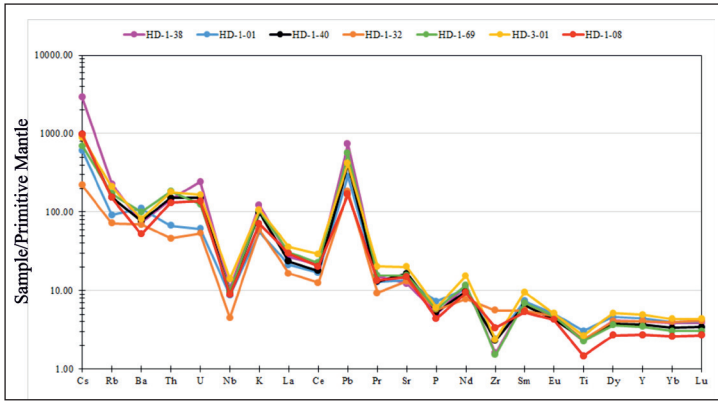
حلالیت بسیار بالایی دارد (Wolf and London, 1994). همان‌طور که در شکل ۱۴ آمده است، روند تکاملی  $P_2O_5$  در توده‌های نفوذی هیرد با روند ماگماهای نوع I مطابقت دارد.

عدد بالای منیزیم در نمونه‌های هیرد نشانگر ماگمای حاصل از ذوب گوشته است، از سوی دیگر، غنی‌شدگی از عناصر LILE و Th و غنی‌شدگی نسبی از سرب نشان از آلودگی پوسته‌قاره‌ای دارد (شکل ۱۵). این ویژگی‌ها نشانگر تشکیل ماگما در محیط کمان آتشفشانی (Zheng, 2019) و همچنین پس-برخوردی (Pearce et al., 1984; Zhang et al., 2014) است. غنی‌شدگی سرب، از توده‌های نفوذی مشابه که با کانی‌سازی همراه نبوده‌اند، از جاهای دیگر در لوت نیز گزارش شده است. به عنوان مثال، می‌توان به توده‌های نفوذی در کودکان (گودکان) (امیدیان‌فرو و همکاران، ۱۳۹۸؛

عدد منیزیم ( $Mg\#$ ) شاخص مناسبی برای ارزیابی منبع ماگما است. بر این پایه، به‌طور عام  $Mg\#$  بزرگ‌تر از ۴۰ نشان‌دهنده ماگماهای منشأ گرفته از گوه گوشته‌ای و کوچک‌تر از ۴۰ نشانگر ماگماهای حاصل از ذوب پوسته یا صفحه فرورونده است (Rapp and Watson, 1995). نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی هیرد، به جز یک نمونه (HD-1-08)،  $Mg\#$  بالاتر از ۴۰ هستند (جدول ۱) که می‌تواند نشانگر منشأ گوشته‌ای برای ماگمای مادر باشد. فراوانی نسبی عناصر سازگاری همچون نیکل و کروم نشان می‌دهد که ماگمای مادر توده‌های نفوذی در هیرد دستخوش تفریق چندانی نشده است. فراوانی  $P_2O_5$  در ماگماهای نوع I به سرعت کاهش پیدا می‌کند چرا که آپاتیت در ماگماهای متالومین و اندکی پرآلومین به اشباع می‌رسد (برای مثال Chappell, 1999; Li et al., 2007). در حالی که آپاتیت در مذاب‌های پرآلومین

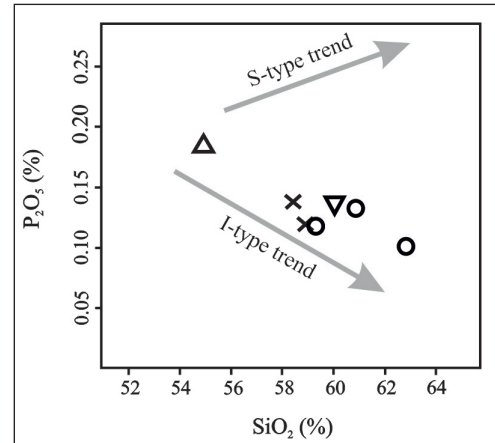
محل برخورد دو بلوک لوت و افغان، و جدایش (delamination) آن نسبت داده شده که با تولید مذاب ناشی از بالا آمدن آستونسفر همراه بوده است (Zarrinkoub et al., 2012; Pang et al., 2013). با توجه به سن ائوسن زیرین-میانی برای سنگ‌های آتشفشانی میزبان در ناحیه هیرد، می‌توان گفت که توده‌های نفوذی در این ناحیه در محیط پس-برخوردی پدید آمده‌اند.

(Omidianfar et al., 2020) و سنگ‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی در منطقه لوت-سیستان (Pang et al., 2013) اشاره کرد. اکنون این باور وجود دارد که بسته شدن اقیانوس سیستان در بین بلوک‌های لوت و افغان در کرتاسه پایانی رخ داده است (Zarrinkoub et al., 2012, Angiboust et al., 2013; Pang et al., 2013). ماگماتیسم گسترده پالئوزن در بلوک لوت، به سبب شدن لیتوسفر در



شکل ۱۵- نمودار چندعنصری بهنجار شده به گوشته اولیه برای توده‌های نفوذی محدوده اکتشافی هیرد (مقادیر بهنجارسازی از سان و مک‌دونوف- Sun and McDonough, 1989).

