



Research Article

Genesis of the Delkan iron deposit based on the geological, tectonic, petrographic as well as $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{34}\text{S}$ stable isotope studies (SW of Bardeskan, Khorasan Razavi Province)

Masih Kassaeian¹ , Mehrdad Behzadi² 

¹ Ph.D. Student of Economic Geology, Department of Mineral and Water Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_kassaeian@sbu.ac.ir

² Associate Professor, Department of Mineral and Water Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_behzadi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Received: 18 August 2025
Accepted: 01 December 2025

Keywords

Skarn
Iron Oxide Apatite
Kashmar-Kerman Tectonic Zone
Delkan
Stable Isotope



 10.22108/ijp.2025.146371.1369

Introduction

Delkan iron mine, geologically, located in the south of Bardeskan city. It is geologically located in the eastern part of the Central East Iran Microcontinent. Regarding structural division, the Delkan iron mine lies in the northeast of the Kashmar-Kerman tectonic zone and on the northeastern ridge of Kuh-e-Sarhangi. Some of the most important iron mines in Iran are located in the Kashmar-Kerman structural zone, for example, the Bafgh iron mines with a total reserve of 5 billion tons (Torabian, 2007).

Geology of the Area

The rock units in the study area are predominantly the metamorphosed units of schist, quartzite, limestone, dolomite, and amphibolite, belonging to Precambrian and the Cambrian units composed of limestone, dolomite, carbonaceous shales, schist, and quartzite. These rock units were subjected to intrusion of a plutonic stock, which gave rise to contact metamorphism halo and iron mineralization during the Silurian.

Materials and Methods

Following the field investigations, for structural studies, 37 fault planes were structurally sampled, and 284 rock samples were taken from the surface and the archive of drilled cores in the mine for petrology, mineralogy, and mineralization studies. 73 microscopic sections of the samples were studied

with an Olympus BX60F5 microscope at the University of Isfahan. Maps of the area were drawn using ArcGIS software. To measure the main oxides, 36 rock samples were taken and after preparation using the peroxide fusion method, were analyzed by the use of the ICP-OES technique. $\delta^{18}\text{O}$ stable isotope analyses were carried out on 2 magnetite and 2 quartz samples. Also, $\delta^{34}\text{S}$ stable

 Corresponding Author

To cite this article: Kassaeian, M., Behzadi, M. (2025) Genesis of the Delkan iron deposit based on the geological, tectonic, petrographic as well as $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{34}\text{S}$ stable isotope studies (SW of Bardeskan, Khorasan Razavi Province). *Petrological Journal*, 16(4), 57-82.



isotope analysis were performed on 2 pyrite samples. All isotope analyses were carried out at the Stable Isotope Research Laboratory of Arak University (SIRL).

Mineralization, Alterations, Mineralogy and Mineralography

Iron mineralization in the Delkan mine is observed in the two forms: 1) Iron oxide apatite with disseminated and veinlet texture within the monzonite intrusive stock, 2) Massive proximal and distal magnetite without apatite.

Alterations observed in the Delkan deposit can be divided into prograde skarn, sodic, calcic, phyllic-silicic, and secondary carbonate alteration in order of occurrence. The intensity and spread of Prograde calc-silicate skarn alteration in the area are extremely limited.

Pyrite occurs in two forms, pentagonal and anhedral to cubic. Primary quartz is pentagonal and secondary quartz is anhedral. Metamorphic garnets are red, isotropic, and metasomatic garnets are brown to green, and anhedral to euhedral. Albite is often replaced by other minerals and can be seen as pseudomorphs. Acicular actinolite with fibrous textures, and anhedral to subhedral apatite, euhedral to anhedral magnetite with massive, disseminated, and replacement textures are noticeable. In the central parts of the deposit, magnetite mineralizations are present in massive form without apatite, but at the margins of the intrusive stock, disseminated magnetite mineralized with apatite. Hematite is seen with disseminated, replacement, and martitization textures; in some cases, it is replaced by goethite or limonite. Chalcopyrite is observed in an anhedral shape.

Galena and sphalerite mineralizations were also observed in shallow quartz veins of Delkan (Shabani et al., 2015).

Fault Patterns and Their Relationship with Iron Mineralization

Two main fault distributions are extended in the mining area, including longitudinal faults trending northeast-southwest parallel to the extension of the Kuh-e-Sarhangi and NW-SE trending transverse faults almost perpendicular to the first group. According to studies (Sahandi et al., 2010; Nozaem, 2012), the Kuh-e-Sarhangi and Delkan areas have undergone multiple tectonic regime shifts between transpressional tectonic phases and extensional phases accompanied by volcanism and mineralization. It seems that the Silurian extensional phases in the longitudinal faults of the area under study have played a significant role in creating a suitable space for the intrusion of monzonite stock, which ultimately gave rise to the formation of

proximal IOA and massive magnetite mineralization. Transverse faults have also played the role of escape routes for part of the hydrothermal fluid, caused the formation of distal mineralizations.

Geochemistry of stable isotopes

The isotopic values of $\delta^{18}\text{O}$ for magnetite samples in ranges from 8.6 and 10‰. According to several people (Einaudi et al., 1981; Bowman, 1998; Meinert et al., 2005), these values indicate a Juvenile origin for the hydrothermal fluid that caused the mineralization of massive magnetites without apatite.

The values of $\delta^{18}\text{O}$ for quartz samples are between 15.6 and 16.2‰. These values indicate isotopic equilibrium between the hydrothermal fluid and the host rock during the gradual cooling processes of the fluid.

The isotopic $\delta^{34}\text{S}$ values for pyrite samples ranging from 20.1 to 20.6‰. According to (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005), we consider the studied sulfur sources in the area of study to be non-magmatic and related to isotopic changes in the hydrothermal fluid in equilibrium with marine sulfates and host rocks as well.

Discussion and Conclusion

Two types of iron mineralizations (skarn and kiruna) occurred in the Delkan mine, but most iron reserves in this deposit share similar characteristics to iron skarn deposits. Mineralization in the Delkan iron deposit has been subjected by several factors, of which the most important are the following:

A) The tectonic regime shifts between the transtensional and transcompressional regimes, which played a key role in intrusion and trapping of the intrusive stock,

B) The direction and patterns of faults have been effective in determining the intrusion paths for both the plutonic stock and the juvenile hydrothermal fluids, mineralization type and locations of mineralizations,

C) Differences in Oxidation state between the intrusive stock and the host rocks (especially the black carbonaceous phyllite layers that are highly reduced) plays a key role in the consumption of dissolved oxygen in the juvenile hydrothermal fluid due to intensity of decarbonation reactions between the fluid and these reducing layers, and as a result, the increase in the CO_2 fugacity of the fluid, which will decrease the intensity of calc-silicate alterations (prograde skarn) and also a decrease in the amount of iron skarn mineralizations.



تعیین زایش کانسار آهن دلکن با تکیه بر بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌ساخت، سنگ‌نگاری و ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ (جنوب‌باختری بردسکن، استان خراسان رضوی)

مسیح کسائیان^۱، مهرداد بهزادی^۲

^۱ دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_kassaeian@sbu.ac.ir
^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_behzadi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

کانسار آهن دلکن در بخش‌های خاوری پهنه زمین‌شناسی ایران مرکزی و در بخش شمال‌خاوری پهنه زمین‌ساختی کاشمر-کرمان جای دارد. زمین‌شناسی محدوده شامل واحدهای شیست، کوارتزیت، آهک، دولومیت، آمفیبولیت و شیل‌های کربن‌دار با سنین پرکامبرین تا کامبرین است. گسل‌های در این محدوده دو روند اصلی نشان می‌دهند. گروه نخست، روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری دارند که در نفوذ و به‌دام‌انداختن استوک آذرین درونی که عامل دگرگونی همبری و کانه‌زایی در محدوده بوده است، مؤثر بوده‌اند و گروه دوم، گسل‌هایی با روند کمابیش عمود بر گروه نخست هستند که در کنترل کانه‌زایی تأثیرگذار بوده‌اند. با توجه به مشابهت‌ها در کانه‌زایی آهن معدن دلکن با سه گروه متفاوت از کانه‌زایی‌های آهن، هدف از این پژوهش شناخت بهتر شرایط و فرایندهای موثر در پیدایش و در پایان، تعیین تیپ کانه‌زایی در کانسار بوده است که با روش بررسی زمین‌شناسی و زمین‌ساخت محدوده و شناخت ارتباط آنها با گسترش و نوع دگرسانی‌ها و کانه‌زایی و همچنین، بررسی‌های کانی‌شناسی، کانه‌نگاری، تجزیه مقدار اکسیدهای اصلی و ایزوتوپ‌های پایدار در محدوده انجام شد. کانه‌زایی در محدوده به دو گروه دسته‌بندی می‌شود. دسته نخست، کانه‌زایی‌های مگنتیت توده‌ای است. دسته دوم، کانه‌زایی افشان و رگچه‌ای اکسیدهای آهن همراه با آپاتیت است. دگرسانی‌ها در محدوده شامل اسکارن پیش‌رونده، سدیک، کلسیک، فیلیتیک، سیلیسی و کربناتی ثانویه است. تجزیه اکسیدهای اصلی در رخنمون‌های کانسار با ترکیب روش آماده‌سازی ذوب پراکسیدی و روش ICP-OES مقادیر مناسبی از کانه‌زایی آهن را نشان می‌دهند. داده‌های تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن روی کانی‌های مگنتیت توده‌ای و کوارتز، نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی برای سیال گرمایی مؤثر در کانه‌زایی‌های آهن بوده است. تجزیه ایزوتوپ پایدار گوگرد روی کانی پیریت نیز نشان‌دهنده خاستگاه غیرماگمایی برای گوگرد است. اگرچه دگرسانی‌ها و کانه‌زایی‌های تیپ کاپرونا در این محدوده وجود دارند، اما ذخایر اصلی آهن در این محدوده، مگنتیت‌های توده‌ای با تیپ اسکارن هستند.

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۵/۲۷
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

کلید واژه‌ها

اسکارن آهن
اکسید آهن آپاتیت
کمبرند ساختاری کاشمر-کرمان
دلکن
ایزوتوپ پایدار



doi 10.22108/ijp.2025.146371.1369

نویسنده مسئول

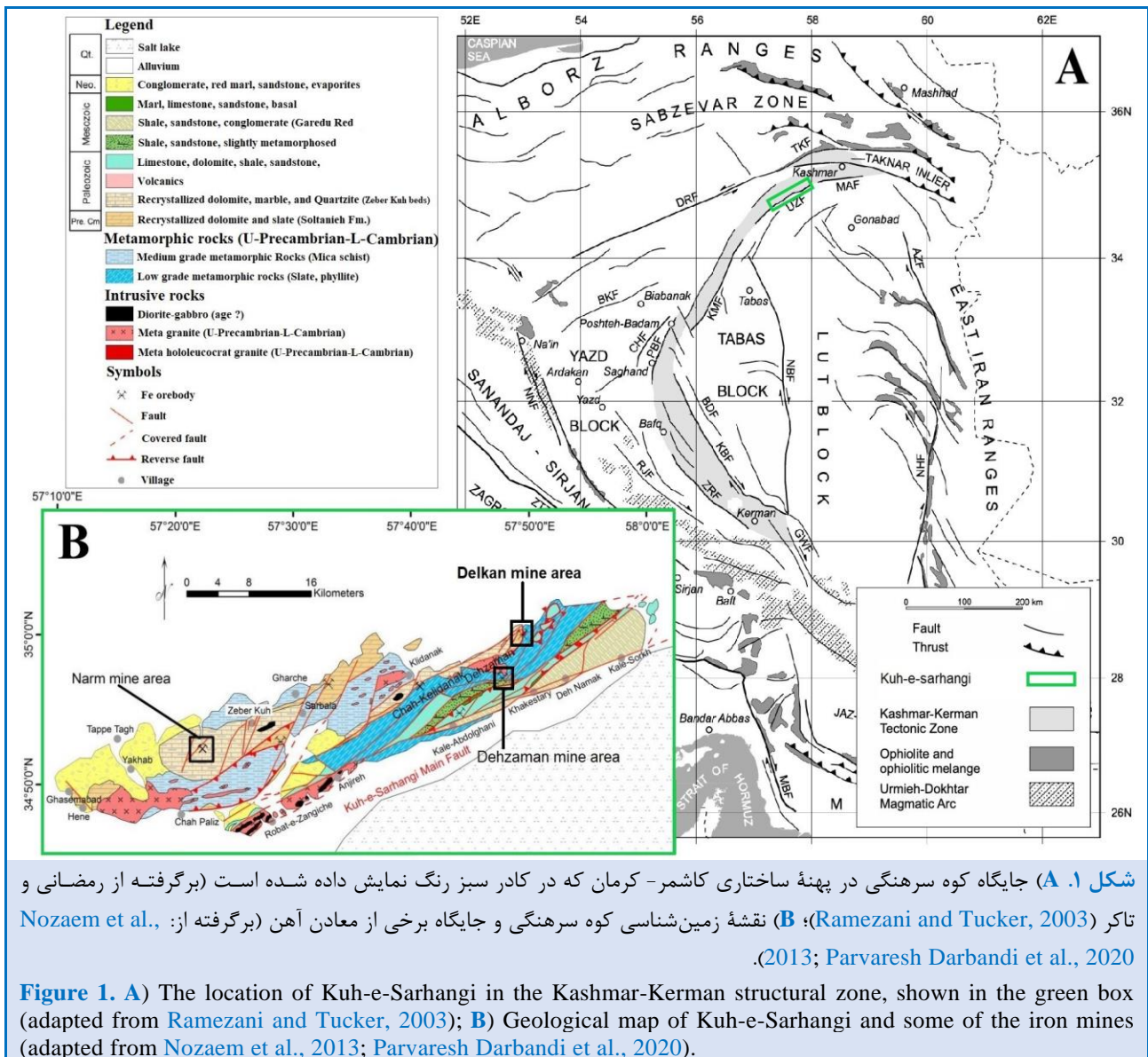
استناد به این مقاله: کسائیان، م.، بهزادی، م. (۱۴۰۴) تعیین زایش کانسار آهن دلکن با تکیه بر بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌ساخت، سنگ‌نگاری و ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ (جنوب‌باختری بردسکن، استان خراسان رضوی). پترولوژی ۱۶ (۴)، ۵۷-۸۲.



مقدمه

معادن آهن دلکن در ۳۶ کیلومتری جنوب شهر بردسکن در نزدیکی بلندی‌های کوه دلکن و کالاسب جای دارد. از دیدگاه پهنه‌بندی زمین‌شناسی، این محدوده در بخش خاوری پهنه ایران مرکزی جای دارد (Stöcklin, 1968, 1977). همچنین، در پهنه‌بندی ساختاری ایران، معادن آهن دلکن در شمال‌خاوری پهنه زمین‌ساختی

کاشمر- کرمان (شکل ۱-۱A) و در یال شمال‌خاوری کوه سرهنگی (شکل ۱-۱B) جای دارد. برخی از مهم‌ترین معادن آهن ایران در پهنه ساختاری کاشمر-کرمان جای گرفته‌اند که از میان آنها می‌توان معادن آهن در منطقه بافق با مجموع ذخیره ۵ میلیارد تن (Torabian, 2007) را نام برد. کانسارهای پدهبید، زبرکوه، کمرکاسه، ده‌زمان و نرم، نزدیک‌ترین معادن آهن به کانسار آهن دلکن هستند.



شکل ۱. A) جایگاه کوه سرهنگی در پهنه ساختاری کاشمر- کرمان که در کادر سبز رنگ نمایش داده شده است (برگرفته از رضایی و تاگر (Ramezani and Tucker, 2003); B) نقشه زمین‌شناسی کوه سرهنگی و جایگاه برخی از معادن آهن (برگرفته از: Nozaem et al., 2013; Parvaresh Darbandi et al., 2020).

