

## Geochemistry, mineralogy, and genesis of Darbe Behesht iron-copper deposit, Dehaj-Sardoie subzone, Kerman Province, Iran

Ghodratollah Rostami Paydar <sup>1\*</sup>, Mansour Adelpour <sup>2</sup>

1- Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

**Keywords:** Geochemistry, Mineralogy, Fe-Cu skarn, Darbe Behesht, Kerman

### 1-Introduction

Darbe Behesht Iron - copper deposit is located in the Dehaj-Sardoie subzone of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA) in the Kerman region. The UDMA zone is often composed of calc-alkaline intrusive and volcanic rocks and associated pyroclastic materials (Alimohammadi et al., 2015). Many authors discussed the tectonic features of this volcano-plutonic belt (eg., Shahabpour, 2005, 2007). Most of the copper deposits are located in the southern part of the arc, known as the Dehaj-Sarduiyeh arc or the Kerman copper belt (Mirzababaei et al., 2011, 2016; Shafiei et al., 2009). This study investigates the geochemistry, tectonic position of volcanic rocks containing Eocene Fe-Cu mineralization, paragenesis, and alteration. So we focus on the field observations, lithology, and ore characterization of Darbe Behesht as a prominent example of the IOCG deposits in the southern part of the Dehaj-Sardoie belt in Iran.

### 2-Methodology

During field surveys, the geological and structural framework of the area was reviewed, and at the same time, the relationship between mineralization and intrusive rocks were determined. The samples were collected from the study area focusing on identifying some characteristics of the host rock and ore textures (13 thin sections and 12 polished sections). Ten samples were analyzed for major elements using x-ray fluorescence (XRF) in the Zar-Azma Laboratory, Mashhad, Iran. Ten samples were sent to the West Lab, Australian Laboratory for trace and rare earth elements (REE) analysis using Inductively- Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS).

### 3- Result and discussion

The area is covered by Eocene volcanic rocks composed mainly of andesite, trachy-andesite, basalt, and pyroclastic rocks (various types of tuffs and agglomerate). Based on major, trace, and REE elements, these rocks are very similar to calc-alkaline lava with metaluminous to peraluminous nature. Enrichment of LILE (Such as K, U, Sr, Rb, Th, Pb, and Ba) and LREE relative to HFSE (Such as Zr, Y, Ti, and Nb) and HREE, high ratios of  $K_2O/Rb$  and  $FeO/Mg$  reveal that the rocks under study were originated in an active continental margin subduction-related tectonic setting. Volcanic rocks affected by hydrothermal fluids, which lead to the occurrence of propylitic alteration, silicification with skarn alteration. Propylitic alteration comprises dominant alteration in the area and is characterized by epidote, chlorite and calcite mineral assemblages. Silicification is mainly cropped out in both adjacent to mineralized veins, and to a lesser amount, as pervasive silica. Argillic alteration is locally present within the surface outcrops. Mineralization is mainly controlled by a system of extensional faults and joints.

In most cases, mineralization is hosted by pyroclastic units (especially agglomerate) or in the contact between agglomerate and andesitic rocks. The presence of granodiorite intrusive masses in the area containing large

\*Corresponding author: rostamigsi2006@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2019.15229

Received 2018-11-10

Accepted 2019-11-27

amounts of hydrous mafic minerals (including amphibole and less biotite) and the presence of the skarn zone produced by magmatic fluids indicate that the mineralization event related to the injection of granodiorite intrusive into country rocks. Magnetite and chalcopyrite are the primary ore minerals. Secondary minerals from weathering are goethite, hematite, limonite, malachite, and azurite. The ore textures and structures are open space-filling, disseminated, vein-veinlet, and replacement. Fluid fluxes into faults, fractures, and weaknesses of the rock units have caused ore mineralization in the specified trends as same as normal faults systems.

#### 4-Conclusion

According to the tectonic setting, geochemical study, and the extensional fault mechanisms, which are lucid together extensional back-arc basin in the Dehaj-Sardoie subzone within UDMA subduction zone. Two critical stages could be separated for mineralization. The first one is the hypogene mineralization phase, and the other one is the supergene phase. The first stage is accompanied by the generation of magnetite in volcanic and pyroclastic rocks and second ones related to reduction fluids that caused copper mineralization. Based on geology, mineralization, geochemistry data, and the presence of skarn, the mineralization mechanism of the Darbe Behesht area is comparable with the North Semnan deposits, and we can be classified as a proximal subclass of calc-alkaline type of IOCG deposits, e.g., skarn. Detailed studies, including fluid inclusion, electron microprobe, and stable isotopic investigations, can be further applied to examine the type of mineralization in the Darbe Behesht area.

#### Acknowledgments

The authors are grateful to the Journal of Advanced Applied Geology reviewers, and the editor is also thanked for their constructive suggestions on the manuscript.

#### References

- Alimohammadi, M., Alirezaei, S., Kontak, D., 2015. Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo–Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 70, 290–304.
- Mirzababaei G., 2011. Relationship between the structural and tectonic factors and mineralization in Dehaj-Sarduieh copper belt; Kerman, SE Iran (in Farsi), 128p.
- Mirzababaei, G., Shahabpour, J., Zarasvandi, A., Hayatolghayb, S.M., 2016. Structural Controls on Cu Metallogenesis in the Dehaj Area, Kerman Porphyry Copper Belt, Iran: A Remote Sensing Perspective. *Journal of Sciences* 27, 253–267.
- Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44, 265–283.
- Shahabpour J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Asian Earth Sciences* 30, 652-665.
- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences* 24, 405–417.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Rostami Paydar, G., Adelpour, M., 2020. Geochemistry, mineralogy, and genesis of Darbe Behesht iron-copper deposit, Dehaj-Sardoie subzone, Kerman Province, Iran. *Adv. Appl. Geol.* 10(2), 235-251.

DOI: 10.22055/AAG.2019.15229

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15229.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15229.html?lang=en)

## زمین‌شیمی، کانی‌شناسی و زایش کانسار آهن - مس درب بهشت، زیرپهنه دهج - ساردوئیه، کرمان

قدرت‌اله رستمی پایدار\*

گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

منصور عادل‌پور

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

\*rostamisi2006@gmail.com

### چکیده

کانسار آهن- مس درب بهشت در زیرپهنه دهج- ساردوئیه از کمان ماگمایی ارومیه-دختر در ناحیه کرمان واقع شده است. سنگ‌های میزبان کانسار درب بهشت به سن اتوسن، شامل تناوبی از گدازه‌ها (آندزیت، تراکی‌آندزیت، بازالت و بازالت) و مواد آذرآواری (انواع توف و آگلومرا) هستند. این سنگ‌ها، بر اساس داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و عناصر نادر خاکی (REE)، شباهت زیادی به گدازه‌های کالک‌آلکان دارند. تمامی نمونه‌ها دارای ماهیت متآلومین تا پراآلومین هستند. غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل با شعاع یونی بالا (LILE) (Ba, Pb, Rb, Sr, K, U, Th) و LREE نسبت به عناصر با میدان پایداری بالا (HFSE) (Nb, Ti, Y, Zr) و HREE و نسبت‌های بالای  $K_2O/Rb$  و  $FeO/MgO$  نشان‌دهنده پیدایش این سنگ‌های آذرین در پهنه زمین‌ساختی وابسته به فرورانش حاشیه فعال قاره‌ای است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه درب بهشت تحت تأثیر محلول‌های گرمایی قرار گرفته و دگرسان شده‌اند، دگرسانی اسکارنی، اپیدوتی و سیلیسی مهم‌ترین نوع دگرسانی می‌باشند. کانی‌سازی آهن و مس در اثر عملکرد سیالات گرمایی که در امتداد گسل‌ها در حرکت بوده ایجاد شده است. ساخت و بافت ماده معدنی به صورت پرکننده فضای خالی، دانه‌پراکنده، رگه-رگچه‌ای و جانشینی است. محیط زمین‌ساختی کانسار درب بهشت با توجه به بررسی‌های زمین‌شیمیایی صورت گرفته یک محیط کشتی است که همزمان با رخداد فرورانش در پشت کمان زیرپهنه دهج- ساردوئیه تشکیل شده است. دو فاز مهم برای رخداد کانه‌زایی در این کانسار قابل جدایش است. فاز اول شامل فرآیندهایی است که سبب تشکیل مگنتیت در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری شده و فاز دوم مربوط به ورود سیالات احیایی است که کانه‌زایی مس را به وجود آورده است.

**کلمات کلیدی:** زمین‌شیمی، کانی‌شناسی، آهن- مس، درب بهشت، کرمان

### مقدمه

داغ داخل قاره‌ای و حوضه‌های کشتی بعد از تصادم قاره‌ای تشکیل می‌شوند (Barton, 2014). منابع سیالات کانه‌ساز کانسارهای IOCG به مدت طولانی یکی از موضوعات مورد بحث بوده (Kun Su et al., 2016) و در مدل‌های کلیدی آن یک منشأ گرمایی - ماگمایی (Sillitoe, 2003; Pollard, 2006) یا چرخش در حوضه‌های تبخیری شور توسط یک منبع حرارتی لازم دانسته شده است (Barton and Johnson, 2000). مطالعه دقیق بر روی پارائز کانی‌های گرمایی در این کانسارها به شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر کانه‌زایی و دگرسانی منجر می‌شود (Taghipour et al., 2012). کانسارهای IOCG دارای تقسیم‌بندی‌های مختلفی هستند که توسط افراد مختلف ارائه شده است؛ یکی از این تقسیم‌بندی‌ها بر اساس فراوانی هماتیت یا مگنتیت می‌باشد (Williams, 2010). گروز و همکاران نیز ذخایر اکسید آهن را به سه گروه بزرگ IOCG، اکسید آهن همراه با فسفر، عناصر نادر خاکی و فلوتور و کانسارهای اسکارن تقسیم‌بندی کرده‌اند (Groves et al., 2010). کریم‌پور و همکاران برای اولین بار در ایران کمربند آتشفشانی- نفوذی خواف -درونه را به عنوان کمربند حاوی کانسارهای تیپ اکسید آهن در ایران معرفی نمود (Karimpour et al., 2011). در این پژوهش به بررسی کانه‌زایی محدوده معدنی آهن- مس درب بهشت واقع در ۲۰ کیلومتری خاور شهر درب بهشت در استان کرمان (شکل ۱)؛ که در زیرپهنه دهج -ساردوئیه از کمان ماگمایی ارومیه-دختر قرار دارد

