



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Geology, petrography, remote sensing, mineralization and mineralogrophy of western part of the Saheb iron ore deposit, NE Saez

Farid Abdollahi¹, Ghasem Nabatian^{2*}, Maryam Honarmand³, Mohammad Ebrahimi⁴

1, 2, 4. Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

3. Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran.

Article info

Article history

Received: 14 March 2025

Accepted: 13 May 2025

Keywords:

skarn, Saheb, petrography, remote sensing, iron mineralization, Sanandaj-Sirjan, Saez.



Abstract

The Saheb skarn iron deposit is located about 16 km northwest of the Saheb district, in Saez city, Kurdistan Province. This area lies within the Sanandaj-Sirjan metamorphic-magmatic zone. The main rock units in the study area include dolomitic rocks of the Soltanieh Formation, Permian and Cretaceous limestones, shale and granitoid batholith. The Saheb batholith shows quartz monzodiorite, quartz monzonite and granite in composition. This batholith has intruded into Permian and Cretaceous sedimentary units during the Late Cretaceous-Early Palaeocene, causing contact metamorphism and skarnification. The contact metamorphism zone in the area includes endoskarn and exoskarn zones and garnet skarn, garnet pyroxene skarn, pyroxene skarn, epidote skarn, marble and mineralized skarn subzones. The Saheb iron mineralization has vein and lencoid-shape with a length of 20 to 100 m and a thickness of 3 to 10 m which formed within marble and hornfelsic units (exoskarn) and to a lesser extent in the intrusive mass (endoskarn). The ore bodies occur as massive, brecciated, open space filling, banded, vein-veinlet, disseminated and relict. Magnetite is the main ore mineral, which is accompanied by pyrite, chalcopyrite, and secondary minerals such as hematite, goethite, azurite, chalcocite, covellite and malachite. Garnet, pyroxene, epidote, actinolite, tremolite, calcite and quartz are present as the gangue minerals. According to the field and microscopic studies, epidotization, chloritization, sericitization, propylitization, and argillic alterations are the most extensive alterations in the mineralized area, respectively. Based on remote sensing studies, it can be stated that carbonate, sericitic and propylitic and gossan alterations are well developed in the region and in some cases, the alteration zones in the study area overlap with together. Field studies, mineralogical and textural features show that the Saheb iron mineralization is classified as a calcium-type skarn deposit.

Introduction

The Saheb iron deposit is located in northwest of Iran (Kurdistan Province). This deposit is situated approximately 16 km northeast of Saez city and is a part of the Sanandaj-Sirjan zone (SSZ) (Aghanabati, 2005). The SSZ is one of the most important zones of Iran, containing many of the main important types of metallic mineralization such as copper, lead, zinc, manganese, gold and iron (Ghorbani, 2013). There are several Au and Fe deposits reported from the northern part of the SSZ. The Saheb Fe deposit which occurs in the carbonate rock units adjacent to the intrusive bodies has been

little studied and its accurate identification could help in the exploration of further resources in the region. Thus, the detailed investigation of geological, mineralization, mineralogical, as well as the identification of different types of alteration zones and line structures in the Saheb area by remote sensing methods have the potential to facilitate additional advancements in this field.

Material and Methods

During several field studies, more than 150 samples were collected from granitoid intrusion, Permian and Cretaceous

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.103784>*Corresponding author: Ghasem Nabatian; E-mail: gh.nabatian@znu.ac.ir

How to cite this article: Abdollahi¹, F., Nabatian, G., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2025. Geology, petrography, remote sensing, mineralization and mineralogrophy of western part of the Saheb iron ore deposit, NE Saez. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(1), 1- 27. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.103784>



BY NC

rock units, skarn rocks and iron ore body. A total of 53 thin-polished, polished and thin sections were prepared to study the host rock, ore body and skarn mineralogy, ore body texture and paragenetic sequences of this deposit. Furthermore, to identify alteration zones in the Saheb iron deposit, we used the satellite images such as LANDSAT8 and ASTER imagery.

Geology of the study area

Based on geological map (Kholghi Khosraqi, 2000), and field studies in the Saheb deposit, the rock units at the Saheb deposit consist of Soltaniyeh Formation, Permian limestone (Ruteh Formation), Cretaceous limestones and shale units and Late Cretaceous to Early Paleocene intrusive bodies with composition of quartz monzonite to granite (Abdollahi et al., 2019). During the Late Cretaceous to Early Paleocene these intrusive bodies intruded within the Ruteh Formation and Cretaceous limestones and shales, resulting in the development of skarn haloes and mineralization within the region. Mineralization in the Saheb iron deposit formed as veins-veinlets and lencoid within the Permian and Cretaceous rocks. Magnetite is the most abundant iron ore mineral in this deposit, which associated with pyrite, chalcopyrite, hematite, goethite, malachite, azurite and chalcocite.

Results and Discussion

According to field and zircon U-Pb data (Abdollahi et al., 2019), the Saheb granitoid which crops out extensively over an area of c. 200 km², intruded into the Permian and Cretaceous sedimentary units during the Late Cretaceous-Early Paleocene. The Saheb batholith ranges in composition from quartz monzodiorite, quartz monzonite to granite. Various contents of plagioclase, amphibole, quartz, biotite and alkali-feldspar occurred in the igneous rocks of the Saheb batholith. The accessory minerals include titanite, zircon, apatite and opaque minerals. The intrusion of the Saheb batholith into carbonate sequences led to contact metamorphism and skarnification in the region, forming skarn Fe-mineralization. The contact metamorphism in the area is composed of endoskarn and exoskarn zones. Exoskarn zone is the main skarn zone and consists of several subzones,

including garnet skarn, pyroxene skarn, garnet pyroxene skarn, epidote skarn, hornfels and marble.

The Saheb iron mineralization exhibits both vein and lenticular shapes, with lengths ranging from 20 to 100 meters and thicknesses between 3 and 10 meters. The ore body is characterized by various forms, including massive, brecciated, open-space filling, banded, vein-veinlet disseminated, and relict structures. Magnetite occurred as the main ore mineral, typically found in association with pyrite, chalcopyrite, and various secondary minerals, including hematite, goethite, azurite, chalcocite, covellite, and malachite. Additionally, the gangue minerals identified in this context include garnet, pyroxene, epidote, actinolite, tremolite, calcite, and quartz. The garnet crystal size is about 1 to 4 cm. In some cases, garnets are found within a magnetite matrix and appear brecciated with the magnetite. Moreover, magnetite is sometimes observed in association with garnet, occurring in banded formations. The occurrence of malachite and azurite in the region suggests the existence of copper mineralization, predominantly found in locations characterized by fractures. As a result of supergene and weathering processes, magnetite has been transformed into hematite and goethite along fractures and crystal margins. Martitization is also visible in some magnetite crystals. The additional supergene minerals include malachite, azurite, chalcocite, covellite, and goethite resulted from pyrite and chalcopyrite weathering. Field and microscopic investigations indicate that epidotization, chloritization, sericitization, propylitization, and argillic alteration represent the most significant alteration observed in the mineralized region, in that order. Generally, mineralization at the Saheb Fe deposit has been carried out in several stages as follows: a) contact metamorphism associated with formation of garnet, pyroxene and marble in massive, banded and vein-veinlets forms, b) prograde metasomatism occurred via intrusion of magmatic fluids into the carbonate host fractures resulting in the formation of tremolite, actinolite, epidote, chlorite and magnetite, alongside garnet and pyroxene, in associated with replacement, breccia, open-space filling, banded, massive and vein-veinlets texture, c) retrograde metasomatism accompanied with low-temperature fluids activity and alteration of minerals formed in previous stage to

the chlorite, epidote, calcite, quartz and clay minerals and occurrence of main ore mineralization. This stage was followed by sulfide mineralization and carbonate veins cutting the Fe-ore minerals, d) Weathering and supergene processes, as the final stage, occurred due to the infiltration of meteoric fluids and formation of azurite, malachite, chalcocite, covellite, hematite and goethite with replacement and relict textures.

Remote sensing is considered as one of the emerging tools in the geological studies where the development of spatial imaging and its specific advantages has increased the usage of these images in Earth studies. Based on remote sensing studies, the carbonate, sericitic and propylitic and gossan alterations are well developed in the region and in some cases the alteration zones in the study area overlap with together.

Conclusions

Based on the mineralogic and textural studies it can be state that the iron mineralization in the Saheb area occurred during various stages including isochemical metamorphism, prograde metasomatism, retrograde metasomatism and also weathering. The current study shows that the Saheb deposit was formed during the Late Cretaceous-Early Paleocene due

to subduction of the Neotethys oceanic lithosphere beneath the Sanandaj-Sirjan magmatic- metamorphic zone. Field studies, mineralogical and textural features show that the Saheb iron mineralization is classified as calcium-type skarn deposit.

Acknowledgements

The authors are grateful to the authorities at the University of Zanjan for their financial support.

References

- Abdollahi, F., Nabatian, Gh., Li, J-W., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2019. Saheb Granitoid Batholith, North of Kurdistan; An Evidence of Cretaceous- Paleocene Magmatism in the Sanandaj-Sirjan Zone. *Journal of Economic Geology* 12(3), 359-376. (in Persian)
- Aghanabati, A., 2005. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran. 538 pp. (in Persian)
- Ghorbani, M., 2013. *The Economic Geology of Iran, Mineral Deposits and Natural Resources of Iran*. Springer Netherlands, 572 pp.
- Kholghi Khosraqi, M.H., 2000. Geological map of Chapan, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran. Tehran, Iran.

CRediT authorship contribution statement

 Farid Abdollahi	Conceptualization, Software, Investigation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
 Ghasem Nabatian	Conceptualization, Software, Methodology, Investigation, Writing -Original Draft, Writing - Review & Editing
 Maryam Honarmand	Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing -Original Draft, Writing - Review & Editing
 Mohammad Ebrahimi	Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - Original Draft, Writing -Review & Editing



زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، دورسنجی، کانه‌زایی و کانه‌نگاری بخش غربی کانسار آهن صاحب، شمال شرق سقز

فرید عبدللهی^۱، قاسم نباتیان^{۲*}، مریم هنرمند^۳، محمد ابراهیمی^۴

۱، ۲، ۴. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۳. دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳	کانسار آهن اسکارن صاحب در حدود ۱۶ کیلومتری شمال غربی بخش صاحب، در شهرستان سقز، استان کردستان واقع شده است. این منطقه در پهنه دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان قرار دارد. واحدهای سنگی اصلی در منطقه مورد مطالعه شامل سنگ‌های دولومیتی سازند سلطانیه، سنگ آهک‌های پرمین و کرتاسه، شیل و باتولیت گرانیتوئیدی است. باتولیت صاحب از نظر ترکیب شامل کوارتز مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت و گرانیت است. این باتولیت در اواخر کرتاسه-اوایل پالئوسن به داخل واحدهای رسوبی پرمین و کرتاسه نفوذ کرده و باعث دگرگونی مجاورتی و اسکارنی شدن شده است. پهنه دگرگونی مجاورتی در منطقه شامل پهنه‌های اندواسکارن و آگزواسکارن و زیرپهنه‌های گارنت اسکارن، گارنت پیروکسن اسکارن، پیروکسن اسکارن، اپیدوت اسکارن، مرمر و اسکارن کانه‌دار است. کانی‌سازی آهن صاحب به شکل رگه‌ای و عدسی شکل با طول ۲۰ تا ۱۰۰ متر و ضخامت ۳ تا ۱۰ متر در داخل واحدهای مرمر و هورنفلسی (آگزواسکارن) و به مقدار محدود در درون توده نفوذی (اندواسکارن) روی داده است. ماده معدنی به صورت توده‌ای، برشی، پرکننده فضای خالی، نواری، رگه-رگچه‌ای، دانه پراکنده و بازماندی تشکیل شده است. مگنتیت کانه اصلی این کانسار است که با پیریت، کالکوپریت و کانی‌های ثانویه مانند همتاتیت، گوتیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت همراه آن دیده می‌شوند. گارنت، پیروکسن، اپیدوت، اکتینولیت، ترمولیت، کلسیت و کوارتز به عنوان کانی‌های باطله در این کانسار به شمار می‌آیند. بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، به ترتیب دگرسانی‌های اپیدوتی، کلریتی، سریسیتی، پروپیلیتی و آرژیلیک، گسترده‌ترین دگرسانی‌ها در منطقه کانه‌دار هستند. بر اساس مطالعات دورسنجی می‌توان اظهار داشت که دگرسانی‌های کربناتی، سریسیتی و پروپیلیتیک و گوسان در منطقه به خوبی گسترش یافته و در برخی موارد، زون‌های دگرسانی در منطقه مورد مطالعه با یکدیگر همپوشانی دارند. مطالعات صحرایی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی نشان می‌دهد که کانی‌سازی آهن صاحب در رده‌ی کانسارهای اسکارن نوع کلسیم قرار می‌گیرد.