Figure 15. Multielement primitive mantle-normalized diagram for the Hired intrusive rocks (Normalization values from Sun and McDonough, 1989).



شکل ۱۴- جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی هیرد در نمودار  $P_2O_5$  در برابر  $SiO_2$  (Chappell, 1999). روند تکامل ماگماهای نوع I و S در این شکل مشخص شده است. نشانه‌ها مانند شکل ۱۱. Figure 14. Plots of the Hired intrusive rocks in the  $P_2O_5$  vs.  $SiO_2$  diagram of (Chappell, 1999) Evolution trends for the I-type and S-type magmas are indicated. Symbols as in Fig. 11.

ماگماهای کاهیده باشد (Takagi, 2004). تحرک نسبتاً کم عناصر HFSE در سیال، این عناصر را به ابزاری مناسب برای بررسی غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی مذاب در منابع گوشته‌ای تبدیل کرده است (Münker et al., 2004). برای مثال نسبت Zr/Nb در بازالت‌های جزایر اقیانوسی (OIB)، بازالت میان اقیانوسی غنی شده (E-MORB) و بازالت میان اقیانوسی نرمال (N-MORB)، به ترتیب کمتر از ۱۰، حدود ۱۰ و حدود ۴۰ است (Pearce and Norry, 1979). این نسبت در توده‌های نفوذی هیرد از ۲/۴ تا ۱۹/۴ متغیر است. به منظور درک منبع ماگمای مولد توده‌های نفوذی هیرد، نمودارهای Nb/Yb در برابر Zr/Yb و Ta/Yb در برابر Ta/Yb (شکل ۱۷). به منظور مقایسه، داده‌های مربوط به مجموعه نفوذی کودکان در خاور هیرد نیز افزوده شده است. بر این اساس، منبع ماگما هماهنگ با منبع E-MORB برای ماگمای مولد توده‌های نفوذی در این دو محدوده است. گرایش برخی از نمونه‌های معرف مجموعه نفوذی کودکان به بازالت‌های اقیانوسی را می‌توان به تفاوت در ترکیب شیمیایی و درجه تفریق ماگمای مادر این مجموعه نسبت به ماگمای مادر توده‌های نفوذی هیرد تفسیر کرد.

دگرسانی در کانسارهای مرتبط با توده نفوذی (RIRGS) نه چندان گسترده است و نه چندان شدید است، بلکه به‌طور عمده محدود به رگه-رگچه‌ها و تا فاصله‌ای کم (چند سانتی‌متر تا چند متر) در پیرامون آنها است. مجموعه کانی دگرسانی سریست ± تورمالین ± پیریت ± کربنات در این کانسارها متداول است و به‌ویژه همراهی نزدیکی با کانی‌سازی طلا دارد (Hart, 2007). نفوذ توده گرانیتوئیدی احیایی در توالی آتشفشانی ناحیه هیرد سبب دگرسانی کوارتز-تورمالین-سریست و دگرسانی

