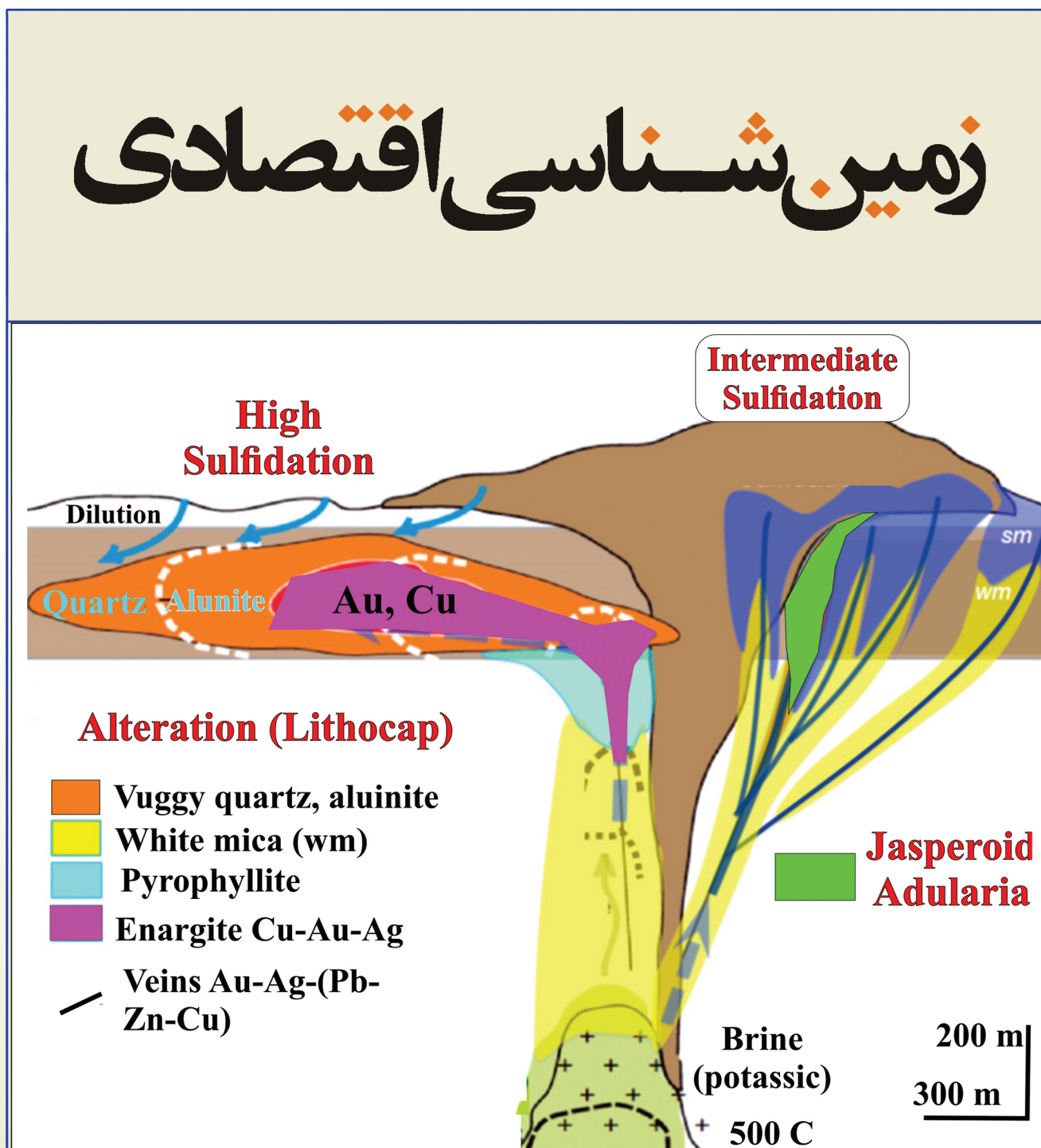


زمین شناسی اقتصادی





صاحب امتیاز

دانشگاه فردوسی مشهد

سر دبیر و مدیر مسئول

دکتر محمد حسن کریم پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

karimpur@um.ac.ir

هیأت تحریریه

دکتر محمد حسن کریم پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر چارلز استرن، استاد (دانشگاه کلرادو امریکا)

دکتر محمد حسین آدابی، استاد (دانشگاه شهید بهشتی)

دکتر ابراهیم راستاد، استاد (دانشگاه تربیت مدرس تهران)

دکتر غلامرضا لشکری پور، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر عباس مرادیان، استاد (دانشگاه شهید باهنر کرمان)

دکتر سیدرضا موسوی حرمی، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر سید احمد مظاهری، استاد (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر مجید قادری، استاد (دانشگاه تربیت مدرس تهران)

دکتر فرهاد بوذری، دانشیار پژوهشی (دانشگاه بریتیش کلمبیا)