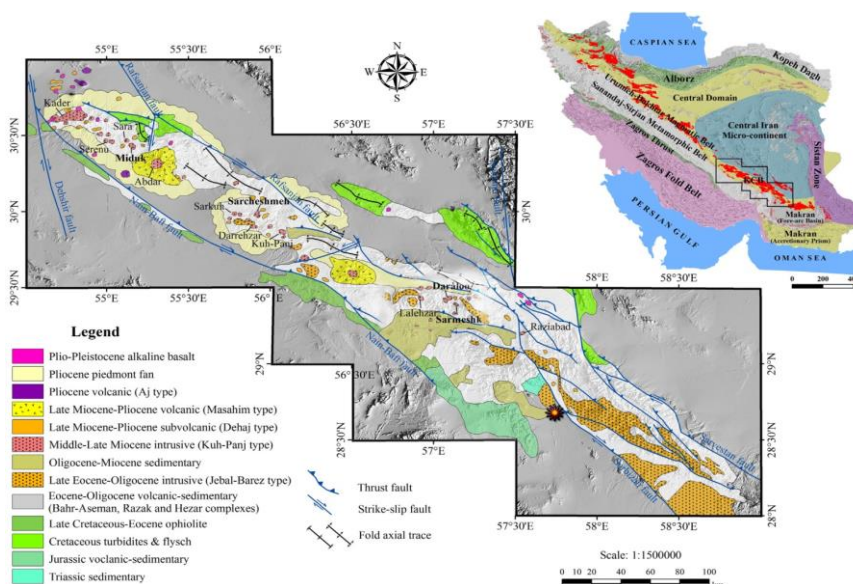
کانسارهای مس-طلا همراه با اکسید آهن یا IOCG (Iron-Oxide Copper Gold)، ذخایر دارای مگنتیت یا هماتیت (اسپکیولاریت) با مقادیر قابل توجهی کالکوپیریت هستند که منشأ گرمایی دارند (Ghayed amini et al., 2014) و انواع کانی‌سازی برشی، رگه و رگچه‌ای، افشان و توده‌ای در آنها دیده می‌شود. این کانسارها معمولاً پلی‌متال هستند و در ارتباط با گرانتیوئیدهای سری I یا A و یا استوک‌های آلکان - کربناتیت بوده و میزبان کانه‌زایی‌های گرمایی کنترل ساختاری هستند (Houa et al., 2015). ارتباط این کانسارها با توده‌های نفوذی مانند ذخایر پورفیری، واضح و مشخص نیست، هر چند در بسیاری موارد ارتباط زمانی و مکانی بین توده‌های آذرین و کانسارهای IOCG وجود دارد (Williams et al., 2010). کانسارها IOCG در نقاط مختلف دنیا در سنگ‌های آتشفشانی یا نیمه آتشفشانی گزارش شده است (Stosch et al., 2011). بعلاوه سنگ-های رسوبی از قبل موجود در منطقه و سنگ‌های درونی مافیک تا فلسیک و حتی سنگ‌های دگرگونی مانند شیست‌ها و گنیس‌ها می‌توانند میزبان این کانسارها باشند. این کانسارها معمولاً دگرسانی گرمایی نسبتاً شدیدی را متحمل شده و بسته به جنس سنگ میزبان و عمق تشکیل آنها، دگرسانی‌های متفاوتی را نشان می‌دهند (Corriveau et al., 2010) و در حوضه‌های کشتی پشت کمربند زون فرورانش، ریفت‌های درون قاره‌ای، نقاط

دهج- ساردوئیه را حاصل فرورانش با زاویه متغیر از کم تا زیاد پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر میکرو قاره‌ی ایران مرکزی می‌دانند. واحدهای سنگی مهم موجود در این ناحیه شامل واحدهای رسوبی تریاس تا انتهای پالئوسن و واحدهای عمدتاً آتشفشانی و آتشفشانی- تخریبی اوایل ائوسن تا پلیوسن می‌باشند که در حدفاصل این دو مجموعه واحد سنگی کنگلومرای کرمان قرار گرفته است. واحدهای سنگی آتشفشانی با سن ائوسن گسترش فراوانی در محدوده مورد پژوهش دارند. بر اساس توالی چینه‌شناسی موجود، آغاز ولکانیسم در این منطقه مشابه با زون ارومیه-دختر مربوط به ابتدای ائوسن است که تشکیل کمپلکس بحر آسمان را داده است. بعد از آن فعالیت ولکانیسم در ائوسن میانی و بالایی توسط سکانس‌های بازالتی و ریولیتی دنبال شده است که با نام کمپلکس رازک شناخته می‌شود و همراه با آنها نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی فاقد کانه‌زایی رخ داده است. فعالیت ماگمایی بعدی در الیگوسن تشکیل کمپلکس ولکانیکی هزار را می‌دهد که توده‌های نفوذی این زمان دارای وضعیت شوشونیتی یا کالک‌آلکالین پتاسیم بالا هستند. مرحله بعدی رخداد ولکانیسم، از میوسن میانی تا پایانی رخ می‌دهد که همزمان با آن تزریق توده‌های پورفیری در سراسر زون ارومیه-دختر رخ داده است. در دوران میوسن میانی و در زمانی که برخورد قاره‌ای بین ایران و عربستان رخ داده است دو استراتولکان و چند گنبد ریولیتی و به‌طور محلی آندزیت‌ها تشکیل گردیده است (Shafiei and Shahab pour, 2008). واحدهای سنگی موجود در منطقه مطالعاتی با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، شامل سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-تخریبی ائوسن می‌باشند که در بخش‌های زیادی تحت تأثیر فرسایش گسترده قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین واحدهای سنگی موجود در محدوده کانسار آهن- مس درب بهشت شامل آگولومرا، آندزیت، تراکی آندزیت، بازالت، لاپیلی توف آندزیتی و توف‌های اسیدی می‌باشند. همچنین در بخش‌هایی توده نفوذی گرانودیوریتی مشاهده می‌شود که در واحدهای سنگی آتشفشانی تزریق شده است.

پرداخته می‌شود. کمان ماگمایی ارومیه-دختر اغلب توسط سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی با ماهیت کالک‌آلکالین و نیز مواد آذرآوری وابسته به آنها تشکیل شده است (Alimohammadi et al., 2015). اکثر کانسارهای مس شناخته شده در قسمت جنوبی این کمان قرار دارند که به عنوان کمان دهج-ساردوئیه یا کمر بند مس کرمان شناخته می‌شود. این پژوهش به بررسی سنگ‌های آتشفشانی واجد کانه‌زایی آهن-مس به سن ائوسن در کانسار درب بهشت، پاراژنز کانیاپی، دگرسانی و جایگاه تکنونوماگمایی این محدوده پرداخته است و سعی دارد با تکیه بر مشاهدات میدانی، سنگ‌شناسی، کانی-شناسی، دگرسانی و کانه‌نگاری خصوصیات کانسار آهن-مس درب بهشت را به عنوان یک مثال بارز از ذخایر IOCG در قسمت جنوبی کمر بند دهج-ساردوئیه در ایران معرفی نماید.

### زمین شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران (Aghanabati, 2004)، در پهنه ساختاری دهج-ساردوئیه که جزئی از یک واحد تکنونوماگمایی مهم تحت عنوان مجموعه ماگمایی ارومیه-دختر است (Aliani et al., 2009)، در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ بم (Eftekhar Nezhad and Aghanabati, 1993) و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ خان‌خاتون و ساردوئیه واقع شده است. بر اساس توالی چینه‌شناسی موجود و سن‌سنجی‌های صورت گرفته آغاز ولکانیسم در این زون مربوط به ابتدای ائوسن است که طی چند مرحله تا پلیوسن ادامه می‌یابد (Hodai Koushk and Rostami Paydar, 2015). در مرحله میوسن میانی تا پایانی، تزریق توده‌های پورفیری سبب تشکیل سیستم‌های مس پورفیری در این زون شده است (Shafiei and Shahab pour, 2008)؛ که از مهم‌ترین آنها می‌توان به معدن مس پورفیری سرچشمه، میدوک، چاه‌مسی، سارا، ایجو و کدر اشاره کرد (Mirzababaei et al., 2016). Shafiei و همکاران (۲۰۱۰) تشکیل مجموعه ولکانیکی کمر بند



شکل ۱- (a) نقشه‌های رسوبی- ساختاری عمده ایران (Stocklin, 1968)، (b) نقشه ساختاری - سنگی ساده شده از موقعیت منطقه معدنی آهن- مس درب بهشت در زیر پهنه دهج-ساردوئیه (Shafiei et al., 2009).

Fig. 1. (a) Map shows the geology of Iran with its structural provinces (Stocklin, 1968), and (b) Simplified litho-structural map of the Dehaj-Sardooye subzone and location of Darbe Behesht iron-copper deposit (Shafiei et al., 2009).



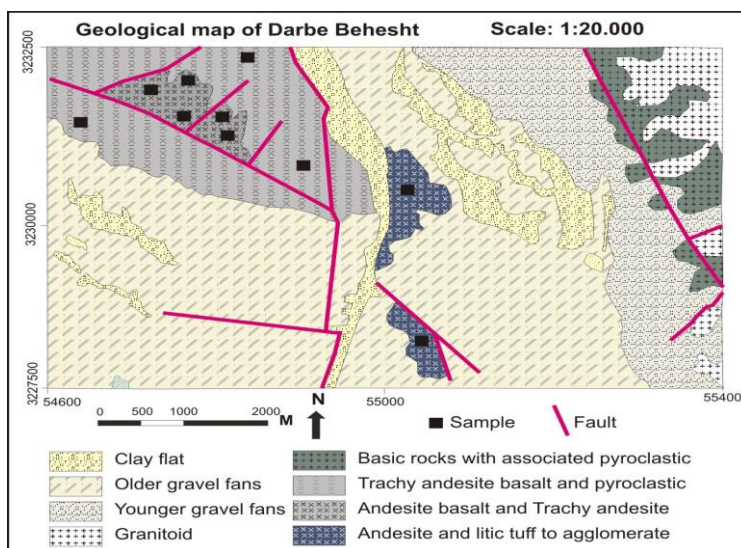
## روش کار

این مطالعه دربرگیرنده دو بخش مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی است. در طی بررسی‌های صحرایی، به منظور آشنایی بیشتر با زمین‌شناسی منطقه و واحدهای سنگی موجود و نیز ارتباط کانه‌زایی با سنگ‌های درونگیر، بازدیدهایی از منطقه صورت گرفت. پس از این بازدیدها و انجام پیمایش‌های زمین‌شناسی، ۴۵ نمونه برای مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. در بخش آزمایشگاهی، برای شناسایی نوع سنگ میزبان، ساخت و بافت و کانه‌های موجود در پهنه‌های کانه‌زایی، ۱۳ مقطع نازک و ۱۲ مقطع صیقلی از کانه‌زایی‌های یاد شده و سنگ‌های درونگیر آنها تهیه شد و مورد مطالعات سنگ‌شناختی و کانه‌نگاری قرار گرفت. افزون بر این، به منظور بررسی‌های زمین‌شیمیایی اکسیدهای اصلی ۱۰ نمونه جهت آنالیز XRF به آزمایشگاه زرآما ارسال گردید (جدول ۱). همچنین جهت آنالیز عناصر کمیاب و عناصر نادر خاکی (REE) از واحدهای سنگی منطقه، ۱۰ نمونه جهت آنالیز ICP-MS به آزمایشگاه LabWest استرالیا ارسال شد (جدول ۲).

## بحث و نتایج

## سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

سنگ‌های آتشفشانی محدوده مورد مطالعه دارای ترکیب حدواسط تا مافیک بوده و به‌صورت گدازه و آذرآواری در سطح زمین دیده می‌شوند که یک توده گرانودیوریتی (مربوط به مجموعه پلوتونیک جبال بارز) در آنها تزریق شده است (شکل ۲). اصلی‌ترین رخنمون این توده نفوذی در بخش شمال شرق محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شود که وسعتی در حدود کمتر از یک کیلومتر دارد. رنگ رخنمون این واحد سنگی سفید بوده و در بخش‌هایی نیز به دلیل بالا بودن اکسید آهن رنگ زرد-قرمز پیدا کرده است. این توده گرانودیوریت دارای میزان پایین کوارتز (کمتر از ۲۰ درصد) بوده و پلاژیوکلاز اصلی‌ترین کانی تشکیل دهنده این توده نفوذی می‌باشد. کانی آمفیبول و کمتر بیوتیت نیز کانی‌های مافیک این سنگ را تشکیل می‌دهند.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی کانسار آهن- مس درب بهشت (مقیاس: ۱:۲۰,۰۰۰).

Fig. 2. Detailed geological map of the Darbe Behesht iron-copper deposit (Scale 1:20,000).

آنها بیشتر آندزین-لابرادوریت پیشنهاد می‌شود (Wright, 1951). کلسیت، کلریت، سریسیت و کوارتز ثانویه از دگرسانی پلاژیوکلازها حاصل شده‌اند و در سطح تعدادی از آنها اکسیدهای آهن مشاهده می‌شود. انحلال و خوردگی شدید که بیانگر بافت‌های غیر تعادلی‌اند نیز در تعدادی از پلاژیوکلازها مشاهده می‌شود. پیروکسن کانی فرومینزین اصلی این نمونه‌هاست که به‌طور عمده به کلریت دگرسان شده است. فراوان‌ترین کانی ثانویه موجود در حفرات و رگه‌های موجود در سنگ کلسیت است. از دیگر کانی‌های ثانویه می‌توان به اکسیدهای آهن، کانی‌های فیلسیلیکاته، کانی‌های تیره، اپیدوت و کانی‌های رسی اشاره کرد. سنگ‌های آذرآواری در منطقه درب بهشت شامل آگلومرای خاکستری رنگ، لاپیلی توف آندزیتی و توف اسیدی سفید رنگ می‌باشد و عمدتاً دارای ترکیب آندزیتی و آندزیت-بازالتی هستند. خرده سنگ‌های این سنگ‌ها از جنس آتشفشانی با بافت میکروولیتی و هیالوپورفیریک حفره‌دار هستند. از دیگر اجزاء تشکیل دهنده این سنگ‌ها می‌توان به بلورهای پلاژیوکلاز و به مقدار کمتر پیروکسن اشاره کرد. اندازه قطعات سنگی در توف‌ها کمتر از ۲ میلی‌متر و در آگلومراها به ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد.