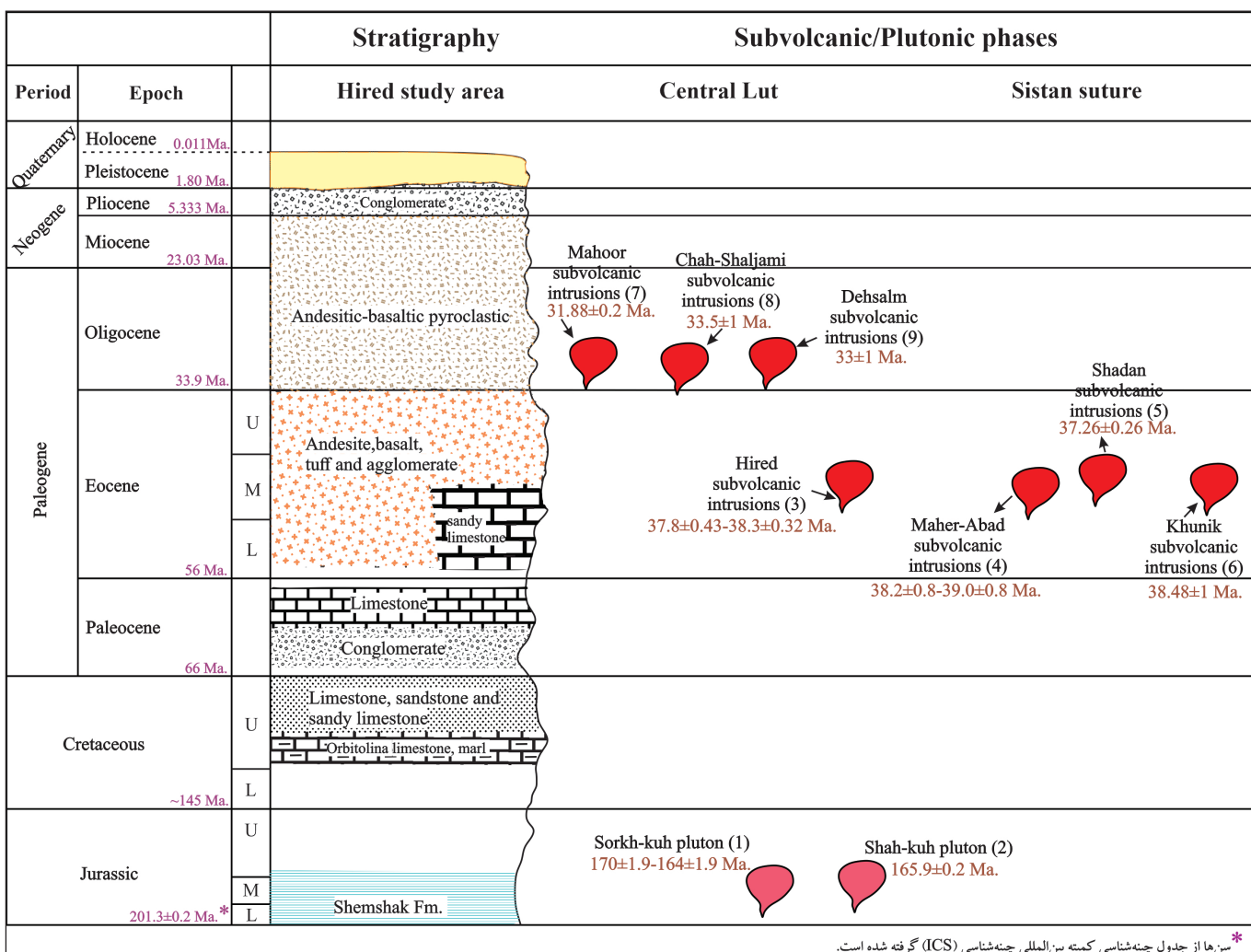
فراوانی عناصر HFSE همانند Zr و Hf، تا حد زیادی توسط فازهای باقیمانده اصلی همانند آمفیبول و گارنت و به‌میزان کمتری توسط فراوانی کانی‌هایی مانند زیرکن، مونازیت، آپاتیت و روتیل کنترل می‌شود (Watson and Harrison, 1984). حل‌پذیری کانی‌هایی چون زیرکن، آپاتیت و احتمالاً مونازیت، تابعی از دما و ترکیب مذاب است. مذاب‌های آب‌دار و به نسبت کم دما، پایین‌ترین فراوانی عناصر HFSE مانند Zr و Hf را دارند (Watson and Harrison, 1984) که این می‌تواند توضیح مناسبی برای تهی‌شدگی نسبی این دو عنصر در توده‌های نفوذی هیرد باشد. غنی‌شدگی نسبی سرب در این توده‌ها را می‌توان به آلودگی ماگما با مواد پوسته‌ای و/یا آلودگی ناحیه منبع توسط سیال‌های برآمده از صفحه فرورونده نسبت داد (برای مثال Pearce and Peate, 1995; Rudnick and Gao, 2003; Pang et al., 2013). مواد پوسته‌ای با نسبت‌های بالای La/Nb و Ce/Pb مشخص می‌شوند (Rudnick and Gao, 2003). سنگ‌های رسوبی، با چیرگی شیل و ماسه‌سنگ غنی از مواد آلی، و هم‌ارزهای دگرگون‌شده آنها گسترش زیادی در لوت مرکزی دارند (Stöcklin et al., 1969; Camp and Griffiths, 1982; Tirrul et al., 1983) (شکل ۱۶). آلودگی ماگمای مادر توده‌های نفوذی هیرد می‌تواند ناشی از هضم این مواد پوسته‌ای باشد.

در مورد گرانیتوئیدهای کاهیده، اما متالومین و از نظر ژئوشیمیایی قابل مقایسه با گرانیتوئیدهای سری l، ممکن است ماگمای مادر به‌عنوان یک مذاب اکسیده در گوشته بالایی تشکیل شده، اما ضمن مهاجرت توسط سنگ‌های پوسته‌ای غنی از مواد آلی (گرافیتی) به شدت آلوده شده باشد (Age and Brimhall, 1988). فرورانش رسوبات قاره‌ای و هضم آنها در زون فرورانش می‌تواند توضیح دیگری برای تشکیل

پیرویت، مارکاسیت، اسفالریت و گالن است. کانی‌سازی طلا همراه با کانی‌های سولفیدی پیریت، آرسنوپیریت و کالکوپیریت در توده نفوذی گرانودیوریتی و سنگ‌های آتشفشانی میزبان آن در زون‌های گسلی شکل گرفته است. در جدول ۲، ویژگی‌های زمین‌ساختی، کانه‌نگاری و دگرسانی هیرد با چند کانسار شناخته‌شده طلای مرتبط با توده‌های نفوذی احیایی (RIRGS) مقایسه شده است.