گزارش آن زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه را بررسی و اشاره کوتاهی نیز به مباحث ساختاری و پتانسیل اقتصادی در این منطقه کرده‌اند. بررسی‌های ملکزاده‌شفاوردی و

در این بخش به شماری از مهم‌ترین پژوهش‌های پیشین در این ناحیه پرداخته می‌شود. نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ قاسم‌آباد (Sahandi et al., 2010) که در این نقشه و

کالکوپیریت و پیریت در پهنه مگنتیتی بوده است. با توجه به شباهت‌های بسیاری که کانسار آهن دلکن با چندین تیپ (گروه) متفاوت از کانه‌زایی‌های آهن دارد، هدف از این پژوهش شناخت بیشتر مکانیسم‌های تأثیرگذار بر پیدایش کانسار، بررسی دقیق‌تر زمین‌شناسی و کانه‌زایی، زمین‌ساخت، ایزوتوپ‌های پایدار و در پایان، تعیین تیپ کانسار با استفاده از مجموعه بررسی‌های جدید و پژوهش‌های پیشین در این محدوده بوده است.

زمین‌شناسی و زمین‌ساخت ناحیه‌ای

زمین‌ساخت بخش شمال‌خاوری پهنه کاشمر کرمان با پهنه گسله کمرتاجی در شمال و گسل کوه سرهنگی در جنوب که ادامه گسل‌های بزرگ پشت‌بادام و کوهبنان هستند، کنترل می‌شود. در این منطقه واحدهای سنگی دگرگون شده و دگرریخت شده پرکامبرین شامل مجموعه آمفیبولیت، میکاشیست‌های گرونادار، مجموعه اسلیت و فیلیت‌های پرکامبرین، سنگ‌های کربناته بلورین، مرمر، میکاشیست، سنگ‌های دولومیتی و شیل‌های سازند ریزو و سلطانیه، ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های کربناته سری زبرکوه، گنیس‌ها و گرانیت‌های میلونیتی شده در کنار واحدهای سنگی از پالئوزویک مانند سازندهای زاگون، لالون، میلا، نیور، پاده‌ها، سردر و سازندهای تریاس، با مرزهای گسله و راندگی‌ها جای گرفته‌اند. حرکت‌های راستالغز راست‌بر با مؤلفه فشارشی گسل‌های کوهبنان و پشت‌بادام و عملکرد گسل بزرگ درونه، مجموعه‌های بزرگ سنگی را به‌صورت گوه‌های زمین‌ساختی درهم‌فرو برده است (Sahandi et al., 2010). گمان می‌رود گوه بزرگ زمین‌ساختی شامل واحدهای پالئوزویک و مزوزویک در جنوب خاوری کوه‌های سرهنگی که با چین‌خوردگی و راندگی همراه است، بدین‌گونه جای گرفته باشد. همچنین، نفوذ توده‌های ده‌زمان، لاج برقی، رباط زنگیچه و یخاب، هم‌زمان با کوه‌زایی کاتانگایی و پیامد فرورانش اقیانوس پروتوتتیس به زیر ایران مرکزی دانسته شده است که در نخستین مرحله دگرریختی به‌صورت سازوکار ترفارشارشی چپ‌گرد در این ناحیه روی داده است (Nozaem et al., 2013). این رخداد به دگرگونی و دگرریختی سنگ‌های پرکامبرین پسین منطقه نیز انجامیده است. با توجه

همکاران (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2018) نشان می‌دهد سنگ‌های میزبان در کانسار آهن پده‌بید شامل تناوبی از سنگ‌های کربناته دگرگون شده، اسلیت و فیلیت هستند که توده‌های دیوریتی و گابرویی در آنها نفوذ کرده‌اند. همچنین، با توجه به شواهد زمین‌شیمیایی تیپ این کانسار را اسکارن دما پایین دانسته‌اند. تحلیل دگرریختی گسترده کوه سرهنگی در شمال‌باختری بلوک لوت در پایان‌نامه دکتری و مقاله‌های مستخرج از این پایان‌نامه (Nozaem, 2012; Nozaem et al., 2013) که نتیجه آن پیشنهاد الگوی زمین‌ساختی فرادرون‌ورقه‌ای برای این بخش از ایران مرکزی در نیمه شمالی بلوک لوت در سنوزویک پایانی بوده است. از مهم‌ترین معادن آهن در کوه سرهنگی معدن سنگ آهن ده‌زمان است (شکل B-1) که در جنوب باختری معدن دلکن جای گرفته است. در بررسی‌های ایمان‌پور و همکاران (Imanpour et al., 2016) این کانسار کانه‌زایی هماتیت به‌صورت نواری، هم‌شیب و هم‌راستا با سنگ‌های رسوبی دگرگون شده میزبان با سن پرکامبرین نشان می‌دهد که با توجه به بررسی‌های زمین‌شیمیایی به روش ریزپردازش الکترونی روی کانسنگ و بررسی اکسیدهای اصلی، شباهت‌های بسیاری میان این کانسار و کانسارهای آهن نواری دیده شد و از این‌رو، رخداد این کانسار را در ارتباط با رسوب آهن در محیط رسوبی نزدیک به ساحل و دور از خاستگاه دانسته شده است. بررسی‌های پرورش‌دربندی و همکاران (Parvareh Darbandi et al., 2020) در کانسار آهن نرم (شکل B-1) نشان می‌دهد کانه‌زایی اصلی آهن در این محدوده مگنتیتی است، شباهت‌هایی میان این کانسار با کانسارهای اکسید آهن آپاتیت^۱ دیده‌اند و توده‌های ماگمایی در محدوده را از نوع آلکالن دانسته‌اند که در جایگاه درون‌صفحه‌ای پدید آمده‌اند. بررسی زمین‌شناسی و کانه‌زایی در معدن دلکن (Shabani et al., 2015) که داده‌های آن شناسایی دو فاز کانه‌زایی در محدوده به‌صورت: (۱) کانی‌سازی اسکارن با کانی‌های نخستین مگنتیت و پیریت و کانی‌های ثانویه هماتیت، مالاکیت و لیمونیت؛ (۲) کانی‌سازی رگه‌ای شامل گالن، اسفالریت،

^۱ Iron oxide apatite (IOA)

رسوبات سنوزویک و باطله‌های به‌دست‌آمده از فرایندهای استخراج ماده معدنی هستند.

روش انجام پژوهش

پس از بررسی‌های صحرایی برای بررسی‌های ساختاری شماره ۳۷ صفحه‌گسلی برداشت ساختاری شدند. همچنین، برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و کانه‌زایی، شماره ۲۸۴ نمونه سنگی از سطح و همچنین، از مغزه‌های حفاری‌شده در آرشیو مغزه‌های معدن برداشت شد. پس از بررسی نمونه‌ها شماره ۴۲ مقطع نازک صیقلی، ۲۳ مقطع صیقلی و ۸ مقطع نازک از نمونه‌های منتخب تهیه شد. بررسی مقاطع با استفاده از میکروسکوپ سه‌چشمی دوکاره (نور گذری-بازتابی الیمپوس) مدل BX60F5 در آزمایشگاه تحصیلات تکمیلی گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان انجام شد و تصویر مقاطع نیز با استفاده از دوربین کائن نصب‌شده روی همین میکروسکوپ تهیه شد. سپس نقشه زمین‌شناسی و دیگر نقشه‌های منطقه با نرم‌افزار ArcGIS رسم شد. شماره ۳۶ نمونه سنگی از نقاط گوناگون سطحی کانسار برداشت شد و پس از خردایش و نرم‌کردن برای بررسی مقدار اکسیدهای اصلی به آزمایشگاه شرکت زرا‌ما تهران فرستاده شد. نمونه‌ها با روش ذوب پراکسیدی^۲ آماده‌سازی، سپس با روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت‌شده القایی^۳ تجزیه شدند.

شماره ۲ نمونه از کانه مگنتیت و ۲ نمونه از کانی کوارتز برای انجام تجزیه ایزوتوپ پایدار $\delta^{18}\text{O}$ و ۲ نمونه از کانی پیریت برای انجام تجزیه ایزوتوپ پایدار $\delta^{34}\text{S}$ از بخش‌های گوناگون معدن با در نظر گرفتن ارتباط نمونه‌ها با مراحل گوناگون کانه‌زایی، میزان تأثیر دگرسانی بر نمونه و امکان جداسازی کانی یا کانه مورد نظر از باطله برگزیده شدند.

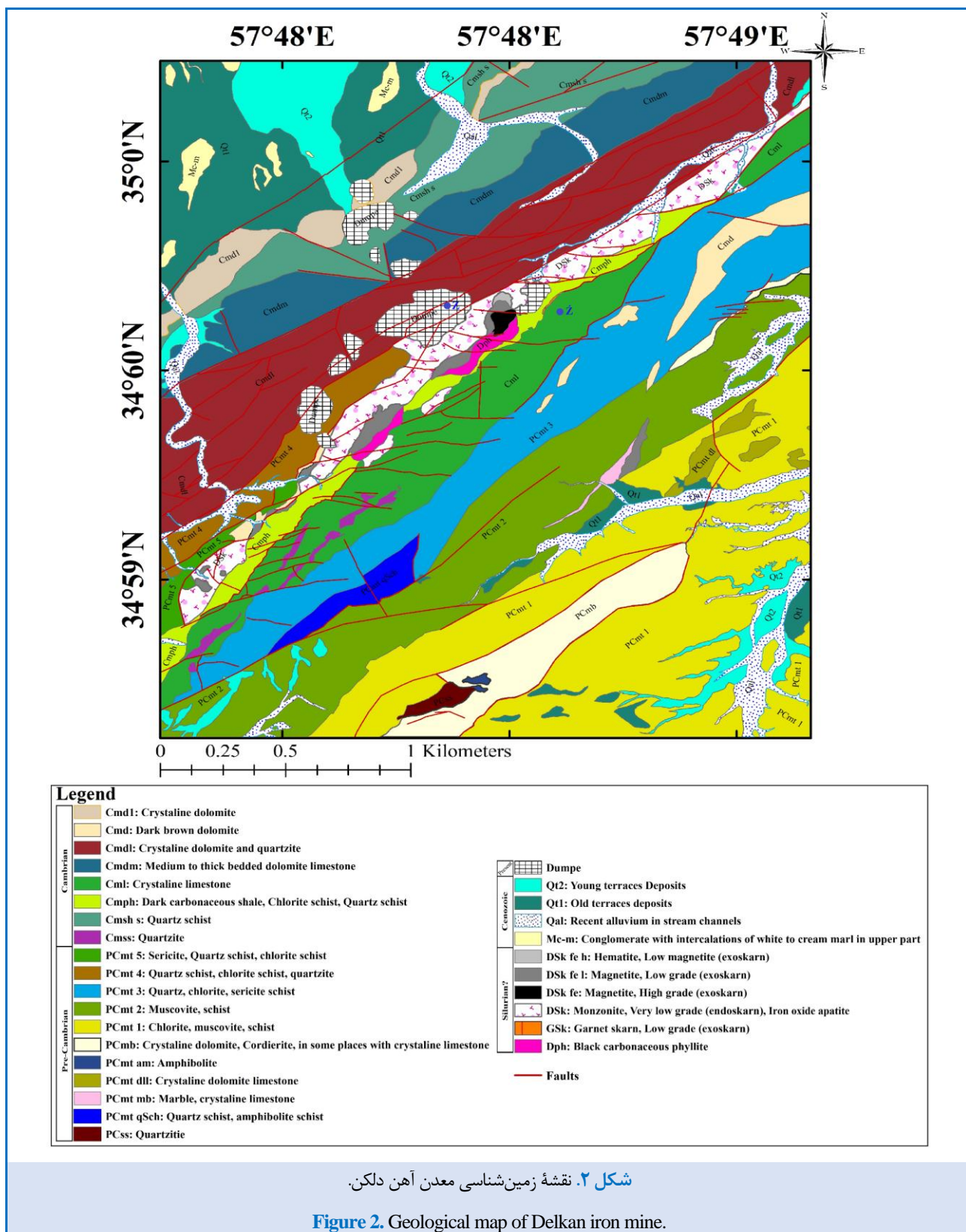
به بررسی‌های پیشین (Nozaem et al., 2013; Rosseti et al., 2015; Hajimirzajan et al., 2019) نخستین و مهم‌ترین رخداد ماگماتیسم در این منطقه گرانیست و ریولیت‌های دگرگون‌شده هستند که با توجه به بررسی‌های سن‌سنجی به روش اورانیم-سرب روی کانی زیرکن به سن ۵۲۱/۳ تا ۵۵۷ میلیون سال پیش هستند. ماگماتیسم جدید در منطقه چه‌بسا در پی رخداد فرایندهای زمین‌ساخت تراکشی محلی روی داده است (Nozaem, 2012).

زمین‌شناسی محدوده

نقشه زمین‌شناسی معدن دلکن در (شکل ۲) نشان داده شده است. بررسی‌های پیشین (Sahandi et al., 2010; Nozaem, 2012; Parvareh Darbandi et al., 2020) در منطقه کوه سرهنگی، منابع اصلی برای شناسایی سن واحدهای زمین‌شناسی گزارش‌شده در نقشه زمین‌شناسی معدن دلکن هستند. مجموعه‌ای مرکب از بررسی‌های، تصویرهای ماهواره‌ای، نقشه‌ها و گزارش‌های پیشین زمین‌شناسی در محدوده و بررسی‌های زمین‌شناسی انجام‌شده در این پژوهش، شامل ویژگی‌های صحرایی (بافت، لایه‌بندی، شیب‌توزیته، کانی‌شناسی، آثار فسیل و ...)، به‌کارگیری ابزارهای صحرایی (کیت سختی‌سنجی و اسیدکلریدریک رقیق در بررسی انواع کربنات‌ها، لوپ، کمپاس، جی‌پی‌اس و ...)، بررسی کانی‌ها و ثبت کانی‌های شاخص (گارنت، پیریت، کلریت، اپیدوت کانی‌های منیزیم‌دار مانند ترمولیت و ...)، بررسی‌های ساختاری (ثبت روند، شیب و بررسی خش‌لغزها در گسل‌های محدوده)، نمونه‌برداری از همه واحدهای سنگی و انجام بررسی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی آنها، برای ترسیم نقشه زمین‌شناسی محدوده بهره‌گرفته شده است. واحدهای سنگی محدوده شامل واحدهای بیشتر دگرریخت و دگرگون‌شده شیبست، کوارتزیت، سنگ آهک، دولومیت و آمفیبولیت به سن پرکامبرین (با پیشوند PC)، واحدهای سنگ آهک، دولومیت شیل‌های کربن‌دار، شیبست و کوارتزیت به سن کامبرین (با پیشوند CM)، واحدهای سازنده از طریق ماگماتیسم و دگرگونی همبری به‌دست‌آمده از نفوذ استوک مونزونیتی و کانه‌زایی‌های متأخر با سن سیلورین و در آخر

² Peroxide Fusion

³ Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی معدن آهن دلکن.

بایناکولار به روش دستی در آزمایشگاه تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان جداسازی شدند و پس از خردشدن و

نخست هر یک از نمونه‌ها خرد شده و کانی‌های کوارتز، پیریت و کانه مگنتیت، بی‌هرگونه آلودگی، با میکروسکوپ

نمونه استاندارد ثانویه با مقدرهای $\delta^{34}\text{S}$ برابر با $(\pm 0.2\%)$ صورت پذیرفت. مقدرهای پذیرفته شده برای انحراف معیار $\delta^{34}\text{S}$ برابر با $(\pm 0.2\%)$ است.