حضور فراوان این دو کانی آبدار نشان‌دهنده وجود سیالات فراوان (بیشتر از ۴ درصد وزنی) با این توده نفوذی است. پس از جایگزینی توده گرانودیوریتی درون مجموعه‌های آتشفشانی دستخوش تبلور شده است و در نتیجه، پس از تبلور استوک، سنگ‌های پیرامون خود را دگرسان کرده است (دگرسانی سیلیسی، کلریتی، اپیدوتی، سریسیتی، کربناتی و اسکارن). مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که ولکانیک‌ها ترکیبی از آندزیت، تراکی‌آندزیت، تراکی‌آندزیت-بازالت، آندزیت-بازالت، داسیت و سنگ‌های آذرآواری شامل آگلومرا و انواع توف‌ها دارند. پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و پیروکسن مهمترین فنوکریست‌های این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. در مقاطع میکروسکوپی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز به عنوان فراوان‌ترین کانی موجود در این سنگ‌ها هستند. اندازه فنوکریست‌های پلاژیوکلازها ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر در یک زمینه ریز دانه است که معمولاً به صورت توده‌ای با بافت‌های ریز دانه و پورفیری مشخص هستند. انواع پورفیری آندزیت‌ها دارای بیش از ۶۰ درصد حجمی پلاژیوکلاز هستند. بلورهای پلاژیوکلاز عموماً نیمه شکل‌دار و تخته‌ای شکل هستند. انواع ماکل‌های تکراری، کارلسباد و منطقه‌بندی نوسانی در آنها دیده می‌شود. با توجه به ماکل تکراری و منطقه‌بندی در پلاژیوکلازها و زاویه خاموشی ۲۸ تا ۳۶ درجه ترکیب

جدول ۱ - نتایج آنالیز XRF سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار آهن- مس درب بهشت (همه اکسیدها بر حسب درصد وزنی).

Table 1. The results of XRF analysis of volcanic rocks in the Darbe Behesht iron-copper deposit (all oxides are in Wt.%).

Rock	Trachyandesite					Andesite		Basaltic trachyandesite		
Sample	DB-2	DB-4	DB-6	DB-10	DB-12	DB-3	DB-14	DB-7	DB-8	DB-16
XRF analyses (wt.%)										
SiO <sub>2</sub>	51.23	56.00	67.14	53.22	54.46	60.77	52.92	49.00	51.12	49.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.07	24.03	16.65	17.89	22.23	16.86	21.36	21.25	21.47	22.53
MnO	0.11	0.15	0.14	0.18	0.10	0.11	0.14	0.18	0.12	0.12
MgO	2.92	1.57	1.99	3.22	1.81	2.17	4.32	3.12	2.27	3.34
CaO	8.90	3.12	4.57	7.95	6.01	2.91	6.18	11.57	10.09	9.54
Na <sub>2</sub> O	2.95	5.54	5.07	6.58	2.34	6.39	5.06	3.61	3.73	5.04
K <sub>2</sub> O	3.75	2.45	4.68	0.16	4.22	0.33	0.47	1.74	2.95	0.67
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.93	0.76	1.04	0.74	1.08	1.24	1.26	0.95	0.89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.47	0.17	0.41	0.17	0.49	0.18	0.18	0.30	0.44	0.43
L.O.I	3.21	3.24	3.71	3.45	3.21	4.4	4.1	4.32	3.79	3.43
Total	98.50	97.18	98.21	95.86	97.86	97.20	97.96	96.33	96.92	95.35

جدول ۲ - نتایج آنالیز ICP-MS سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار آهن- مس درب بهشت (تمام عناصر بر حسب ppm).

Table 2. The results of ICP-MS analysis of volcanic rocks in the Darbe Behesht iron-copper deposit (all trace elements are in ppm).

Rock	Trachyandesite					Andesite		Basaltic trachyandesite		
Sample	DB-2	DB-4	DB-6	DB-10	DB-12	DB-3	DB-14	DB-7	DB-8	DB-16
ICP-MS analyses (ppm)										
Ba	378	408	490	40.1	354	27.9	53.7	24.8	314	353
Ag	0.09	0.04	0.24	0.03	0.03	0.15	0.03	0.02	0.02	0.02
Ce	53	17	67	23	47	27	18	27	59	47
Dy	3.2	3	4.8	4.4	2.8	5.6	3	5.5	3	4.2
Er	1.7	1.3	2.8	2.4	1.7	2.9	1.4	3	2.8	2.2
Eu	1.5	1.1	1.8	1.4	1.1	1.6	1.1	1.6	2	1.7
Gd	4.2	3.8	5.5	4.6	3.5	5.4	3.5	5.3	4.5	5.5
Hf	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Ho	0.69	0.57	1	0.99	0.6	1.2	0.62	1.2	1	0.93
K	31300	18900	42300	1740	5307	3340	4070	3020	4072	6020
La	28	6.9	35	9.8	23	11	7.8	11	15.2	23
Lu	0.3	0.18	0.52	0.42	0.31	0.45	0.22	0.51	0.5	0.36
Nb	5.4	1.7	8.4	2.6	3.5	4	1.8	4.5	3.7	3.4
Nd	26	13	33	16	21	19	13	19	34	26
P	1900	700	1960	1020	2070	1040	762	1090	2018	2080
Pb	15	4.4	14	2.9	14.1	3.9	4.5	6.7	15.1	16
Pr	6.7	2.6	8.6	3.4	5.3	4.1	2.8	4.1	8.3	6.4
Rb	62	53	90	4.1	52	9.1	8.7	7.6	24	12
Sm	4.9	3.3	6.3	4	3.8	4.7	3.3	5	6.7	5.6
Sr	1220	287	845	446	1400	207	389	251	1430	1560
Ta	0.34	0.02	0.58	0.16	0.23	0.18	0.09	0.22	0.05	0.09
Tb	0.66	0.61	0.88	0.8	0.52	1.1	0.58	1	0.94	0.82
Th	8.2	1.5	10	1.2	8.1	1.3	1.1	1.2	7.1	6.9
Ti	5590	3570	4730	5050	5650	5100	6550	6030	5400	5930
Tm	0.32	0.22	0.55	0.45	0.29	0.53	0.27	0.54	0.47	0.41
U	2	0.52	3.1	0.47	1.8	0.42	0.47	0.47	1.2	1.7
V	192	111	73	140	201	115	148	122	180	250
Y	18	14	25	25	20	33	15	35	19	21
Yb	1.7	1.1	2.9	2.4	1.7	2.6	1.3	2.8	2.6	2
Zr	110	94	200	99	92	150	87	160	98	81

## زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی

با توجه به دگرسانی نسبتاً گسترده سنگ‌های آتشفشانی منطقه و پیدایش کانی‌های ثانویه مانند اپیدوت، کلریت و کلسیت در آنها، در این بخش سعی شد تا برای بررسی ویژگی‌های اولیه سنگ‌های آتشفشانی منطقه، بررسی‌های زمین‌شیمی روی نمونه‌های سالم و کمتر دگرسان شده متمرکز شود، و در عین حال در تفسیر داده‌های زمین‌شیمی بیشتر روی ویژگی‌های عناصری تکیه شود که در محیط‌های گرمابی دگرسان نسبتاً کم‌تحرک و غیرفعال باقی می‌مانند. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های مختلف سنگ‌های آتشفشانی میزبان کانسار آهن-مس در بهشت در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

درصد  $\text{SiO}_2$  این سنگ‌ها بین ۴۹/۰۰ تا ۶۰/۷۶ درصد متغیر است. بر اساس ترکیب شیمیایی، سنگ‌های آتشفشانی موردنظر در نمودار (Winchester and Floyd, 1977) که بر اساس نسبت  $\text{Zr/TiO}_2$  در مقابل  $\text{Nb/Y}$  ترسیم شده، دارای ترکیب آندزیتی است و در نمودار (Bas et al., 1986) که بر مبنای درصد وزنی مجموع آلکانل  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  در مقابل درصد وزنی سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) رسم شده است، در محدوده آندزیت، تراکی آندزیت و تراکی آندزیت-بازالت قرار می‌گیرند (شکل ۳a). این سنگ‌ها بر اساس نمودار اکسیدهای عناصر آلکانل در برابر سیلیس در محدوده آلکانل و ساب آلکانل قرار می‌گیرند؛ اقتباس از (Irvin and Baragar, 1971) (شکل ۳b)؛ نمونه‌های مورد بررسی از لحاظ شاخص اشباع آلومین بر اساس نمودار  $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$  (Shand, 1943)، در محدوده متالومین تا پراآلومین جای می‌گیرند (شکل ۳c). عناصر فرعی آندزیت‌هایی که به حواشی قاره‌ای فعال وابسته‌اند دارای ویژگی‌های خاصی هستند که آن‌ها را از آندزیت-های جزایر قوسی مجزا می‌سازد.

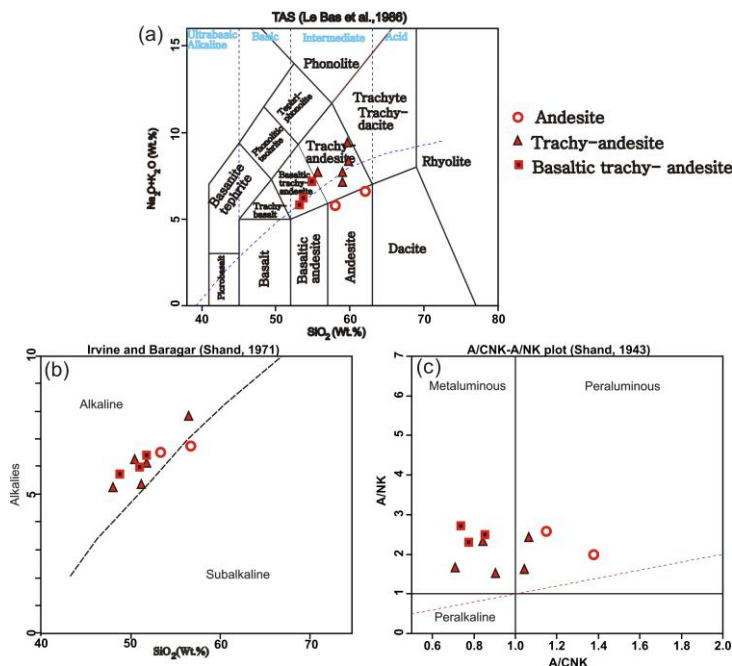
ویژگی میزان بالای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و میزان پایین  $\text{MgO}$  (شکل ۴) نسبت به  $\text{SiO}_2$  در واحدهای آتشفشانی و همچنین توالی سری‌های آندزیتی غنی از بلورهای پلاژیوکلاز نشان دهنده تشکیل احتمالی آنها در یک محیط زمین‌ساختی کششی ناشی از فرورانش با زاویه کم است (Abolipour, 2004). در شکل ۴ تغییرات بعضی عناصر اصلی در مقابل  $\text{SiO}_2$  برای سنگ‌های منطقه در بهشت نشان داده شده است. مقادیر  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{CaO}$  و  $\text{MgO}$  با افزایش  $\text{SiO}_2$  روند نزولی نشان می‌دهند، که این تغییر روندها در عناصر اصلی با پیشرفت فرآیند تفریق بلوری ماگمایی امری عادی است (Ghanei et al., 2014). این سنگ‌ها نسبت  $\text{Ba/La} < 15$  و  $\text{La/Th} > 7$  است (Gill, 1981) که همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود نسبت  $\text{La/Th}$  و  $\text{Ba/La}$  در محدوده مورد بررسی به ترتیب برابر ۱۶/۸۴ و ۳/۸ می‌باشد که نشانه تشابه آن‌ها با سنگ‌های حواشی قاره‌ای فعال است. به منظور تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی، از نمودارهایی استفاده شد که عناصر کمیاب کم‌تحرکی چون  $\text{Y}$ ،  $\text{Nb}$ ،  $\text{Zr}$ ،  $\text{V}$ ،  $\text{Ta}$ ،  $\text{Hf}$  سازنده‌های آن هستند. این عناصر نسبتاً نامتحرک بوده و هنگام فرآیندهایی چون هوازدگی، دگرسانی و دگرگونی حساسیت نشان نداده و وارد فاز شاره نمی‌شوند (Aliani et al., 2009). همانطور که در شکل ۵ و جدول ۱ مشاهده می‌شود مقدار  $\text{Zr}$  در سنگ‌های مورد مطالعه دامنه وسیعی (بین ۹ تا ۲۰۰) را به خود اختصاص داده‌اند که از این لحاظ به سنگ‌های سری آلکانل تا کالک آلکانل شباهت دارند (Pearce and Cann, 1973). سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه در محدوده کمان‌های ماگمایی ناشی از فرورانش قرار می‌گیرند. با توجه به خصوصیات زمین‌شیمیایی و همچنین با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آتشفشانی در بهشت، به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها با ماگماتیسیم ناشی از فرورانش یک پوسته اقیانوسی به زیر یک

پوسته قاره‌ای در ارتباط بوده و در یک محیط کمان ماگمایی تشکیل شده‌اند (Muller and Groves, 1997) (شکل ۶).