مقدمه

۱۷' ۳۶° عرض شمالی می‌باشد. مساحت بخش غربی آن در حدود یک کیلومتر مربع بوده که در بخشی از کوه سلطان واقع شده است. این کوه در جنوب روستاهای چاپان و چاغرلو و روبروی روستای متروکه یاپشخان می‌باشد. براساس تقسیمات محیط‌های تکتونیکی-رسوبی ایران (Aghanabati, 1998; Aghanabati, 2005; Alavi, 1994)، این کانسار در پهنه دگرگونی-ماگمایی، سنندج-سیرجان قرار دارد. این پهنه از دیدگاه فلززایی یکی از مهم‌ترین پهنه‌های ایران می‌باشد

کانسار آهن صاحب در ۱۶ کیلومتری شمال شرق شهر صاحب، از بخش‌های شهرستان سقز و در استان کردستان قرار دارد. این محدوده در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چاپان (Kholghi Khosraqi, 2000) و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ مهاباد (Eftekharneshad, 1977) قرار دارد. محدوده مورد مطالعه در شمال غرب ایران قرار دارد که محصور به مختصات جغرافیایی ۴۶°۳۳' تا ۴۶°۳۶' طول شرقی و ۳۶° ۱۶' تا

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.103784>

*نویسنده مسئول: قاسم نباتیان gh.nabatian@znu.ac.ir

استناد به این مقاله: عبدللهی، ف، نباتیان، ق، هنرمند، م، ابراهیمی، م. (۱۴۰۴). زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، دورسنجی، کانه‌زایی و کانه‌نگاری بخش غربی کانسار آهن صاحب، شمال شرق سقز. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۲۷. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.103784>



که خاستگاه انواع مهمی از کانه‌زایی‌های فلزی مس، سرب، روی، منگنز، طلا و آهن می‌باشد (Ghorbani, 2013). از کانسارهای مهمی که در این منطقه رخ داده‌اند، می‌توان به کانسار طلای کوه‌زایی کرویان (Heidari et al., 2006)، طلای قبعلوچه (Aliyari et al., 2012)، طلای باریکا (Yarmohammadi et al., 2008)، طلای قلقله (Aliyari et al., 2005)، آهن ظفرآباد (Barati and Gholipoor, 2014)، آهن دهگلان، آهن میمون آباد، آهن صاحب (Abdollahi, 2019; Abdollahi et al., 2019) و آهن غلام‌آباد (Tale Fazel, 2023) اشاره کرد. کانسار اسکارن صاحب در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ توسط شرکت ایتوک مورد بررسی قرار گرفت و این شرکت با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، ژئوشیمی و داده‌های حاصل از گمانه‌های حفاری به مطالعه این کانسار پرداخت و آن را جزء دسته آهن‌های با مقیاس کوچک (ذخیره در حدود ۳ میلیون تن) طبقه‌بندی کرد. عبداللهی و همکاران (Abdollahi et al., 2019) و عبداللهی (Abdollahi, 2019) بر روی کانه‌زایی آهن در بخش غربی کانسار صاحب به همراه سن‌سنجی توده گرانیوتئیدی صاحب، مطالعاتی را انجام داده‌اند. براساس مطالعات ایشان، سن ۵۸ تا ۶۷ میلیون سال برای توده گرانیوتئیدی صاحب بدست آمد. در این پژوهش به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، پتروگرافی توده نفوذی و سنگ‌میزبان، دورسنجی، کانه‌زایی و کانه‌نگاری بخش غربی کانسار اسکارن صاحب به همراه خاستگاه و تیپ کانه‌زایی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. مطالعه این کانسار و تعیین نوع کانه‌زایی می‌تواند به عنوان کلید توزیع مکانی و زمانی برای اکتشاف کانه‌زایی‌های مشابه در این بخش از پهنه سهندج- سیرجان مورد استفاده قرار گیرد.

زمین‌شناسی

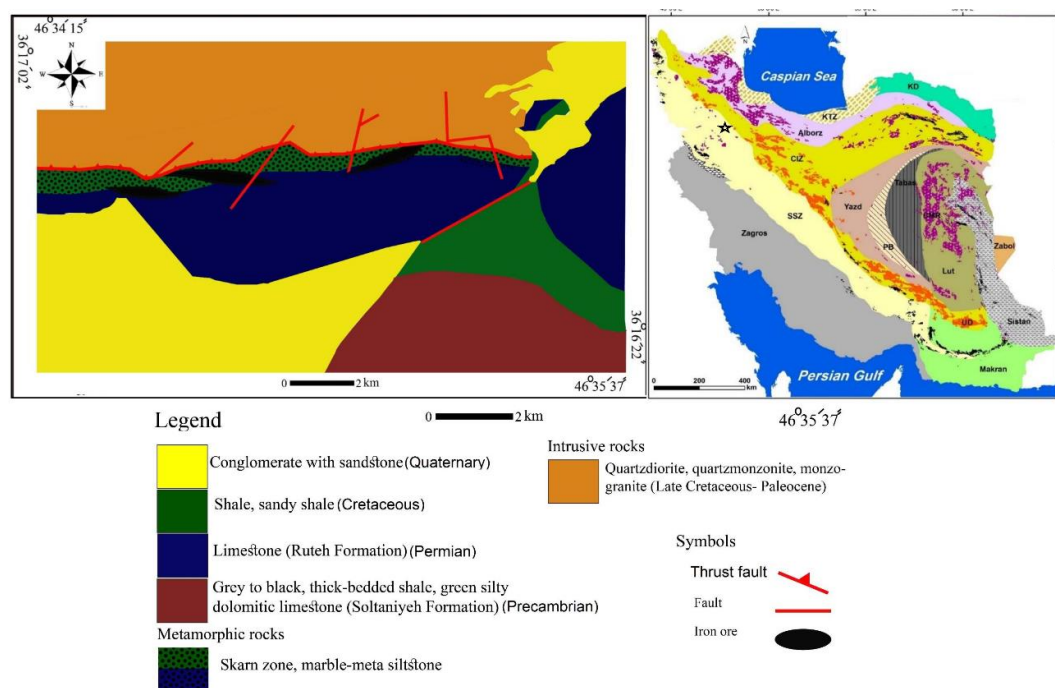
همانطور که قبلاً ذکر شد، منطقه مورد مطالعه در شرق شهرستان سقز در استان کردستان و در شمال‌غرب ایران قرار گرفته است. این محدوده از دیدگاه پهنه‌های زمین‌شناسی ایران در پهنه دگرگونی- ماگمایی سهندج- سیرجان قرار دارد. براساس نقشه زمین‌شناسی

۱:۵۰۰۰ تهیه شده از منطقه (شکل ۱) (Sohaili et al., 2001)، واحدهای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه شامل واحد کربناته مرمری شده به سن پرمین، واحد کربناتی و شیلی‌های هورنفلسی شده کرتاسه، باتولیت گرانیوتئیدی صاحب با محدوده سنی ۵۸ تا ۶۷ میلیون سال (Abdollahi et al., 2019; Abdollahi, 2019) و رسوبات عهد حاضر می‌باشد. در این کانسار در اثر فعالیت‌های تکتونیکی و گسل‌های تراستی واحدهای پرمین کمر بالای کانسار را تشکیل داده‌اند و واحد کرتاسه و توده نفوذی کمرپایین این کانسار را تشکیل داده‌اند. رخنمون واحد کربناته پرمین در ارتفاعات کوه سلطان در بالا دست کانسار موجود می‌باشد که مرز آن با رسوبات کرتاسه به صورت گسله می‌باشد (شکل ۲-ا). رسوب‌های پرمین در این منطقه شامل حدود ۱۱۰ متر ماسه-سنگ‌های کوارتزی سفید تا خاکستری، ماسه‌سنگ‌های قهوه‌ای و شیل-های ماسه‌ای سبز تا خاکستری ستبرلایه هستند. در این رسوبات هیچ گونه فسیل شاخصی دیده نمی‌شود. این نهشته‌ها از لحاظ موقعیت چینه‌نگاری هم‌ارز نهشته‌های سازند روته در البرز می‌باشند. در ضمن، عوامل دگرگونی و تکتونیکی باعث تبلور مجدد این واحد کربناته و تشکیل مرمر در بخش‌هایی از آن شده است (شکل ۲-ب). رخنمون واحدهای کرتاسه در منطقه مورد مطالعه گسترش زیادی دارند و شامل رسوب‌های آواری، قاره‌ای، دریایی و گدازه‌های آتشفشانی می‌باشند که با ناپیوستگی زاویه‌دار، نهشته‌های کهن‌تر را می‌پوشاند. قابل ذکر است که رخنمون واحدهای کرتاسه در منطقه مورد مطالعه بیشتر واحدهای شیلی و آهک‌های مارنی دگرگون شده‌اند که کانه‌زایی آهن نیز در داخل آنها روی داده است. کانه‌زایی در داخل رسوبات کرتاسه بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای بوده که گاه‌ها ضخامت رگه‌های آهن‌دار به ۳ متر می‌رسد (شکل ۲-ج). در مقیاس نمونه دستی این واحدها معمولاً به رنگ روشن دیده می‌شوند. این واحد بعد از باتولیت گرانیوتئیدی بیشترین رخنمون را در منطقه داشته و در مجاورت باتولیت گرانیوتئیدی به هورنفلس تبدیل شده است. توده نفوذی صاحب حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع گسترش دارد و در زمان ۵۸ تا ۶۷ میلیون سال پیش (Abdollahi et al., 2019; Abdollahi, 2019) به داخل واحدهای موجود در منطقه

صاحب تزریق شده است. این باتولیت از ۳ ترکیب کوارتز مونزونیت، کوارتز مونزودیوریت و گرانیت تشکیل شده که در واحدهای پرمین و کرتاسه نفوذ کرده و باعث ایجاد دگرگونی مجارتی و پدیده اسکارن‌زایی در واحدهای مذکور شده است. در مقیاس صحرایی و ماکروسکوپی این توده به رنگ روشن سفید متمایل به صورتی دیده می‌شود (شکل ۲-د) که می‌توان درشت‌بلورهایی از آلکالی فلدسپار را در آن مشاهده کرد. هم‌چنین این توده توسط یک سری دایک‌های دیابازی قطع شده است. رسوبات عهد حاضر موجود در منطقه که زمین‌های کشاورزی پایین دست کانسار را تشکیل می‌دهند، در اثر هوازدگی توده نفوذی موجود در منطقه تشکیل شده‌اند.

ناحیه مورد بررسی گسلش و شکستگی‌های پیچیده‌ای دارد. اثر جابجاشدگی‌ها، جایگزینی ماگما، فوران‌های آتشفشانی از فاکتورهای کنترل کننده شرایط رسوبگذاری منطقه هستند. درهم شدگی و

چندگانگی تکاپوهای زمین‌ساختی در چارچوب پدیده‌هایی چون جنبش‌های چرخشی، برشی و به احتمال جنبش‌های قائم‌بلوک‌ها، سبب پیدایش گسل‌های واژگون، نرمال، سیستم‌های متقاطع و تغییر شکل‌های ناشی از آن‌ها شده و فرصت‌های مناسب برای نفوذ یا فوران ماگما و گدازه‌های آتشفشانی بوجود آورده است. در منطقه مورد مطالعه یک سری گسل و شکستگی‌هایی در این ناحیه وجود دارند که بیشتر روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب دارند که از جمله آن می‌توان به گسل زیویه اشاره کرد. این گسل از مهمترین گسل‌های موجود در این ناحیه است که با شیب ۴۵ درجه به سمت شمال‌غرب از نوع گسل‌های معکوس بوده و ۲۶ کیلومتر طول دارد. با توجه به آنکه این گسل‌ها در اطراف ناحیه معدنی مشاهده می‌شوند می‌توان اظهار داشت که برخی از این گسل‌ها و شکستگی‌ها به عنوان معبری برای عبور سیالات کانه‌ساز در این منطقه نقش داشته‌اند.



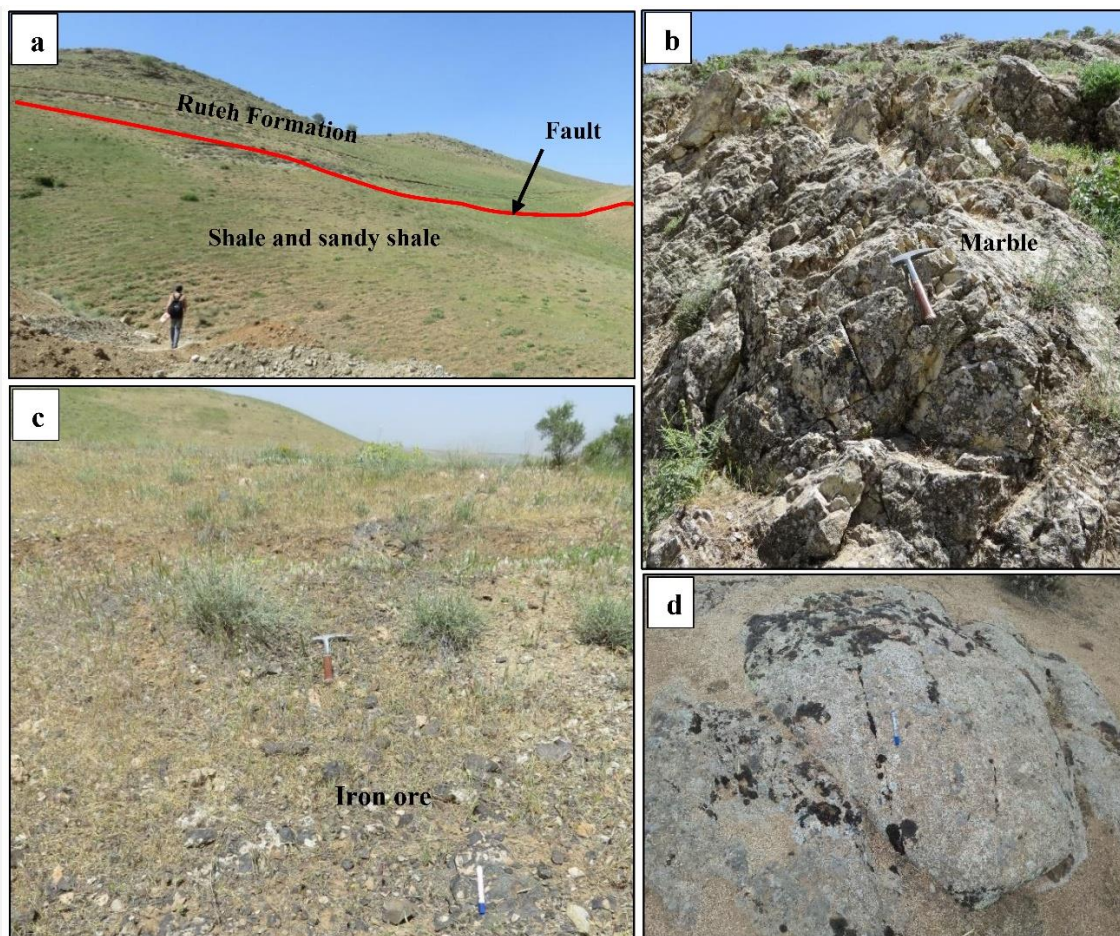
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار آهن صاحب (Soheili et al., 2001)، با اعمال تغییرات جزئی و نقشه زمین‌شناسی- ساختاری ایران که منطقه مورد مطالعه با علامت ستاره بر روی آن نشان داده شده است.