کانه‌زایی

کانه‌زایی آهن در معدن دلکن به دو صورت (۱) اکسیدهای آهن همراه با آپاتیت با بافت پراکنده و رگچه‌ای و (۲) اکسیدهای آهن توده‌ای بدون آپاتیت دیده می‌شود. کان‌زایی اکسید آهن همراه با آپاتیت در این محدوده بیشتر متمرکز در خود استوک نفوذی مونزونیستی است (شکل ۳-۳A). این نوع کان‌زایی از نظر حجم و شدت کانی‌سازی ارزش اقتصادی کمتری دارد و با توجه بسیار تأثیر بالای فرایندهای دگرسانی در استوک نفوذی، حفظ‌شدگی خوبی ندارد. بیشترین مقدار آپاتیت‌های تجزیه‌نشده را می‌توان در حاشیه‌های شمال‌باختری توده نفوذی یافت که کمی کمتر دچار دگرسانی شده است و از این‌رو، کانی‌های آپاتیت همراه با اکسیدهای آهن را می‌توان در نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از این بخش دید. جایگاه رخداد کان‌زایی‌های توده‌ای آهن (بدون آپاتیت) دو دسته است: دسته نخست، کان‌زایی همجوار با توده آذرین درونی^۵ است که شامل کان‌زایی‌های اندواسکارن اکسیدهای آهن توده‌ای (مگنتیت و هماتیت) درون خود استوک نفوذی (شکل‌های ۳-B و ۳-C) و همچنین، کان‌زایی‌های اگزواسکارن، در محل همبری^۹ میان حاشیه جنوبی توده آذرین درونی با واحدهای فیلیتی است (شکل ۳-F). در این واحدها مقدار فراوانی پیریت نیز با بافت پراکنده در کان‌زایی دیده می‌شود. دسته دوم، شامل کان‌زایی‌های آهن با فاصله از توده آذرین درونی^{۱۰} می‌شود که در محل همبری گسله واحدهای شیستی و آهکی در فاصله ۷۰ متری جنوب توده آذرین درونی (شکل‌های ۳-D و ۳-E) و همچنین، در محل همبری واحدهای شیست و مرمر در فاصله ۱ کیلومتری از جنوب‌خاوری توده آذرین درونی دیده می‌شوند (شکل ۳-H).

نرم‌سازی نهایی در هاون آگاتی، تعداد ۶ نمونه با وزن نزدیک به دست کم ۱ گرم برای هر نمونه، برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی به آزمایشگاه تحقیقاتی ایزوتوپ‌های پایدار دانشگاه اراک فرستاده شد. در این آزمایشگاه برای تجزیه ایزوتوپی اکسیژن، پس از پیرولیز^۴ هر نمونه جامد در دمای بالا (1450°C) در تجزیه عنصری^۵ همه اتم‌های اکسیژن در نمونه به گاز CO تبدیل می‌شوند. همه ناخالصی‌های این گاز پس از گذر آن از ستون تصفیه و تله آبی در سیستم، تصفیه و جدا می‌شوند. پس از تصفیه همه ناخالصی‌ها ستون جذب دارای نمونه (تا دمای 150°C) گرم می‌شوند و پس از گذر از تله آبی دوم همه گاز CO به طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی^۶ وارد می‌شود. در این مرحله مقدار نسبت جرمی $30/28$ به‌دست آورده شد که برای ارزیابی نسبت $\delta^{18}\text{O}$ در نمونه به‌کار برده می‌شود. تجزیه نمونه‌های ایزوتوپی اکسیژن با دستگاه Isoprime مدل Precision انجام شد. برای تأیید کل روش و کالیبراسیون گازهای مرجع، اندازه‌گیری‌های مکرر ماده مرجع (IAEA-NBS-28) با مقدرهای استاندارد $\delta^{18}\text{O}$ برابر با $(\pm 0.1\%)$ انجام شد. مقدرهای پذیرفته شده برای انحراف معیار $\delta^{18}\text{O}$ برابر با $(\pm 0.3\%)$ است. برای تجزیه مقدرهای ایزوتوپی گوگرد، پس از احتراق^۷ هر نمونه جامد در دمای 1150°C در تجزیه عنصری همه اتم‌های گوگرد در نمونه به گاز SO_2 تبدیل می‌شود. همه ناخالصی‌های در این گاز پس از عبور آن از ستون تصفیه و تله آبی در سیستم، تصفیه و جدا می‌شوند. پس از تصفیه همه ناخالصی‌ها ستون جذب حاوی نمونه (تا دمای 220°C) گرم می‌شود و همه گاز SO_2 به طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی وارد می‌شود. در این مرحله، مقدرهای نسبت جرمی $66/64$ به‌دست آمد که برای ارزیابی نسبت $\delta^{34}\text{S}$ در نمونه به‌کار برده می‌شود. تجزیه نمونه‌های ایزوتوپی گوگرد با دستگاه Isoprime مدل ۱۰۰ انجام شد. برای تأیید کل روش و کالیبراسیون گازهای مرجع، اندازه‌گیری‌های مکرر ماده مرجع (IAEA-S-34) با مقدرهای استاندارد $\delta^{34}\text{S}$ برابر با $(\pm 0.2\%)$ و همچنین، یک

⁵ Proximal

⁹ Contact

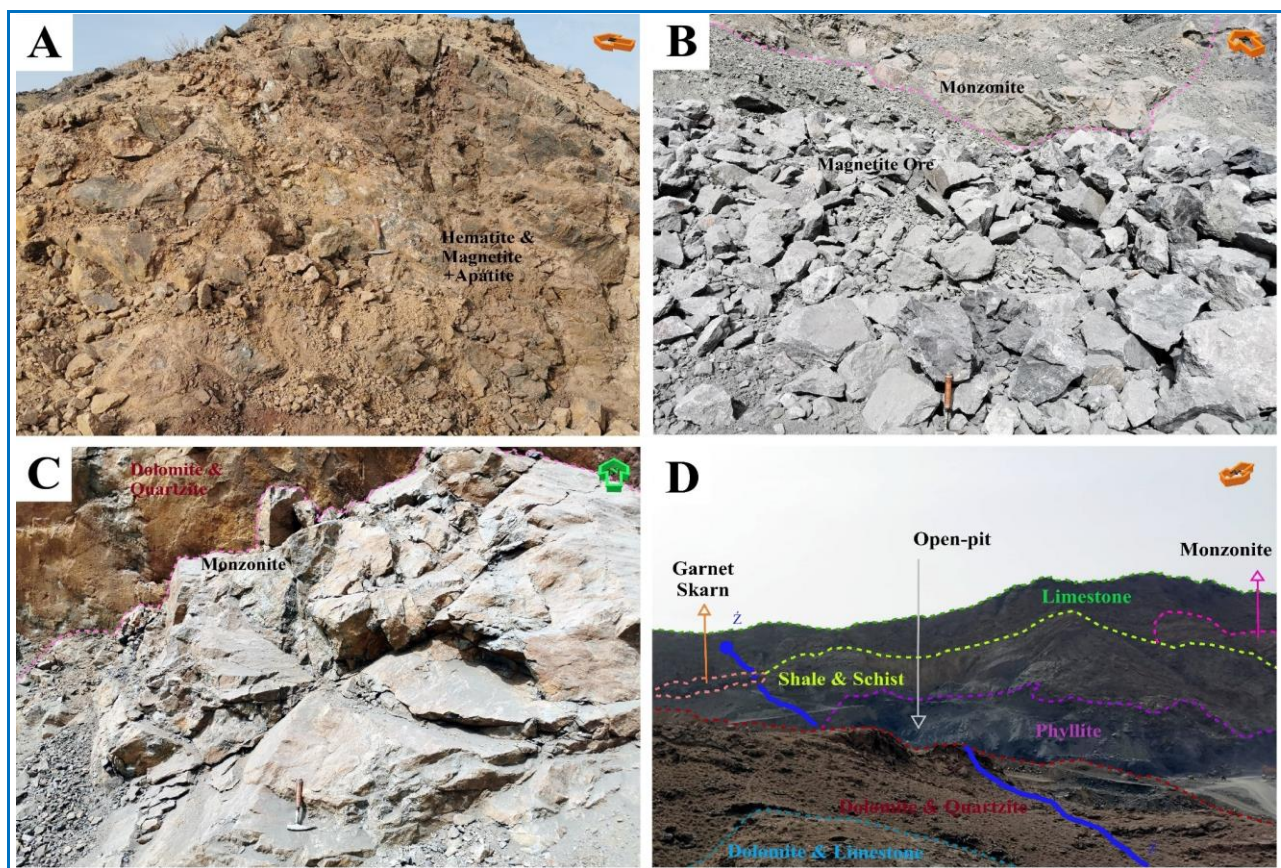
¹⁰ Distal

⁴ Pyrolysis

⁵ Elemental Analyzer (EA)

⁶ Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)

⁷ Combustion



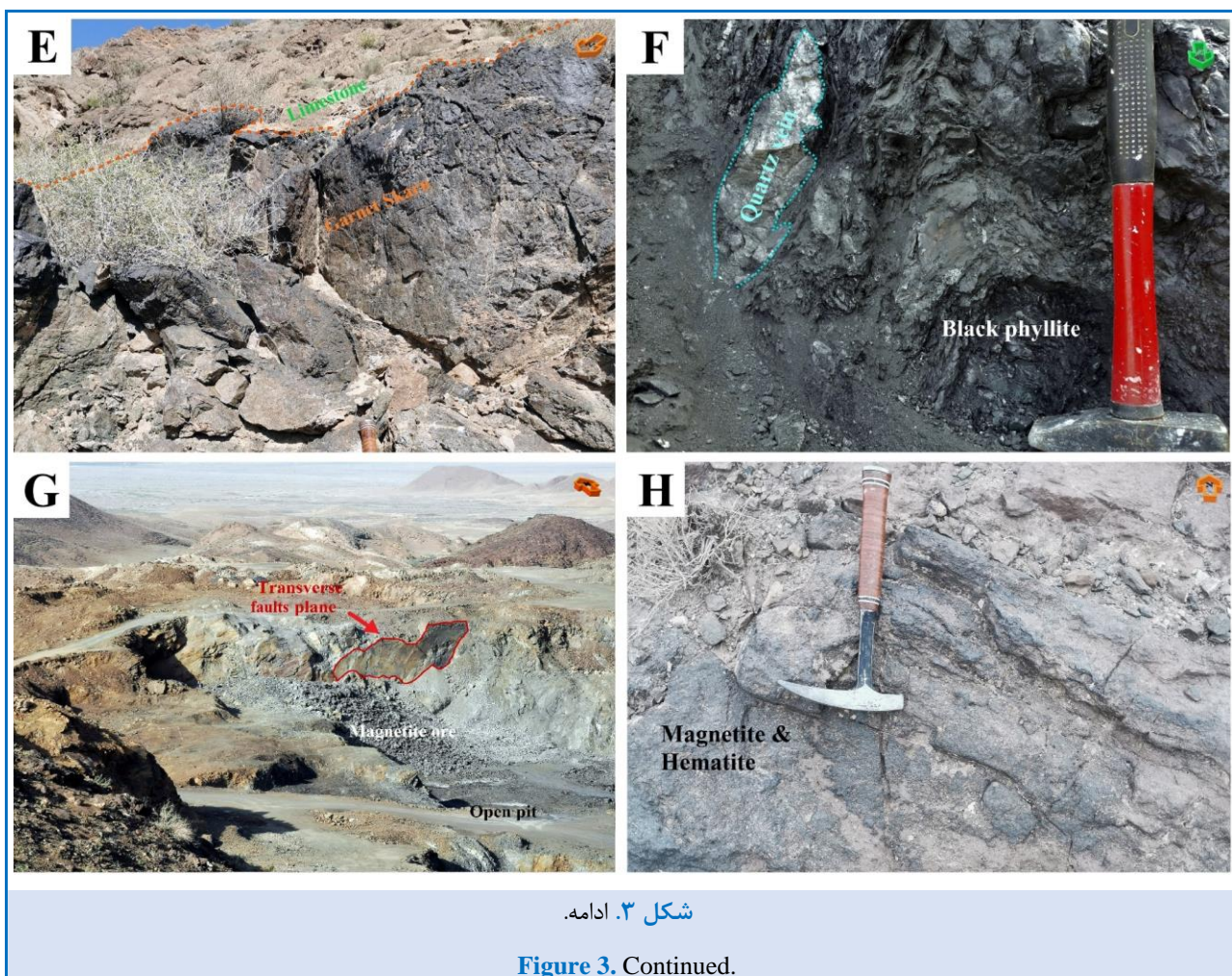
شکل ۳. A) کانه‌زایی‌های آهن همراه با آپاتیت‌های میکروسکوپی در بخش باختری کانسار، کانه‌زایی‌های در این ناحیه بسیار دچار هوازدگی شده است؛ **B)** کانه‌زایی اصلی مگنتیت در کنار استوک مونزونیتی مرتبط با کانه‌زایی، در سایت استخراجی ماده معدنی؛ **C)** استوک نفوذی مونزونیتی بسیار دگرسان‌شده در مرز گسله با لایه دولومیت؛ **D)** نمایی از برخی واحدهای سنگی در حاشیه کانه‌زایی که اوپن‌پیت^{۱۱} در این نما به‌علت قرارگیری در فروافتادگی میان واحدها، دیده نمی‌شود؛ **E)** واحد گارنت اسکارن؛ **F)** فیلیت‌های تیره‌رنگ با مقدار بالای گرافیت، رگه سیلیسی نیز در سمت چپ تصویر به‌خوبی دیده می‌شود؛ **G)** نمایی از اوپن‌پیت معدن، آینه گسلی یکی از گسل‌های عرضی نیز به‌خوبی در مرکز این تصویر دیده می‌شود؛ **H)** کانه‌زایی مگنتیت دور از استوک نفوذی در ناحیه جنوب‌خاوری محدوده (۱ کیلومتری در جهت جنوب‌خاوری استوک نفوذی).

Figure 3. A) Iron mineralization with microscopic apatites in the western part of the deposit, mineralization in this area has been severely affected by weathering; **B)** Main proximal magnetite mineralization next to the monzonite stock within the open-pits mining area; **C)** Highly altered monzonite intrusive stock at the fault boundary with the dolomite layer; **D)** A view of some of the rock units at the margin of the mineralization, where the Open-Pit is not visible in this view due to its location in a depression between the units; **E)** Garnet skarn unit; **F)** Dark phyllites containing high amounts of graphite, silica vein is also clearly visible on the left side of the image; **G)** A view of the open-pit, the fault mirror of one of the transverse faults is also clearly visible in the center of this image; **H)** Distal magnetite mineralization in the southeastern area (1 km southeast of the intrusive stock).

^{۱۱} Open-Pit

برای هر نمونه به‌دست آمده است. تغییرات مقدار Fe_2O_3 آهن کل و تغییرات P_2O_5 که مقدارهای آن بسته به تغییرات آپاتیت در نمونه‌های نخستین (پیش از آماده‌سازی) بوده است در (شکل ۴) دیده می‌شود.

داده‌های تجزیه مقدار اکسیدهای اصلی در نمونه‌های برداشت شده از سطح کانه‌زایی‌های بخش مرکزی محدوده در (جدول ۱) گزارش شده است، مقدار آهن کل (Fe_t) در این جدول بر پایه محاسبه وزن اتمی عنصر آهن در



شکل ۳. ادامه.

Figure 3. Continued.

همراه با نفوذ واحدهای آذرین درونی و کانه‌زایی (فاز کششی در سیلورین) بوده است.

وجود این تناوب‌ها در رژیم زمین‌ساختی نقشی کلیدی در پیدایش فضای مناسب و به‌دام‌انداختن ماگماهای سیلیکاتی بازی می‌کند که مانند فاکتورهای مهم در زمینه پیدایش کانسارهای تیپ اکسید آهن-مس-طلا^{۱۲} مرتبط با کوه‌زایی و همچنین، کانسارهای تیپ اکسید آهن-آپاتیت یا تیپ کایرونا^{۱۳}، همین تناوب‌های میان رژیم‌های زمین‌ساختی فشارشی و کششی است (Reich et al., 2022; Skirrow, 2022). از این رو، با توجه به ویژگی‌های صحرایی و داده‌های به‌دست‌آمده از برداشت‌های ساختاری گمان می‌رود فازهای تراکشی سیلورین در منطقه دلکن، نقش به‌سزایی در پیدایش فضای مناسب برای نفوذ توده مونزونیتی از راه گسل‌های طولی

الگوی گسل‌ها و ارتباط آن با کانه‌زایی آهن در معدن دلکن

بررسی‌های تصویرهای ماهواره‌ای و شواهد صحرایی دو پراکندگی اصلی گسل در منطقه معدن را نشان می‌دهند (شکل ۵). بر پایه وضعیت امتداد این گسل‌ها نسبت به امتداد ساختارها در کوه سرهنگی، دو روند شامل گسل‌های طولی با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری موازی روند کوه سرهنگی و گسل‌های عرضی با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری به‌صورت کمابیش عمود بر روند کوه سرهنگی دیده می‌شوند (شکل ۳-۲). بر پایه بررسی‌های پیشین (Sahandi et al., 2010; Nozaem, 2012) ناحیه کوه سرهنگی و ناحیه دلکن دچار تناوب‌هایی میان فازهای زمین‌ساختی ترا فشارشی (فاز ترا فشارشی چپ‌گرد در زمان پرکامبرین-پسین-کامبرین آغازین، فاز ترا فشارشی چپ‌گرد در دونین‌میانی) و فازهای تراکشی

¹² Iron oxide copper-gold (IOCG)

¹³ Kiruna

را بازی کرده‌اند، که در پایان به رخداد کانه‌زایی اکسید آهن (شکل ۳-ب) در پی واکنش‌های شیمیایی میان سیالات گرمایی آپاتیت و توده‌های مگنتیت، درون و همجوار با توده آذرین درونی و سنگ‌های میزبان انجامیده است.