برای تمایز کمان ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای از کمان ماگمایی جزایر - قوسی از نسبت عناصر کمیاب  $\text{Zr/Y}$  برای تشخیص رژیم تکنوتیکی می‌توان استفاده کرد (Pearce and Norry, 1979). به این صورت که اگر در گدازه‌ها نسبت  $\text{Zr/Y} > 3$  باشد، متعلق به کمان‌های آتشفشانی قاره‌ای هستند و اگر در آنها نسبت  $\text{Zr/Y} < 3$  باشد به کمان‌های آتشفشانی اقیانوسی تعلق دارند. سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه دارای نسبت  $\text{Zr/Y} > 3$  هستند و در گروه قوس‌های آتشفشانی قاره‌ای قرار می‌گیرند. بنابراین محیط تکتونوماگمایی منطقه مورد مطالعه را می‌توان جزء محیط‌های حاشیه فعال قاره‌ای به شمار آورد. در شکل ۷ ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی در بهشت نسبت به بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی غنی شده (E-MORB) و گوشته اولیه نشان داده شده است. نمودارهای عنکبوتی جهت بررسی میزان تغییر و تحولات ماگمایی مولد نسبت به ماگمای اولیه و همچنین منشاء و روابط ژنتیکی آنها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود فراوانی عناصر کمیاب  $\text{Y}$ ،  $\text{Zr}$ ،  $\text{Lu}$ ،  $\text{Yb}$ ،  $\text{Dy}$ ،  $\text{Th}$ ،  $\text{Eu}$ ،  $\text{Sm}$  در نمونه‌ها تقریباً مشابه با فراوانی این عناصر در E-MORB است و نیز عناصر کمیاب دارای پتانسیل یونی پایین (LILE) پراکندگی بیشتری نسبت به عناصر با پتانسیل یونی بالا (HFSE) دارند. این پراکندگی به علت تحرک نسبتاً زیاد عناصر LILE در طول دگرسانی است. عبارتی این عناصر به دلیل ناسازگار بودن در ماگمای مرتبط با فرورانش غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. روند تغییرات عناصر کمیاب در سنگ‌های مختلف کم و بیش موازی است که این امر دلالت بر هم‌خاستگاه بودن آنها دارد. نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده عناصر خاکی نادر نسبت به E-MORB و گوشته اولیه بیانگر غنی‌شدگی از عناصر خاکی نادر سبک و ناسازگار می‌باشد. این از ویژگی‌های کالک آلکانل کمان‌های آتشفشانی زون‌های فرورانش حاشیه قاره است (Pearce, 1983). تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) مثل  $\text{Ti}$  و  $\text{Nb}$  و غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) مانند  $\text{Ba}$  و  $\text{K}$  قابل مشاهده می‌باشد. این ویژگی‌ها می‌تواند نشانه آغستگی پوسته در فرآیند ماگمایی و آلودگی توسط پوسته باشد (Harris, 1986; Chappell, 1992). آنومالی منفی  $\text{Ti}$  و  $\text{Nb}$  به عوامل مختلفی نسبت داده می‌شود. این عوامل عبارتند از: ۱) ماگماتیسیم مرتبط با فرورانش؛ ۲) وجه مشخصه سنگ‌های پوسته قاره‌ای و دخالت پوسته در فرآیندهای ماگمایی (Kuster and Harms, 1998)؛ ۳) نشان‌دهنده فقر این عناصر در منشأ؛ پایداری فازهای حاوی این عناصر در طی ذوب‌بخشی و یا جدایش آنها در طی فرآیند تفریق است. آنومالی مثبت  $\text{Pb}$  به متاسوماتیسیم گوه گوشته‌ای توسط سیالات ناشی از پوسته اقیانوسی فرورو و یا آرایش ماگما با پوسته قاره‌ای اشاره دارد (Kamber et al., 2002). ماگمای تشکیل‌دهنده سنگ‌های آتشفشانی در مناطق فرورانش معمولاً از گوه‌گوشته‌ای، سیالات و مذاب‌های آبدار مشتق از پوسته اقیانوسی فرورو منشأ می‌گیرند (Pearce and Peate, 1995). ماگماهایی که از گوه گوشته‌ای منشأ گرفته‌اند، معمولاً دارای  $\text{K}_2\text{O}$  بالا و  $\text{MgO}$  پایین هستند. نسبت بالای  $\text{Ba/Th}$  اشاره به تأثیر رسوبات در زایش ماگما دارد (Morata and Aguirre, 2003). عنصر  $\text{Ba}$  ناسازگار و متحرک است و مقدار آن در پوسته قاره‌ای و رسوبات زیاد است (Rollinson, 1998). هنگامی که پوشش رسوبی روی پوسته اقیانوسی فرورانه می‌شود، عناصر  $\text{Sr}$  و  $\text{Ba}$  توسط سیالات مشتق شده از رسوبات آبدار و پوسته اقیانوسی به گوه گوشته‌ای منتقل شده و تولید ماگماهایی با  $\text{Sr}$  و  $\text{Ba}$  بالا می‌کند (Morata and Aguirre, 2003). در شکل ۸ فراوانی عناصر نادر

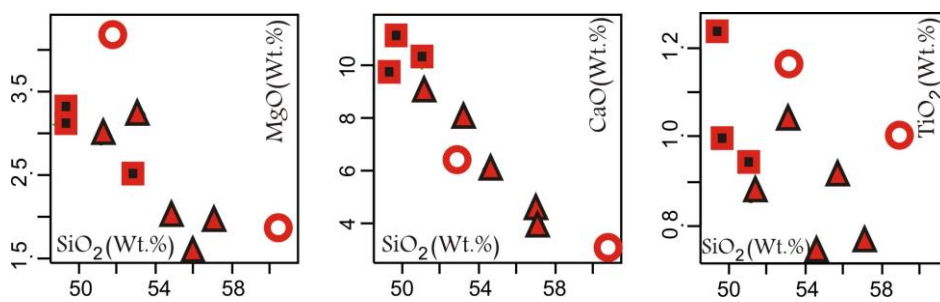
قلیایی نشان می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شیمی و نیز با در نظر گرفتن موقعیت زمانی و مکانی سنگ‌های آتشفشانی کانسار درب بهشت، به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها با ماگماتیسم ناشی از فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ورقه ایران مرکزی وابسته بوده و در یک محیط کمان ماگمایی تشکیل شده‌اند.

خاکی نمونه‌ها، نسبت به کندریت بهنجار شده است. چنانچه در این شکل ملاحظه می‌شود الگوهای یکنواخت غنی شدگی از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) در مقایسه با عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) در نمونه‌ها به چشم می‌خورد. غنی شدگی از عناصر LREE نسبت به عناصر HREE و مقدار Nb, Zr و Ti (HFSE) وابستگی این سنگ‌ها را به سری‌های آهکی-



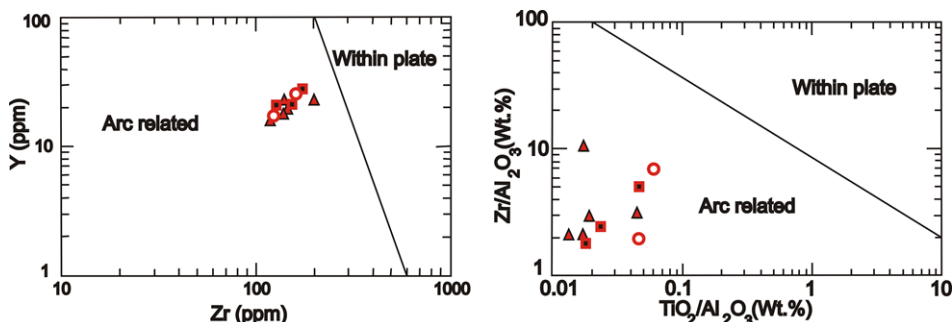
شکل ۳- (a) نمودار  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$ ، نمونه‌ها در محدوده آندزیت، تراکی آندزیت و آندزیت-بازالت قرار گرفته‌اند (Le Bas et al, 1986)، (b) نمودار اکسیدهای - عناصر آلکان در برابر سیلیس، جهت تمایز سری‌های آلکان و ساب‌آلکان (Irvine and Baragar, 1971) و (c) نمودار  $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ ، نمونه‌ها در محدوده متآلومینوس تا پرالومینوس قرار گرفته‌اند (Shand, 1943).

Fig. 3. (a) Plot of  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$ , samples are located in andesite, trachyandesite and basaltic trachyandesite (Le Bas et al, 1986), (b) Plot of Alkalies vs.  $\text{SiO}_2$ , for differentiation of alkaline series and sub-alkaline series (Irvine and Baragar, 1971), and (c) Plot of  $A/\text{CNK} - A/\text{NK}$ , samples are located in metaluminous to peraluminous (Shand, 1943).



شکل ۴- روند تغییرات عناصر  $\text{MgO}$  و  $\text{TiO}_2$  و  $\text{CaO}$  نسبت به  $\text{SiO}_2$ .

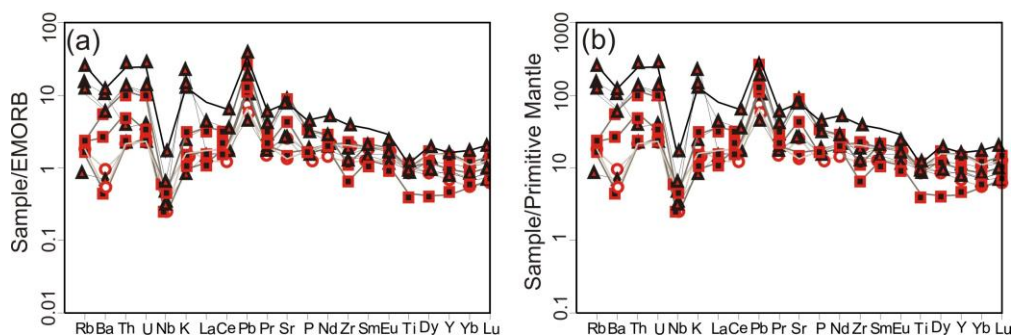
Fig. 4. Plot of  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{CaO}$  vs.  $\text{SiO}_2$



شکل ۶- تعیین محیط تکنونیک سنگ‌های آتشفشانی درب بهشت (Muller and Groves, 1997).

Fig. 6. Tectonic setting of volcanic rocks of Darbe Behesht (Muller and Groves, 1997).