Fig. 1. Geological map of the Saheb iron deposit with scale 1:5000 (Soheili et al. 2001, with some modification) and the geological-structural map of Iran showing the location of the study area.

روش مطالعه

طی بازدیدهای صحرایی انجام شده، حدود ۱۵۰ نمونه سطحی از بخش‌های مختلف کانسار شامل واحدهای میزبان و توده نفوذی برداشته شده است. برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی تعداد ۱۳ مقطع نازک صیقلی، ۲ مقطع صیقلی و ۳۸ مقطع نازک از سنگ میزبان و بخش‌های کانه‌دار تهیه شد و توسط میکروسکوپ‌های Olympus و GX در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه زنجان مطالعه شدند. همچنین برای بررسی گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه از تصویر سنجنده Landsat-8 و برای بررسی دگرسانی‌های موجود در منطقه از

تصویر سنجنده ASTER استفاده شد. برای مطالعات دورسنجی از نرم‌افزارهای ENVI (5.6)، PCI Geomatica (SP2) و ARC GIS (10.3) استفاده شد. برای انجام پیش‌پردازش و تصحیح اتمسفری بر روی تصویر Landsat-8 از روش FLAASH و برای تصحیح اتمسفری تصویر سنجنده ASTER از روش IARR Reflectance استفاده گردید. به دلیل آنکه پوشش‌های گیاهی دارای طیف‌هایی مشابه با بعضی از دگرسانی‌ها هستند با ماسک کردن پوشش گیاهی موجود در منطقه مقدار بازتاب طیفی پوشش‌های گیاهی از نظر کمی و کیفی به صفر رسید تا مقدار خطا در نتایج به حداقل برسد.



شکل ۲- تصاویر صحرایی از واحدهای رخنمون یافته در کانسار آهن صاحب. (a) مرزگسله واحدهای سنگی پرمین و کرتاسه (جهت دید به سمت جنوب غرب) (b) نمایی از آهک‌های دگرگون شده در محدوده معدنی کانسار آهن صاحب (c) رگه کانه‌زایی آهن در شیل‌های هورنفلسی شده کرتاسه (جهت دید به سمت غرب) (d) نمایی نزدیک از توده گرانیتوئیدی صاحب.

Fig. 2. Field photographs of rock units in the Saheb iron deposit. a) Falut contact between the Permian and Cretaceous rocks units (View direction to the south west) b) View of metamorphosed limestone in the Saheb iron ore deposit c) Vein-type iron mineralization within the Cretaceous hornfelsic shales (View direction to the west) d) A close view of the Saheb granitoid.

صفر نزدیک باشند، نشان‌دهنده شباهت بالا هستند و بهترین

دورسنجی

نتیجه را در اختیار کاربر قرار می‌دهند (Kruse et al., 1985). براساس این روش، کانی کائولینیت با رنگ بنفش و با زاویه طیفی ۰/۵۳، کانی کلسیت با رنگ آبی فیروزه‌ای با زاویه طیفی ۰/۴۶، کانی کلریت با رنگ سبز و با زاویه طیفی ۰/۴۷، کانی هماتیت با رنگ قرمز و با زاویه طیفی ۰/۴ و کانی ترمولیت با رنگ زرد و با زاویه طیفی ۰/۴۸ در منطقه مورد مطالعه بارزسازی گردیدند (شکل ۳-ا).

فیلترینگ تطبیق‌یافته تنظیم اختلاط (MTMF)

این روش خود ترکیبی از ۲ روش آشکارساز خطی عدم اختلاط (Linear Spectral Unmixing) و مدل آماری فیلترینگ تطبیق یافته (Matched Filtering) می‌باشد. MTMF به صورت کلی روشی زیرپیکسلی است که با افزایش واکنش پدیده‌ی هدف و کاهش واکنش‌های پس‌زمینه سعی در بارز نمودن پدیده هدف دارد (Pour and Hashim, 2011) که با انجام این روش بر روی تصویر سنجنده ASTER از منطقه مورد مطالعه با استفاده از کتابخانه طیفی نرم‌افزار به بارزسازی اکسیدهای آهن موجود در منطقه و همچنین کانی‌های ترمولیت- اکتینولیت موجود در منطقه پرداخته شد. اکسیدهای آهن موجود در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳-ب به رنگ‌های سبز برای هماتیت و قرمز برای گوتیت بارزسازی شدند که پس از بارسازی نشان‌دهنده تجمع بیش از اندازه این کانی‌ها درون آبراهه‌های موجود در منطقه بود. این مطلب بیانگر آن است که کانی‌های اکسید آهن از

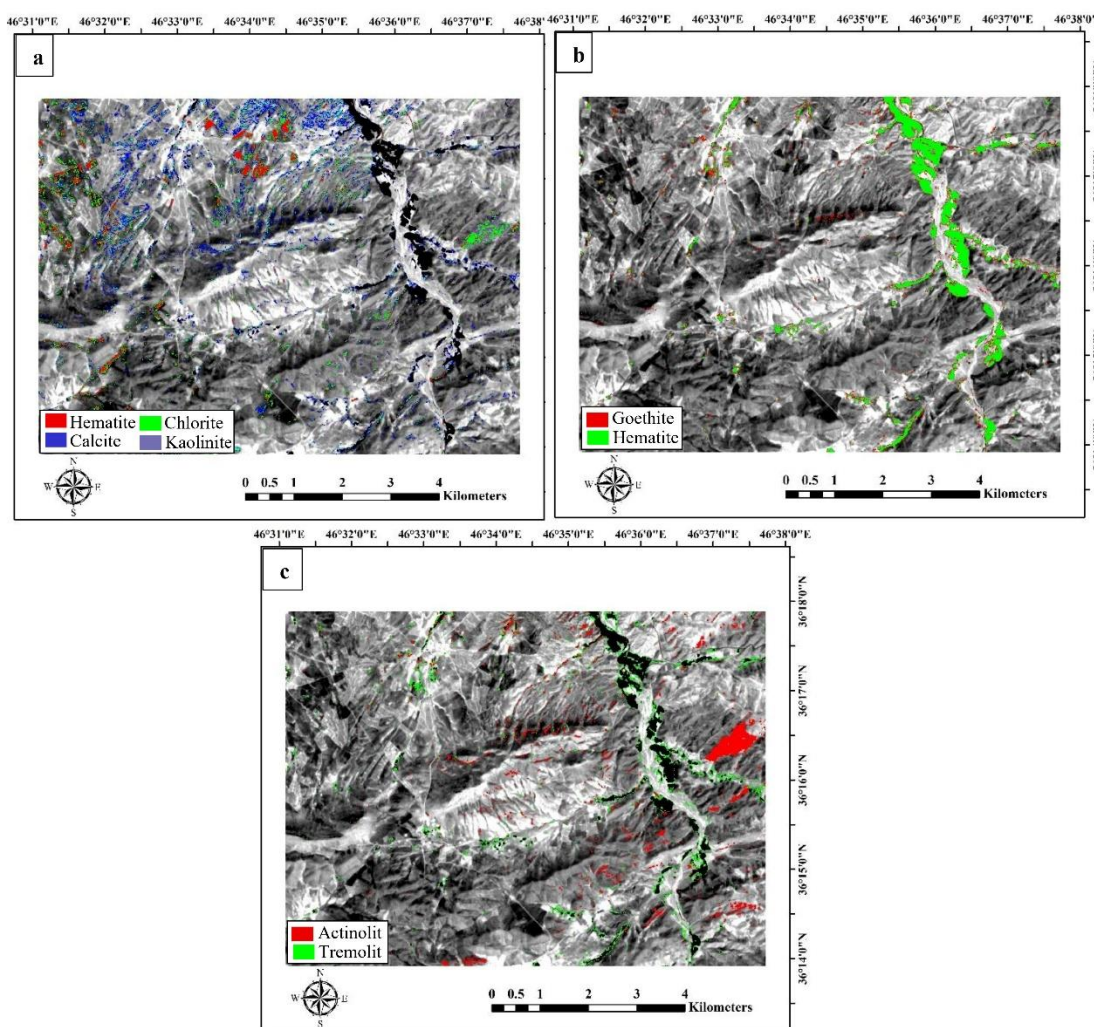
یکی از کاربردهای مطالعات دورسنجی تعیین زون‌های دگرسانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. روش‌های متفاوتی برای بارزسازی دگرسانی‌ها وجود دارد (Abrams et al., 1983; Aliani et al., 2015; Maanijou et al., 2019) که در این تحقیق از نقشه‌بردار زاویه طیفی (principal component analysis: SAM) و فیلترینگ تطبیق یافته تنظیم اختلاط (Mixture Tuned Matched Filtering: MTMF) استفاده شده است. مطالعات دورسنجی بر روی کانسار آهن صاحب با دو هدف شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه و همچنین شناسایی دگرسانی‌های موجود در این کانسار صورت گرفته است. در ادامه، مطالعات دورسنجی که به روش‌های مختلفی بر روی تصاویر ماهواره‌ای اعمال گردیده، به صورت جداگانه توضیح داده شده‌اند.

نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

روش نقشه‌برداری زاویه طیفی نوعی طبقه‌بندی نظارت شده می‌باشد که در این روش از مقایسه طیف تصاویر، طیف استاندارد و یا کتابخانه طیفی دیجیتالی سازمان زمین‌شناسی آمریکا موجود در نرم افزار ENVI (5.6) استفاده شده است. در این روش، شباهت بین طیف مرجع با طیف پیکسل بوسیله محاسبه زاویه بین ۲ طیف در فضای چند بعدی که به صورت ۲ بردار مشخص می‌شود، انجام می‌گیرد. این طیف‌ها به صورت بردارهایی در فضایی برابر با تعداد باندها در نظر گرفته می‌شوند. زوایایی که به

ترمولیت نیز در منطقه به ترتیب به رنگ‌های قرمز و سبز در منطقه بارزسازی گردیدند (شکل ۳-۲).

واحدهای اطراف از جمله بخش‌های کانه‌زایی شسته شده و در این بخش‌ها تجمع پیدا کرده‌اند. همچنین کانی‌های اکتینولیت و



شکل ۳- نتایج مطالعات دورسنجی بر روی تصاویر سنجنده ASTER کانسار آهن صاحب. (a) نتایج حاصل از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (b) بارزسازی اکسیدهای

آهن با روش MTMF (c) بارزسازی کانی‌های ترمولیت- اکتینولیت با استفاده از روش MTMF

Fig. 3. Results of remote sensing studies on ASTER sensors of the Saheb Fe deposit. a) Results of spectral angle mapper b) Identifying of iron oxides by using MTMF method c) Identifying of tremolite and actonlrite by using MTMF method.

معدنی و مطالعات آب زیرزمینی موجود در یک منطقه کاربرد دارد

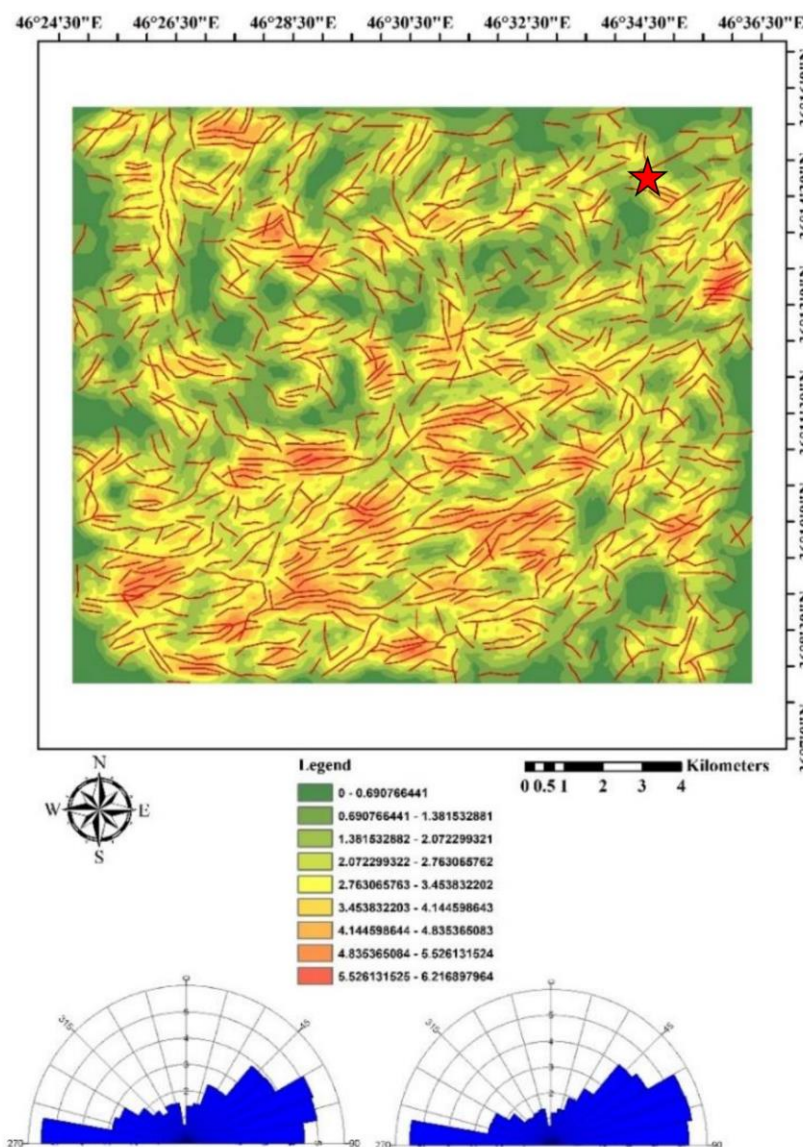
(Huston and Large, 1989; Krauskopf, 1979; Bames, 1997; Einaudi et al., 2003; Ogg et al., 2008; Pirajno, 2009; Reichenbacher et al., 2011., Kouzmanov and Pokrovski, 2012; Maanijou et al., 2015). در این پژوهش از تصویر Landsat-8 به دلیل داشتن باند پانکروماتیک ۱۵ متری

مطالعه گسلش و خطواره‌ها

از دیگر کاربردهای سنجش از دور، مطالعه شکستگی‌ها، خطواره‌ها و خصوصیات ساختاری زمین است (Canals et al., 1992). مطالعه شکستگی‌ها و خطواره‌های موجود در منطقه به طور چشم‌گیری در شناسایی سامانه‌های کانه‌ساز، اکتشافات

خطوط مشخص شده و سایر عملیات‌های مربوطه بر روی آن انجام شود. سپس خروجی ARC GIS به صورت فایل اتوکد وارد نرم افزار Rockworks شده تا نمودارهای گلسرخی مربوط به آن ترسیم شوند. پس از انجام عملیات فوق بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه، وضعیت شکستگی‌ها و خطواره‌های موجود طبق شکل ۴ مشخص گردید.