جدول ۱. داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه اکسیدهای اصلی و آهن کل در معدن دلکن. داده‌های بر پایه درصد هستند.

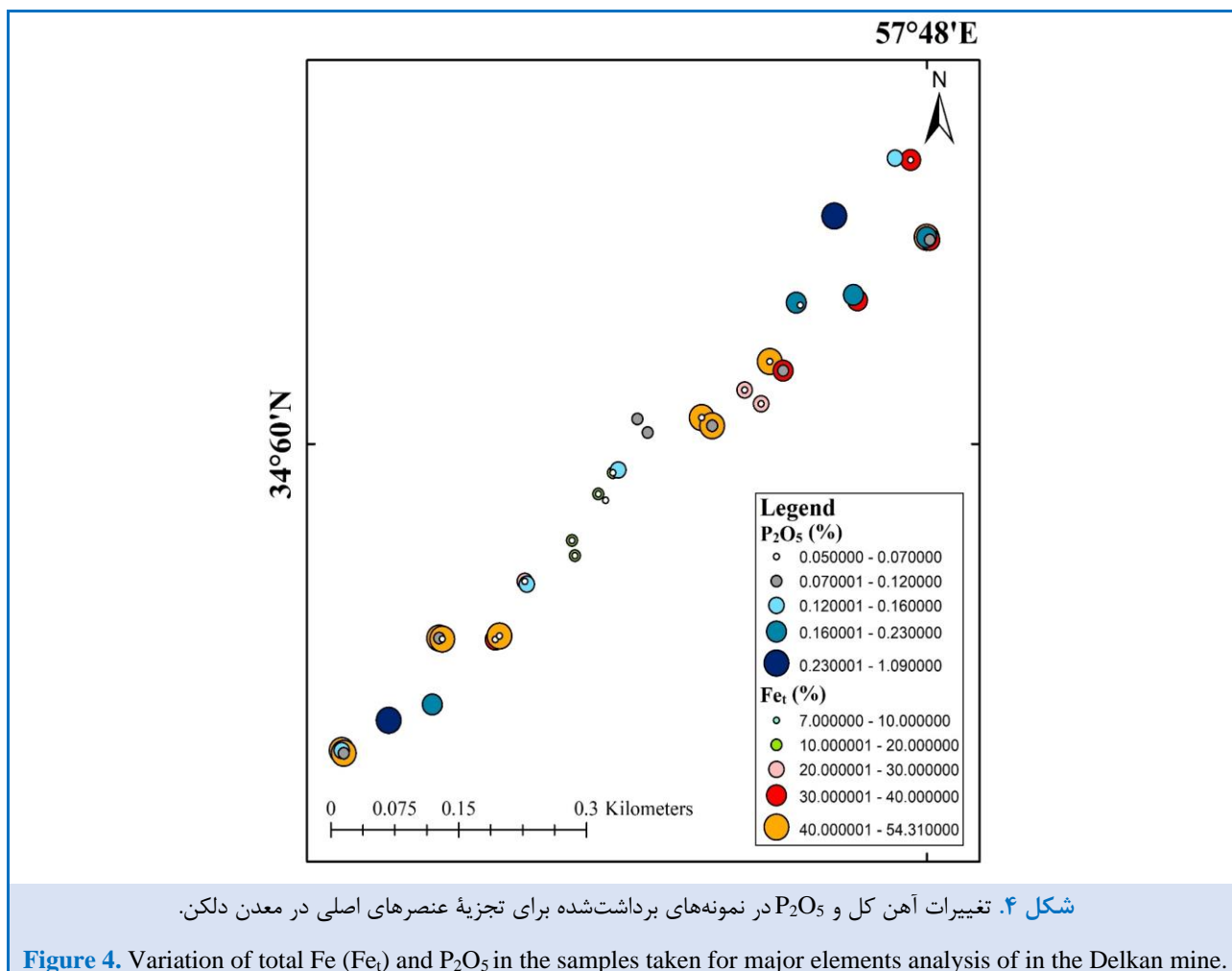
Table 1. Results from the analysis of major oxides and total iron in the Delkan mine. Results are in %.

Sample Name	DL-TR01-S01	DL-TR01-S02	DL-TR02-S03	DL-TR02-S04	DL-TR03-S10	DL-TR03-S11	DL-TR04-S21	DL-TR04-S22	DL-TR05-S30
SiO ₂	13.80	18.93	49.57	36.33	32.93	32.97	17.48	20.01	21.23
TiO ₂	2.66	2.30	0.23	1.59	1.00	0.90	2.00	2.09	1.52
MnO	0.58	0.53	0.82	1.61	0.95	0.85	0.75	0.83	0.78
Fe ₂ O ₃	77.58	73.46	16.82	27.71	42.37	41.72	64.99	70.06	55.60
MgO	0.32	0.23	3.21	1.52	0.69	1.89	0.35	1.22	1.37
CaO	2.22	2.97	12.62	9.70	9.04	9.88	7.53	4.64	9.52
K ₂ O		0.15	3.79	1.87	2.07	1.00		0.16	
BaO			0.07		0.12				
P ₂ O ₅	0.14	0.10	0.08	0.76	0.05	0.19	0.08		0.06
SO ₃			1.67	4.96	1.17	1.86	2.17	0.79	1.71
Fe _t	54.31	51.42	11.77	19.40	29.66	29.20	45.49	49.04	38.92

Sample Name	DL-TR05-S31	DL-TR06-S46	DL-TR06-S47	DL-TR07-S52	DL-TR07-S53	DL-TR08-S55	DL-TR08-S56	DL-TR09-S58	DL-TR09-S59
SiO ₂	14.46	40.53	23.85	54.24	56.50	59.16	55.15	47.36	49.12
TiO ₂	1.86	1.57	1.14	0.29	0.35	0.39	0.40	1.51	0.74
MnO	0.68	0.45	0.83	0.39	0.34	0.32	0.33	0.37	0.53
Fe ₂ O ₃	73.41	23.54	39.11	14.78	17.20	13.96	16.41	16.46	18.43
MgO	0.81	1.82	1.18	1.28	1.82	1.75	2.05	1.31	1.86
CaO	6.06	6.72	17.55	8.14	6.78	6.17	7.80	5.84	9.08
K ₂ O		3.83	0.26	4.94	4.12	4.00	2.37	3.51	3.05
BaO		0.08	0.10	0.07	0.07	0.16	0.07	0.07	0.05
P ₂ O ₅	0.05	0.16	0.05		0.06		0.06	0.15	0.05
SO ₃	2.61	3.35	0.79	0.13	0.09	0.11		0.09	0.10
Fe _t	51.39	16.48	27.38	10.35	12.04	9.77	11.49	11.52	12.90

Sample Name	DL-TR10-S60	DL-TR10-S61	DL-TR11-S64	DL-TR11-S65	DL-TR12-S68	DL-TR12-S69	DL-TR13-S71	DL-TR13-S72	DL-TR14-S74
SiO ₂	57.24	59.83	15.25	17.13	35.99	40.92	15.30	23.18	46.90
TiO ₂	1.08	1.26	1.29	2.39	0.84	0.98	2.17	1.48	0.23
MnO	0.11	0.12	0.75	0.84	0.66	0.68	0.73	0.76	0.53
Fe ₂ O ₃	11.42	10.00	62.57	75.09	34.48	40.04	77.14	49.39	19.67
MgO	0.77	0.71	0.62	1.00	2.91	3.45	0.64	1.09	2.92
CaO	3.40	4.13	9.21	8.14	8.04	7.89	5.62	10.28	9.38
K ₂ O	2.45	2.17			1.41	1.05		0.53	1.58
BaO	0.07	0.06							
P ₂ O ₅	0.09	0.09		0.10	0.07			0.10	0.23
SO ₃		0.25	2.61	1.00	1.44	0.38	1.63	1.47	1.64
Fe _t	7.99	7.00	43.80	52.56	24.14	28.03	54.00	34.57	13.77

Sample Name	DL-TR14-S75	DL-TR15-S84	DL-TR15-S85	DL-TR16-S100	DL-TR16-S101	DL-TR17-S116	DL-TR17-S117	DL-TR18-S128	DL-TR18-S129
SiO ₂	48.69	31.92	41.25	49.81	35.86	16.16	28.09	21.25	32.94
TiO ₂	0.19	0.77	0.38	0.31	0.43	1.74	0.29	0.45	1.28
MnO	0.52	0.79	0.74	0.28	0.50	0.70	0.60	0.72	0.71
Fe ₂ O ₃	17.98	47.37	27.13	19.81	37.85	69.89	46.42	43.20	41.59
MgO	3.95	5.27	7.44	2.22	0.53	0.75	6.44	1.38	1.58
CaO	9.24	6.26	7.62	5.01	11.17	6.59	6.30	17.79	5.77
K ₂ O	2.48		0.62	2.18			1.56		1.18
BaO							0.09		0.12
P ₂ O ₅	0.06	0.06	0.23	0.07	1.09	0.23	0.12		0.15
SO ₃	1.24	0.69	1.74	5.88	9.39	1.41	6.50	1.77	0.14
Fe _t	12.59	33.16	18.99	13.87	26.50	48.92	32.49	30.24	29.11



دگرسانی‌های شاخص سه تیپ از کانه‌زایی آهن به صورت اسکارن، اکسید آهن آپاتیت و اکسید آهن مس-طلا را نشان می‌دهد. تفکیک و تفسیر دقیق و کامل دگرسانی‌ها و فرایندهای پیدایش برای هر یک از تیپ‌های کانه‌زایی آهن در این محدوده، با توجه به هم‌پوشانی^{۱۴} دگرسانی‌ها و فرایندهای نخستین کانه‌زایی، با دگرسانی‌ها و فرایندهای کم‌دما تر متأخر، شاید در مرحله‌ای از بررسی در این محدوده بسیار دشوار و یا ناشدنی باشد. با توجه به آنچه گفته شد، به ترتیب رخداد، دگرسانی‌های دیده‌شده در کانسار دلکن را می‌توان به اسکارن کالک‌سیلیکاتی پیش‌رونده^{۱۵}، سدیک، کلسیک، فیلیک و سیلیسی و کربناتی ثانویه دسته‌بندی کرد که در ادامه به شرح هر یک پرداخته می‌شود.

گسل‌های عرضی نیز نقش مسیره‌های فراری را برای بخشی از سیال گرمابی داشته‌اند و به رخداد کانه‌زایی‌هایی با فاصله از توده آذرین درونی (شکل‌های E-۳ و H-۳) انجامیده‌اند.

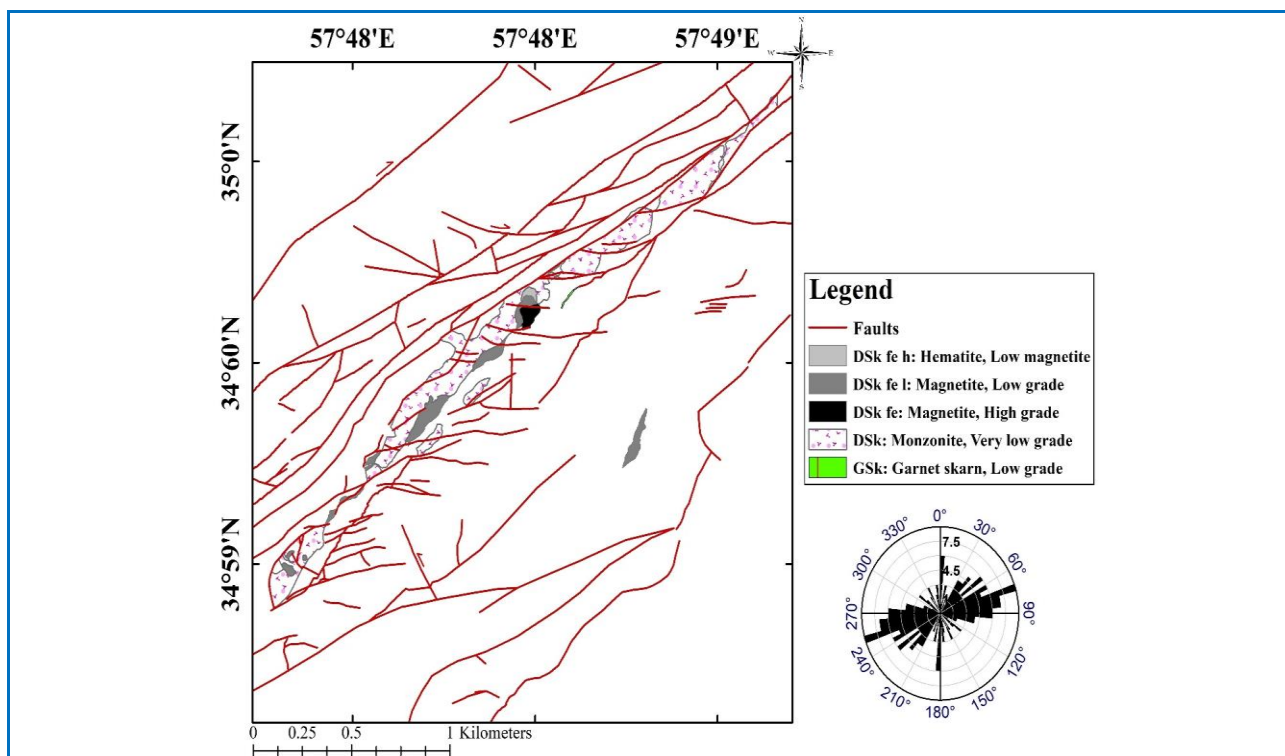
نشانه‌های خردشدگی در مقیاس میکروسکوپی کمابیش در همه سنگ‌های این محدوده و همچنین، کانه‌های آهن دیده می‌شود که نشان‌دهنده وجود و تأثیرگذاری فعالیت‌های زمین‌ساختی پیشین، همزمان و پس از کانه‌زایی است. گسل‌های این محدوده اکنون نیز دچار حرکت‌های فشارشی میان صفحه عربی به سوی صفحه اوراسیا هستند (Moumeni et al., 2021).

دگرسانی‌ها

کانسار آهن دلکن همزمان بیشتر روابط کانی‌شناسی و

¹⁴ Overprint

¹⁵ Prograde



شکل ۵. نقشه الگوی گسل‌های معدن دلکن به‌همراه جایگاه استوک نفوذی و کانه‌زایی‌های آهن و نمودار گل‌سرخ.

Figure 5. Map of the Delkan mine fault patterns and the location of the intrusive stock and iron mineralization and the Rose plot.