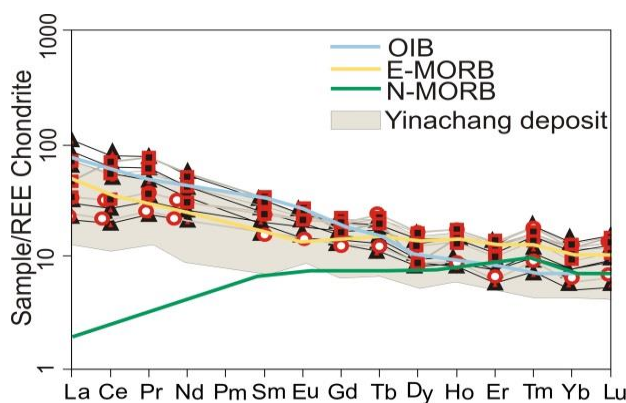


شکل ۷- (a) الگوی عناصر ناسازگار نرمال شده به E-MORB و (b) نمودار عنکبوتی نرمالیزه شده براساس گوشته اولیه؛ تپی شدگی از عناصر با شدت میدان بالا هم چون Nb و Y، Ti، Zr، غنی شدگی از عناصر Ba و K نشان دهنده شرکت پوسته در فرآیندهای ماگمایی و آلودگی ماگما توسط پوسته است (Harris, 1986; Chappell, 1992).

Fig. 7. (a) E-MORB normalized incompatible element patterns, and (b) Primitive mantle normalized incompatible element patterns; depletion from high field strength elements like Zr, Ti, Y, Nb and Ba and K enrichment show contamination at later stage of magmatic process with crustal materials (Harris, 1986; Chappell, 1992).

منطقه مورد پژوهش سازگار است. عدم ایجاد بی‌هنجاری مثبت برای عنصر Eu در نمونه‌ها با وجود میزان بالای بلورهای پلاژیوکلاز (به عنوان حمل کننده عنصر) می‌تواند حاصل بالا بودن میزان فوگاسیته اکسیژن در طول تشکیل ماگما در گوشته (Morata and Aguirre, 2003) و یا آبدار بودن ماگما و در نتیجه عدم تفریق قابل توجه پلاژیوکلاز در طول مراحل اولیه تکامل ماگمایی باشد (Richards et al., 2012). صاف شدن هرچه بیشتر الگوی عناصر خاکی کمیاب (شکل ۸) و کاهش اختلاف میان غنی‌شدگی عناصر خاکی کمیاب سنگین و سبک نسبت به کندریت نشانگر افزایش نسبی درجه ذوب بخشی در گوشته است. به احتمال زیاد در محدوده درب بهشت واحدهای آذرین از آهن و مس غنی بوده‌اند و در محیطی کششی سریعاً به سطح رسیده و به شکل سنگ‌های آتشفشانی غنی از آهن و مس ظاهر شده‌اند. بنابراین داده‌های زمین‌شیمی در این منطقه نشانگر رخداد ولکانیسم و تشکیل واحدهای سنگی آتشفشانی تحت تأثیر فرآیند کشش همزمان با فرورانش است.

ضخامت زیاد گدازه‌های آتشفشانی و واحدهای سنگی نشان‌دهنده رخداد یک کشش و بازشدگی در منطقه مورد مطالعه است (Tosdal and Munizaga, 2003). با توجه به موقعیت فرورانشی و سن ائوسن منطقه، تشکیل حوضه کششی در مناطق فرورانشی مناسب به نظر می‌رسد (Shahabpour, 2005). تأثیر رخداد فرورانش و ذوب پوسته اقیانوسی فرورونده برای تشکیل مذاب در این محیط کششی بسیار بالا است (Pearce and Stern, 2006). بالا بودن میزان باریم و توریم در سنگ‌های ماگمایی که دارای منشأ پوسته فرورونده هستند، اهمیت تأثیر پوسته اقیانوسی را برای تشکیل مذاب در حوضه کششی درب بهشت افزایش می‌دهد (Pearce and Stern, 2006). وجود شباهت نسبی میان برخی از نمونه‌های سنگی منطقه و گوشته غنی شده نشان‌دهنده تشکیل و جایگزینی آنها در موقعیتی کششی است (Kampunzu et al., 2000). در موقعیت کششی ماگماتیسم از نوع آلكالین فراوانی زیادی دارد (Luhr, 1997). غنی‌شدگی بیش از حد عناصر آلكالین حاصل ذوب درجه پایین گوشته است (Ishizuka et al., 2010) که با ماهیت آلكالین سنگ‌ها در



شکل ۸- الگوی بهنجار شده عناصر نادر خاکی سنگ‌های درب بهشت نسبت به کندریت (Nakamura, 1977)، OIB: بازالت جزایر اقیانوسی، E-MORB: بازالت‌های پشته میان اقیانوسی غنی شده، N-MORB: بازالت‌های پشته میان اقیانوسی نرمال، محدوده خاکستری رنگ کانسار ینگ چانگ چین می‌باشد.

Fig. 8. Chondrite-normalized REE patterns of the rocks from Darbe Behesht. Normalizing values are from Nakamura, 1977. OIB: Oceanic Island Basalt, E-MORB: Enriched MORB, N-MORB: normal MORB, The compositions of the Yinachang deposit from China.

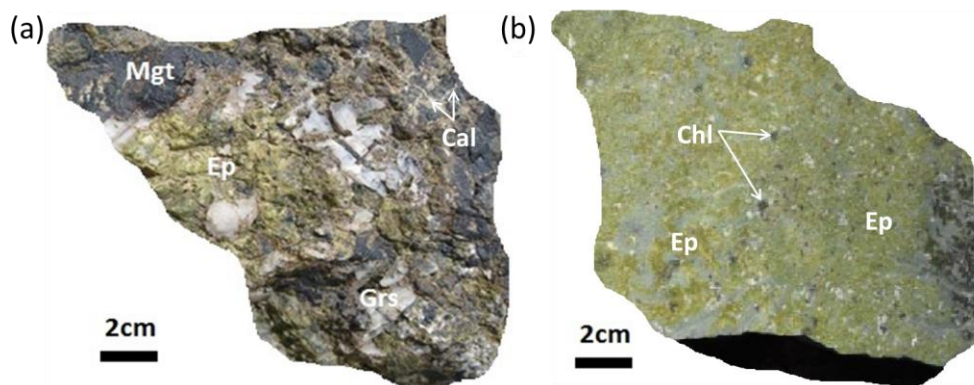
بهبست مجموعه‌ای از کانی‌های کالک سیلیکاتی در همراهی با رخداد کانه‌زایی آهن و در مرز توده نفوذی و سنگ‌های در برگریخته مشاهده می‌شود که می‌توان این مجموعه را اسکارن نامید (Taghipour et al., 2012). این کانی‌ها شامل گارنت، پیروکسن، کلریت، اپیدوت به همراه کانی‌های کوارتز، مسکوویت

#### دگرسانی

در محدوده مطالعاتی مهم‌ترین مجموعه دگرسانی شناسایی شده از نظر شناسایی تیپ کانه‌زایی آهن در منطقه مجموعه دگرسانی اسکارنی و شکل‌گیری سنگ‌های متاسوماتیک می‌باشد. در محدوده معدنی آهن-مس درب

مجاورت توده نفوذی و یا در نزدیکی آن کربنات وجود داشته باشد گسترش زون اسکارن زیاد است. بایستی توجه داشت وجود مقادیر کم کربنات در واحدهای سنگی آتشفشانی-تخریبی عامل این مقدار اسکارن زایی بوده است. دگرسانی‌های اپیدوتی و کلریتی و همچنین سیلیسی در همراهی با کانه‌زایی آهن-مس در سراسر منطقه و به شکل گسترده مشاهده می‌شود. دگرسانی‌های کلریتی و اپیدوتی به دلیل وجود دو کانی سبز رنگ سبب ایجاد رنگ سبز در مجاورت رگه‌های کانه دار شده است (شکل ۹b).

به همراه مگنتیت مجموعه اسکارنی را تشکیل می‌دهند (شکل ۹a). رگه‌های حاوی ماده معدنی در بخش‌هایی با این مجموعه کانی‌ها همراهی می‌شوند (شکل ۱۰). میزان گسترش کانی گارنت کمتر از سایر کانی هاست. کانسارهای نوع اسکارنی دارای سنگ میزبان عمده کربناتی هستند، اما در سنگ‌های آتشفشانی که دارای شکستگی‌های فراوان بوده و نفوذپذیری بالایی دارند نیز ایجاد می‌شوند. در سنگ‌های آتشفشانی میزان تشکیل و گسترش کانی‌های کالک‌سیلیکاته اسکارنی مانند گارنت‌ها کاهش می‌یابد. در مناطقی که در

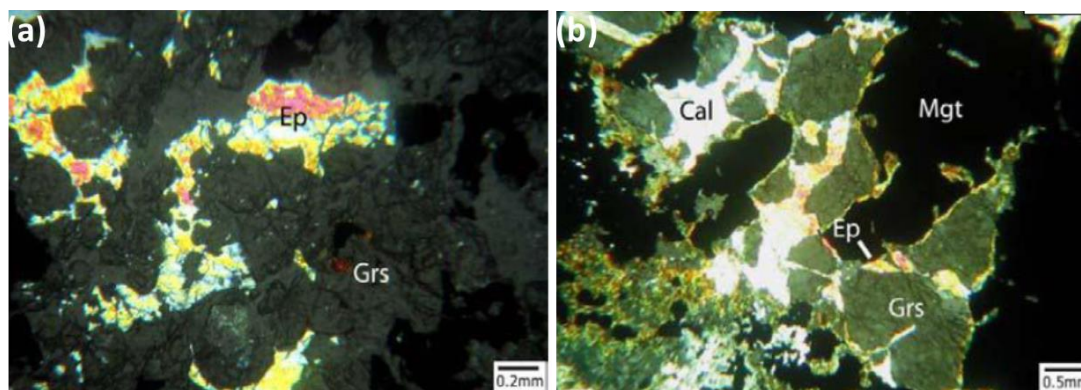


شکل ۹- (a) مجموعه کالک‌سیلیکاته اسکارن متشکل از کلسیت، اپیدوت، کلریت، گارنت به همراه کانی مگنتیت، (b) دگرسانی کلریتی و اپیدوتی در رخنمون محدوده درب بهشت؛ (Mgt): مگنتیت، Ep: اپیدوت، Cal: کلسیت، Grs: گروسولار، Chl: کلریت). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

Fig. 9. (a) Calc-silicate skarn complex consist of calcite, epidote, chlorite, garnet with magnetite, (b) Chlorite and epidote alteration in outcrop of Darbe Behesht area (Mgt: magnetite, Ep: epidote, Cal: calcite, Grs: grossular, Chl: chlorite), mineral abbreviations according to Whitney and Evans (2010).

چرخش آب‌های زیرزمینی و گرم شدن آنها در مجاورت توده‌های نفوذی باشد (Shelley, 1993). دگرسانی مهم دیگر در همراهی با کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه دگرسانی سیلیسی است که در بخش‌هایی سبب شده است تا بخش زیادی از سنگ تبدیل به سیلیس شود. از دیگر دگرسانی موجود دگرسانی سریسیتی است که در بخش‌هایی شدت دگرسانی سبب تشکیل بلورهای صفحه‌ای مسکویت شده است (شکل ۱۱). در بخش‌هایی در حاشیه رگه‌های کانه‌دار می‌توان شاهد وجود کائولن به صورت گسترده بود که این کانی رسی تحت‌تأثیر فرایند کانه‌زایی ایجاد شده است. در مناطق سطحی نیز تشکیل کانی‌های رسی قابل مشاهده است که این کانی‌ها به شکل عمده تحت‌تأثیر هیدرولیز ناشی از فرایند سوپرژن ایجاد شده‌اند.