استفاده شد. در سنجش از دور برای مطالعه گسل‌ها و خطواره‌ها پس انجام تصحیحات لازم بر روی تصویر سنجنده مورد نظر در نرم افزار (5.6) ENVI، ابتدا تصویر را وارد الگوریتم آنالیز مولفه‌های اصلی (principal component analysis) کرده، سپس خروجی این الگوریتم وارد نرم افزار Geomathica (SP2) می‌شود. در این نرم افزار خطواره‌ها را به صورت شیپ فایل استخراج کرده و آن را به نرم افزار (10.3) ARC GIS وارد کرده تا چگالی



شکل ۴- تصویر تراکم میزان خطواره‌ها و گسل‌های موجود در منطقه صاحب به همراه رز دیاگرام‌های فراوانی (سمت راست) و طولی (سمت چپ). محدوده مورد مطالعه با علامت ستاره قرمز رنگ بر روی شکل مشخص شده است.

Fig. 4. Image of lineaments and faults densities in the Saheb area associated with abundant (right) and longitudinal (left) diagrams. The location of the study area is indicated by the red star.

در اندازه‌های ۰/۵ تا ۴ میلیمتر، ۲۰-۱۵ درصد کوارتز، ۲۵-۲۰ آلکالی فلدسپار با اندازه‌های ۱ تا ۶ میلی‌متر و مقدار کانی‌های مافیک (بیوتیت و آمفیبول) موجود در این توده ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی در اندازه‌های حداکثر ۲ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۵-ا). بلورهای پلاژیوکلاز موجود در این توده دارای ماکل تکراری بوده و در برخی بخش‌ها به سریسیت تبدیل شده‌اند. کانی‌های فرعی موجود در این توده شامل آپاتیت، تیتانیت، زیرکن و کانی‌های اپک هستند. کانی‌های اپک شامل مگنتیت با اندازه‌های کمتر از یک میلی‌متر و به مقدار کم گوتیت هستند.

کوارتز مونزونیت: این توده در مقیاس نمونه دستی دارای ضریب رنگینی مزوکرات بوده و بافت گرانولار ناهمسان‌دانه (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد. یکی از کانی‌های اصلی این توده پلاژیوکلاز با فراوانی ۲۵-۳۵ درصد بوده که دارای منطقه‌بندی، ماکل تکراری، اندازه ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر و در مواردی به سریسیت تجزیه شده است. آلکالی فلدسپارهای موجود در این توده با اندازه‌های ۱-۶ میلی‌متر حدود ۳۰-۴۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده و پرتیتی شده‌اند. در مواردی بلورهای کوچک پلاژیوکلاز، آمفیبول و بیوتیت توسط آلکالی فلدسپار احاطه شده و بافت پوئی‌کلیتیک بوجود آمده است. در سنگ‌های کوارتز مونزونیتی، فراوانی بیوتیت و آمفیبول تقریباً یکسان و ۱۵ درصد حجم سنگ را با هم تشکیل می‌دهند. آمفیبول‌ها و بیوتیت‌ها بصورت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در اندازه‌های حداکثر ۲ میلی‌متر در این واحد سنگی قابل مشاهده‌اند. کوارتزها (حدود ۱۰ درصد) بیشتر بصورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل در اندازه‌های ۰/۳ تا ۳ میلیمتر،

براساس نتایج حاصل از مطالعه شکستگی‌ها و خطواره‌های موجود در کانسار آهن صاحب می‌توان اظهار داشت که شکستگی‌ها و گسل‌های با راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب در این کانسار، می‌توانسته‌اند معبر خوبی برای نفوذ و عبور سیالات کانه‌ساز باشند. البته این احتمال وجود دارد که برخی از گسل‌ها و شکستگی‌ها بعد از وقوع کانه‌زایی در منطقه ایجاد شده باشند که این مورد، نیاز به بررسی‌های صحرایی دقیق‌تری دارد.

سنگ‌نگاری توده نفوذی

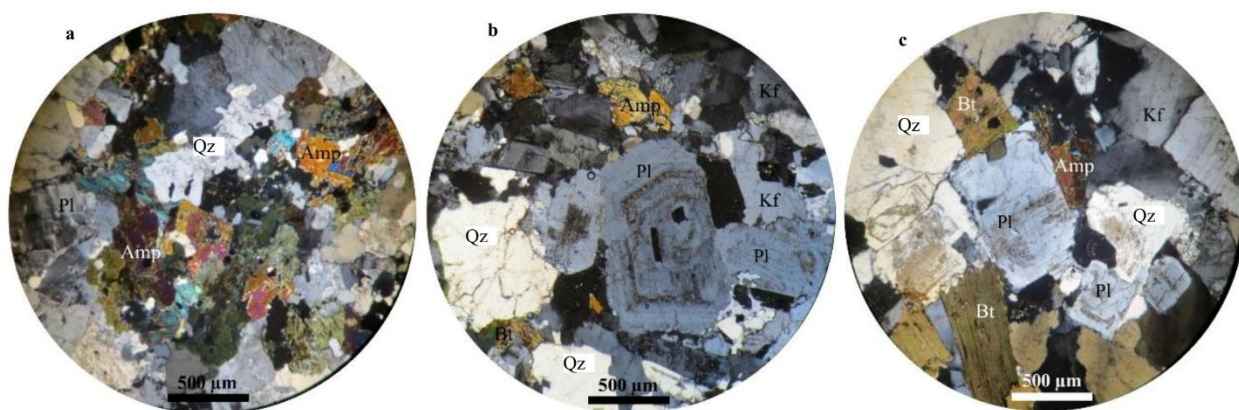
طبق مطالعات سنگ‌نگاری باتولیت صاحب اغلب دارای طیف ترکیبی کوارتز مونزونودیوریت، کوارتز مونزونیت و گرانیت می‌باشد. براساس مطالعات ژئوشیمیایی انجام شده این باتولیت، در دسته گرانیت‌های کالک‌آلکالن نوع I قرار می‌گیرد (Kholghi and Vossoughi Abedini, 2008). مطالعات این پژوهشگران و همچنین الیاسی و آهنگری (Elyasi and Ahangari, 2015) نشانگر آن است که باتولیت صاحب از ذوب بخشی گوشته (متاسوماتیسم شده) بوجود آمده که بعداً تحت تاثیر فرایند تفریق بلوری و آغشتگی قرار گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که باتولیت صاحب در جایگاه ژئودینامیکی حاشیه فعال قاره‌ای تشکیل شده است.

کوارتز مونزونودیوریت: در نمونه دستی این توده درشت‌بلور، به رنگ خاکستری و دارای ضریب رنگینی مزوکرات می‌باشد. بافت اصلی این توده در مقیاس میکروسکوپی گرانولار ناهمسان دانه است. کانی‌های اصلی این توده شامل ۳۰ تا ۴۵ درصد پلاژیوکلاز

بیشتر بصورت بین‌بلورری و در مواردی دارای حاشیه مضرسی دیده می‌شود. کانی‌های فرعی موجود در این توده شامل آپاتیت، زیرکن، تیتانیت و کانی‌های اپک هستند.

گرانیت: در نمونه دستی گرانیت می‌توان بلورهای درشت ارتوکلاز صورتی رنگ را مشاهده نمود. بافت اصلی این توده گرانولار ناهمسان‌دانه است و می‌توان بافت‌های فرعی پوئی‌کلیتی و

میرمکیتی را نیز در آن مشاهده کرد. کانی‌های اصلی این توده نیز شامل ۳۰-۴۰ درصد پلاژیوکلاز با اندازه‌ای حدود ۰/۲ تا ۲ میلی-متر، ۲۰ درصد آلکالی فلدسپار، بلورهای ۰/۱ تا ۳ میلی‌متری کوارتز که حدود ۲۰-۳۰ درصد حجم سنگ را تشکیل داده‌اند و کانی‌های مافیک شامل بیوتیت و آمفیبول با ۱۵ درصد حجمی می‌باشند (شکل ۵-۷). کانی‌های فرعی این توده شامل آپاتیت، تیتانیت، زیرکن و کانی‌های کدر هستند.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از باتولیت گرانیتوئیدی صاحب. (a) تجمعی از کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و کوارتز با بافت گرانولار در توده کوارتز مونزودیوریت (b) بافت گرانولار ناهمسان‌دانه با حضور کانی‌های آلکالی فلدسپار پرتیتی، پلاژیوکلاز، بیوتیت، آمفیبول و کوارتز در کوارتز مونزونیت (c) بافت گرانولار در توده گرانیتی. (آلکالی فلدسپار: Kf، پلاژیوکلاز: Pl، بیوتیت: Bt، آمفیبول: Amp، کوارتز: Qz). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 5. Microphotograph of the Saheb batholith. a) Granular texture in the quartz-monzodiorite body which consists of amphibole, plagioclase and quartz b) Poikilitic and inequigranular textures in the quartz-monzonite which contains Alkali feldspar, plagioclase, biotite, amphibole and quartz minrals c) Granular texture in the granite. (Alkali feldspar: Kf, plagioclase: Pl, biotite: Bt, amphibole: Amp, quartz: Qz). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

کانه‌زایی

اساس مطالعه برای شناخت چگونگی تشکیل یک کانسار، شناخت و بررسی کانی‌شناسی، مطالعه ساخت و بافت ماده معدنی و تشخیص روابط پاراژنتیکی میان آن‌ها است. به عبارت دیگر مطالعات کانه‌نگاری اطلاعات مفیدی را در مورد محیط تشکیل شرایط تشکیل کانسار در اختیار ما می‌گذارد (Pirajno, 2009). در این مبحث سعی شده که بخش غربی کانه‌زایی کانسار آهن

صاحب براساس مشاهدات صحرایی و مطالعات کانه‌نگاری شرح داده شود. بر همین اساس، ویژگی‌ها و روابط بین کانه‌ها، بافت و ساخت و چگونگی نهشته شدن آن‌ها در ادامه توضیح داده شده است. ماده معدنی در آنومالی غربی کانسار آهن صاحب، اغلب به صورت رگه-رگچه‌ای و عدسی شکل با ضخامت ۳ متر و طول حدود ۱۰۰-۲۰۰ متر در سنگ‌های دگرگونی کربناته پرمین (شکل ۶-۵)، رسوبات دگرگون شده کرتاسه و به مقدار کمتر در توده

نفوذی تشکیل شده است. کانی‌سازی آهن در این منطقه بیشتر به صورت رگه‌ای در داخل گسل‌ها و شبکه‌ای از رگه-رگچه در فواصل بین گسل‌ها و هم چنین به صورت عدسی شکل در واحدهای کربناته دگرگون شده پرمین و کرتاسه تشکیل شده است (شکل ۶-b). در این کانسار، بلورهای درشت و شکل‌دار گارنت را می‌توان دید که تحت تأثیر دگرسانی و هوازدگی قرار گرفته‌اند. ابعاد بلورهای گارنت حدود ۱ تا ۴ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۶-c). گارنت‌ها در برخی بخش‌ها در زمینه‌ای از مگنتیت قرار دارند و توسط آن برشی شده‌اند (شکل ۶-d). وجود مالاکیت و آزوریت (شکل ۶-e) در منطقه حاکی از وجود کانی‌سازی مس در این منطقه است که این پدیده بیشتر در بخش‌هایی که درزه‌ها و شکاف‌ها موجود هستند، مشاهده می‌شوند (شکل ۶-f). رگه-رگچه‌های کوارتزی در برخی بخش‌ها ماده معدنی را قطع کرده‌اند (شکل ۶-g). مگنتیت در مواردی به صورت نواری با گارنت (شکل ۶-h) یافت می‌شود.

دگرسانی

به طور کلی، دگرسانی در کانسار آهن صاحب بسیار گسترده و متنوع بوده و هاله‌های متفاوتی را در این کانسار به وجود آورده است. بر اساس مطالعات صحرایی، سنجش از دور و میکروسکوپی، دگرسانی‌های اپیدوتی-کلریتی، ترمولیتی-اکتینولیتی، سریسیتی، پروپیلیتی و آرژیلیک به ترتیب بیشترین گسترش را در منطقه کانه‌زایی دارند که در ادامه به تفصیل شرح داده شده‌اند. قابل ذکر است که بخش‌های ترمولیتی-اکتینولیتی و اپیدوتی-کلریتی جزو پهنه‌های اسکارنی هستند که در آن بخش توضیح داده شده‌اند.

دگرسانی سریسیتی: این دگرسانی بیشتر در داخل توده نفوذی یا باتولیت گرانیتوئیدی صاحب مشاهده می‌شود. در نتیجه این دگرسانی در کانسار صاحب بلورهای پلاژیوکلاز به طور بخشی به سریسیت و کانی رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۷-a). قابل ذکر است که سریسیت به رنگ سفید تا خاکستری و به صورت ریزدانه در این منطقه دیده می‌شود.