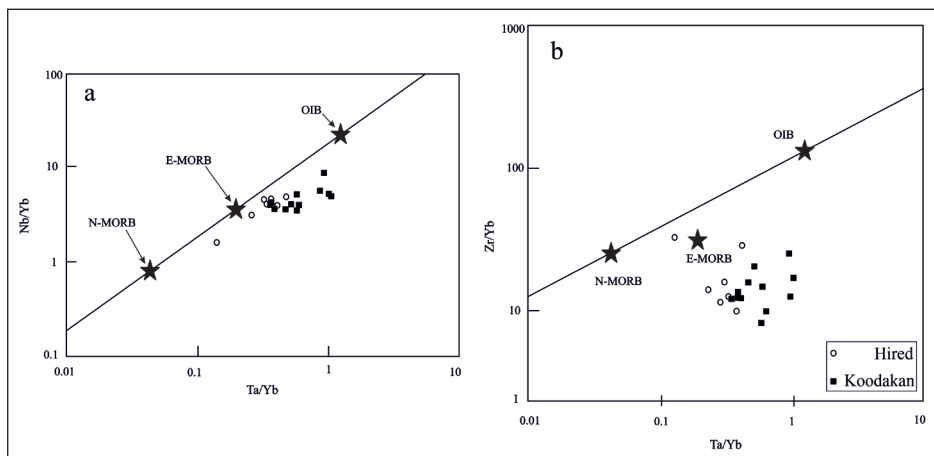
سیلیسی-کربناتی و کانه‌زایی شده است. دگرسانی گرمایی در هیرد به‌طور عمده محدود به زون‌های رگه‌ها است. همراهی کانه‌زایی طلا با این دگرسانی‌ها، نشان از اهمیت آنها در شناسایی زون‌های طلا دار در منطقه دارد.

کانی‌سازی در هیرد به شکل رگه-رگچه‌ای و همین‌طور جانیشینی و پراکنده در ارتباط با توده نفوذی گرانودیوریتی ایلمنیتی متالومین نوع I تشکیل شده است. مجموعه کانی‌سازی سولفیدی شامل آرسنوپیریت، پیریت، کالکوپیریت،



شکل ۱۶- ستون زمان-چینه‌نگاری (کرونواستراتیگرافی) ناحیه هیرد، ساده‌شده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ دهسلم (سهندی و همکاران، ۱۳۷۱) و ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران (بهروزی و خان‌ناظر، ۱۳۷۱) و ارجماندزاده (Arjmandzadeh et al., 2022). منبع داده‌های سن‌سنجی توده‌های نفوذی از: (۱): Tarkian et al. (1983); (۲): Mahmoudi et al. (2010); (۳): Karimpour et al. (2021); (۴): Karimpour et al. (2021); (۵): Richards et al. (2012); (۶): Samiee et al. (2016); (۷): Miri-Beydokhti et al. (2015); (۸): Arjmandzadeh et al. (2011); (۹): Arjmandzadeh and Santos (2014).

Figure 16. Chronostratigraphic chart for the Hired (simplified after Dehsalm 1:250000 (Sahandi et al., 1992) and Basirian 1:100000 (Behrouzi and Khannazer, 1992) geological maps, and Arjmandzadeh et al. (2022)). The chronology data on granitoids are from: (1): Tarkian et al. (1983); (2): Mahmoudi et al. (2010); (3): Karimpour et al. (2021); (4): Karimpour et al. (2021); (5): Richards et al. (2012); (6): Samiee et al. (2016); (7): Miri-Beydokhti et al. (2015); (8): Arjmandzadeh et al. (2011); (9): Arjmandzadeh and Santos (2014).



شکل ۱۷- جانمایی نمونه‌های معرف توده‌های نفوذی هیرد و کودکان در نمودارهای دوتایی نسبت عناصر ناسازگار (A) Nb/Yb در برابر Ta/Yb و (B) Zr/Yb در برابر Ta/Yb، که منشأ بازالت‌های میان اقیانوسی غنی‌شده را برای توده‌های نفوذی هیرد و کودکان نشان می‌دهند؛ مقادیر N-MORB, E-MORB و OIB برگرفته از سان و مکدوناف (Sun and McDonough, 1989)، داده‌های کودکان از امیدیان‌فر و همکاران (۱۳۹۸).

Figure 17. Binary diagrams of incompatible element ratios the mantle source feature for the Hired and Koudakan granitoid rocks. A) Nb/Yb vs. Ta/Yb and B) Zr/Yb vs. Ta/Yb that showing enrichment MORB for Hired and Koudakan intrusions; N-MORB, E-MORB and OIB value are after Sun and McDonough (1989). Koudakan data after Omidianfar et al. (2019).

## ۵- نتیجه‌گیری

احیایی سیال‌های گرمایی است. رخداد کانی‌سازی طلا همراه با رگه‌های کوارتزی تخت از دیگر ویژگی‌های کانسار طلای هیرد است. با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی، و همین‌طور کانی‌شناسی کانسنگ، کانسار طلای هیرد قابل مقایسه با سامانه‌های طلای همبسته با گرانیتوئیدهای احیایی نوع-I معرفی کرد.

## سپاسگزاری

نویسندگان از دانشکده علوم زمین کاربردی دانشگاه کارلسروهه آلمان (AGW)، به‌ویژه دکتر Jochen Kolb برای حمایت مالی و شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (IMPASCO) برای کمک در بازدیدهای زمین‌شناسی و دسترسی به مغزه‌های حفاری سپاسگزاری می‌کنند. بخشی از هزینه‌ها با اعتبار پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی به دکتر ایرج رسا و دکتر سعید علیرضایی پوشش داده شد.