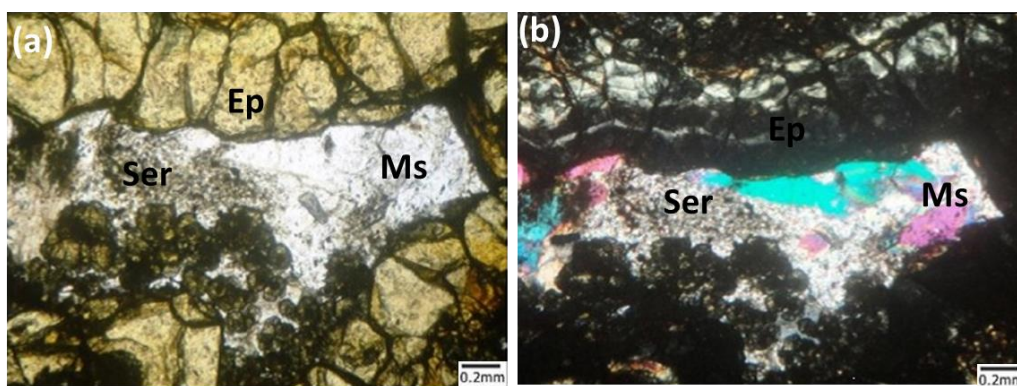
کلریت از دگرسانی پیروکسن حاصل شده است که در آن شکل اولیه بلورهای پیروکسن نیز باقی مانده است. کربنات و کوارتز بیشتر شکستگی‌ها و حفرات را پر می‌کنند. در دگرسانی کلریتی نسبت سیال به سنگ کم است و تمایل به ایزوشیمیایی بودن دارد و در پاسخ به متاسوماتیسم  $H^+$  تشکیل می‌شود (Ulrich and Heinrich, 2002). در بخش‌هایی که تنها می‌توان شاهد حضور کانه‌زایی مس به شکل مالاکیت و آزوریت بود آثاری از این دگرسانی‌ها مشاهده نمی‌شود. در اطراف رگه‌های کانه دار گسترش دگرسانی بین ۲ تا ۱۰ برابر قطر رگه اتفاق افتاده است که این امر در اطراف رگه‌های با دمای بالا طبیعی است. کربناتی شدن، در کمانی ماگمایی حاشیه قاره‌ها می‌تواند ناشی از



شکل ۱۰- (a) تصویر میکروسکوپی از گارنت و اپیدوت در بخش اسکارنی شده (XPL)، (b) تصویر میکروسکوپی از گارنت، اپیدوت، کلسیت و مگنتیت در بخش اسکارن، نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

Fig. 10. (a) Photomicrograph of garnet and epidote in skarn section, (b) Photomicrograph of garnet, epidote, calcite and magnetite in the skarn section. Mineral abbreviations according to Whitney and Evans (2010).





شکل ۱۱- دگرسانی اپیدوتی، سریستی و مسکوویت در مجاورت رگه‌های حاوی آهن (a) نور XPL و (b) نور PPL. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

Fig. 11. Epidotization, sericitization and muscovite in the vicinity of iron-bearing veins (a) XPL and (b) PPL. Mineral abbreviations according to Whitney and Evans (2010).

سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-تخریبی منطقه مشاهده می‌گردد. بررسی‌ها در محدوده معدنی آهن-مس درب بهشت نشانگر وجود دو ژئومتری متفاوت می‌باشد. در این منطقه رخداد کانه‌زایی آهن به شکل قطع کننده لایه‌بندی و همچنین به صورت هم‌روند با آن دیده می‌شود. اشکال قطع کننده لایه‌بندی بدون شک رخداد کانه‌زایی آهن را به صورت اپی‌ژنتیک و پس از سنگ میزبان نشان می‌دهند (شکل ۱۲).

### ژئومتری کانه‌زایی

در محدوده معدنی آهن-مس درب بهشت ترکیب عمده سنگ‌های میزبان کانه‌زایی آندزیت تا بازالت می‌باشد. بایستی توجه داشت که سنگ‌های توف فلسیک نیز همراه با کانه‌زایی دیده شده‌اند و رخداد توده نفوذی نیز دارای اهمیت زیادی می‌باشد. کانه‌زایی محدود به واحدی خاص نبوده و در تمام



شکل ۱۲- رگه‌های مغنتیت همراه با دگرسانی اپیدوتی در واحدی که لایه‌بندی را قطع نموده است.

Fig. 12. Magnetite veins along with epidotization in the unit that cuts the layering the rock unit.

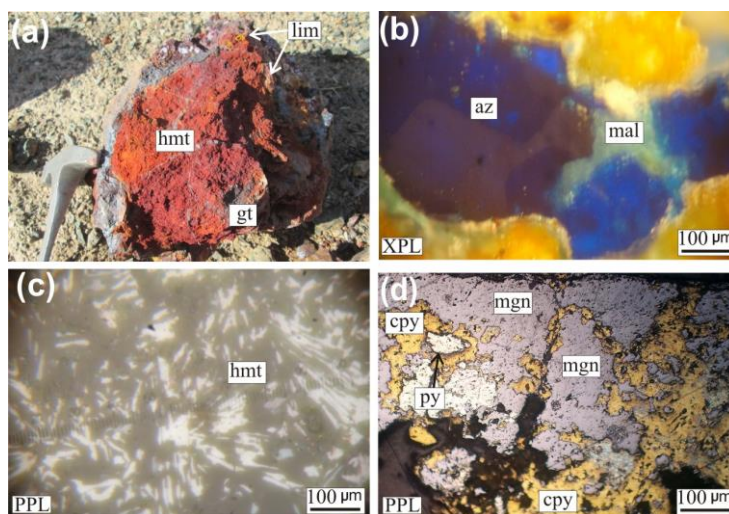
شکل گسترده مشاهده می‌شود. رگه‌های کانه‌دار در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها و نقاط ضعف سنگ‌ها تزریق شده‌اند. همچنین در بخش‌های مختلف به شکل گسترده کانه‌زایی آهن در امتداد و هم‌روند با توالی سنگی اتفاق افتاده است. این کانه‌زایی نیز به دلیل وجود دگرسانی‌های گسترده در اطراف آن به احتمال زیاد از نوع اپی‌ژنتیک می‌باشد. بایستی توجه داشت در بخش‌های زیادی از محدوده مطالعاتی می‌توان شاهد وجود رگه‌های مالاکیت و آزوریت بود که به شکل ثانویه و تأخیری تحت تأثیر رخداد فرایند سوپرژن ایجاد شده‌اند. این رگه‌ها تحت تأثیر تمرکز مجدد اکسیدهای مس در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها ایجاد شده‌اند. نکته قابل توجه این است که رگه‌های حاوی کانی‌های ثانویه مس یعنی مالاکیت و آزوریت رگه‌های حاوی مغنتیت را قطع نموده‌اند.

اشکالی که دارای ژئومتری هم‌روند با لایه‌بندی هستند نیز با توجه به رخداد دگرسانی‌های گسترده در مرز آنها با واحدهای سنگی کمر بالا و کمر پایین به طور حتم به شکل اپی‌ژنتیک و تنها به دلیل وجود نقطه ضعف در مرز لایه‌بندی واحدهای سنگی در این بخش‌ها تزریق شده‌اند. در کانسار درب بهشت گسل-های با روند مختلف وجود دارد؛ با این وجود بیشتر گسل‌ها دارای روند شمال-شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق هستند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته کلیه زون‌های کانه‌دار به طور عمده دارای روند شمال-شرق-جنوب‌غرب هستند. کانه‌زایی در منطقه معدنی آهن-مس درب بهشت به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و همچنین هم‌روند با لایه‌بندی رخ داده است. رگه‌های حاوی کانه‌زایی دارای ضخامت‌های متفاوت (از چند سانتی متر تا چند متر) و گسترش طولی زیاد (از چند متر تا چند ده متر) هستند. این رگه‌ها حاوی کانه‌زایی اولیه آهن-مس بوده و در اطراف آنها رخداد دگرسانی به

**کانی‌شناسی، ساخت و بافت**

است و پس از آن کانه‌زایی سولفیدی مس به صورت کالکوپیریت و پیریت ایجاد شده است. در بخش‌های مختلف کنسار گسترش کانه‌های مس و آهن متفاوت بوده و از فراوانی‌های متفاوتی برخوردارند به نحوی که در بخش‌های کمی کانی‌های مس‌دار گسترش بیشتری داشته و در بخش‌هایی کانی‌های آهن‌دار اهمیت پیدا کرده‌اند. فاز سوم در تشکیل کانی‌ها در منطقه مطالعاتی مرحله سوپرژن و هوازدگی می‌باشد که کانه‌زایی در امتداد غسل‌های عادی پس از فاز فشارشی تشکیل شده است. تأثیر آب‌های جوی و رخداد فرایند اکسایش موجب اکسید شدن کانه‌های سولفیدی اولیه به کانی‌های غیرسولفیدی شده است. در این فاز کانی‌های مالاکیت و آزوریت از کالکوپیریت و همچنین هماتیت و گوتیت و لیمونیت از مگنتیت حاصل شده‌اند (شکل ۱۳). این فاز به شکل قطع کننده مجموعه فازهای قبلی را تحت تأثیر قرارداده و رگه‌های آنها را قطع نموده است. در شکل ۱۴ توالی پاراژنزی کنسار درب بهشت نشان داده شده است.

مهم‌ترین فرایند در تشکیل هر کنسار نفوذ سنگ‌های منشأ، مهاجرت سیالات کانی‌ساز و ته‌نشینی کانی‌ها است. مهم‌ترین کانه با ارزش آهن در محدوده مطالعاتی مگنتیت بوده که در بخش‌هایی توسط رگه‌های کالکوپیریت و پیریت قطع شده است (شکل ۱۳). کانه‌های ثانویه حاصل از هوازدگی، گوتیت، هماتیت، لیمونیت، سیدریت، لپیدوکروسیت، اکسیدهای منگنز، مالاکیت و آزوریت هستند (شکل ۱۳). ساخت و بافت غالب کانه‌زایی نیز رگه‌ای، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی می‌باشد. بر اساس ویژگی‌های بافتی مشاهده شده در مقاطع صیقلی در کنسار آهن-مس درب بهشت کانی کالکوپیریت به عنوان فاز تأخیری و قطع کننده مگنتیت مشاهده می‌شود. با توجه به این شرایط در کنسار درب بهشت تشکیل کالکوپیریت و رخداد کانه‌زایی مس را می‌توان مربوط به فاز دوم کانه‌زایی دانست (شکل ۱۳d). بدین صورت که در ابتدا کانه‌زایی اکسیدی آهن در مرحله پیشرونده اسکارن به شکل مگنتیت رخ داده



شکل ۱۳- (a) کانی‌های هماتیت، لیمونیت و گوتیت حاصل هوازدگی مگنتیت، (b) کانی‌های مالاکیت و آزوریت حاصل دگرسانی کالکوپیریت، (c) فرایند مارتیت‌شدن و تبدیل مگنتیت به هماتیت، (d) قطع شدن مگنتیت توسط رگه‌های کالکوپیریت و پیریت؛ Py: پیریت، Cpy: کالکوپیریت، Mgn: مگنتیت، mal: مالاکیت، az: آزوریت، hmt: هماتیت، lim: لیمونیت، gt: گوتیت. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans, 2010) برگرفته شده است.

Fig. 13. (a) Hematite, limonite and goethite due to weathering of magnetite, (b) Malachite and azurite that created by alteration of chalcopyrite, (c) Transformation of magnetite to hematite during martitization, (d) Magnetite cut by pyrite and chalcopyrite (Py: pyrite; Cpy: chalcopyrite; Mgn: magnetite; mal: malachite; az: azurite, hmt: Hematite; lim: limonite; gt: goethite). Mineral abbreviations according to Whitney and Evans (2010).

زیر دسته کنسارهای مرتبط با ماگماتیسیم کالک‌آلکانل و مرتبط با ماگماتیسیم آلکانل تقسیم شده‌اند (Gandhi, 2004).