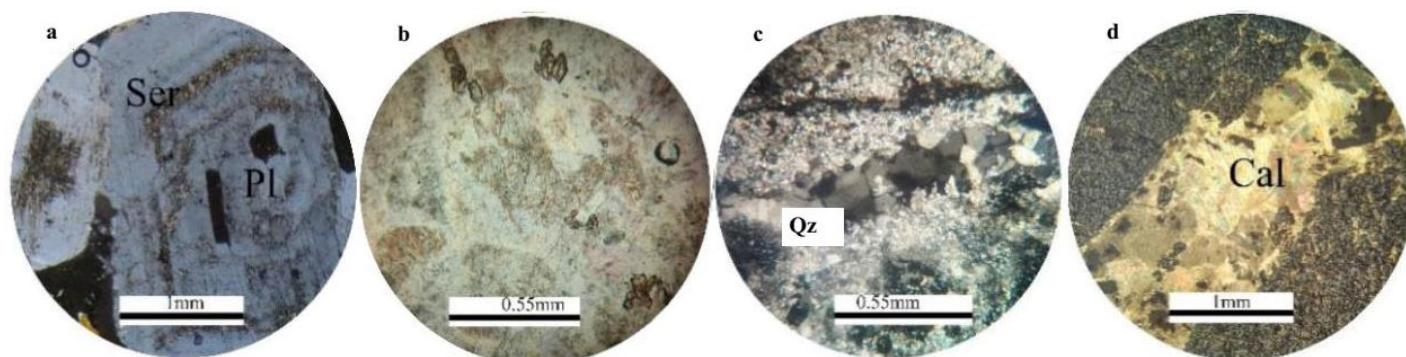
دگرسانی آرژیلیک: این دگرسانی را می‌توان در حاشیه بخش-های کانه‌دار و در توده‌های نفوذی می‌توان مشاهده کرد. در مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی می‌توان به صورت فراوان این نوع دگرسانی را رویت نمود. این دگرسانی را می‌توان در همراهی با دگرسانی سریسیتی مشاهده کرد. در کانسار صاحب این دگرسانی گسترش وسیعی ندارد. کانی‌های رسی ریزبلور محصول عمده این دگرسانی می‌باشند (شکل ۷-b).

دگرسانی سیلیسی شدن و کربناته‌شدن: این دگرسانی‌ها در مراحل انتهایی کانه‌زایی در این منطقه به صورت رگه-رگچه‌ای تشکیل شده‌اند و کانی‌های مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. با توجه به آنکه رگه‌های کربناته، رگه‌های سیلیسی را قطع کرده‌اند، می‌توان اظهار داشت که رگه‌های کوارتزی قبل از رگه-رگچه‌های کربناتی تشکیل شده‌اند. دگرسانی سیلیسی یکی از رایج‌ترین و شناخته شده‌ترین انواع دگرسانی در سامانه‌های گرمابی است. سیلیسی شدن و کربناتی شدن نیز در سنگ‌های منطقه بیشتر به صورت رگچه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷-c و d) و نشان دهنده تزریق سیلیس و کربنات توسط محلول‌های گرمابی داخل شکستگی‌ها و ته‌نشینی درون آن‌هاست.



شکل ۶- تصاویر صحرایی از کانه‌زایی در بخش غربی اسکارن آهن صاحب. (a) کانه‌زایی آهن به صورت رگه- رگچه‌ای در واحدهای کربناتی دگرگون شده (مرمر) پرمین (b) کانه‌زایی آهن در هورنفلس‌های کرتاسه. (c, d) بلورهای گارنت برشی شده در زمینه‌ای از مگنتیت. (e, f) تشکیل کانه‌های سوپرژن از جمله مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن (g) رگچه‌ای از کوارتز که ماده معدنی مگنتیت را قطع کرده است. قطعه برشی کالکوپیریت در این رگچه مشاهده می‌گردد. (h) بافت نواری گارنت و مگنتیت در کانسار صاحب. (کوارتز: Qz، مگنتیت: Mt، گالن: Grt، مالاکیت: Mlc). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 6. Field photos of the western part of the Saheb iron skarn deposit. a) Iron mineralization as vein-veinlets within the Permian metamorphosed carbonate (marble) units. b) Iron mineralization in the Cretaceous hornfels. c, d) Brecciated garnet crystals within the magnetite. e) Formation of supergene minerals such as malachite, azorite and iron oxides. g) Quartz vein that cuts off the magnetite ore body. The chalcopyrite fragment is observed within the quartz vein. h) Banded texture of garnet and magnetite at the Saheb deposit. (Magnetite: Mt, garnet: Grt, Quartz: Qz; malachite: Mlc). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی از دگرسانی‌های موجود در کانسار صاحب. (a) دگرسانی سریستی که در بلورهای پلاژیوکلاز اتفاق افتاده است. (b) دگرسانی آرژیلیک که در توده نفوذی جانشین پلاژیوکلاز شده است. (c) دگرسانی سیلیسی که به صورت رگه- رگچه‌های کوارتز در سنگ میزبان تشکیل شده است. (d) دگرسانی کربناته که به صورت رگچه‌های درون سنگ میزبان روی داده است. (اپیدوت: Ep، کلریت: Chl، گارنت: Grt، اکتینولیت: Act، پیروکسن: Px، سریسیت: Ser، پلاژیوکلاز: Pl، کوارتز: Qz، کربناته: Cal). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 7. Photomicrographs of different types of alterations in the Saheb deposit. a) Sericitic alteration occurred within the plagioclase crystals. b) Argillic alteration which has been replaced plagioclase in the intrusive rock. c) Silicic alteration formed as quartz vein-veinlets in the host rock. d) Carbonate alteration occurred as vein-veinlets within the host rock. (Epidote: Ep, chlorite: Chl, garnet: Grt, actinolite: Act, pyroxene: Px, sericitic: Ser, plagioclase: Pl, quartz: Qz, carbonate: Cal). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی

بر پایه بررسی‌های میکروسکوپی روی مقطع‌های صیقلی و نازک- صیقلی، کانه‌های این کانسار بیشتر از گروه‌های اکسیدی و سولفیدی می‌باشند. براساس مطالعات کانه‌نگاری، کانه اصلی موجود در این منطقه مگنتیت است که با مقادیر محدودی پیریت و به مقدار جزئی کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، گوتیت، آزوریت و مالاکیت همراهی می‌شود. کانه‌های باطله نیز شامل گارنت، پیروکسن، ترمولیت- اکتینولیت، کلسیت، اپیدوت و کوارتز می‌باشند.

مگنتیت: همانطور که گفته شد، مگنتیت کانه اصلی در کانسار اسکارن صاحب بوده و بیشترین حجم آن را تشکیل می‌دهد. مگنتیت در نمونه‌های دستی به شکل بلورهای درشت تا بیش از یک سانتی‌متر نیز دیده می‌شود. اما اغلب اندازه بلورهای آن در حد ۵ میلی‌متر می‌باشد. بلورهای مگنتیت به صورت شکل‌دار،

نیمه‌شکل‌دار و بی‌شکل در نمونه‌ها دیده می‌شوند. مگنتیت در مقاطع صیقلی به رنگ کرم تا خاکستری روشن دیده می‌شود (شکل ۸-ا). بافت کانه مگنتیت توده‌ای (شکل ۸-ا)، رگه- رگچه‌ای (شکل ۸-ب) و برشی می‌باشد. قابل ذکر است که در برخی بخش‌ها کانی مگنتیت توسط رگه- رگچه‌هایی از پیریت قطع شده است. در این کانسار تبدیل مگنتیت به گوتیت و هماتیت در مناطقی که شدت دگرسانی و شکستگی در آن بخش- ها بالا است، دیده می‌شود. در نتیجه فرآیندهای سوپرژن و هوازگی، مگنتیت در امتداد شکستگی‌ها و حاشیه بلورها به هماتیت و گوتیت تبدیل شده است. در برخی از بلورها پدیده مارتیتی شدن نیز قابل مشاهده است (شکل ۸-ج). مارتیتی شدن نوع خاصی از پدیده جانشینی است که در آن مگنتیت در امتداد سطوح رخ (۱۱۱) توسط هماتیت جانشین می‌شود (Craig and Vaughan, 1994).

پیریت: همانطور که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد، فراوانی کانی‌های سولفیدی در کانسار صاحب خیلی کم می‌باشد. پیریت بیشتر در این کانسار به صورت رگه- رگچه‌ای تشکیل شده و کانه- زایی مگنتیت را قطع کرده است (شکل ۸-d و e). این کانی بیشتر به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل می‌باشد. چنین به نظر می‌رسد که این سولفیدها در مراحل پایانی کانه‌زایی در این منطقه تشکیل شده‌اند. در بعضی نقاط، کالکوپیریت نیز همراه با پیریت مشاهده می‌شود که این نشان از همزمانی تشکیل آنها است. پیریت‌ها در بعضی نقاط به صورت دانه‌پراکنده و پرکننده فضای خالی دیده می‌شوند. در بیشتر موارد این کانی تحت تأثیر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی قرار گرفته و از حاشیه و شکستگی‌ها به گوتیت و اکسیدهای آهن تبدیل شده است. در نتیجه فرایند هوازدگی و رفتار محلول‌های اکسیدان، پیریت توسط گوتیت جایگزین شده است (Thomas and Traiana, 2004).

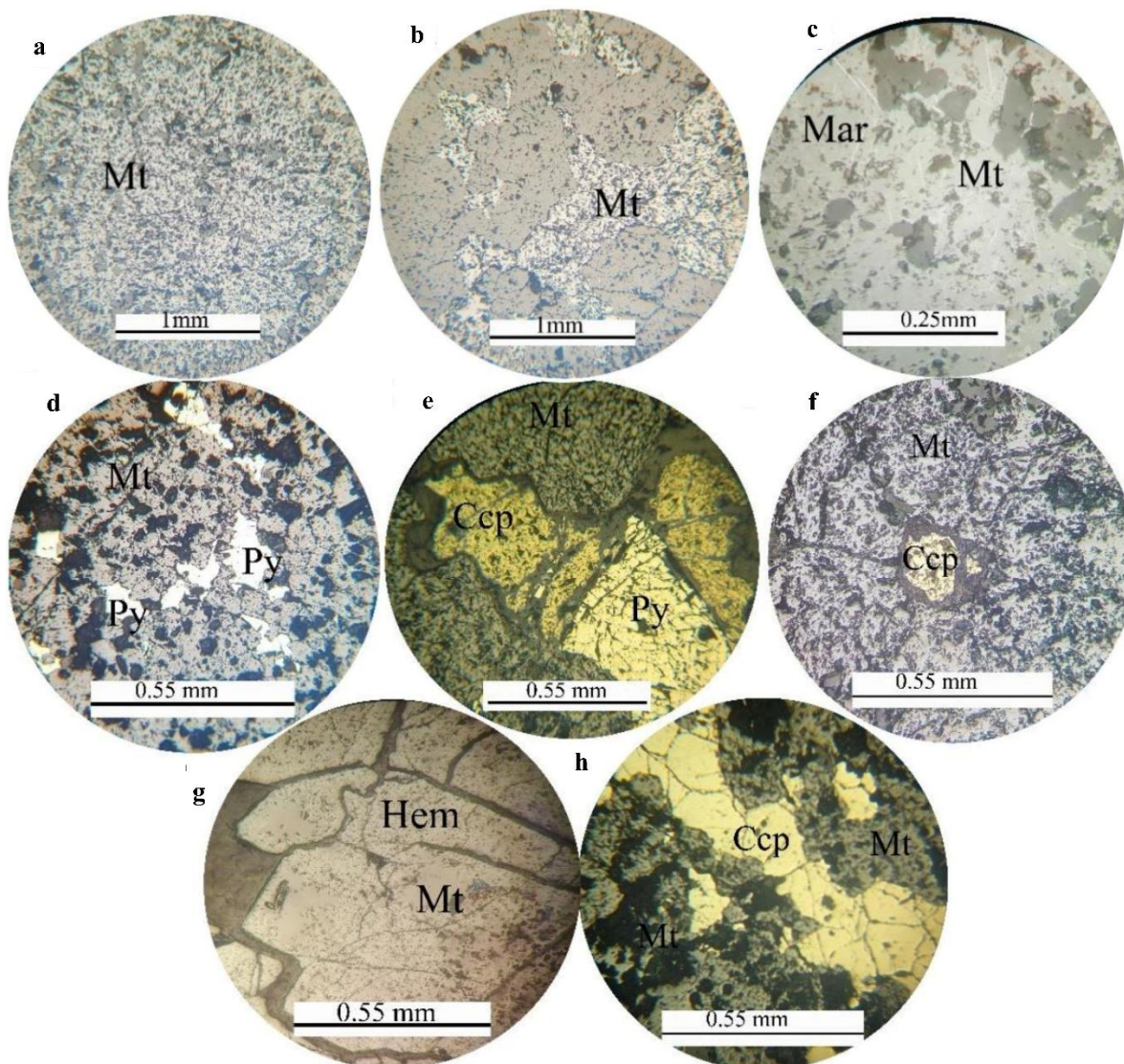
کالکوپیریت: این کانی دارای بافت‌های رگچه‌ای و گاه به صورت شکافه‌پرکن است (شکل ۸-f). همانطور که قبلاً نیز ذکر شد این کانی به مقدار کم در این منطقه به همراه پیریت تشکیل شده و مگنتیت را نیز قطع کرده است (شکل ۸-g). کانی کالکوپیریت نیز همانند سایر کانه‌های موجود در این کانسار تحت تأثیر فرایند سوپرژن و هوازدگی قرار گرفته و در نتیجه آن به مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۸-g). در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی، بافت‌های جانشینی و بازماندی در کالکوپیریت‌ها تشکیل شده‌اند.

هماتیت: این کانه محصول فرایندهای هوازدگی و سوپرژن بوده و در اثر آن، مگنتیت توسط آب‌های جوی اکسیدان به صورت جزئی و یا کامل به کانی‌های ثانویه از جمله هماتیت و گوتیت

تبدیل شده است (شکل ۸-h). در اثر این فرایند که پس از سرد شدن توده نفوذی و همزمان با هجوم سیالات دما پایین روی می‌دهد، کانه مگنتیت در امتداد کلیواژها و درزه‌های خود به هماتیت تبدیل می‌شود. به اعتقاد هاینس و همکاران (Haynes, 2000) برای تشکیل هماتیت حضور اکسیژن لازم و ضروری می‌باشد و باید فوگاسیته اکسیژن از طریق یک منبع خارجی در محل کانه- زایی بالا برود که محتمل‌ترین منبع اکسیژن آب‌های جوی می‌باشد. قابل ذکر است که در نواحی سطحی و گسل خورده کانسار، بخش قابل توجهی از مگنتیت به هماتیت تبدیل شده است.