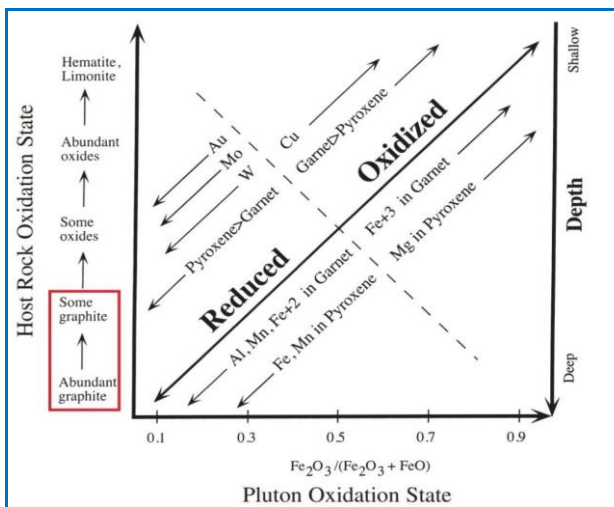
سیلیسی شست و شیل با توده آذرین درونی و مجاورت سیالات گرمابی و کانه‌زایی‌ها، جدای از ترکیب سیال گرمابی، می‌توانسته‌اند منابع بزرگ و در دسترس برای عنصرهای سیلیسی و کربناتی لازم برای پیدایش کانی‌های کالک‌سیلیکاتی باشند؛ اما با وجود این، شدت و گسترش رخداد اسکارن پیش‌رونده در کانسار دلکن بسیار اندک است؛ به‌گونه‌ای که کانی‌های حاصل از دگرسانی پیش‌رونده تنها بسیار اندک در واحد کوچک گارنت اسکارن (Gsk) در شکل‌های ۲، ۳-D و ۳-E (که شامل گارنت (شکل F-۹) است) و نیز شبه‌ریخت‌های^{۱۶} نادری از گارنت و پیروکسن (که معمولاً با کلسیت جانشین شده‌اند) و در برخی بخش‌های دیگر کانسار دیده می‌شود. در ادامه دلایل این نبود گسترش نام برده می‌شود:

۱) دمای نخستین در آغاز فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی با سیال گرمابی در این کانسار به اندازه کافی برای رخداد و گسترش دگرسانی‌های اسکارن پیش‌رونده

اسکارن کالک‌سیلیکاتی پیش‌رونده

دگرسانی کالک‌سیلیکاتی پیش‌رونده یا دگرسانی اسکارن پیش‌رونده با پیدایش کانی‌های کالک‌سیلیکاتی (مانند: گارنت، پیروکسن) شناسایی می‌شود. این دگرسانی در پی واکنش سیالات گرمابی در بازه‌های دماهایی متوسط تا بالا ($240\text{--}300^\circ\text{C}$) با سنگ‌های میزبان با ترکیب کربناته با مقادیر متفاوتی از سیلیس روی می‌دهد. ترکیب شیمیایی و کمیت در کانی‌های فراورده این دگرسانی به ترکیب سیال و نوع سنگ‌های میزبان بسیار وابسته است. بررسی این دگرسانی از بهترین ابزارها برای منطقه‌بندی، اکتشاف و تفسیر فرایندهای مؤثر در پیدایش کانسارهای اسکارن است. در کانسار آهن دلکن، دگرسانی شدید در استوک نفوذی و نیز همپوشانی و جانشینی گسترده و شدید کانی‌های سازنده از دگرسانی‌های دمابالا با دگرسانی‌های متأخر دماپایین (که نشان از حجم بالای حضور سیالات گرمابی دارد) و همچنین، حضور و همبری مستقیم لایه‌های کربناته (کلسیت و دولومیت) و لایه‌های

¹ Pseudomorph

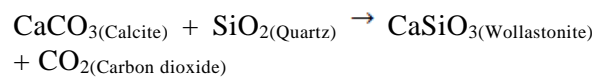


شکل ۶. پتانسیل اکسایش-کاهش سنگ‌های آذرین درونی و سنگ‌های میزبان در کانسارهای اسکارن (برگرفته از Newberry et al., 1991; Meinert et al., 2005). شرایط اکسایش-کاهش سنگ‌های آذرین درونی بر پایه مقدار $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ و دیگر اندیس‌های کاهندگی نشان‌دهنده مقدار اکسایش-کاهش در سنگ‌های آذرین درونی شامل کانی‌شناسی اکسیدها (ایلمنیت، مگنتیت، هماتیت) و مقدارهای Fe در کانی‌های مافیک مانند پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت است. مقدار اکسایش-کاهش در سنگ میزبان بر پایه فراوانی کربن (گرافیت، کربن، هیدروکربن)، سولفیدها (پیروتیت، پیریت) و اکسیدها (ایلمنیت، مگنتیت، هماتیت) است. سنجش ژرفای پیدایش کار دشوارتری است؛ با وجود این، کمتر از ۵ کیلومتر ژرفای کم و بیش از ۱۰ کیلومتر ژرفای بسیار در پیدایش کانسارهای اسکارن است. مقدار فوگاسیته اکسیژن بر پایه فراوانی کربن در سنگ‌های میزبان (شیست کربن‌دار و فیلیت‌های سیاه رنگ) کانسار آهن دلکن با مربع سرخ رنگ درون شکل نمایش داده شده است.

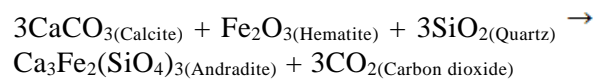
Figure 6. Redox potential of plutonic rocks and host rocks in skarn deposits (adapted from Newberry et al., 1991; Meinert et al., 2005). Redox conditions of plutonic rocks are based on $(Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO))$ values and other indicators of redox values in plutonic rocks include the mineralogy of oxides (ilmenite, magnetite, hematite) and Fe values in mafic minerals such as pyroxene, amphibole and biotite. Redox values in host rocks are based on the abundance of carbon (graphite, carbon, hydrocarbons), sulfides (pyrrhotite, pyrite) and oxides (ilmenite, magnetite, hematite). Measuring the depth of formation is more difficult, however, depths of less than 5 km are low and more than 10 km are high in the formation of skarn deposits. Host rocks (carbonaceous schist and black phyllites) oxidation state based on carbon abundance in the Delken iron deposit is indicated by the red square in the figure.

به صورت گسترده بالا نبوده است و این دما در بازه‌های دمایی پایینی برای پیدایش این نوع دگرسانی بوده است؛

(۲) از جنبه‌های مهم در پیدایش و بررسی همه کانسارها، به ویژه اسکارن‌ها، فوگاسیته اکسیژن در توده آذرین درونی و سنگ میزبان است؛ زیرا برای پیدایش هر کانی کالک‌سیلیکاته در هر شرایطی، یک واکنش کربن‌زدایی^{۱۷} روی می‌دهد؛ از ساده‌ترین نمونه‌های آن واکنش زیر است:



و در مجموعه کانی‌های مرتبط با دگرسانی کالک‌سیلیکاتی پیش‌رونده در کانسار آهن دلکن نیز (با توجه به عدم وجود ولاستونیت) به شکل واکنش زیر است:



که محصول این واکنش‌ها جدای از کانی کالک‌سیلیکاته، گاز CO_2 است. گاز CO_2 باید به گونه‌ای از سیستم بیرون رود، وگرنه به بالا رفتن فوگاسیته CO_2 در سیستم می‌انجامد که کند یا مختل کردن هرگونه واکنش کالک‌سیلیکاتی را به دنبال خواهد شد. در این کانسار توده آذرین درونی از نوع کوارتز مونزونیت تا مونزونیت است که معمولاً این گونه توده‌های آذرین درونی فوگاسیته اکسیژن متوسط تا بالا دارند (Ridolfi et al., 2010). ذخیره آهن در آن نیز کانه‌های مگنتیت و به صورت کمتر، هماتیت هستند که در بازه فوگاسیته متوسط تا کمابیش بالای اکسیژن پایدار هستند؛ اما در میان مجموعه سنگ‌های میزبان در این کانسار، دو واحد شایسته‌های کربن‌دار (ذغال‌دار) و فیلیت‌های سیاه رنگ وجود دارند که هر دو این واحدها مقدارهای بالایی از گرافیت دارند؛ به گونه‌ای که واحدهای فیلیتی کمابیش به طور کامل از ذغال ساخته شده‌اند (واحد Dph در شکل‌های ۲ و ۳-F) که گویای کاهندگی شدید این واحدها از نظر فوگاسیته اکسیژن است (شکل ۶).

¹⁷ Decarbonation

سرسیت و کلریت همراه بوده است. این دگرسانی بیشتر در بخش‌های حاشیه‌ای کانسار و گسترش آن معمولاً همراه با دگرسانی سیلیسی دیده می‌شود (شکل‌های H-۹ و D-۹). در دگرسانی سیلیسی افزایش سطح SiO_2 به پیدایش رگه و رگچه‌های سیلیسی با کانه‌های سولفیدی مانند پیریت و گاهی کالکوپیریت و اکسیدی مانند هماتیت ثانویه نیز انجام‌یافته است (شکل‌های I-۹, J-۹, K-۹ و D-۹). دگرسانی سیلیسی با بافت پرکننده فضای خالی، در بخش‌های همجوار با توده آذرین درونی و در شکاف‌های ناشی از خردشدگی کانه‌های مگنتیت توده‌ای دیده می‌شود (شکل A-۹) که از نظر پاراژنتیک رخداد این دگرسانی پس از مراحل کانه‌زایی آهن را نشان می‌دهد. با دورشدن از نواحی همجوار با توده آذرین درونی از شدت این دگرسانی کاسته می‌شود.

دگرسانی کربناتی ثانویه

با پیدایش رگه-رگچه‌های کلسیت به صورت ثانویه دیده می‌شود. نقشه ساده‌شده از دگرسانی‌ها و کانی‌های شاخص در معدن دلکن در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

کانی‌شناسی و کانه‌نگاری

پیریت

پیریت به دو صورت پنتاگونال (شکل‌های ۸ و L-۹) و نیمه‌شکل‌دار تا کوبیک (شکل K-۹) در منطقه یافت می‌شود. پیریت‌های پنتاگونال با رنگ زرد، با ابعاد ۳ میلی‌متر تا ۷ سانتیمتر و با بافت‌های متراکم و توده‌ای دیده می‌شوند. پیدایش آنها با فرایندهای دگرگونی مرتبط است. پیریت‌های نیمه‌شکل‌دار تا کوبیک با رنگ زرد تا نقره‌ای با ابعاد ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون هستند و با کانی‌های کوارتز و کالکوپیریت همراه هستند. این کانی بافت‌های پراکنده، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی نشان می‌دهد.

کوارتز

کوارتز به دو صورت اولیه و ثانویه در منطقه یافت می‌شود (شکل I-۹). کوارتزهای نخستین به صورت شکل‌دار با ابعاد ۱۵۰ میکرون تا ۳ میلی‌متر هستند و گاه سطوح رشدی متأخر نشان می‌دهند پیدایش این کوارتزها با

پیدایش یکی از مهم‌ترین بخش‌های کانه‌زایی مگنتیت در همجواری با این فیلیت‌ها می‌تواند واکنش شدید سیال گرمایی با این واحدها و در نتیجه، کاهش فوگاسیته اکسیژن و افزایش فوگاسیته CO_2 در سیستم، دست‌کم در بازه‌های دمایی پایداری کانی‌های گارنت و پیروکسن را نشان دهد که باعث محدودیت در رخداد و کاهش شدت گسترش دگرسانی‌های پیش‌رونده شده است. احتمال تأثیرگذاری کنترل‌کننده‌های ساختاری نیز در تعیین مسیرهای حرکت سیال گرمایی و پیدایش این پدیده وجود دارد.

دگرسانی سدیک

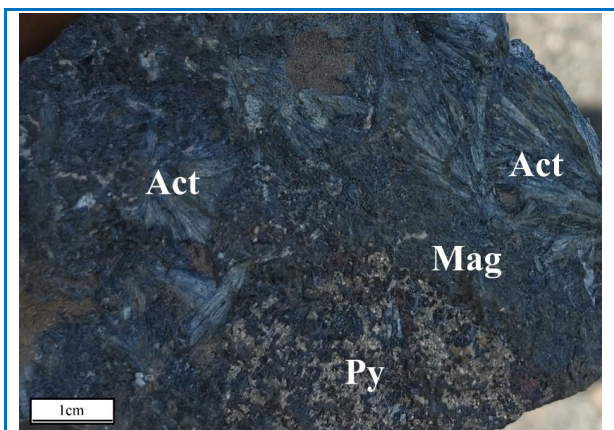
دگرسانی‌های گسترده سدیک معمولاً با گسترش و جانمایی کانی آلپیت و در کانسارهای اکسید آهن آپاتیت گزارش شده‌اند (Daliran, 1990; Jami, 2006; Torab, 2008; Heidarian et al., 2017). اگرچه این دگرسانی در برخی کانسارهای اسکارن نیز دیده می‌شود. با اینکه این دگرسانی گسترش کمابیش بالایی در همه بخش‌های کانسار دارد و کانه‌زایی اکسید آهن آپاتیت تنها به خود استوک نفوذی محدود است و به صورت اندک در برخی بخش‌های همبری آن با سنگ میزبان است، اما از دیدگاه پاراژنتیک روابط نزدیکی در رخداد این نوع کانه‌زایی با دگرسانی سدیک وجود دارد. این دگرسانی کمابیش به‌طور کامل شامل همپوشانی با دگرسانی‌های کم‌دما شده است؛ اما نشانه‌های آن (شبه‌ریخت‌های آلپیت) با فاصله از توده آذرین درونی، بیشتر دیده می‌شوند (شکل‌های H-۹ و B-۹).

دگرسانی کلسیک

دگرسانی کلسیک با پیدایش کانی‌های غنی از کلسیم مانند اکتینولیت، کلسیت، گاهی همراه با اپیدوت و همپوشانی شدید نشانه‌هایی از دگرسانی‌های پیشین دیده می‌شود. این دگرسانی در مناطق همجوار با توده آذرین درونی بسیار شدت بیشتری دارد، به گونه‌ای که لایه‌های توده‌ای اکتینولیت تا قطر ۳ متر نیز دیده می‌شوند.

دگرسانی فیلیک و سیلیسی

دگرسانی فیلیک و سیلیسی بر همه سنگ‌های این محدوده تأثیرگذار بوده است و با پیدایش کانی‌هایی مانند



شکل ۸. کانه‌زایی مگنتیت و اکتینولیت (با بافت‌های دسته‌جاری). نیمی از یک کانی پیریت پنتاگونال نیز که در محل شکستگی‌ها با مگنتیت جانشین شده است در پایین این تصویر دیده می‌شود.

Figure 8. Magnetite mineralization and actinolite (with fibrous textures). Half of a pentagonal pyrite mineral, replaced by magnetite along its fractures, is at the bottom of the image.

آپاتیت

آپاتیت با ابعاد ۲۰ میکرون تا ۱ سانتیمتر و به صورت شکل‌دار (هگزگونال) تا نیمه‌شکل‌دار و با بافت‌های پراکنده تا رگچه‌ای به همراه مگنتیت و بیشتر در حاشیه شمالی کانه‌زایی دیده می‌شود.

مگنتیت

مگنتیت به صورت شکل‌دار تا بی‌شکل، با بافت توده‌ای، پراکنده و جانشینی دیده می‌شود (شکل ۹-۱). این کانی در حاشیه‌های کانسار به همراه آپاتیت با بافت پراکنده و در بخش‌های مرکزی به صورت توده‌ای دیده می‌شود (شکل ۹-۲). معمولاً در نقاط نزدیک به سطح این کانی به صورت حاشیه‌ای، یا مارتیتیزاسیون با کانه هماتیت جانشین شده (شکل ۹-۳) و گاهی نیز جانشین اسپیکولاریت‌های نخستین شده است.

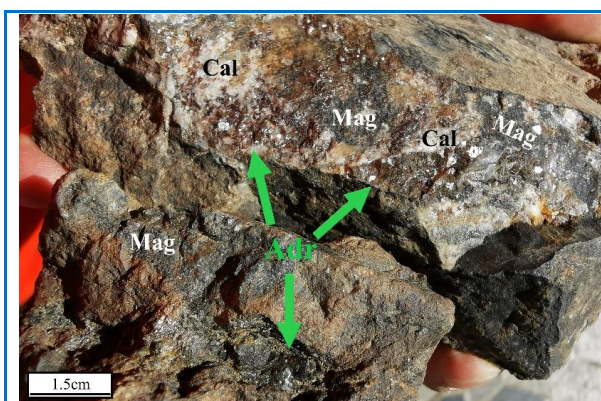
هماتیت

هماتیت با بافت پراکنده یا جانشینی و مارتیتی شدن به جای مگنتیت دیده می‌شود (شکل‌های ۹-۱ و ۹-۳). این کانه بیشتر در بخش‌های حاشیه‌ای و سطحی با کانی‌های گوتیت و لیمونیت جانشین شده است. همچنین، بسیار به‌ندرت به صورت اسپیکولاریت دیده می‌شود که پیدایش آنها چه‌بسا به فرایندهای پیش از کانه‌زایی مربوط است.