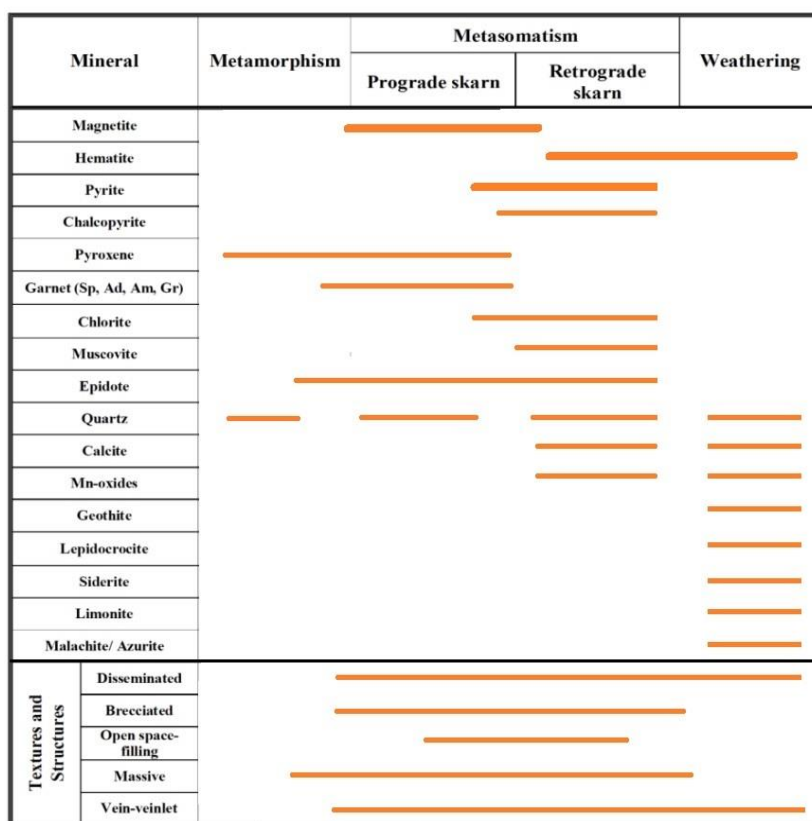
کنسارهای IOCG مرتبط با ماگماتیسیم کالک آلکانل عبارتند از (جدول ۳): کنسارهای آهن تیپ اسکارنی (Iron Skarn type)، کنسارهای آهن تیپ کایرونا (Kiruna type)، کنسارهای تیپ المپیک دم (Olympic Dam type) و کنسارهای آهن تیپ کلون کوری (Cloncurry type). با توجه به وجود سنگ‌های آتشفشانی و اسکارن در محدوده مورد مطالعه و بر طبق دسته‌بندی کنسارهای نوع IOCG می‌توان رخداد کانه‌زایی در این منطقه را از زیر مجموعه نزدیک منشأ مربوط به توده‌های کالک آلکانل کنسارهای IOCG، یعنی اسکارن آهن دانست.

**مقایسه با کنسارهای تیپ IOCG در ایران**

بسیاری از این کانه‌زایی‌ها دارای سن ائوسن هستند و کنسار آهن-مس درب بهشت بیشترین شباهت را با کنسار آهن شمال سمنان نشان می‌دهد (جدول ۴).

**تعیین زایش کانه‌زایی آهن-مس درب بهشت**

جهت بررسی تیپ کانه‌زایی آهن-مس درب بهشت خصوصیات این محدوده با خصوصیات مربوط به تیپ‌های مختلف کانه‌زایی آهن در دنیا مقایسه شده است. کنسارهای آهن در دنیا به دو شکل متفاوت یعنی سین‌ژنتیک و اپی‌ژنتیک تقسیم شده‌اند (جدول ۳). بر اساس جدول ۳ می‌توان رخداد کانه‌زایی آهن-مس در محدوده معدنی درب بهشت را از نوع کانه‌زایی مرتبط با فرآیندهای اپی‌ژنتیک دانست. این فرآیندها حاصل رخداد توده نفوذی در واحدهای سنگی میزبان و تأثیر سیالات کانه‌ساز حاصل از آنها بر سنگ میزبان می‌باشد که منجر به تشکیل کنسارهای آهن شده است. کنسارهای اپی‌ژنتیک آهن خود به دسته‌های متعددی تقسیم می‌شوند که در ادامه تقسیمات مربوط به کنسارهای تیپ IOCG بررسی شده است: کنسارهای تیپ IOCG به دو



شکل ۱۴- توالی پاراژنزی کانی سازی آهن - مس در کانسار درب بهشت.

Fig. 14. Paragenetic sequence of mineralization at Darbe Behesht iron-copper deposit.

جدول ۳- تقسیم‌بندی کانسارهای اکسید آهن ماگماتیکی- هیدروترمالی و کانسارهای مس - طلائی وابسته (Gandhi, 2004).

Table 3. Classification of magmatic-hydrothermal iron oxide deposits and copper-gold dependent deposits (Gandhi, 2004).

Calc-alkaline magma			
Iron Skarn-type	Kiruna-type	Olympic Dam-type	Cloncurry-type
Massive magnetite garnet-pyroxene	Massive magnetite apatite actinolite	Breccia (one or more stages), magnetitehematite	Hydrothermal veins & disseminations in older
Stratabound lensoid & irregular bodies at	Tabular, pipe-like & irregular bodies,	Pipe-like & irregular bodies, vent or fault	Stratabound, breccia or fault controlled
Monometallic Fe and related FeOx-Cu-Au	Monometallic Fe & related Cu-FeOx	Polymetallic: Fe, Cu, Au, Ag, REE	Polymetallic: Cu, Au, Ag, Bi, Co, W
Alteration: Sodic	Alteration: Sodic	Alteration: Potassic	Alteration: Potassic
Magnitogorsk deposit, Russia	Kiirunavaara deposit, Sweden	Olympic Dam deposit, Australia	Osborne & Starra deposits, Australia
Alkaline-carbonatite magma			
Phalaborwa-type		Bayan Obo-type	
Within or marginal to intrusion		Hosted by country rock	
Veins, layers, disseminations and aggregates, late intrusive phase		Veins, layers, disseminations and aggregates, stratabound lenses	
Low Ti magnetite, apatite, olivine, phlogopite, carbonate, fluorite, Cu sulphides, pyrite, PGE, Au,		Magnetite (replacive and/or pre existing), hematite, bastnaesite, phlogopite, Fe-Ti-Cr-Nb	
Zoning in ore; Na & K alteration		Zoning in ore; Na & K alteration	
Phalaborwa deposit, South Africa		Bayan Obo deposit, China	



**نتیجه گیری**

سنگ‌های آتشفشانی کانسار آهن-مس به سن ائوسن شامل تناوبی از گدازه‌ها و مواد آذرآواری هستند که بر مبنای شاخص‌های زمین‌شیمیایی جزء سری آلکانل-کالک‌آلکانل محسوب می‌شوند و دارای ماهیت متالومین تا پراآلومین هستند. نسبت  $Zr/Y$  نشان می‌دهد که سنگ‌های مذکور مربوط به قوس‌های

ماگمایی قاره‌ای می‌باشند. تهی‌شدگی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) نشانه آغشتگی پوسته در فرآیندهای ماگمایی و آلودگی توسط پوسته می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی منطقه درب بهشت، دگرسانی گرمایی را تحمل کرده‌اند.

جدول ۴- مقایسه ویژگی‌های کانسار درب بهشت با سایر کانسارهای مشابه در ایران.

Table 4. Comparison of Darbe Behesht deposit characteristics with other similar deposits in Iran.

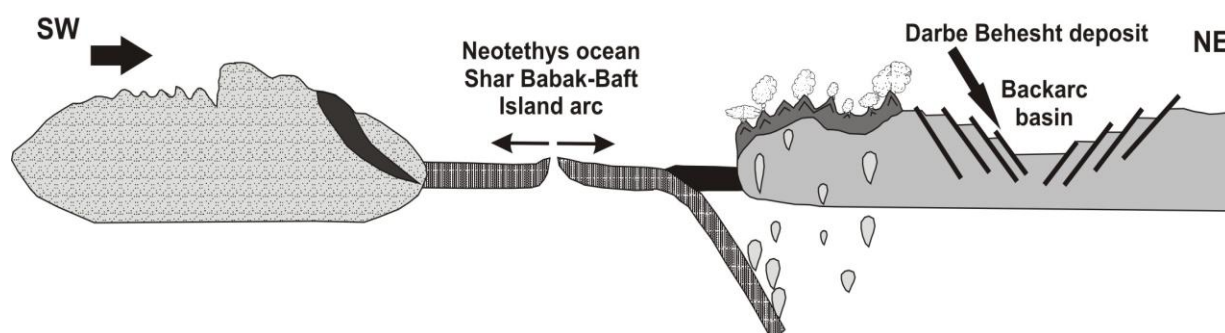
Darbe Behesht	Khosroabad	Tikme dash	Sangan	Galali	North Semnan	Golgohar	Deposit
56 km from Jiroft city in Kerman	40 km northeast of Songor	30 km southeast of Tabriz	250 km south of Mashhad	60 km northwest of Hamedan	15 km northeast of Semnan	50 km southwest of Sirjan	Location
Urumieh-Dokhtar	Sanandaj	Northwest zone	East of Iran	Sanandaj	South of Alborz zone	Sanandaj-Sirjan	Structural zone
Eocene	Oligo-Miocene	Oligocene	Eocene-Oligocene	Eocene-Oligocene	Eocene	Paleozoic	Mineralizing age
Andesite - basaltic and Eocene degradation	Lime, basaltic andesite	Calcareous tuff and rhyolite and Oligocene dacite	Lime, dolomite, volcanic, shale	Jurassic-Cretaceous schist and limestone sericite	Andesite-dacite	Gneiss, schist, amphibolite	Host rock
False streaks and layers	Lens and amorphous	Lens, vein and massive	Lens (scattered, vein)	Lens	Small, streaked, dyke-like masses	Layered, lens	Ore geometry
Magnetite, hematite, chalcopyrite, garnet, epidote	Magnetite, (hematite, limonite), garnet, epidote, diopside	Hematite, pyrite, chalcopyrite, garnet, clinopyroxene	Magnetite, (hematite, pyrite) diopside, amphibole, garnet	Magnetite, (pyrite)	Magnetite, hematite, pyrite, garnet, diopside	Magnetite, pyrrhotite, phlogopite, forsterite	Paragenesis
Chloritization, silicification, epidotization	Epidotization, chloritization, argillic, hematitization	Epidotization pyroxenization	Hematitization	Hematitization	Epidote, argillic	Epidote, siliceous, chlorite, serpentine	Alteration
Granodiorite	Granite	Gabbrodiorite	Gabbro, diorite, granite	Diorite, granodiorite	Monzonite	Diorite	Intrusive mass
Lithology and structural factors	Lithology	Lithology	Lithology and structural factors	Lithology and structural factors	structural factors	Lithology	Controlling factors
Current study	Motevalli (2005)	Karimzade et al. (2002)	Jafarzadeh et al. (1995)	Jafarzadeh et al. (1995)	Jafarzadeh et al. (1995)	Hallaji (1992)	References

آبدار (شامل آمفیبول و کمتر بیوتیت) می‌باشد و همچنین وجود زون اسکارن حاصل از سیالات ماگمایی می‌توان رخداد کانه‌زایی را مرتبط با تزریق توده نفوذی گرانودیوریت به داخل واحدهای سنگی موجود در منطقه دانست. جریان یافتن سیالات در میان گسل‌ها، شکستگی‌ها و نقاط ضعف حد فاصل واحدهای سنگی سبب رخداد کانه‌زایی در روندهای مشخص شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در کانسار درب بهشت می‌توان رخداد دو فاز مختلف کانه‌زایی، یک فاز کانه‌زایی هیپوزن و یک فاز کانه‌زایی سوپرزن را در نظر گرفت. ترتیب احتمالی تشکیل کانی‌ها در این محدوده معدنی مشابه با سایر کانسارهای تیپ IOCG و رده اسکارن‌های آهن-مس قابل تطبیق است. در ابتدا با تزریق

مهم‌ترین مجموعه دگرسانی شناسایی شده از نظر ارتباط با تیپ کانه‌زایی آهن در این منطقه، اسکارنی شدن می‌باشد. نکته دیگر اینکه در کانسار درب بهشت کانه‌زایی محدود به واحدی خاص نبوده و در تمام سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی-تخریبی منطقه مشاهده می‌گردد. مهم‌ترین کانی با ارزش آهن در محدوده مطالعاتی مگنتیت بوده که در بخش‌هایی توسط رگه‌های کالکوپیریت و پیریت قطع شده است. کانی‌های ثانویه حاصل از هوازدگی نیز گوتیت، هماتیت، لیمونیت، مالاکیت و آزوریت هستند. ساخت و بافت کانه‌زایی اغلب بصورت رگه‌ای، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی می‌باشند. وجود توده نفوذی با ترکیب گرانودیوریت در محدوده مطالعاتی که دارای مقادیر فراوان کانی‌های مافیک

تحت تأثیر بالا آمدگی و بروززدگی سنگ‌های منطقه ایجاد شده است. در این مرحله طی بالا آمدگی واحدهای سنگی و کانه‌زایی در معرض سیالات جوی دما پایین قرار گرفته‌اند. این سیالات سبب شست و شوی مس از سولفیدهای آن و ته‌نشست آن به شکل مالاکیت و آزوریت در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های موجود شده است. مقایسه ویژگی‌های کانه‌زایی آهن از قبیل سنگ‌میزبان، جایگاه زمین‌ساختی، پاراژنز کانیاپی، بافت ماده معدنی و محصولات دگرسانی با کانسارهای مختلف نشان می‌دهد که با توجه به وجود اسکارن در محدوده مورد مطالعه و بر طبق دسته‌بندی کانسارهای نوع IOCG می‌توان رخداد کانه‌زایی در منطقه درب بهشت را از زیرمجموعه پروکسیمال مربوط به توده‌های کالک آلکان کانسارهای IOCG، یعنی اسکارن آهن دانست.