کوولیت و کالکوسیت: این کانی‌ها حاصل هوازدگی کالکوپیریت می‌باشند و به مقدار کم در این کانسار تشکیل شده‌اند. کوولیت و کالکوسیت بیشتر از شکستگی‌ها و حواشی بلوری در اثر فرایندهای هوازدگی و سوپرژن جایگزین کالکوپیریت شده‌اند (شکل ۹).

مالاکیت و آزوریت: کربنات‌های مس (مالاکیت و آزوریت) در نواحی اکسیدان دیده می‌شوند. این کانی‌ها، که از دگرسانی و اکسیداسیون کالکوپیریت به وجود آمده‌اند، با رنگ‌های سبز (مالاکیت) و آبی لاجوردی (آزوریت) در بخش‌های اکسیدان کانسار مشاهده می‌گردند. مالاکیت و آزوریت به صورت رگه- رگچه‌ای و جانشینی در این کانسار مشاهده می‌شوند (شکل ۶-e و f). در بعضی نقاط می‌توان کانی مالاکیت را در متنی از مگنتیت مشاهده کرد که در نتیجه جانشینی این کانی به جای کالکوپیریت تشکیل شده است. همانطور که ذکر شد، این کانی‌ها در طی فرایندهای هوازدگی و سوپرژن جانشین کانی کالکوپیریت شده‌اند. جانشینی در برخی بخش‌ها به حدی است که فقط بقایایی از کالکوپیریت در مرکز آن باقی مانده است.

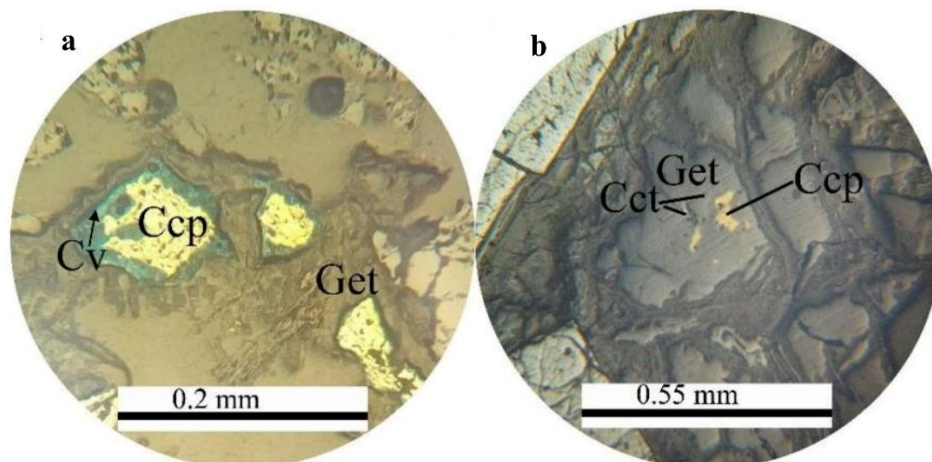


شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های موجود در کانسار آهن صاحب. (a) بلورهای بی‌شکل مگنتیت با بافت توده‌ای. (b) مگنتیت با بافت رگچه‌ای، (c) مارتیتی شدن کانی مگنتیت. (d) پیریت که به صورت رگچه‌ای مگنتیت را قطع کرده است. (e) هم‌رشدی پیریت و کالکوپیریت که به صورت رگچه‌ای کانی مگنتیت را قطع کرده‌اند. (f) حضور کانه کالکوپیریت به صورت شکافه پرکن در داخل مگنتیت، (g) قطع شدن مگنتیت توسط رگچه کالکوپیریت. (h) کانی مگنتیت در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی به هماتیت تبدیل شده است. (مگنتیت: Mt، مارتیتی شدن: Mar، پیریت: Py، کالکوپیریت: Ccp، هماتیت: Hem). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 8. Photomicrographs of minerals at the Saheb iron deposit. a) Xenomorph crystals of magnetite with massive texture. b) Magnetite minerals which formed as vein texture. c) Martitization of magnetite. d) Vein-veinlets of pyrite that cut magnetite. e) Coexisting of pyrite and chalcopyrite which cut the magnetite veins. f) The presence of chalcopyrite mineral as open space filling in the magnetite mineral. g) Magnetite minerals are cut by chalcopyrite vein. h) Magnetite mineral which replaced by secondary hematite due to the supergene and weathering processes. (Magnetite: Mt, martitization: Mar, pyrite: Py, chalcopyrite: Ccp, hematite: Hem). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

و سپس سولفات فرو ایجاد می‌شود. سولفات فرو تشکیل شده بعداً به هیدروکسید فریک تبدیل شده و در ادامه گوتیت از هیدروکسید فریک به دست می‌آید (Smirnov, 1976).

گوتیت: کانی گوتیت یکی دیگر از کانی‌های اکسیدی در این کانسار است که اکثراً جانشین کالکوپیریت شده است (شکل ۹). انحلال کانی‌های سولفیدی دارای آهن جهت تشکیل گوتیت به گونه‌ای رخ می‌دهد که ابتدا کانی سولفیدی آهن‌دار اکسید شده



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های ثانویه موجود در کانسار آهن صاحب. (a) کانی کالکوپیریت که از حاشیه به کوولیت و گوتیت تبدیل شده است. (b) بافت بازمانده در کالکوپیریت و تبدیل این کانی از حاشیه به گوتیت و کالکوسیت. (کالکوپیریت: Ccp، کوولیت: Cv، گوتیت: Get، کالکوسیت: Cct). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 9. Photomicrographs of secondary minerals at Saheb iron deposit. a) The chalcopyrite mineral which replaced by covellite and goethite. b) Relict texture in the chalcopyrite which replaced by goethite and chalcocite. (Chalcopyrite: Ccp, covellite: Cv, goethite: Get, Chalcocite: Cct). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

روی نوع کانی، ترکیب شیمیایی کانه، دامنه پایداری کانی و غیره تاثیر می‌گذارند (Meinert et al., 2005). شناسایی دقیق ضخامت پهنه اندواسکارنی به دلیل گسترش بسیار زیاد توده نفوذی، هم‌چنین پوشیده بودن این توده‌ها توسط رسوبات عصر حاضر، کمابیش غیر ممکن می‌باشد. این سنگ‌ها در مقیاس ماکروسکوپی و رخنمون دستی به رنگ سبز تیره دیده می‌شوند که این امر ناشی از تجمع کانی‌های کالک‌سیلیکاته می‌باشد. پهنه‌های اندواسکارن و اگزواسکارن پهنه‌های اصلی این کانسار بوده ولی پهنه اگزواسکارن، گسترش بیشتری دارد. براساس شواهد صحرایی و میکروسکوپی، پهنه اگزواسکارن شامل زیرپهنه‌های گارنت اسکارن، پیروکسن اسکارن، گارنت- پیروکسن اسکارن،

پهنه‌های اسکارنی

نفوذ سیال‌های آهن‌دار در سنگ‌های کربناته، تبلور دوباره سنگ‌های کربناته، اسکارن‌زایی و نهشته شدن کانسار مهم‌ترین رخداد در کانسار اسکارن صاحب است. انواع سیلیکات‌های کلسیم بدون آب (گارنت و پیروکسن) و آب‌دار (از جمله اکتینولیت و اپیدوت) و محصولات دگرسانی پسروده آن‌ها (از جمله کلریت، کلسیت و کوارتز) در حجم گسترده‌ای از سنگ‌های کربناته تشکیل شده‌اند. کانی‌شناسی پهنه‌های اسکارن به طور مستقیم از ترکیب سنگ میزبان آهکی و شیلی پیروی می‌کند. افزون بر این، عواملی چون فوگاسیته اکسیژن، فوگاسیته گوگرد، غلظت دی اکسید کربن در آب، وجود کلر، فلوئور و دیگر عناصر گازی و فعال،

مرمر، اپیدوت اسکارن و اسکارن کانه‌دار است. ضخامت پهنه اسکارنی حدود ۴۰ تا ۵۰ متر بوده و ضخامت ماده معدنی درون این پهنه بین ۳ تا ۱۰ متر می‌باشد. قابل ذکر است که بخش‌های حاشیه توده‌های کوارتز مونزونیتی و گرانیتی متحمل فرایندهای دگرسانی شده و کانی‌های مربوط به اسکارنی شدن در داخل آن‌ها تشکیل شده‌اند.

گارنت: بیشترین مقدار کانی‌های باطله در کانسار صاحب را گارنت تشکیل می‌دهد. این کانی بخاطر فرایندهای دگرسانی و هوازدگی به کانی‌های ثانویه از جمله اپیدوت، کلسیت، کلریت و کوارتز تبدیل شده است (شکل ۱۰-a و b). گارنت در نمونه‌های دستی و مقاطع میکروسکوپی شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار بوده و رنگ آن‌ها قهوه‌ای روشن می‌باشد. قابل ذکر است که گارنت در این منطقه بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای در سنگ میزبان توده نفوذی تشکیل شده است. اندازه بلورهای گارنت از ۱ تا ۳ سانتی-متر تغییر می‌کند. گارنت‌ها را می‌توان به صورت نواری نیز مشاهده کرد. برخی بلورهای گارنت دارای منطقه‌بندی هستند (شکل ۱۰-a). همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، در برخی بخش‌ها بلورهای گارنت برشی شده و در متنی از مگنتیت قرار دارند (شکل ۱۰-d). این نکته بیانگر آن است که مگنتیت بعد از گارنت در این کانسار تشکیل شده است.

پیروکسن: در کانسار آهن صاحب فراوانی پیروکسن از گارنت کمتر است. این کانی در زیرپهنه پیروکسن اسکارن تشکیل شده و در زیر میکروسکوپ به رنگ‌های سبز، زرد و صورتی دیده می‌شود. بلورهای پیروکسن به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند (شکل ۱۰-c). برخی از بلورهای پیروکسن در امتداد رخ‌ها در حال تبدیل شدن به کانی‌های ثانویه از جمله ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت می‌باشند. بیشتر بلورهای پیروکسن به

ترمولیت، اکتینولیت (شکل ۱۰-d و e) و کلسیت تبدیل شده‌اند. در برخی بخش‌ها، بلورهای شکل‌دار و نیمه شکل‌دار پیروکسن در متنی از مگنتیت هستند. این موضوع نشان می‌دهد که مگنتیت پس از پیروکسن تشکیل شده است.

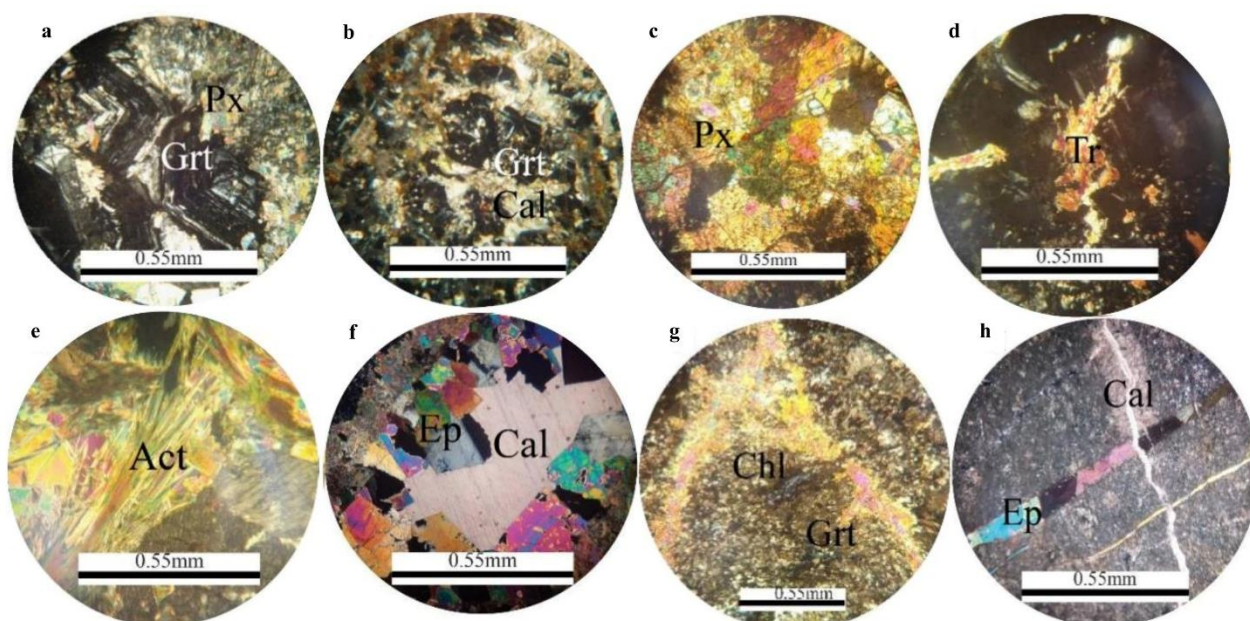
ترمولیت-اکتینولیت: در زیر میکروسکوپ ترمولیت بی‌رنگ و اکتینولیت به رنگ سبز و دارای چندرنگی است. با افزایش مقدار آهن در اکتینولیت رنگ آن تیره‌تر و چندرنگی آن شدیدتر می‌گردد. در کانسار صاحب رابطه مستقیمی بین همراهی این دو کانی با ماده معدنی وجود دارد. در بعضی از بلورهای ترمولیت و اکتینولیت می‌توان بقایای کمی از کانی پیروکسن را مشاهده کرد که نشان دهنده‌ی تبدیل پیروکسن به این کانی‌ها و تاخر این دو کانی نسبت به پیروکسن می‌باشد (شکل ۱۰-d و e). این دگرسانی همراه با کانه‌زایی در منطقه اتفاق افتاده است.