فرایندهای پیش از رخداد دگرسانی‌ها و کانه‌زایی در این کانسار مرتبط است. کوارتزهای ثانویه بی‌شکل هستند و با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضای خالی و جانشینی دیده می‌شوند.

گارنت

گارنت با دو خاستگاه دگرگونی و دگرسانی در منطقه دیده می‌شود. گارنت‌های با خاستگاه دگرگونی با رنگ سرخ معمولاً در واحدهای شیستی، به صورت ایزوتروپ و با ابعاد کمتر از ۱۵۰ میکرون، با بافت پراکنده پدید آمده‌اند. گارنت‌های با خاستگاه دگرسانی (شکل‌های ۷ و ۹-۱) با ابعاد بیشتر از ۲۵۰ میکرون، رنگ قهوه‌ای تا سبز و به صورت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار دیده می‌شوند.



شکل ۷. گارنت‌های (آندرادیت) با خاستگاه دگرسانی که با فلش‌های سبز رنگ در دو نمونه با کانه‌زایی مگنتیت نمایش داده شده‌اند.

Figure 7. Garnets (andradite) with alteration origin, marked by green arrows on the surface of two samples with magnetite mineralization.

آلبیت

آلبیت با ابعاد ۱ تا ۴ سانتیمتر و با بافت پراکنده دیده می‌شود و معمولاً با کانی‌های کوارتز، سرسیت، کلریت، هماتیت و غیره به‌طور کامل جانشین شده است.

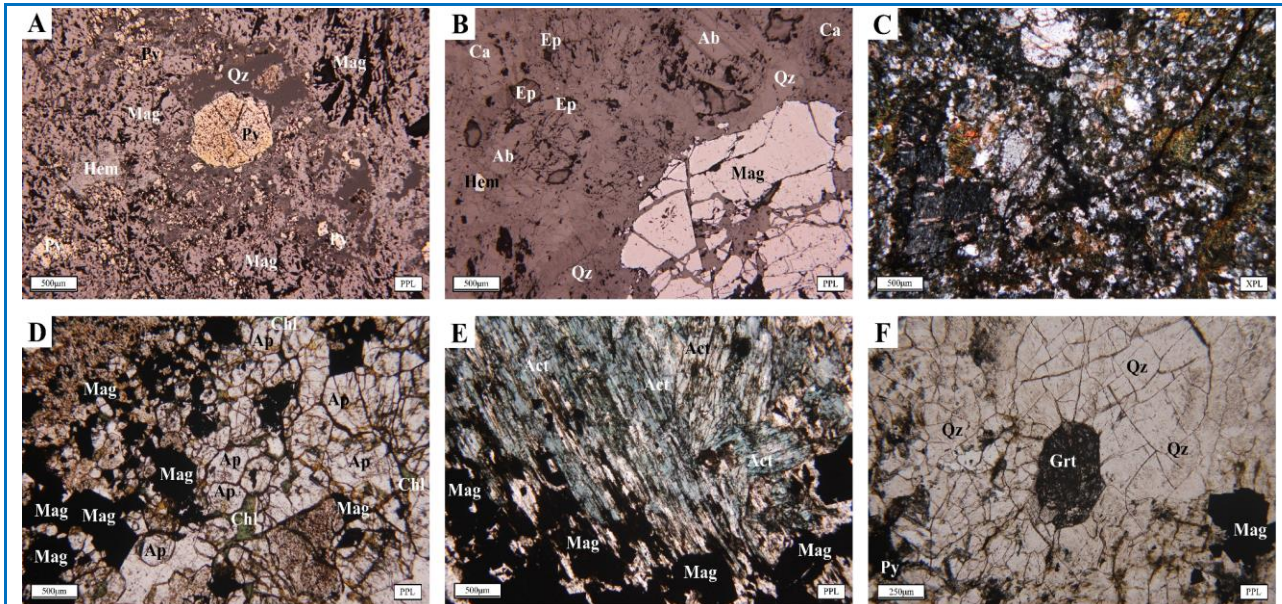
اکتینولیت

این کانی با ابعاد ۳۰۰ میکرون تا ۲۰ سانتی‌متر و با بافت‌های دسته‌جاری و افشان و تیغه‌ای در این منطقه یافت می‌شود. در محل همبری جنوبی استوک نفوذی با سنگ میزبان (شیل‌های کربن‌دار)، لایه‌های کانه‌زایی همراه با کانی‌زایی‌های اکتینولیت به قطر ۲ متر نیز دیده می‌شود (شکل ۸).

کالکوپیریت

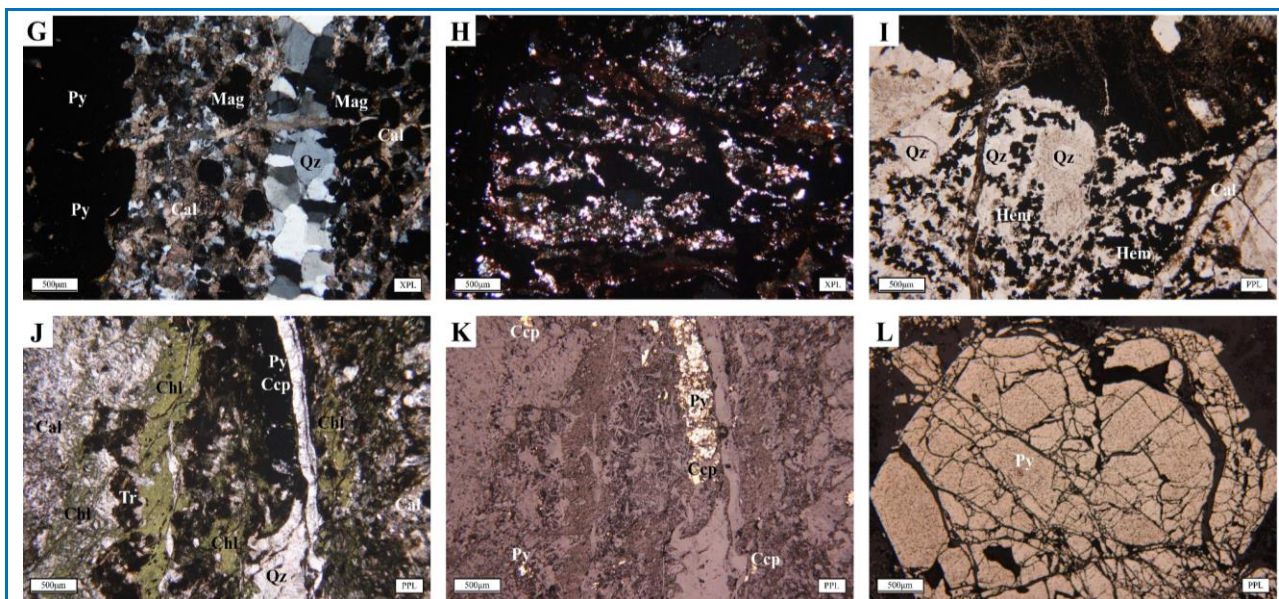
می‌شود (شکل ۹-K). این کانی در مناطق حاشیه‌ای و سطحی، با کانی‌های کولیت و کالکوسیت، در حاشیه‌ها جانشین شده است.

بیشتر به همراه پیریت و کوارتز، به صورت بی‌شکل و با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پراکنده و پرکننده فضای خالی دیده



شکل ۹. A کانه‌زایی اصلی مگنتیت و رگچه‌های سیلیسی با پیریت بسیار به‌عنوان باطله در این بخش دیده می‌شوند؛ **B** مارتیتی شدن مگنتیت (جانشینی مگنتیت با هماتیت) در حاشیه‌ها و سطوح رخ دانه مگنتیت، همچنین، حضور شبه‌ریخت‌های آلبیت که با کوارتز و سریسیت جانشین شده‌اند. بلورهای تازه آپیدوت چه‌بسا نشان‌دهنده هم‌فاز بودن مگنتیت‌های نخستین با دگرسانی‌های سدیک و سپس همپوشانی دگرسانی سدیک با دگرسانی‌های کلسیک، فیلیک و سیلیسی است؛ **C** استوک نفوذی مونزونیتی که بسیار دگرسان شده است؛ **D** کانه‌زایی مگنتیت و آپاتیت نخستین در حاشیه باختری کانسار. مگنتیت مارتیتی شده است و هماتیت با گوتیت جانشین شده است. دگرسانی فیلیک نیز در این ناحیه بسیار شدید است؛ **E** همراهی مگنتیت و اکتینولیت. اکتینولیت در حاشیه و برخی سطوح کریستالی با کلسیت جانشین شده است؛ **F** همراهی گارنت و مگنتیت با کوارتزهای فاز دوم؛ **G** نفوذ رگه کوارتز میان خردشدگی‌ها و فضاهای خالی در کانه‌زایی مگنتیت همراه با کلسیت؛ **H** شبه‌ریخت کانی آلبیت در مرکز تصویر که کاملا با کانی‌های کلریت و سریسیت جانشین شده که نشان‌دهنده همپوشانی دگرسانی سدیک با دگرسانی فیلیک است؛ **I** در مرکز تصویر، کوارتز هگزگونال نخستین که در بیش از ۵ نسل سطوح رشد نشان می‌دهد و که با کوارتزهای ثانویه همراه با کانه‌زایی هماتیت فراگرفته شده است؛ **J** رگچه سیلیسی که با کانه‌های پیریت و کالکوپیریت و همچنین، دگرسانی کلریتی همراه است؛ **K** عکس پیشین در نور بازتابی؛ **L** پیریت کما بیش درشت پنتاگونال. نام اختصاری کانی‌ها بر پایه وار (Warr, 2021).

Figure 9. A Main magnetite mineralization, the presence of siliceous veinlets with high pyrite as waste is notable in this parts; **B** Martitization of magnetite (replacement of magnetite by hematite) at the margins and along cleavage planes of magnetite grains, the presence of albite pseudomorphs replaced by quartz and sericite, fresh epidote crystals can indicate that the primary magnetites are co-phase with sodic alteration and then overprinting by sodic, calcic, phyllic and silicic alterations; **C** Monzonite intrusive stock that has been strongly altered; **D** Primary magnetite and apatite mineralization on the western margin of the deposit. The magnetite has been martitized and the hematite has been replaced by goethite. Phyllic alteration is also highly intense in this area; **E** Mineralization of magnetite and actinolite. Actinolite at its crystal planes and margins were replaced by calcite; **F** Mineralization of garnet beside magnetite and second-phase quartz; **G** Intrusion of quartz veining between fractures and cracks of magnetite and calcite mineralization; **H** Pseudomorph of albite mineral in the center of the image that is completely replaced by chlorite and sericite minerals, indicating the overprint of sodic alteration by phyllic alteration; **I** In the center of the image, primary hexagonal quartz showing more than 5 generations of growth surfaces and surrounded by secondary quartz with hematite mineralization; **J** Silica veinlet associated with pyrite and chalcopryrite minerals as well as chloritic alteration; **K** Previous image in the reflected light; **L** Relatively coarse pentagonal pyrite. Minerals abbreviations are from Warr (2021).

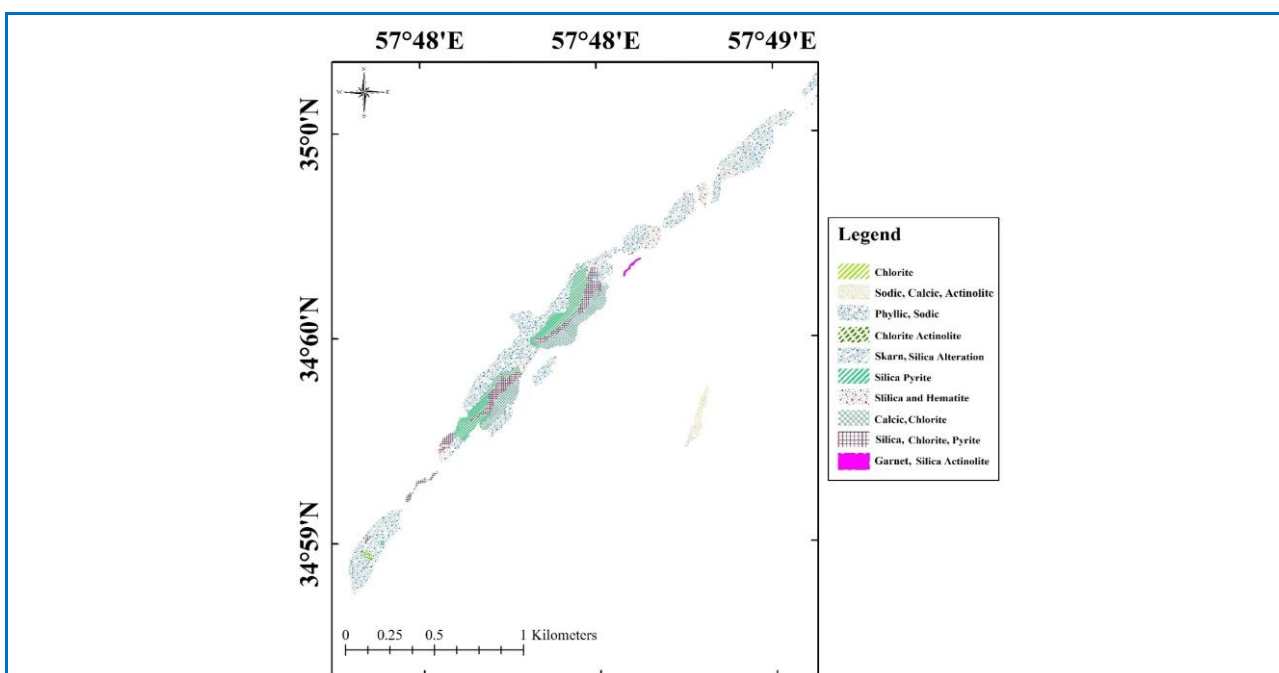


شکل ۹. ادامه.

Figure 9. Continued.

سطح کانسار گزارش شده است که با توجه به فرایند باطله‌برداری انجام شده برای استخراج ماده معدنی در زمان انجام این پژوهش، نشانه‌ای از کانه‌زایی‌های یادشده در محدوده دیده نشد.

روابط پاراژنتیک دگرسانی-کانی‌زایی در معدن آهن دلکن در (جدول ۲) دیده می‌شود. گفتنی است که در پژوهش‌های شبانی و همکاران (Shabani et al., 2015) کانه‌زایی‌های محدود گالن و اسفالریت نیز همراه با رگه‌های سیلیسی در



شکل ۱۰. نقشه ساده‌شده از دگرسانی‌ها و کانی‌های شاخص در معدن دلکن.

Figure 10. Alterations and the key minerals on the simplified map of Delkan mine.

جدول ۲. سکانس پاراژنتیک دگرسانی-کانی‌زایی در معدن آهن دلکن.

Table 2. Paragenetic sequence of alteration-mineralization in the Delkan iron mine

Hydrothermal alteration and mineralization	Prograde skarn	Na alteration	Ca alteration	Mineralization	Phyllitic-silicic alteration	Late carbonatization	Supergene and weathering
Mineral association	Pre existed Minerals						
Pyrite	-----			...	-----		
Quartz	-----			...	-----		
Garnet	-----	.....				
Pyroxene	....					
Albite		-----					
Magnetite		.....		-----		
Apatite		.....				
Actinolite			-----				
Calcite			-----			.....
Epidote			....			
Hematite				...	-----		
Chlorite					-----		
Sericite					-----		
Chalcopyrite					....	
Covellite							....
Chalcocite							....
Limonite							....
Goethite							-----
Gypsum							....

----- Major phase Minor Phase.