کانی‌سازی طلا در هیرد از نظر مکانی و زایشی در ارتباط نزدیک با توده‌های نفوذی احیایی است که با رخداد ایلمنیت به‌عنوان یک کانی ماگمایی همراه مشخص می‌شوند. توده‌های نفوذی هیرد با غنی‌شدگی در عناصر لیتوفیل درشت یون، عناصر نادر خاکی سبک و عدد منیزیم به نسبت بالا (۳۶/۳۶ تا ۵۲/۳۲) مشخص می‌شوند که پیشنهاد می‌کند ماگمای مادر این توده‌ها از یک گوشته متاسوماتیسم شده، منشأ گرفته است. ماهیت احیایی ماگمای مادر را می‌توان به آلودگی با سنگ‌های پوسته‌ای غنی از مواد آلی نسبت داد، که این امر با ناهنجاری سرب نیز پشتیبانی می‌شود. توده‌های نفوذی هیرد از نظر کانی‌شناسی و ژئوشیمی قابل مقایسه با گرانیتوئیدهای نوع I هستند که اغلب در زون‌های فرورانش و برخوردی تشکیل شده‌اند.

کانی‌سازی در هیرد به شکل‌های گوناگون رگه‌ای، جانیشینی و افشان رخ داده است و با فراوانی نسبی آرسنوپیریت و پیروتیت مشخص می‌شود که ناشی از ماهیت

## کتابنگاری

- اشراقی، ح.، ۱۳۸۵، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و تیپ کانه‌زایی طلا در محدوده هیرد (شمال غرب نهبندان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۲۶۲ ص.
- امیدیان‌فر، س.، رهگشای، م.، منصف، ا.، ۱۳۹۸، ژئوشیمی و پتروژنز توده نفوذی گرانیتوئیدی کودکان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۱۳، ص. ۸۹-۱۰۰.
- بومری، م.، بیابانگرد، ح.، ناکاشیما، ک.، اسفرم، م.، ۱۳۹۳، کانه‌نگاری و شیمی سولفیدهای درون‌زاد در کنسار ماهور، غرب نهبندان، شرق ایران، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۲۹، ص. ۷۵-۸۸ بهروزی، ا.، خان‌ناظر، ن.، ۱۳۷۱، نقشه زمین‌شناسی بصیران، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- زارعی، ف.، ولایتی، س.، ۱۳۹۶، نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ هیرد، شرکت مهندسی مشاور معدنکاو و شرکت فناوری و مدیریت مهندسی سامیک.
- سمیعی، س.، ۱۳۹۴، کانی‌سازی، پترولوژی و مطالعات ژئوفیزیکی در منطقه خونیک، جنوب بیرجند، رساله دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۹۷ ص.
- سهندی، م. ر.، بهروزی، ا.، خان‌ناظر، ن.، ۱۳۷۱، نقشه زمین‌شناسی دهسلم (چاه‌وک)، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عسکری، ع.، صفری، م.، ۱۳۸۰، طرح اکتشافات مواد معدنی جنوب خراسان، گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ بصیران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۶۸ ص.
- عسکری، ع.، صفری، م.، ۱۳۸۲، گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ محدوده امیدبخش کانی‌سازی طلای هیرد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کره‌ای، م.ت.، ۱۳۸۱، گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی نیمه‌تفصیلی در محدوده آنومالی ۱:۲۰۰۰۰ هیرد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۷۳ ص.
- کریم‌پور، م.ح.، حیدریان شهری، م.ر.، ملکزاده شفارودی، آ.، عسکری، ع.، ۱۳۸۵، مطالعات زمین‌شناسی، ژئوشیمی، پترولوژی و ژئوفیزیک در منطقه کانی‌سازی طلا-قلع هیرد (خراسان جنوبی)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۸۳ ص.
- کریم‌پور، م.ح.، ملکزاده شفارودی، آ.، حیدریان شهری، م.ر.، عسکری، ع.، ۱۳۸۶، کانی‌سازی، دگرسانی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی طلا-قلع هیرد، استان خراسان جنوبی، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱، ص. ۶۷-۹۰.
- ملکزاده شفارودی، آ.، ۱۳۸۸، زمین‌شناسی، کانی‌سازی، آلتراسیون، ژئوشیمی، میکروترموتری، مطالعات ایزوتوپی و تعیین منشأ کانی‌سازی مناطق اکتشافی ماهرآباد و خویک، استان خراسان جنوبی، رساله دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۹۱ ص.
- مهرابی، ب.، طالع فاضل، ا.، قاسمی سیانی، م.، ۱۳۹۰، مطالعات ژئوشیمیایی و فلززایی توده گرانیتوئیدی سرخ‌کوه (مجموعه آتشفشانی-نفوذی خاور ایران) و ارتباط آن با کانی‌سازی مس-طلا-آهن، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۲۰، ص. ۲۹-۴۵.