اپیدوت-کلریت: این کانی در کانسار اسکارن صاحب جزء فراوانترین کانی‌های پهنه اسکارنی بوده و در نمونه دستی و زیر میکروسکوپی به راحتی قابل تشخیص است. به عقیده شیمازیکی (Shimazaki, 1980) وجود اپیدوت، نشان دهنده‌ی تاثیر محلول‌های آهن‌دار است. در دمای کم و با افزایش مقدار فوگاسیته اکسیژن، دامنه پایداری اپیدوت افزایش پیدا می‌کند، اما در فوگاسیته پایین اکسیژن، اپیدوت در کنار کوارتز پایدار می‌شود و جانشین مجموعه آنورتیت-هیدنبرژیت می‌گردد. در پهنه اسکارنی اغلب بلورهای اپیدوت حاصل دگرسانی پلاژیوکلاز و گارنت بوده و جانشین آنها شده است. به عقیده شیمازیکی (Shimazaki, 1980) کانسارهای اسکارنی که مقدار اپیدوت در آن‌ها فراوان است، در همراهی با گرانیتوئیدهای مگنتیتی می‌باشند. در حالی که کانسارهای فقیر از اپیدوت با گرانیتوئیدهای ایلمنیتی همراه هستند. وجود اپیدوت در توده گرانیتوئیدی صاحب که از نوع تیپ

(I Kholghi and Vossoughi Abedini, 2008; Abdollahi

et al., 2018; Abdollahi, 2019) می‌باشد، با این امر سازگار است. در کانسار صاحب کانی اپیدوت را می‌توان به شکل‌های رگه-رگچه‌ای و جانشینی مشاهده نمود (شکل ۱۰-f). اپیدوتی شدن حاصل جانشینی این کانی به جای کانی‌هایی مانند گارنت و پلاژیوکلاز در این کانسار است. در نتیجه تاثیر سیالات گرمابی بر روی کانی‌هایی مانند گارنت و پلاژیوکلاز، اپیدوت در امتداد شکستگی‌ها و درزه‌های موجود در این کانی‌ها تشکیل شده است.

در آنومالی غربی کانسار آهن صاحب اپیدوتی شدن همراه با کانه-زایی در منطقه به وجود آمده است. سیالات گرمابی غنی از منیزیم، کلسیم و اکسیدهای آهن باعث تشکیل این دگرسانی در منطقه شده‌اند. قابل ذکر است که کانی کلریت در اطراف بخش-های کانه‌زایی همراه اپیدوت و هم چنین در اطراف کانی‌های بیوتیت و آمفیبول در توده نفوذی تشکیل شده است (شکل ۱۰-g). همانطور که در شکل ۱۰-h مشاهده می‌شود، رگچه‌های کلسیتی موجود در کانسار صاحب در مواردی رگه-رگچه‌های اپیدوت را قطع کرده‌اند.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های باطله موجود در کانسار آهن صاحب. a, b) همراهی گارنت و پیروکسن که با کلسیت‌های مراحل آخر کانه‌زایی جایگزین شده‌اند. c) تشکیل بلورهای پیروکسن در پهنه پیروکسن اسکارن. d, e) بلورهای کشیده ترمولیت و اکتینولیت که جانشین پیروکسن شده‌اند. f) بلورهای موزائیکی اپیدوت که توسط رگچه کلسیتی قطع شده‌اند. g) دگرسانی کلریتی که در حاشیه گارنت تشکیل شده است. h) رگچه تاخیری کلسیت که رگچه اپیدوتی را قطع کرده است. (گارنت: Grt، پیروکسن: Px، کلسیت: Cal، ترمولیت: Tr، اکتینولیت: Act، اپیدوت: Ep، کلریت: Chl). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig 10. Photomicrographs of gangue minerals in the Saheb iron deposit. a, b) Garnet and pyroxene minerals replaced by late-stage calcite. c) Formation of pyroxene crystals in the pyroxene skarn zone. d, e) Pyroxene minerals which replaced by the elongated crystals of tremolite and actinolite. f) Mosaic crystals of epidote cut by calcite veinlets. g) Chlorite alteration formed beside of the garnet. h) Late-stage calcite vein which cut epidote vein. (Garnet: Grt, pyroxene: Px, tremolite: Tr actinolite: Act, calcite: Cal, epidote: Ep). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

ها مجموعه کانی‌های تشکیل شده در مراحل قبلی را قطع کرده‌اند. با توجه به اینکه رگچه‌های کلسیتی، رگچه‌های کوارتزی را قطع کرده‌اند، می‌توان اظهار داشت که کلسیت نسبت به کوارتز تاخیری‌تر است (شکل ۱۱-ب).

کوارتز و کلسیت: کوارتز و کانی‌های کربناته در این کانسار بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۱۱-ا). کوارتز به صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار دیده می‌شود. این کانی-



شکل ۱۱-ا) مگنتیت که توسط رگچه کوارتز قطع شده است. (ب) ماده معدنی که توسط رگچه‌های کلسیتی و کوارتزی قطع شده است. رگچه‌های کربناتی، رگچه‌های کوارتزی را نیز قطع کرده است. (مگنتیت: Mt، کوارتز: Qz، کلسیت: Cal). علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) می‌باشند.

Fig. 11-a) Magnetite ore which is cut by quartz vein. b) The ore body cut by the calcite and quartz veins. Carbonate veins also cut the quartz veins. (Magnetite: Mt, quartz: Qz, calcite: Cal). Minerals abbreviations are after Whitney and Evans (2010).

می‌رسد این بافت در اثر جایگزینی کانی‌های مذکور در لایه‌بندی سنگ میزبان روی داده است. قابل ذکر است که مگنتیت و کانی‌های سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) نیز در این کانسار بافت رگه-رگچه‌ای نشان می‌دهند. همانطور که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد، بافت برشی ناشی از تزریق سیالات کانه‌دار به داخل سنگ میزبان و بخش‌های اسکارنی بوده که در نتیجه آن کانی‌ها گارنت و پیروکسن برشی شده و در زمینه‌ای از مگنتیت قرار گرفته‌اند. در برخی بخش‌ها نیز رگه-رگچه‌های کوارتز و کلسیت نیز مجموعه کانه‌زایی را قطع کرده و باعث برشی شدن آنها نیز شده‌اند. هوازگی کانی‌های اولیه از جمله مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت و تبدیل آن‌ها به کانه‌های ثانویه از جمله کوولیت،

ساخت و بافت: مطالعات ساخت و بافت ماده معدنی و تشخیص دقیق پاراژنز و توالی پاراژنتیکی کانه‌های معدنی و سنگ‌ساز، یکی از اساسی‌ترین پارامترهای شناسایی ویژگی‌های محیط و فرآیندهای تشکیل هر کانسار می‌باشد. نتایج این مطالعات نقش کلیدی و تعیین کننده‌ای در دستیابی به اهداف این تحقیق داشته‌اند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که ساخت و بافت مواد معدنی و باطله در کانه‌زایی آهن صاحب از نوع توده‌ای، رگه-رگچه‌ای، برشی، دانه‌پراکنده، نواری و جانشینی است. بافت‌های توده‌ای، رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و دانه پراکنده از بافت‌های اولیه کانه‌زایی مگنتیت می‌باشند که همزمان با تشکیل کانسنگ به وجود آمده‌اند. بافت نواری نیز بیشتر متشکل از نوارهای متناوب مگنتیت با گارنت می‌باشد (شکل ۶ع) که به نظر

کالکوسیت، ملاکیت، آزوریت و گوتیت، باعث ایجاد بافت‌های جانشینی و بازماندی شده است.

توالی پاراژنتیکی

تشکیل یک کانسار با طی شدن فرایندهای متفاوتی همراه است. این فرایندها بر روی سنگ میزبان و کانی‌های موجود در کانسار اثر خود را می‌گذارند. با بررسی تشکیل هر کدام از کانی‌ها در بستر زمان، می‌توان به توالی پاراژنتیک کانسار دست پیدا کرد (Pirajno, 2009). افزون بر این، توالی پاراژنتیک باید زمان نهشته شدن کانی‌های باطله و بازه زمانی آن‌ها را نیز نشان دهد. توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌های باطله کانه‌زایی آنومالی غربی کانسار آهن صاحب با توجه به مطالعات صحرایی، سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و شواهد بافتی و روابط بین کانی‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به مطالعات انجام شده، کانی‌سازی در کانسار صاحب در چند مرحله به شرح زیر تشکیل شده است:

دگرگونی مجاورتی (ایزوشیمیایی)

پس از تشکیل واحدهای کربناته پرمین (سازند روته) و شیل‌های کرتاسه، توده نفوذی صاحب در زمان کرتاسه بالایی-پالئوسن به داخل این سنگ‌ها تزریق شده است. بعد از تزریق توده نفوذی صاحب در واحدهای مذکور، دگرگونی مجاورتی در سنگ‌های مجاور توده اتفاق افتاده است. در این مرحله، واحدهای کربناته به مرمر و شیل‌های کرتاسه به هورنفلس تبدیل شده‌اند. در مرحله دگرگونی ایزوشیمیایی به مقدار کم کانی‌های بی‌آب مانند گارنت، پیروکسن به صورت توده‌ای، نواری و رگه-رگچه‌ای در داخل بخش‌های مرمری شده و هورنفلس‌ها تشکیل شده‌اند.

متاسوماتیسم

بر اساس مشاهدات بافتی و کانی‌شناختی متاسوماتیسم طی ۲ مرحله یعنی متاسوماتیسم پیشرونده و متاسوماتیسم پسرونده اتفاق افتاده که در ادامه توضیح داده شده است.

متاسوماتیسم پیشرونده

پس از جایگیری توده گرانیتوئیدی صاحب در واحدهای دربرگیرنده، توده مذکور شروع به سرد شدن نموده و سیال‌های ماگمایی از آن جدا شده و از طریق درزه‌ها و شکاف‌ها، وارد واحدهای رسوبی دگرگون شده پرمین و کرتاسه گردیده‌اند. سیالات کانه‌ساز باعث تحرک و جابه‌جایی عناصر بین دو گرادیان متفاوت شیمیایی و حرارتی شده و واکنش‌های را سبب می‌گردند که موجب تشکیل کانی‌ها و کانه‌ها می‌شوند. در این مرحله، کانی‌های سیلیکاته بی‌آب از جمله پیروکسن و گارنت در اثر اضافه شدن عناصر و اکسیدهایی از جمله Fe, SiO₂ و Mg از ماگمای گرانیتوئیدی به داخل مرمرها، تشکیل شده و بخش اگزواسکارن را در این منطقه بوجود آورده است. وجود بلورهای پیروکسن در کنار بلورهای گارنت نشان دهنده تشکیل این دو کانی همزمان با هم است. در این مرحله علاوه بر کانی‌های گارنت، پیروکسن و مگنتیت (به مقدار کم و در مراحل پایانی این مرحله) تشکیل شده‌اند. بافت‌های تشکیل شده در این مرحله شامل جانشینی، برشی، پرکننده فضای خالی، نواری، توده‌ای و رگه-رگچه‌ای هستند.

متاسوماتیسم پسرونده

با سرد شدن سیستم اسکارنی و نفوذ آب‌های جوی دما پایین به درون سیستم کانه‌زایی، در دماهای زیر ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد و تغییرات فوگاسیته اکسیژن (fO_2) و فوگاسیته گوگرد (fS_2)، گارنت و پیروکسن به فازهای جدید و آبداری مانند اپیدوت،

سوپرژن و هوازدگی

وجود کانی‌هایی مانند آزرویت، مالاکیت، هماتیت و گوتیت بارزترین نشانه از تاثیر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی در این کانسار است. در بخش غربی کانسار صاحب، نفوذ سیال‌های جوی در ماده معدنی باعث شسته‌شدن و انحلال کانی‌های سولفیدی اولیه و تشکیل هیدروکسیدهای آهن و کربنات‌های آبدار مس شده است (شکل ۱۲). در پهنه اکسیدان، کانی‌های گوتیت و لیمونیت به وجود آمده و سبب تشکیل گوسان و دگرسانی اکسید آهن شده‌اند. هم‌چنین کانی‌های آبدار و بی‌آب مس، مانند کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت نیز در پهنه اکسیدان تشکیل می‌شوند (Evans, 1987). به دلیل اینکه آب‌ها در پهنه اکسیدان ویژگی‌های اکسایشی داشته و حاوی کربنات می‌باشند، موجب رسوب کانی‌های کربناته آبدار مس می‌شوند. مالاکیت در دمای پایین و در شرایط اکسایشی با فشار CO_2 ۱۰-۱۵ تا ۲۵-۱۰ اتمسفر پایدار است (Rose, 1989). آب‌های زیرزمینی به صورت معمول دارای همین شرایط می‌باشند، در حالی که فشار CO_2 در آب‌های جوی کنونی زمین حدود ۳۴-۱۰ است. بنابراین مالاکیت در محیط اشباع از آب‌های زیرزمینی و یا در شرایط گذشته که مقدار فشار CO_2 بالاتر بوده تشکیل شده است (Putter et al., 2010). در کانسار اسکارن صاحب، بر اثر فرایندهای سوپرژن کانی‌هایی مانند کالکوسیت و کوولیت و در اثر هوازدگی کانی‌هایی از جمله هماتیت، گوتیت، مالاکیت و آزوریت به وجود آمده‌اند. در طی این مرحله بافت‌هایی از جمله جانشینی و بازماندی نیز تشکیل شده‌اند.

ترمولیت و اکتینولیت و یا کانی‌هایی مانند کلسیت و کوارتز و مگنتیت تبدیل شده‌اند. مهم‌ترین تغییر شیمیایی سیال عبارتست از خنثی شدن (با افزایش pH) در اثر برخورد با کلسیت (مرمر) و تا حدودی کالک‌سیلیکات‌های اولیه‌ی اسکارنی، که در این حالت کمپلکس‌های کلریدی ناپایدار شده و مواد معدنی خود را به صورت کانسنگ اکسیدی و سولفیدی برجای گذاشته‌اند. در این مرحله، کانی‌های کالک‌سیلیکات آبدار و بدون آب تشکیل شده در مراحل قبلی اسکارن‌زایی، توسط سیالات دما پایین دچار دگرسانی شده و مجموعه‌های کانی‌های کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی را ایجاد کرده است. قابل ذکر است که حجم اصلی کانه‌زایی مگنتیت در این مرحله رخ داده است. در این مرحله می‌توان کانی‌های اکسیدی مانند مگنتیت، ترمولیت، اکتینولیت، اپیدوت و کلریت را مشاهده کرد که در کنار آن‌ها، کانی‌های سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده‌اند. با توجه به شواهد به دست آمده و مطالعات انجام شده می‌توان اظهار داشت که کانی‌های سولفیدی در این مرحله بعد از کانه‌زایی مگنتیت تشکیل شده است. رگه-رگچه‌های کربناتی و سیلیسی نیز همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد در مرحله تاخیری و بعد از کانه‌زایی سولفیدی تشکیل شده‌اند. قابل ذکر است که رگه-رگچه‌های کربناتی آخرین فاز کانه‌زایی هستند که رگچه‌های سیلیسی و مجموعه کانه‌زایی را قطع کرده‌اند. بافت‌های مشاهده شده در این مرحله شامل جانشینی، برشی، پرکننده فضای خالی، توده‌ای و رگه-رگچه‌ای می‌باشند.