مقدارهای اکسیژن به‌دست‌آمده برای سیال با خاستگاه ماگمایی در کانسارهای اکسید آهن مس- طلا که در بازه ۵+ تا ۱۱+٪ گزارش شده‌اند (Barton, 2014)، می‌توان خاستگاه سیال گرمایی که به پیدایش کانه‌زایی اصلی (مگنتیت‌های توده‌ای بدون آپاتیت) در کانسار آهن دلکن انجامیده است را سیالات ماگمایی دانست.

مقدارهای $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ گزارش‌شده برای کانی کوارتز در معدن دلکن از ۱۵/۶ تا ۱۶/۲٪ (میانگین: ۱۵/۹٪) است. مقدارهای ایزوتوپی اکسیژن به‌دست‌آمده در کانی کوارتز در بازه‌های ۱۰+ تا ۱۲٪ تا ۱۸+ تا ۲۵٪ در کانسارهای اسکارن آهن نشان‌دهنده تعادل ایزوتوپی سیال گرمایی از نظر ایزوتوپ اکسیژن، با سنگ میزبان کربناته با مقدارهای بالای ایزوتوپی اکسیژن است (Einaudi et al., 2005; Bowman, 1998; Meinert et al., 1981). در کانسار دلکن نیز داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه‌های ایزوتوپی اکسیژن در کانی کوارتز تعادل ایزوتوپی میان سیال گرمایی با سنگ میزبان در فرایندهای سردشدن تدریجی سیال را نشان می‌دهد.

زمین‌شیمی ایزوتوپ‌های پایدار

ایزوتوپ‌های اکسیژن

چکیده‌ای از داده‌های تجزیه‌های ایزوتوپی انجام‌شده در معدن دلکن در جدول ۳ آورده شده است. مقایسه این داده‌ها با برخی منابع اکسیژن و کانی‌های اکسیژن‌دار در معادن آهن تیپ اسکارن، تیپ اکسید آهن آپاتیت، تیپ اکسید آهن مس- طلا و دیگر منابع اکسیژن نیز در شکل A-۱۱ نشان داده شده است.

مقدارهای ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ گزارش‌شده برای کانه مگنتیت در معدن دلکن از ۸/۶ تا ۱۰٪ (میانگین: ۹/۳٪) است که مشخصاً از مقدارهای گزارش‌شده برای کانسارهای اکسید آهن آپاتیت ایران و جهان بالاتر است و در بازه مقدارهای ایزوتوپی اکسیژن در کانسارهای اسکارن و اکسید آهن مس- طلا جای می‌گیرد. از آنجایی که مقدارهای ایزوتوپی اکسیژن در کانه مگنتیت برای کانسارهای اسکارن آهن که سیال گرمایی در آنها خاستگاه ماگمایی^{۱۸} دارد، در بازه ۴+ تا ۱۰+٪ (Einaudi et al., 1981; Bowman, 1981) قرار دارد.

¹ Juvenile

ایزوتوپ‌های گوگرد

۲ نمونه برای تجزیه مقدارهای ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ از کانی پیریت نیمه‌شکل‌دار و کوبیک همراه با کانه‌زایی توده‌ای مگنتیت (شکل ۹-۱) برگزیده شدند که گزیده‌ای از داده‌های تجزیه آنها در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقایسه این داده‌ها با مقدارهای ایزوتوپی گوگرد در کانی‌های پیریت معادن تیپ اکسید آهن آپاتیت در منطقه بافق و برخی دیگر از منابع گوگرد در (شکل ۱۱-۱) دیده می‌شود. مقدارهای $\delta^{34}\text{S}$ گزارش شده برای کانی پیریت در معدن دلکن از ۲۰/۱ تا ۲۰/۶ (میانگین: ۲۰/۳۵) است. سولفیدهای پدیدآمده در مراحل پایانی کانه‌زایی در کانسارهای اکسید آهن مس- طلا معمولاً مقدارهای بالاتری

(۵+ الی ۲۰%) نسبت به سولفیدهای نخستین دارند. مقدارهای ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای اکسید آهن مس- طلا که کانه‌زایی غالب آهن و ضعیف مس دارند در بازه‌های بیشتر از ۵% و معمولاً بیشتر از ۱۰% هستند (Barton, 2014). مقدارهای ایزوتوپی گوگرد با خاستگاه ماگمایی از ۰ تا ۵±% است. این مقادارها تنها تحت تأثیر منابع سولفات‌های دریایی (تبخیری‌ها) و کربنات‌ها در سنگ‌های میزبان می‌توانند از ۱۵+ تا ۳۰% افزایش یابند (Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005). از این رو، منابع گوگرد در کانسار آهن دلکن را می‌توان غیرماگمایی و مرتبط با تغییرات شیمیایی روی داده در سیال گرمایی و تعامل با سولفات‌های دریایی و سنگ‌های میزبان دانست.

جدول ۳. داده‌های ایزوتوپی اکسیژن و گوگرد برای کانی‌های جدا شده در کانسار دلکن.

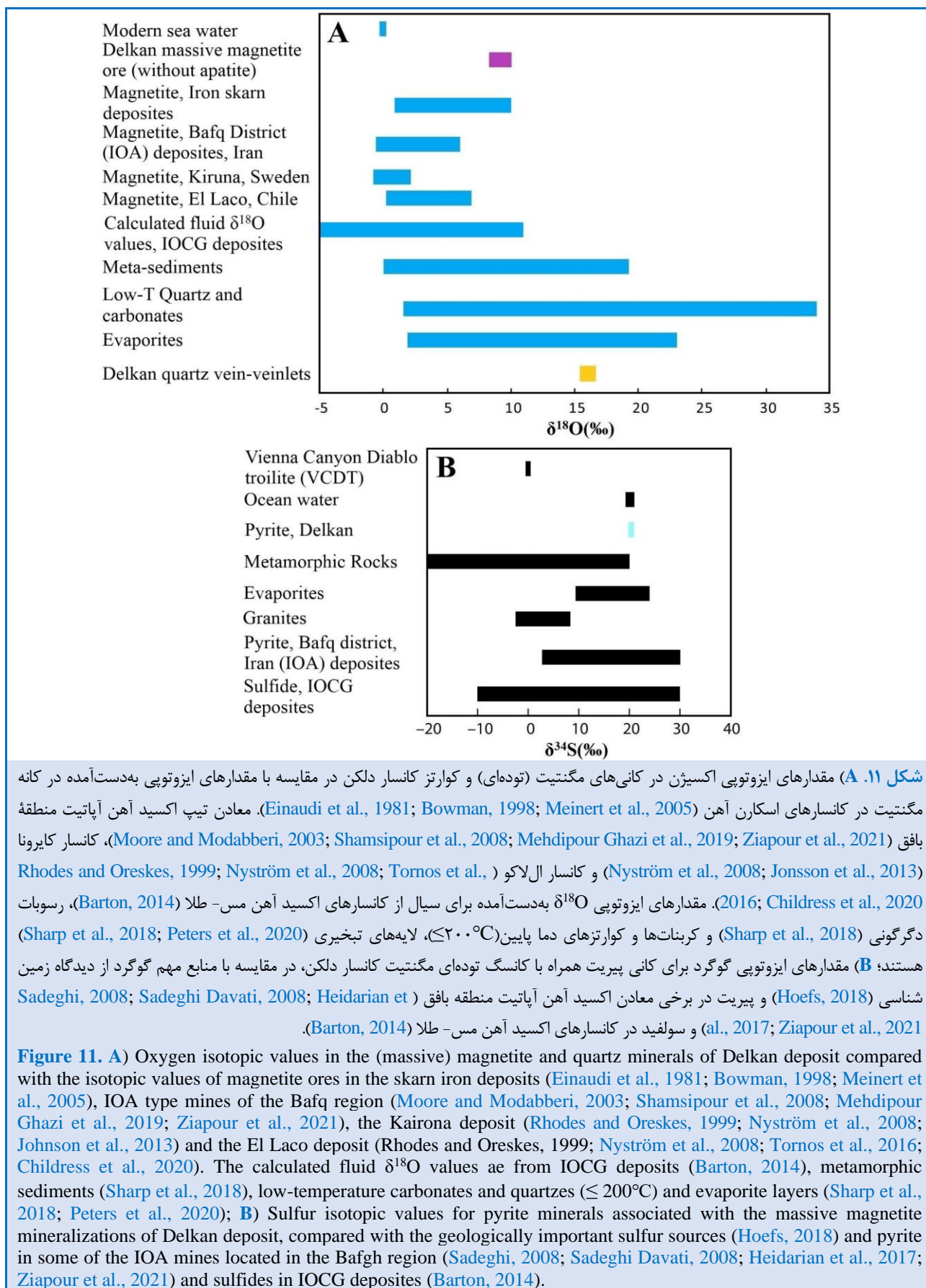
Table 3. Oxygen and sulfur isotopic data for the picked minerals from Delkan deposit.

Sample	Mineral type	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) VSMOW	$\delta^{34}\text{S}$ (‰) VCDT	Remarks
Mineral separates				
DFE1	Magnetite	10	-	Massive magnetite ore + Quartz veinlets + Pyrite
DFE2	Magnetite	8.6	-	Massive magnetite ore + Quartz veinlets + Pyrite
LC2	Quartz	15.6	-	Quartz vein-veinlets in main magnetite ore + Pyrite
LC3	Quartz	16.2	-	Quartz vein-veinlets in main magnetite ore + Pyrite
DPY1	Pyrite	-	20.1	Pyrite in magnetite Ore and Quartz veinlets
DPY2	Pyrite	-	20.6	Pyrite in magnetite Ore and Quartz veinlets

بحث

بسیاری از کانسارهای آهن با مقدارهای بسیار کم از مس و طلا و یا بدون کانه‌زایی‌های مس و طلا در سراسر دنیا را زیر مجموعه و یا عضوی از خانواده کانسارهای اکسید آهن مس- طلا دانسته‌اند (Skirrow, 2022). کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت به طور مشخص بخشی از کانسارهای اکسید آهن مس- طلا نیستند؛ اما می‌توانند شباهت‌های بسیاری با این کانسارها داشته باشند؛ مانند

داشتن پیریت، کالکوپیریت و طلا در مراحل پایانی کانه‌زایی در برخی کانسارهای تیپ اکسید آهن آپاتیت و یا پیدایش مگنتیت، اکتینولیت و آپاتیت در مراحل نخستین کانه‌زایی در برخی از کانسارهای تیپ اکسید آهن مس- طلا. این همانندی‌ها چه‌بسا نشان‌دهنده گونه‌ای از رابطه پیوستگی در پیدایش این دو تیپ از کانسار در برخی مناطق باشد؛ اگرچه کانه‌زایی‌ها لزوماً همانند هم نباشند (Reich et al., 2022).



زمین‌ساخت، سنگ‌شناسی توده آذرین درونی و سنگ‌های میزبان، کانه‌نگاری، شواهد ایزوتوپی و در نظر گرفتن تفاوت‌های این کانسار با کانسارهای اکسید آهن مس-طلا، بی‌گمان می‌توان گفت کانه‌زایی آهن در هر دو تیپ اسکارن و اکسید آهن آپاتیت در این معدن روی داده است. با توجه به فراوانی سنگ‌های کربناته و سنگ‌های کربن‌دار در این محدوده، بیشتر کانه‌زایی آهن از نظر میزان و اهمیت اقتصادی در معدن دلکن با واکنش‌ها و فرایندهای اسکارنی میان سیالات گرمایی ماگمایی و مجموعه سنگ‌های میزبان پدید آمده‌اند. این نوع از کانه‌زایی با ترکیبی از دو تیپ (رخداد آهن در تیپ‌های اسکارنی و اکسید آهن آپاتیت، در کنار هم)، در معادن دیگر ناحیه کوه سرهنگی، مانند معدن سنگ آهن نرم (شکل ۱-B) نیز دیده می‌شود (Parvareh Darbandi et al., 2020).

شکل ۱۲ چکیده‌ای از مراحل پیدایش، دگرسانی‌ها و کانی‌زایی‌های گوناگون در کانسار آهن دلکن (در مقطع عرضی باختری-خاوری میان نقطه Z تا Z' که در مرکز شکل‌های ۲ و ۳-D نمایش داده شده‌اند) را نشان می‌دهد.

برداشت

کانه‌زایی در کانسار دلکن به دو گروه دسته‌بندی می‌شود:

دسته نخست، کانه‌زایی اسکارن آهن به صورت مگنتیت‌های توده‌ای همراه با کمی پیریت به صورت همجوار و درون استوک نفوذی، با مجموعه‌ای از سنگ‌های میزبان فیلیت و شیست‌های کربن‌دار، شیست و دولومیت است که از نظر عیار و ذخیره، ماده معدنی اصلی استخراجی در این کانسار است. کانه‌زایی‌های محدود اسکارن آهن با فاصله ۱۰۰ متری و ۱ کیلومتری به‌سوی جنوب از استوک نفوذی نیز با سنگ‌های میزبان شیست و سنگ آهک دیده می‌شوند.

دسته دوم، کانه‌زایی افشان و رگچه‌ای اکسیدهای آهن همراه با آپاتیت در درون استوک نفوذی مونزونیتی است.

کانسارهای تیپ اکسید آهن مس-طلا گهگاه که سنگ میزبان کربناته داشته باشند شباهت‌هایی را به کانسارهای اسکارن نشان می‌دهند؛ مانند پیدایش پهنه‌های دگرسانی اسکارن پیش‌رونده در برخی از کانسارهای تیپ اکسید آهن مس-طلا.

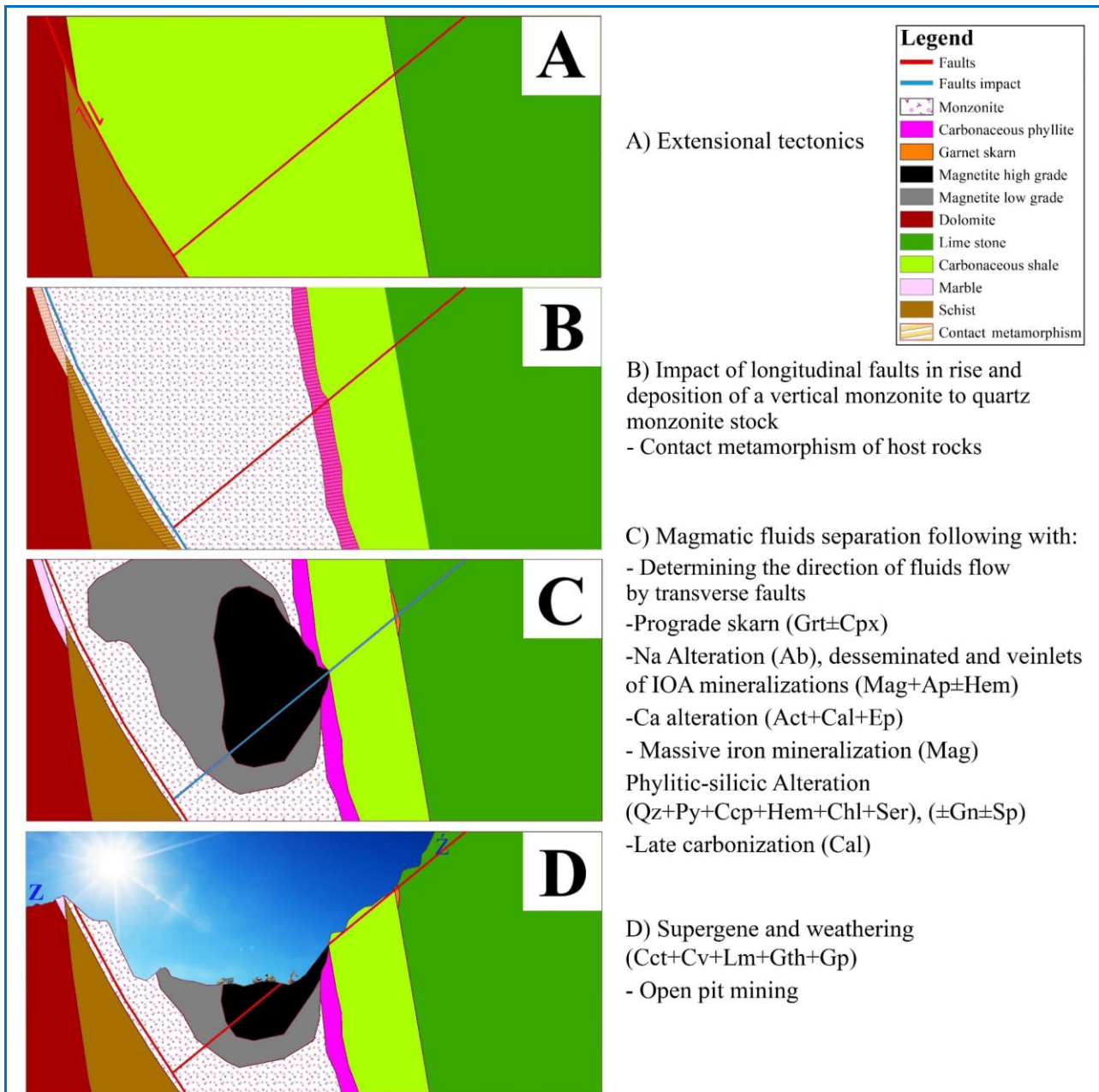
همان‌گونه که گفته شد کانسار دلکن شباهت‌هایی با کانسارهای اکسید آهن مس-طلا دارد؛ اما در اینجا برخی از مهم‌ترین تفاوت‌های میان این کانسار با کانسارهای اکسید آهن مس-طلا نام برده می‌شوند:

الف) بیشتر کانسارهای اکسید آهن مس-طلا در مراحل پیدایش خود یک یا دو مرحله از دگرسانی‌هایی را دارند که کانی‌هایی با مقدار بالای پتاسیم-آهن (مانند بیوتیت و/یا فلدسپار پتاسیک) در آنها پدید می‌آیند (Barton, 2014; Skirrow, 2022). کانی‌های پتاسیک در این کانسار دیده نمی‌شوند؛ هرچند شاید در روند دگرسانی‌ها کانی‌های پتاسیک با کانی‌های سدیک متأخر جانشین شوند (Barton, 2014) که در این کانسار کانی‌های سدیک (آلبیت) کاملاً شکل‌دار و بدون بافت جانشینی هستند؛

ب) در کانسارهای اکسید آهن مس-طلا که دگرسانی پیش‌رونده دارند معمولاً گارنت‌ها از نوع آلماندین (Skirrow, 2022) و پیروکسن‌ها نیز از نوع دیوپسید هستند (Barton, 2014)؛ اما در کانسار دلکن گارنت‌های با خاستگاه دگرسانی از نوع آندرادیت هستند (شکل ۷) که بیشتر در کانسارهای اسکارن آهن دیده می‌شوند و پیروکسن نیز به صورت شبه‌ریخت به صورت بسیار محدود در بخش‌های مرکزی کانسار دیده می‌شود؛

پ) کانی‌های منیزیم دار مانند ترمولیت در دگرسانی‌های کانسارهای اکسید آهن مس-طلا بسیار کمیاب هستند (Skirrow, 2022)؛ اما در این کانسار به‌ویژه در محل همبری شمالی استوک نفوذی می‌توان در مجموعه کانی‌های پدیدآمده از دگرسانی، ترمولیت را نیز دید (شکل ۹-J).

با توجه به مجموعه بررسی‌های زمین‌شناسی،



شکل ۱۲. مراحل پیدایش کانسار آهن دلکن در مقطع عرضی ZZ' که در شکل‌های ۲ و ۳-D نمایش داده شده است؛ **A)** زمین‌ساخت کششی که فضای مناسب را برای نفوذ استوک مونزونیتی ایجاد کرده است؛ **B)** تأثیر گسل‌های طولی در بالا آمدن و نفوذ استوک مونزونیتی. دگرگونی همبری سنگ‌های میزبان پیش از جداشدن سیالات گرمایی-ماگمایی از ماگمای مونزونیتی و در ادامه آن، تعیین جهت جریان سیالات با گسل‌های عرضی، اسکارن پیش‌رونده، دگرسانی سدیمی و کانه‌زایی پراکنده اکسید آهن آپاتیت، دگرسانی کلسیک، کانه‌زایی توده‌ای آهن، دگرسانی فیلیک و سیلیسی، دگرسانی کربناتی ثانویه؛ **D)** فرایندهای سوپرژن و هوازدگی، استخراج ماده معدنی به روش اُپن‌پیت.

Figure 12. Formation stages of the Delkan iron deposit shown in the ZZ' cross-section that was shown in Figures 2 and 3D; **A)** Extensional tectonics that created a suitable space for the intrusion of the monzonite stock; **B)** Impact of longitudinal faults in rise and intrusion of the monzonite stock. Contact metamorphism of host rocks before the separation of any juvenile hydrothermal fluids from the monzonite magma; **C)** Separation of juvenile hydrothermal fluids from the monzonite stock following with determining the direction of fluids flow by transverse faults, progressive skarn, sodic alteration and disseminated iron oxide apatite mineralization, calcic alteration, massive iron mineralization, phylitic and silicic alteration, secondary carbonate alteration; **D)** Supergene and weathering processes, open-pit mining.

محدوده وجود دارند؛ اما بیشتر ذخایر آهن در این کانسار به صورت مگنتیت‌های توده‌ای و با ویژگی‌هایی همانند کانسارهای اسکارن آهن پدید آمده‌اند.

سپاس‌گزاری

از همکاری‌های ارزشمند مدیر محترم گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان آقای دکتر جمالی در راستای انجام امور آزمایشگاهی مربوطه و راهنمایی‌های ارزشمند استادان محترم گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان مانند آقای دکتر ترابی و آقای دکتر مکی‌زاده و همچنین، همراهی‌های مدیر عامل محترم شرکت دلکن کاوان پاسارگاد و کارکنان معدن دلکن سپاس‌گزاری می‌شود. این مقاله از پیشنهادهای ارزشمند سه داور ناشناس بهره‌مند شده است، از پیشنهادهای انتقادی آنها سپاس‌گزاری می‌شود.

گسل‌های محدوده به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند که گروه نخست روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری دارند و در نفوذ و به‌دام‌انداختن استوک نفوذی که عامل دگرگونی همبری و کانه‌زایی در محدوده بوده است تأثیرگذار بوده‌اند. گروه دوم، گسل‌هایی با روند عمود بر گروه نخست هستند که در کنترل محل و نوع کانه‌زایی‌ها تأثیرگذار بوده‌اند.

دگرسانی‌های اصلی در محدوده شامل اسکارن پیش‌رونده، سدیک، کلسیک، فلیک، سیلیسی و کربناتی ثانویه هستند که در برخی بخش‌ها دچار فرایندهای سوپرژن و هوازدگی شده‌اند. تجزیه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن روی کانی‌های مگنتیت توده‌ای و کوارتز، نشان‌دهنده خاستگاه ماگمایی برای سیال گرمایی و تأثیر فرایندهای اسکارنی در پیدایش کانه‌زایی‌های آهن بوده است و تجزیه ایزوتوپ پایدار گوگرد روی کانی پیریت نشان‌دهنده خاستگاه غیرماگمایی برای گوگرد است. کانه‌زایی‌های آهن با دو تیپ اسکارن و کایرونا در این

Reference

- Barton, M.D. (2014) Iron Oxide (-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 17, 515-541. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01123-2>
- Bowman, J.R. (1998) Stable-isotope systematic of skarns. Mineralized intrusion-related skarn systems, 99-145.
- Childress, T., Simon, A.C., Reich, M., Barra, F., Bilenker, L.D., La Cruz, N.L., and Ovalle, J.T. (2020) Triple Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$), Hydrogen ($\delta^2\text{H}$), and Iron ($\delta^{56}\text{Fe}$) Stable Isotope Signatures Indicate a Silicate Magma Source and Magmatic-Hydrothermal Genesis for Magnetite Orebodies at El Laco, Chile. Economic Geology, 115(7), 1519-1536. <http://dx.doi.org/10.5387/econgeo.4760>
- Daliran, F. (1990) The Magnetite-Apatite Deposit of Mishdovan, East Central Iran. An Alkali Rhyolite Hosted, "Kiruna type" Occurrence in the Infracambrian Bafq Metalotect, Unpublished Ph.D. Thesis. Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, Germany.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., and Newbery, R.J. (1981) Skarn deposits. Economic Geology 75th Anniversary Volume, 317-391.
- Hajimirzajan, H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Homam, S.M., Heidarian Shahri, M.R., and Santos, J.F. (2019) Geochronological and geochemical characteristics of the Dehzaman intrusive and volcanic rocks (NE Iran): implication for a Cadomian magmatism. Periodico di Mineralogia, 88, 33-56. <https://doi.org/10.2451/2019PM812>
- Heidarian, H., Alirezaei, S., and Lentz, D.R. (2017) Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. Ore Geology Reviews, 83, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.031>
- Hoefs, J. (2018) Stable isotope geochemistry (Vol. 437). Springer International Publishing AG.
- Imanpour, Karimpour, M.H., and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2016) Study of mineralization and geochemistry of Deh Zaman iron deposit (southwest of Bardeskan) in comparison with banded

- iron firmation deposits. *Iranian Journal of Crysrallography and Mineralogy*, 24(4), 675-690 (In Persian).
- Jami, M. (2006) *Geology, Geochemistry and Evolution of the Esfordi Phosphate – Iron Deposit, Bafq Area, Central Iran*, Unpublished Ph.D. Thesis. University of New South Wales.
- Jonsson, E., Troll, V.R., Högdahl, K., Harris, C., Weis, F., Nilsson, K.P., and Skelton, A. (2013) Magmatic origin of giant ‘Kiruna-type’ apatite-iron-oxide ores in Central Sweden. *Scientific Reports*, 3(1), 1644. <http://dx.doi.org/10.1038/srep01644>
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H., and Shabani, S. (2018) Geology, mineralogy, and geochemistry of the Padehbid iron occurrence, southwest of Bardaskan, South Khorasan Province. *Advanced Applied Geology*, 8(3), 51-62 [In Persian]. <https://doi.org/10.22055/aag.2019.26711.1881>
- Mehdipour Ghazi, J., Harris, C., Rahgoshay, M., and Moazzen, M. (2019) Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposit in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite. *Ore Geology Reviews*, 105, 590-604. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.006>
- Meinert, L.D., Dipple, G.M., and Nicolescu, S. (2005) World skarn deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 299-336. <http://dx.doi.org/10.5382/AV100.11>
- Moore, F., and Modabberi, S. (2003) Origin of Choghart iron oxide deposit, Bafq mining district, Central Iran: new isotopic and geochemical evidence. *Journal of Sciences*, 14(3), 253-269.
- Moumeni, M., Nozaem, R., and Dehbozorgi, M. (2021) Quantitative assessment of the relative tectonic activity using the analytical hierarchy process in the northwestern margin of the Lut Block, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 206, 104607. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104607>
- Newberry, R.J., Einaudi, M.T., and Eastman, H.S. (1991) Zoning and genesis of the Darwin Pb-Zn-Ag skarn deposit, California; a reinterpretation based on new data. *Economic Geology*, 86(5), 960-982.
- Nozaem, R. (2012) *Deformation Analysis of the Kuh-e-Sarhangi Area at Northwest Edge of Lut Block*. Ph.D thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran [In Persian].
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Rossetti, F., Della Seta, M., Vignaroli, G., Yassaghi, A., and Eliassi, M. (2013) Post-Neogene right-lateral strike-slip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran. *Tectonophysics*, 589, 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.001>
- Nyström, J.O., Billström, K., Henríquez, F., Fallick, A.E., and Naslund, H.R. (2008) Oxygen isotope composition of magnetite in iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden. *GFF*, 130(4), 177-188.
- Parvareh Darbandi, M., Malekzadeh Shafaroudi, A., Azimzadeh, A.M., and Karimpour, M.H. (2020) Magnetite mineralization properties of Narm iron mine with respect to petrology and geochemistry of its adjacent gabbroic- dioritic rocks (North of Tabas, South Khorasan Province). *Petrological Journal*, 11(1), 103-128 [In Persian]. <https://doi.org/10.22108/ijp.2020.118478.1145>
- Peters, S.T., Alibabaie, N., Pack, A., McKibbin, S.J., Raeisi, D., Nayebi, N., and Lehmann, B. (2020) Triple oxygen isotope variations in magnetite from iron-oxide deposits, central Iran, record magmatic fluid interaction with evaporite and carbonate host rocks. *Geology*, 48(3), 211-215. <http://dx.doi.org/10.1130/G47858Y.1>
- Ramezani, J., and Tucker, R.D. (2003) The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7), 622-665. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Reich, M., Simon, A.C., Barra, F., Palma, G., Hou, T., and Bilenker, D.L. (2022). Formation of iron oxide-apatite deposits. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3, 758–775. <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-022-00335-3>

- Rhodes, A.L., and Oreskes, N. (1999) Oxygen Isotope Composition of Magnetite Deposits at El. Laco, Chile: Evidence of Formation from Isotopically Heavy Fluids. Society of Economic Geologists, Special Publication, 7, 333-351. <http://dx.doi.org/10.5382/SP.07.11>
- Ridolfi, F., Renzulli, A., and Puerini, M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1), 45-66. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>
- Rossetti, F., Nozaem, R., Lucci, F., Vignaroli, G., Gerdes, A., Nasrabadi, M. and Theye, T. (2015) Tectonic setting and geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi region (NW Lut Block). *Journal of Asian Earth Sciences*, 102, 24-44.
- Sadeghi Davati, V.A. (2008) Geochemical and genetic investigation of Choghart magnetite-apatite deposit. M.Sc. thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian).
- Sadeghi, R. (2008) Geochemical and genetic investigation of North Anomaly iron ore (central Iran). M.Sc. thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian).
- Sahandi, M.R., Qasemi, M.R., and Ekhtiarabadi, M. (2010) Geological map of the Qasem Abad, Scale 1:100,000, Sheet No. 7559. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Shabani, S., Karimpour, M.H., and Malekzadeh Shafaroudi, A. (2015) Geology and Mineralization of Delkan Mine, southwest of Bardaskan, Razavi Khorasan province. 7th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Damghan University, Damghan, Iran (In Persian).
- Shamsipour, R., Khakzad, A., Rasa, I., Vosoughi-Abedini, M. (2008) Mineralogy and fluid inclusion studies of Chador-Malu iron ore deposit, Bafq. Central Iran. *Research Journal of University of Isfahan*, 29, 129-144 (In Persian).
- Sharp, Z.D., Wostbrock, J.A.G., and Pack, A. (2018) Mass-dependent triple oxygen isotope variations in terrestrial materials. *Geochemical Perspectives Letters*, 7, 27-31. <http://dx.doi.org/10.7185/geochemlet.1815>
- Skirrow, R.G. (2022) Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits—A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*, 140, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>
- Stöcklin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 25, 1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Stöcklin, J. (1977) structural correlation of the Alpine ranges between Iran and central Asia. *Mémoire hors série de la Société géologique de France*, (8), 333-335.
- Torab, F.M. (2008) Geochemistry and Metallogeny of Magnetite Apatite Deposits of the Bafq Mining District, Central Iran, Doctoral thesis. Clausthal University of Technology, Germany.
- Torabian, S. (2007) Mineralization and genesis of Anomaly (3) of Gol Gohar Sirjan based on the distribution of minor elements. M.Sc thesis, Tarbiat Moallem University, Iran (In Persian).
- Tornos, F., Velasco, F., and Hanchar, J.M. (2016) Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit, Chile. *Geology*, 44(6), 427-430. <http://dx.doi.org/10.1130/G37705.1>
- Warr, L.N. (2021) IMA-CNMNC Approved Mineral Symbols. *Mineralogical Magazine*, 85, 291-320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Ziapour, S., Esmaily, D., Khoshnoodi, K., and Simon, A.C. (2021) Mineralogy, geochemistry, and genesis of the Chahgaz (XIVA Anomaly) Kiruna-type iron oxide-apatite (IOA) deposit, Bafq district, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 128, 103924. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103924>