## References

- Ague, J.J., and Brimhall, G.H., 1988. Magnetic arc asymmetry and distribution of anomalous plutonic belts in batholiths of California: effects of assimilation, crustal thickness, and depth of crystallization. *Geological Society of American Bulletin* 100, 912-927. doi: 10.1130/0016-7606(1988)100<0912:MAADO>2.3.CO;2.
- Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J., and Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic "mélange" (Eastern Iran), *Lithos* (156-159), 139-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.007>.
- Arjmandzadeh, R., Alirezai, S., and Almasi, A., 2022. Tectonomagmatic reconstruction of the Upper Mesozoic-Cenozoic Neotethyan arcs in the Lut Block, East Iran: a review and synthesis, *Turkish Journal of earth Sciences* (31), 1-25. doi:10.55730/yer-2204-7.
- Arjmandzadeh, R., and Santos, J.F., 2014. Sr-Nd isotope geochemistry and tectonomagmatic setting of the Dehsalm Cu-Mo porphyry mineralizing intrusives from Lut Block, Eastern Iran, *International Journal Earth Sciences* (103), 123-140. doi: 10.1007/s00531-013-0959-4.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M., and Homam, S. M., 2011. Two-sided asymmetric subduction; implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut Block, eastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* (41), 283-296.
- Askari, A., and Safari, M., 2003. *1:20000 Geological-Mining map of Hired, GSI, Mashhad, Iran. (In Persian)*.
- Askari, A., Safari, M., 2001. *South Khorasan mineral exploration plan, Geochemical exploration report of 1:100000 Basiran, GSI, Mashhad, Iran. (In Persian)*.
- Behrouzi, A., and Khan-Nazer, N. 1992, *1:100000 Geological quadrangle map of Basiran, Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Belvin, Ph. L., and Chappell, B. W., 1992. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia, *Transitions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83, 305-316. doi: 10.1017/S0263593300007987.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 (11), 1746-1766. doi: 10.1139/e81-163.
- Boomeri, M., Biabangard, H., Nakashima, K., and Sform, M., 2014. *Mineralography and chemistry of hypogene sulfides in Mahoor ore deposit, West Nehbandan, East Iran, Iranian Journal of Geology, No. 29, 75-88. (In Persian)*.
- Camp, V.E., and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 15, 221-239. Doi: 10.1016/0024-4937(82)90014-7.
- Cave, B. J., Barnes, S. J., Pitcair, I. K., Sack, P. J., Kuikka, H., Johnson, S. C., and Duran, Ch. J., 2019. Multi-stage precipitation and redistribution of gold, and its collection by lead-bismuth and lead immiscible liquids in a reduced-intrusion related gold system (RIRGS); Dublin Gulch, Western Canada. *Ore Geology Reviews*, v. 106, 28-55. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.010>.
- Chappell, B.W., 1999. Aluminum saturation in I- and S- type granites and the characterization of fractionated haplogranites, *Lithos* (46), 535-551.