Mineral	Isochemical Stage	Metasomatism		Supergene
		Prograde skarn	Retrograde skarn	
Garnet				
Pyroxene				
Magnetite				
Pyrite				
Chalcopyrite				
Tremolite				
Actinolite				
Epidote				
Chlorite				
Quartz				
Calcite				
Chalcocite				
Covellite				
Hematite				
Goethite				
Malachite				
Azurite				
Textures	Vein-Veinlet			
	Brecciated			
	Open space filling			
	Massive			
	Replacement			
	Banded			
	Relict			

شکل ۱۲- توالی پاراژنتیک کانه‌ها و کانی‌های باطله در آنومالی غربی کانسار آهن صاحب.

Fig. 12. Paragenetic sequence of minerals in the western anomaly of the Saheb iron deposit

نتیجه‌گیری

در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌شناسی ساختاری ایران، منطقه مورد مطالعه بخشی از پهنه دگرگونی-ماگمایی سنندج-سیرجان می‌باشد. واحدهای رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه، شامل واحدهای کربناته مرمری شده پرمین، واحدهای شیلی هورنفلسی شده کرتاسه و توده گرانیتوئیدی صاحب با سن ۵۸ تا ۶۷ میلیون سال (Abdollahi et al., 2019; Abdollahi, 2019) می‌باشد. بر پایه مطالعات دورسنجی می‌توان اظهار داشت که دگرسانی‌های کربناته، کلریتی، ترمولیت-اکتینولیتی، گوسان و

آرژلیک در منطقه از گسترش خوبی برخوردارند. بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، توده گرانیتوئیدی صاحب دارای ترکیب کوارتز مونزودیوریت، کوارتز مونزونیت و گرانیت می‌باشد. توده کوارتز مونزودیوریت دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، کوارتز و آلکالی فلدسپار به عنوان کانی‌های اصلی و کلریت، تیتانیت، زیرکن و آپاتیت کانی‌های فرعی این توده را تشکیل می‌دهند. توده کوارتز مونزونیت دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، آمفیبول، بیوتیت و آلکالی فلدسپار به عنوان کانی‌های اصلی و تیتانیت، آپاتیت، زیرکن و کانی‌های اپک به عنوان کانی‌های فرعی می‌باشد.

توده گرانیته از کانی‌های کوارتز، آلکالی فلدسپارهای درشت‌دانه با بافت پرتیتی، پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول تشکیل شده است. کانی‌های آپاتیت، زیرکن و تیتانیت کانی‌های فرعی این توده را تشکیل می‌دهند. زیرپهنه کانه‌دار به صورت عدسی شکل و رگه‌ای با گسترش طولی ۲۰ تا ۱۰۰ متر و با ضخامت ۳ تا ۱۰ متر می‌باشد. کانه‌زایی آهن صاحب به صورت توده‌ای، برشی، پرکننده فضای خالی، نواری، رگه-رگچه‌ای، دانه پراکنده، جانشینی و بازماندی مشاهده می‌شود. مگنتیت کانه اصلی کانسنگ در این منطقه بوده که همراه با آن کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه مانند هماتیت، گوتیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت می‌باشد. گارنت، پیروکسن، اپیدوت، اکتینولیت، ترمولیت، کلسیت و کوارتز به عنوان کانی‌های باطله در این کانسار حضور دارند. کوولیت، کالکوسیت، آزوریت، گوتیت، مالاکیت و هماتیت در اثر فرایندهای سوپرژن و هوازدگی در این کانسار تشکیل شده‌اند. با توجه به سن به دست آمده از توده گرانیته‌ی صاحب، می‌توان اظهار داشت که این کانسار در Aghanabati, A., 1998. Major sedimentary and structural units of Iran (map). Geosciences 7, 29-30.

Aghanabati, A., 2005. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 538 pp. (in Persian)

Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229(3-4), 211-238.

Aliani, F., Dadfar, S., Maanijou, M., 2015. Detection of Alteration Zones of Haji Abad Iron Deposit with (SWIR+VNIR) Data of ASTER Sensor. Geoscience Journal 24(94), 73-80. (in Persian)

Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., Shamsa, M.J., 2005. The role of deformation and alteration in gold mineralization in the Qolqoleh ductile, shear zones and brittle southwest of Saez. 24th Geoscience Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian)

Aliyari, F., Rastad, E., Mohajjel, M., 2012. Gold deposits in the Sanandaj-Sirjan zone orogenic gold deposits or

اواخر کرتاسه- اوایل پالئوسن در اثر تزریق توده گرانیته به داخل این واحدها تشکیل شده است. از نظر تقسیمات کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی، این کانسار با توجه به ویژگی‌های کانی‌شناسی و کانه‌زایی، می‌توان اظهار داشت که این کانه‌زایی از نوع اسکارن کلسیمی بوده که کانه اصلی آن مگنتیت می‌باشد. با توجه به گسترده بودن باتولیت صاحب در این منطقه و وجود سنگ‌های کربناته و واکنش‌پذیر در این بخش از ایران، شواهد به دست آمده از این کانسار می‌تواند به اکتشاف کانسارهای مشابه در این بخش از پهنه دگرگونی- ماگمایی سهندج- سیرجان کمک بسزایی نماید.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول می‌باشد که با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه زنجان انجام شده است. لذا بدین وسیله از همکاری ارزنده آن معاونت تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- Abdollahi, F., 2019. Presentation of genetic model for western part of Saheb iron mineralization (wet ore Saez) using by geological, mineralogical, remote sensing and age of intrusive rocks in the region. M. Sc. Thesis in economic geology, University of Zanjan, Zanjan, Iran. 153 pp. (in Persian)
- Abdollahi, F., Nabatian, Gh., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2018. Geology and petrography of Saheb granitoid intrusive bodies, north of Saez. The 36th National and the 3rd International Geosciences Congress, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Abdollahi, F., Nabatian, Gh., Li, J-W., Honarmand, M., Ebrahimi, M., 2019. Saheb Granitoid Batholith, North of Kurdistan; An Evidence of Cretaceous- Paleocene Magmatism in the Sanandaj-Sirjan Zone. Journal of Economic Geology 12(3), 359-376. (in Persian)
- Abrams, M.J., Brown, d., Lepley, L., Sadowski, R., 1983. Remote sensing of porphyry copper in Southern Arizona. Economic Geology 78(4), 591-604.

- intrusion related gold systems. *Resource. Geology* 62(3), 296–315.
- Bames, H.L., 1997. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons, Tir 2, 972 pp.
- Barati, M., Gholipour, M., 2014. Study of REE behaviors, fluid inclusions, and O, S stable Isotopes in Zafar-abad iron skarn deposit, NW Divandarreh, Kordestan province. *Journal of Economic Geology* 6(2), 235-257. (in Persian)
- Canals, A., Cardellach, E., Rye, D.M., Ayora, C., 1992. Origin of the Atrevida Vein (Catalonian costal ranges, Spain), minralogic, fluid inclusion and stable isotope study. *Economic Geology* 87, 142-153.
- Craig, J.R., Vaughan, D.L., 1994. *Ore Microscopy and Ore Petrography*, John Wiley and Sons, New York, pp. 446.
- Eftekharneshad, j., 1977. Geological map of Mahabad, scale 1: 250000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Einaudi, M.T., Hedenquist, J.W., Inan, E.E., 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transition from porphyry to epithermal environments. *Special Publiction-Society of Economic Geologists* 10, 285-314.
- Elyasi, E., Ahangari, M., 2015. Petrology and geochemistry of felsic to mafic plutonic rocks from the Saheb, West Iran. *Iranian Journal of Geology* 9 (33), 15-30.
- Evans, A.M., 1987. *An introduction to ore geology*. Blackwell Scientific Publications, London. 450 pp.
- Ghorbani, M., 2013. *The Economic Geology of Iran, Mineral Deposits and Natural Resources of Iran*. Springer Netherlands, 572 pp.
- Haynes, D.W., 2000. Iron oxide–copper (–gold) deposits: their position in the ore deposit spectrum and modes of origin. in: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal iron oxide–copper–gold and related deposits, a global perspective* PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 71-90.
- Heidari, S.M., Rastad, E., Mohajjel, M., Shamsa, S.M.J., 2006. Gold Mineralization in Ductile Shear Zone of Kervian (Southwest of Saqez- Kordestan Province). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 15(58), 18-37. (in Persian)
- Huston, D.L., Large, R.R., 1989. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews* 4, 171-200.
- Kholghi Khosraqi, M.H., 2000. Geological map of Chapan, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Kholghi, M.H., Vossoughi Abedini, M., 2008. Petrogenesis, geodynamics and radiometric age dating of Safakhaneh mass, Northwest of Iran. *Scientific Quarterly Geosciences Journal* 17(66), 24-39. (in Persian)
- Kouzmanov, k., pokrovski, G.S., 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (–Mo–Au) systems, in: Sillitoe Richard H. (Ed.), *SEG Special Publication 16: Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Edition: 2012*, Society of Economic Geologists, Chapter: 22, pp. 573-618.
- Krauskopf, K., 1979. *Introduction of Geochemistry*. 2nd edn McGraw-Hill. New York, 640 pp.
- Kruse, F.A., Raines, G.L., Watson, K., 1985. Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data, in *Proceedings, International Symposium on Remote Sensing of Environment, Fourth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration geology*, San Francisco, 1-4 April Environmental Research Institute of Michigan (ERIM), Ann Arbor, Mi, 309-324.
- Maanijou, M., Ramezani, T., Alipour, S., 2019. The main effective factors on the minralization of sonajil porphyry-epithermal copper- gold deposit, using remote sensing, mineralogical and geochemical studies. *Iranian Journal of Geology* 12(48), 79-63. (in Persian)
- Maanijou, M., Puyandeh, N., Sepahi A.A., Dadfar, S., 2015. Mapping of hydrothermal alteration of Dashkasan (Sari gunay) epithermal gold mine using aster sensor images and xrd analysis. *Geoscineces Journal* 24(95), 95-104. (in Persian)
- Meinert, L., Dipple, G., Nicolescu, S., 2005, World skarn deposits, in: Hedenquist, J.W., et al., (eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, pp. 299–336.
- Meinert, L.D., 1983. Variability of skarn deposits: Guides to exploration. *Revolution in the Earth Sciences*. Kendall-Hunt Publishing, Dubuque, Iowa, 301-316.
- Ogg, J.G., Ogg, G., Gradstein, F.M., 2008. *The concise geologic time scale*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Blackwell Scientific Publications, London. 1243 pp.
- Pour, A.B., Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 1309-1323.

- Putter, T.D., Mees, F., Decrée, S., Dewaele, S., 2010. Malachite an indicator of major Pliocene Cu remobilization in a karstic environment, (Katanga, Democratic Republic of Congo). *Ore Geology Reviews* 38(18), 90–100.
- Ramdhor, p., 1980. The ore minerals and their intergrowth, Pergamon Prss, Oxford, 440 pp.
- Reichenbacher, B., Alimohammadian, H., Sabouri, J., Haghfarshi, E., Faridi, M., Abbasi, S., Matzke-Karasa, R., Fellin, M.G., Carnevale, G., Schiller, W., 2011. Late Miocene stratigraphy, paleoecology and paleogeography of the Tabriz basin (NW Iran, Eastern Paratethys). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 311, 1–18.
- Rose, M., 1989. Mobility of copper and other heavy metals in sedimentary environments. in: Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C., Kirkham, R.V. (Eds.), *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits*. Geological Association of Canada, Canada, pp. 97–110.
- Seedorf, E., Dilles, J.H., Proffett, J.M., Einaudi, M.T., Zurcher, L., Stavast, W.J.A., Johnson, D.A., Barton, M.D., 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology* 100th Anniversary, pp. 251–298.
- Shelly, D., 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman & Hall, London, 445 pp.
- Shimazaki, H., 1980. Characteristics of skarn deposits and related acid magmatism in Japan. *Economic Geology* 75, 173–183.
- Smirnov, V.I., 1962. *Geology of mineral deposits*. English translation (1976), Mir. Publishers, Moscow, 520 pp.
- Sohaili, M., Bani Adam, F., Hesami, A.F., 2001. Geological map of Saheb area, scale 1:5000. Tosee Olom Zamin Company.
- Tajeddin, H.A., Rastad, E., Yagoubpor, A., Mohajjel, M., 2012. Petrogenesis Geochemistry and Role of Deformation on Ore Elements Distribution of Barika Gold-Rich Massive Sulfide Deposit, East of Sardasht, Northwest of Sanandaj – Sirjan Zone. *Geoscience Journal* 21(83), 141–156. (in Persian)
- Tale Fazel E., 2023. Ilvaite trace mineral chemistry as a thermodynamic recorder of retrograde alteration and metallogenic indicator for discrimination of skarn deposits: an example from the iron deposit in North Sanandaj-Sirjan Zone. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 9 (1), 283–307.
- Thomas, H.Y., Traina, S.J., 2004. Transformation of magnetite to goethite during Cr (VI) reduction condition under alkaline pH condition. 227th American Chemical Society meeting, Anaheim, USA.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Yarmohammadi, A., Rastad, E., Mohajjel, M., Shamsa, M.J., 2008. Barika gold mineralization: a gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit in Iran. *Journal of Science* 34(1), 47–60. (in Persian)