توده نفوذی رخداد دگرگونی مجاورتی در عمق ایجاد می‌شود. با آغاز تبلور توده نفوذی سیالات کانه‌دار از این توده جدا شده و به داخل شکستگی‌های موجود در سنگ‌های اطراف و گسل‌های دارای روندهای مشابه که در زمان تزریق توده نفوذی حضور داشته‌اند، وارد شده‌اند. همچنین در نقاط ضعف حدفصل لایه‌بندی سنگ‌ها نیز تزریق سیالات دمای بالا اتفاق افتاده است (فاز رفت سیالات). این سیالات سبب تشکیل اسکارن و رخداد کانه‌زایی به صورت مگنتیت شده‌اند. در فاز بعدی با کاهش دمای سیستم و ورود سیالات جوی کانی‌های سولفیدی در شکستگی‌ها و فضاهای خالی سنگ و یا بلورهای مگنتیت ته‌نشین شده‌اند (فاز برگشت). در این فاز رخداد کانه‌زایی سولفیدی به شکل قطع‌کننده کانه‌زایی اکسیدی آهن اتفاق افتاده است. فاز سوم کانه‌زایی



شکل ۱۵. مدل شماتیک ترسیم شده از جایگاه ساختاری احتمالی برای رخداد کانه‌زایی آهن-مس در کانسار درب بهشت.

Fig. 15. Schematic model drawing of the possible tectonic setting for Fe-Cu mineralization in the Darbe Behesht deposit.

## منابع

- Abolipour, M., Rastad, E., Rashidnejad Omran, N., 2015. Manto-Type Copper Mineralization in Pyrobitumen-Bearing Porphyritic Andesite, Koshkoiye District of Rafsanjan, Dehaj-Sardoie Subzone. *Geosciences* 24, 123-144.
- Aghanabati, A. 2004. *The Geology of Iran*, Geological Survey of Iran, Tehran, p.586.
- Aliani, F., Alirezaei, A., Moradian, A., Abbasloo, Z., 2009. Geochemistry and petrography of Meiduk copper deposit's host volcanic rocks – Kerman. *Iranian society of crystallography and mineralogy* 3, 449-462.
- Alimohammadi, M., Alirezaei, S., Kontak, D., 2015. Application of ASTER data for exploration of porphyry copper deposits: A case study of Daraloo-Sarmeshk area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews* 70, 290-304.
- Barton, M.D., Johnson, D.A., 2000. Alternative brine sources for Fe-oxide (Cu-Au) systems: Implications for hydrothermal alteration and metals. In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective*. Glenside, SA: Australian Mineral Foundation, pp. 43-60.
- Barton, M.D., 2014. *Iron Oxide (Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems*, Elsevier Ltd. All rights reserved. University of Arizona, Tucson, USA.
- Bas, L., Maitre, L., Streckeisen and Zanettin., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal Petrology* 27 (3), 375- 750.
- Chappell, B.W., 1992. I and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences* 83, 1-26.
- Corriveau, L., Williams, P. J., Mumin, H., 2010. Alteration vectors to IOCG mineralization from uncharted terranes to deposits. In: Corriveau, L. and Mumin, A. H. (Eds), *Exploring for iron oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 89-110.
- Eftekhari Nezhad, J., Aghanabati, A., 1993. Geological map of Bam, scale 1:250,000, Geological Survey of Iran. No. J 11.
- Gandhi, S.S., 2004. Magmatic-hydrothermal Fe oxide±Cu±Au deposits: classification for a digital database and an overview of selected districts", IAVCEI General Assembly 2004, Pucn, Chile.
- Ghanei Ardakani, J., Mehdizadeh Shahri, H., Darvishzadah, A., Makizade, M., 2014. Studies of magmatic evolution and petrogenesis of the granitoid bodies of Yazd. *Petrology* 4, 87-104.
- Ghayed amini, M., Bagheri, H., Asadi harouni, H., Mokhtari, E., Ayati, F., 2014. Evaluation of geological-geochemical data of Alishar copper index to determine mineralization pattern and type. *Scientific Journal- Research in Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 7, 51- 68.

- Gill, J.B., 1981. *Orogenic Andesite and Plate Tectonics*, Springer, Berlin, 389 p.
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., Itzman N. W., 2010. Iron oxide copper- gold (IOCG) deposits through earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology* 105, 641-656.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Ries, A.C. (Ed.), *Geological Society London, Special Publication* 19, 67-81.
- Hodai Koushak, H., Rostami Paydar, Gh., 2015. Study of IOCG Iron mineralization in Darbe Behesht Area, Kerman, Second National Conference on Geology and Resources Exploration, 6p.
- Houa, L., Jun, D., Hui-juan, P., 2015. Geology, geochronology, and geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit of the Kangdian region of SW China: Evidence for a Paleo-Mesoproterozoic tectono-magmatic event and associated IOCG systems in the western Yangtze Block. *Journal of Asian Earth Sciences* 103, 129-149.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 235-458.
- Ishizuka, O., Yuasa, M., Tamura, Y., Shukuno, H., Stern, R. J., Naka, J., Joshima, M., Taylor, R. N., 2010. Migrating shoshonitic magmatism tracks Izu-Bonin-Mariana intra-oceanic arc rift propagation. *Earth and Planetary Science Letters* 294, 111-122.
- Jafarzadeh, A., Ghorbani, M., Pezeshkpour, M., 1995. Iron ore deposits, geology of Iran, book development plan. *Geological Survey of Iran*.
- Kamber, B.S., Ewart, A., Collerson, K.D., Bruce, M.C. and McDonald, G.D., 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 144, 38-56.
- Kampunzu, A. B., Tembo, F., Matheis, G., Kapenda, D., Huntsman-Mapila, P., 2000. Geochemistry and Tectonic Setting of Mafic Igneous Units in the Neoproterozoic Katangan Basin, Central Africa: Implications for Rodinia Break-up. *Gondwana Research* 2, 125-153.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Esphandiari pour, A., Mohammad Nejad, H., 2012. Neyshabour turquoise mine: the first Iron Oxide Cu-Au-U-LREE (IOCG) mineralized system in Iran. *Journal of Economic Geology* 2, 193-216.
- Karimzadeh Somarin, A., Moayyed, M., 2002. Granite- and gabbro diorite associated skarn deposits of NW Iran. *Ore Geology Reviews* 20, 301-321.
- Kun, S., Zhi, Z., Xiao-Chun, L., 2016. Using elemental and boron isotopic compositions of tourmaline to trace fluid evolutions of IOCG systems: The world class Dahongshan Fe-Cu deposit in SW China. *Chemical Geology* 44, 265-279.
- Kuster, D., Harms, U., 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the Late Neoproterozoic East African Orogen. A review 45, 177-195.
- Luhr, J.F., 1997. Extensional tectonics and the diverse primitive volcanic rocks in the western Mexican Volcanic Belt. *Canadian Mineralogy* 35, 473-500.
- Mirzababaei, G., Shahabpour, J., Zarasvandi, A., Hayatolghayb, S.M., 2016. Structural Controls on Cu Metallogenesis in the Dehaj Area, Kerman Porphyry Copper Belt, Iran: A Remote Sensing Perspective. *Journal of Sciences* 27, 253-267.
- Morata, D., Aguirre, L., 2003. Extensional lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29° 20' -30° S, Chile: geochemistry and petrogenesis). *Journal of South American Earth Sciences* 16, 459-476.
- Motevalli, K., Ghaderi, M., Rashid nejad Omran, N. A., 2005. Mineralogy, geochemistry and origin of Khosrow Abad and Tekye bala iron deposits in Northeast of Songor. MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- Muller, D., Groves, D.I., 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 235 p.
- Nakamura, K., 1977. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation -Principle and proposal, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2, 1-16.
- Pearce, J. A., Stern, R. J., 2006. The origin of back-arc basin magmas: trace element and isotope perspectives. *Geophysical Monograph Series* 166, 63-86.
- Pearce, J.A., 1983. Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J. and Nurry, M.L. (Ed.), *Continental basalts and mantle xenoliths*, Shiva, Nantwich, pp. 230-249.
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69, 33-47.
- Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 23, 251-285.
- Pollard, P.J., 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces. *Mineralium Deposita* 41, 179-187.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., 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 and western Pakistan. *Economic Geology* 107, 295-332.
- Rollinson, H., 1998. *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*, Longman, Singapore, 446 p.
- Shafiei, B., 2010. Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran, and their magmatic-metallogenetic implications). *Ore Geology Reviews* 38, 27-36.

- Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44, 265–283.
- Shafiei, B., Shahabpour, J., 2008. Gold distribution in porphyry copperdeposits of Kerman region, Southeastern Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 19, 247–260.
- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Asian Earth Sciences* 24, 405–417.
- Shand, S.J., 1943. Eruptive rocks, their genesis, composition classification and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite, New York, 488 p.
- Shelley, D., 1993. Igneous and metamorphic rocks under the microscope. Chapman and Hall, London, 445 p.
- Sillitoe R. H., 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* 38, 787-812.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists* 52, 1229–1258.
- Stosch, H. G., Romer, R. L., Daliran, F., Rhede, D., 2011. Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq district. East-Central Iran. *Mineralium Deposita* 46, 9-21.
- Taghipour, S., Kananian, A., Khalili, M., 2012. Sodic-calcic alteration in the host rocks of the Esfordi magnetite-apatite deposit. *Petrology* 4, 76-80.
- Tosdal, R., Munizaga, F., 2003. Lead sources in Mesozoic and Cenozoic Andean ore deposits, north-central Chile (30-34°S), *Mineralium Deposita* 38, 234-250
- Ulrich, T., Heinrich, C.A., 2002. Geology and alteration geochemistry of the Porphyry Cu-Au Deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology* 97, 1865-1888.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.
- Williams, P.J., 2010. Classifying IOCG Deposits, Short Course Notes Canada. Geological Association of Canada 20, 23–38.
- Williams, P.J., Kendrick, M. A., Xavier, R.P., 2010. Sources of ore fluid components in IOCG deposits. In: Porter, T.M., (ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: a global perspective - advances in the understanding of IOCG deposits. Global Perspective Series, 3. PGC Publishing, Linden Park, SA, Australia*, pp. 107-116.
- Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1977. Chemochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325-343.
- Wright, F.E., 1951. Computation of the optic axial angle from the three principal refractive indices. *American Mineralogist* 36, 543-556.