- Chappell, B.W., and White, A.J.R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt, Geological Society of America Special Papers (272), 1-26. doi: 10.1130/SPE272-p1.
- Cox, K.G., Bell, J.D., and Pankhurst, R.J., 1979. The interpretation of igneous rocks, George Allen. Ed. Springer.
- Eftekhari-Nejad, J., Ruttner, A., Valeh, N., Nabavi, M. H., Haghypour, A., Hajian, J., and Alavai, M., 1977. 1:250000 Geological quadrangle map of Iran No. J6: Ferdows: Tehran, Geological Survey of Iran, 1 sheet.
- Eftekhari-Nejad, J., Vahdati-Daneshmand, F., and Stöcklin, J., 1991. 1:250000 Geological quadrangle map of Iran No. K8: Birjand: Tehran, Geological Survey of Iran, 1 sheet.
- Eshraghi, H., 2006. *Mineralogy, geochemistry and type of gold mineralization in Hired district (NW Nehbandan) (In Persian with English abstract), MSc. thesis, Univ. of Tarbiat-Modares, Tehran, Iran., 262 p.*
- Goldfarb, R. J., Baker, T., Dueé, B., Groves, D. I., Hart, C. J. R., and Gosselin, P., 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes, Economic Geology 100th Anniversary Volume, 407-450. <https://doi.org/10.5382/AV100.14>
- Hart, C. J. R., 2007. Reduced intrusion-related gold systems, Mineral Deposits of Canada: A synthesis of Major deposit types, district metallogeny, the Evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication (5), 95-112.
- Hart, C. J. R., Baker, T., and Burke, M., 2000. New exploration concepts for country-rock hosted, intrusion-related gold systems, Tintina Gold Belt: British Columbia and Yukon Chamber of Mines, Special Volume 2, 145-172.
- Ishihara, S., 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks, Mining Geology (27), 293-305. doi: 10.11456/shigenchishitsu1951.27.293
- Ishihara, S., 2008. Granitoid series and mineralization in the circum-Pacific Phanerozoic granitic belts: Resource Geology (48), 219–224. doi: 10.1111/j.1751-3928.1998.tb00019.x
- Ishihara, S., Robb, L. J., Anhaeusser, C. R., Imai, A., 2002. Granitoid series in terms of magnetic susceptibility: A case study from the Barberton region, south Africa. Gondwana Research, v. 3, 581-589. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70630-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70630-4)
- Karimpour, M. H., Zaw, Kh., and Huston, D. L., 2005. S-C-O isotopes, fluid inclusion microthermometry, and the genesis of ore bearing fluids at Qaleh-Zari Fe-Oxide Cu-Au-Ag mine, Iran, Journal of Sciences 16 (2), 153-168.
- Karimpour, M.H., and Stern, C.R., 2009. Advanced space borne thermal emission and reflection radiometer mineral mapping to discriminate high sulfidation, reduced intrusion related and iron-oxide gold deposit, Eastern Iran, Journal of Applied Sciences, 9 (5), 815-828. Doi: 10.3923/jas.2009.815.828
- Karimpour, M.H., Heidarian, M.R., Malekzadeh-Shafaroudi, A., and Askari, A., 2006. *Geology, geochemistry, petrology and geophysics of gold-tin mineralization of Hired (South Khorasan) (In Persian), Geological Survey of Iran, 283 p.*
- Karimpour, M.H., Malekzadeh-Shafaroudi, A., Heidarian M.R., and Askari, A., 2007. *Mineralization, alteration and geochemistry of Hired gold-tin prospecting area (In Persian), South Khorasan province, Iranian society of crystallography and mineralogy, No. 1, 67-90.*
- Karimpour, M.H., Malekzadeh-Shafaroudi, A., Mohammadi, F., Askari, A., Sadeghi, M., Santos, J. F., and Stern, C. R., 2021. Comparison of petrological and geochemical characteristics of three different types of Eocene copper-gold mineralization in eastern Iran, Ore Geology Review (138), <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104335>.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Malekzadeh-Shafaroudi, A., Heidarian M.R., and Mazaheri, A. 2009. Petrochemistry of the Reduced, Ilmenite-Series Granitoid Intrusion Related to the Hired Gold-Tin Prospect (Basiran), Eastern Iran. Journal of Applied Sciences 9 (2), 226-236.
- Kluyver, H. M., Griffis, R., Alavai-Naini, M., 1981. 1:250000 Geological quadrangle map of Iran No. J6: Naybandan: Tehran, Geological Survey of Iran, 1 sheet.
- Koreie, M. T., 2002. *Geochemical detailed-exploration in Hired prospecting area (In Persian), Geological Survey of Iran. 173 p.*
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R., and Mortensen, J.K., 2000. An exploration model for intrusion-related gold system, Society of economic geology, News, v. 40, 1-15. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2000-40.fea>.
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., Liu, Y., Yuan, C., Wei, G., and Qi, C., 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?, Lithos 96, 186-204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>.
- Mahmoudi, Sh., Masouddi, F., Corfu, F., and Mehrabi, B., 2010. Magmatic and metamorphic history of the Dehsalm metamorphic complex, Eastern Lut Block (Eastern Iran), from U-Pb geochronology. International Journal Earth Sciences, 99, 11153-11165. Doi: 10.1007/s00531-009-0465-x.
- Malekzadeh-Shafaroodi, A., 2009. *Geology, mineralization, alteration, geochemistry, microthermometry, isotope studies and determining the mineralization source of Khoopic and Maher-Abad exploration area, PhD. thesis (In Persian with English abstract). Ferdowsi University of Mashhad. 291 p.*
- Maloof, T.L., Baker, T., and Thompson, J.F.H., 2001. The Dublin Gulch intrusion-hosted gold deposit, Tombstone plutonic suite, Yukon Territory, Canada: Mineralium Deposita, v. 36, 583–593. doi:10.1007/s001260100190.

- Maniar, P.D., and Piccoli, P.M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.* 101, 635-643. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2).
- Maulana, A., Watanabe, K., Imai, A., and Yonezu, K., 2013. Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in Sulawesi, Indonesia: magma genesis and regional metallogenic constraint, *Procedia Earth and Planetary Science* (6), 50-57. doi: 10.1016/j.proeps.2013.01.007.
- McCoy, D., Newberry, R.J., Layer, P.W., DiMarchi, J.J., Bakke, A.A., Masterman, J.S., and Minehane, D.L., 1997. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska: *Economic Geology Monograph* (9), 191-241. doi: <https://doi.org/10.5382/Mono.09.08>.
- Mehrabi, B., Tale-Fazel, A., and Qasemi-Siani, M., 2011. *Geochemical and metallogenesis of Sorkh-Kuh granitoid intrusion (Volcanic-plutonic assemblage of eastern Iran) and its associated with copper-gold-iron mineralization (In Persian)*, *Iranian Journal of Geology*, No. 20, 29-45.
- Miri-Beydokhti, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., and Klötzi, U., 2015. U-Pb zircon geochronology, Sr-Nd geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Mahoor granitoids rocks (Lut Block, Eastern Iran), *Journal of Asian Earth Sciences* (111), 192-205. doi:10.1016/j.jseas.2015.07.028.
- Münker, C., Gerhard, W., Zogodiyanski, G., and Churikova, T., 2004. Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka–Aleutian arc lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 224 (3-4), 275-293. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.030>.
- Omidianfar, S., Monsef, I., Rahgoshay, M., Zheng, J., and Cousens, B., 2020. The Middle Eocene high-K magmatism in Eastern Iran Magmatic belt: constraints from U-Pb zircon geochronology and Sr-Nd isotopic ratios. *International Geology Review*, p. 1-18. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1716272>.
- Omidianfar, S., Rahgoshay, M., Monsef, I., 2019. *Geochemistry and petrogenesis of Koudakan granitoidic intrusion (eastern of Lut Block) (In Persian with English abstract)*, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, v. 29 (113), 89-100.
- Pang, K., Chung, S., Hossein, M., and Mahdi, M., 2013. Eocene–Oligocene post-collisional magmatism in the Lut–Sistan region, eastern Iran: magma genesis and tectonic implications. *Lithos*, 180–181, 234–251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.009>.
- Pearce, J.A., and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69, 33–47. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00375192>.
- Pearce, J.A., and Peate, D.W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas, *Annual review of Earth and Planetary Science*, 23, 251-285. doi: 10.1146/annurev.ea.23.050195.001343.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., and Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks, *Journal of Petrology* (25), 956-983. doi: 10.1093/petrology/25.956.
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area (Northern Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1),63-81. doi:10.1007/BF00384745.
- Ramezani, J., and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, Central Iran, U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics, *Journal of Science*, 303, 622-665. doi: 10.2475/ajs.303.7.622.
- Rapp, R.P., and Watson, B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling, *Journal of Petrology*, 36 (4), 891-931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., and Fletcher, T., 2012. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran western Pakistan. *Economic Geology* (107), 295-332. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.295>.
- Rudnick, R.L., and Gao, S., 2003. Composition of the continental crust, *Treatise on Geochemistry*, v. 3, 1-64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Rodríguez-Terente, L.M., Martín-Izard, A., Arias, D., Fuertes-Fuente, M., and Cepedal, A., 2018. The Salave Mine, a Variscan intrusion-related gold deposit (IRGD) in the NW of Spain: Geological context, hydrothermal alterations and ore features, *Journal of Geochemical Exploration* (188), 364-389. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.011>.
- Sahandi, M. R., Behrouzi, A., and Khan-Nazer, N., 1992. *1:250000 Geological quadrangle map of Dehsalm (Chah-Vak)*, *Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Samiee, S., 2016. *Mineralization, petrology and geophysics studies in Khunik area, South of Birjand, PhD. thesis (In Persian with English abstract)*, *Ferdowsi University of Mashhad*, 279 p.
- Samiee, S., Karimpour, M. H., Ghaderi, M., Haidarian Shahri, M. R., Klötzi, U., Santos, J. F., 2016. Petrogenesis of subvolcanic rocks from the Khunik prospecting area, south of Birjand, Iran: Geochemical, Sr-Nd isotopic and U-Pb zircon constraints. *Journal of Asian Earth Sciences* (115), 170-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2015.09.023>.
- Stöcklin, J., Nabavi, M. H., Eftekhari-nejad, J., Hushmandzadeh, A., Zahedi, M., and Tatevosian, Sh., 1969. *1:250000 Geological quadrangle map of Iran No. J7: Boshruyeh: Tehran*, Geological Survey of Iran (GSI), 1 sheet.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London Special Publication*, 42, 313–345. Doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

- Takagi, T., 2004. Origin of magnetite- and ilmenite- series granitic rocks in the Japan arc, *American Journal of Science* (304), 169-202. doi: 10.2475/ajs.304.2.169.
- Tarkian, M., Lotfi, M., Baumann, A., 1983. Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran (511), 357-383.
- Thompson, J. F. H., Sillitoe, R. H., Baker, T., Lang, J. R., and Mortensen, J. K., 1999. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces, *Mineralium Deposita* (34), 323-334. doi:10.1007/s001260050207.
- Thompson, J.F.H., and Newberry, R.J., 2000. Gold deposits related to reduced granitic intrusions: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, 377-400. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.11>.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of American Bulletin*, 94, 134-150. Doi: 10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2.
- Vikent'eva, O.V., Prokofiev, V.Y., Gamyani, G.N., and Goryachev, N.A., 2018. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids, *Ore Geology Reviews* (102), 240-259. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.004>.
- Watson, E.B., and Harrison, T.M., 1984. Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic systems: a summary and prospectus of experimental approaches. *Physics and Earth Planetary Interiors* (35), 19-30. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(84\)90031-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(84)90031-1).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., and Chappell, B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination, and petrogenesis, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 95 (4), 407-419. doi:10.1007/BF00402202.
- Whitney, D.L., and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, v. 95, 185-187. doi:10.2138/am.2010.3371.
- Wolf, M. B., and London, D., 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanisms, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (58), 4127-4145. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90269-0).
- Zarei, F., and Velayati, S., 2018. *1:5000 Geological map of Hired, Samic Technological and Management Engineering Company and Madankav Engineering Company. (In Persian)*.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.-N., Chung, S.-L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.-Y., and Lee, H.-Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constrains on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 154, 392-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>.
- Zhang, Y., Guo, Zh., Pe-Piper, G., and Piper, D.J.W., 2014. Geochemistry and petrogenesis of Early Carboniferous volcanic rocks in West Junggar, North Xinjiang: implications for post-collisional magmatism and geodynamic process, *Gondwana Research* 28 (4). doi: 10.1016/j.gr.2014.08.018.
- Zheng, Y.F., 2019. Subduction zone geochemistry, *Geoscience Frontiers* (10), 1223-1254. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003>.