دکتر امیر مرتضی عظیم زاده، پژوهشگر ارشد (دانشگاه تکنولوژی لولنو)

کارشناس اجرایی

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مدیر اجرایی

دکتر آزاده ملکزاده شفاوردی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ویراستار فارسی

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

صفحه آرا

سارا حبیبی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اطلاعات نشریه

شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

دوره انتشار: فصلنامه

پروانه انتشار

(وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی)

۱۳۸۸/۰۹/۰۲ - ۲۱۱۲۴

اعتبار علمی - پژوهشی

(کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور)

۱۳۸۹/۰۵/۰۹ - ۴۱۴۳

تماس با نشریه

آدرس پستی: ایران، مشهد، میدان آزادی، پردیس

دانشگاه فردوسی، دانشکده علوم، نشریه زمین‌شناسی

اقتصادی

کد پستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۳

پست الکترونیکی: econg@um.ac.ir

وبسایت: <https://econg.um.ac.ir>

تلفن: ۳۸۸۰۴۰۵۰ (۵۱) ۰۹۸

نمابر: ۳۸۸۰۷۳۵۲ (۵۱) ۰۹۸

نشریه زمین‌شناسی اقتصادی به صورت فصلنامه، در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی و علوم وابسته، به زبان فارسی و با چکیده مبسوط انگلیسی منتشر می‌شود.

اهداف

- نشر مقاله‌های علمی
- گسترش پژوهش و ارتقای دانش زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی
- نشر آخرین دستاوردهای علمی پژوهشگران دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های علمی در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی و علوم مرتبط با آن

زمینه‌های موضوعی

- زمین‌شناسی اقتصادی
- اکتشافات ژئوشیمیایی
- اکتشافات ژئوفیزیکی
- سنجش از دور و اکتشاف منابع معدنی
- زمین‌شناسی محیط زیست

بانک‌ها و نمایه‌نامه‌ها



با سلام

مواد معدنی در ادوار گذشته همواره نقشی مهم و اساسی در زندگی انسان ایفا کرده است. میزان و نوع استفاده از مواد معدنی در تقسیمات زمانی، رابطه‌ای مستقیم با دانایی انسان‌ها داشته است. امروزه مواد معدنی و معادن، جایگاه ویژه‌ای در اشتغال، اقتصاد، صنعت و استقلال کشورها دارند. پایدارترین اشتغال و درآمد مربوط به بخش معدن است. برای مثال، معدن مس پورفیری بینگام واقع در ایالت یوتای امریکا، از ۱۰۴ سال قبل تاکنون در حال بهره‌برداری است و حدود چهار نسل در این معدن شاغل بوده‌اند. معدن یادشده نقشی مهم در تولید مس و اقتصاد امریکا در طول تمامی این سال‌ها داشته است. کشورهای توسعه‌یافته، برنامه‌های ویژه و توجه جدی به اکتشاف و استخراج مواد معدنی دارند؛ از جمله می‌توان کشورهای استرالیا، کانادا، امریکا و چین را نام برد.

زمین‌شناسان اقتصادی و رشته‌های مرتبط، مسئولیت شناسایی، اکتشاف و مدیریت ذخایر معدنی را در کشورهای توسعه‌یافته برعهده دارند. موفقیت در کشف ذخایر معدنی، مرهون زمین‌شناسان اقتصادی باتجربه، کارآمد، ماهر و برخوردار از آخرین یافته‌های دانش زمین‌شناسی اقتصادی است. با نگاهی به گذشته، می‌توان دریافت که ایرانی‌ها در کشف و ذوب فلزات، دارای تاریخچه درخشان و با قدمت چندین هزار ساله‌اند. نخستین آلایژ (برنز) توسط ایرانی‌ها اختراع شد. بنابراین، ایران در زمینه کشف مواد معدنی، مهد دانایی، استعداد، توانمندی و تلاش بوده و انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران با توجه به توانایی بسیار ارزشمند و بالای کشور در خصوص مواد معدنی، تلاش خواهد کرد تا از طریق آموزش، پژوهش‌ها و اصلاحات قانونی، بهترین جایگاه در کشف ذخایر معدنی را برای کشور مهیا سازد.

انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران مصمم است با همدلی و تلاش اساتید، پژوهشگران، دانشجویان و دستگاه‌های اجرایی مرتبط با برنامه‌ریزی، گام‌های مهمی در راستای تحقق جایگاه مناسب اکتشاف ذخایر معدنی در کشور را فراهم کند. موارد زیر در دستور کار انجمن قرار گرفته است:

- ۱) هدفمند کردن تحقیقات و پژوهش‌ها در زمین‌شناسی اقتصادی (اکتشافات ذخایر معدنی). با توجه به توانایی و شرایط زمین‌شناسی و اولویت‌های تحقیقاتی - اکتشافی در خصوص اکتشاف ذخایر معدنی در مناطق مختلف کشور، این امر با مشارکت اساتید، پژوهشگران و دستگاه‌های اجرایی محقق خواهد شد. اساتید، پژوهشگران، دانشجویان دکتری و کارشناسی ارشد دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی، مجری طرح‌های مزبور خواهند شد. در خصوص تعیین اولویت‌ها، مؤلفه‌های متعددی مورد توجه قرار خواهد گرفت: ۱- تأمین مواد اولیه برای توسعه صنعت کشور، ۲- توسعه اشتغال در مناطق کم‌برخوردار با کشف ذخایر معدنی، ۳- تأمین مواد اولیه برای مصالح سبک و عایق‌های حرارتی با توجه به افزایش نرخ انرژی، ۴- افزایش سهم صادرات مواد معدنی با تأکید بر ارزش افزوده، ۵- توجه جدی به مسایل زیست‌محیطی اکتشاف و استخراج معادن، ۶- نوآوری در دانش و فناوری اکتشاف، ۷- اکتشاف مواد راهبردی و ۸- سایر مؤلفه‌ها.

۲) رصد کردن آموزش و تحقیقات زمین‌شناسی اقتصادی در کشورهای توسعه‌یافته و بومی‌سازی و به‌روز رسانی آموزش و پژوهش زمین‌شناسی اقتصادی در ایران.

۳) خوشبختانه نشریه زمین‌شناسی اقتصادی با کسب مجوز علمی-پژوهشی، زمینه چاپ تحقیقات و پژوهش‌های زمین‌شناسی اقتصادی در کشور را فراهم کرده است. با عنایت به این مهم که نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، نمادی از متخصصان زمین‌شناسی اقتصادی ایران است؛ لذا از تمامی اساتید، پژوهشگران و دانشجویان دکتری درخواست می‌شود بهترین مقاله‌های علمی-پژوهشی خود را برای چاپ در این مجله ارسال نمایند.

۴) برنامه‌ریزی برای برگزاری کارگاه‌های آموزشی و تخصصی.

- ۱ بررسی کانده‌زایی فلزهای گران‌بهای سولفیداسیون پایین در پتانسیل معدنی کهیاز (شمال شرق اصفهان) با تکیه بر شواهد زمین‌شناسی، کانده‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال مهین رستمی، محمد معانی‌جو، علی شعله، علی اصغر سپاهی گرو، رضا علی‌پور
- ۳۳ شیمی‌کانی و توزیع اندازه بلور پلاژیوکلازها در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون، ایران: با تأکید بر فرایندهای کنترل‌کننده تکامل ماگما مهدیه بامروت، سارا درگاهی، محسن آروین، علیرضا شاکر، جیمی جی ویلکینسون، ادگار ای کورتس-کالدرون، مجید امین‌زاده
- ۶۱ پیدایش و منشأ رنگ کانی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک (استان یزد): شواهدی از کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال کیامرث حسینی، محمد یزدی، حسین عزیزی
- ۱۰۵ زمین‌شناسی، دگرسانی، کانده‌نگاری، زمین‌شیمی و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در محدوده اکتشافی کویران، شمال غرب دهسلم (مرکز بلوک لوت) محمود پورخسرو، محمدحسن کریم‌پور، سیدمسعود همام، فاطمه سپیدبر
- ۱۳۱ کانی‌زایی برون‌زاد مرتبط با پهنه‌های گسلی و شکستگی‌ها در کانسار روی و سرب کوشک، ایران مرکزی غلامرضا میرزابابائی، محمد یزدی، محمد گوهری انارکی، مینا ملک محمدی
- ۱۷۳ ارزیابی پتانسیل کانده‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تأکید بر منطقه دره‌ساری، با استفاده از تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی مینا شاهین، زهرا اعلی‌نیا، زهره حسین‌زاده، سیدمحسن طباطبائی‌منش، پوریا محمودی



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1178



Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence

Mahin Rostami ¹ , Mohammad Maanijou ^{2*} , Ali Sholeh ³ , Ali Asghar Sepahi ⁴ , Reza Alipoor ⁵

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

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

³ Ph.D. SRK Consulting, Almaty, Kazakhstan

⁴ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 05 June 2026
Revised: 04 August 2026
Accepted: 15 August 2026

Keywords

Electrum
Adularia
Low Sulfidation
Kahyaz
Seveh-Naein-Jiroft magmatic belt

*Corresponding author

Mohammad Maanijou
✉ mohammad@basu.ac.ir

ABSTRACT

The Kahyaz prospect is located approximately 45 km southeast of Ardestan, Esfahan Province, within the central part of the Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt. Gold-bearing siliceous veins are hosted by Oligocene andesitic–trachyandesitic volcanic rocks. The main mineralized vein is approximately 2 km long and has a width of 2–5 m, with gold grades ranging from 0.1 to 2.1 g/t. Electrum is the main gold-bearing mineral, whereas base metal sulfides, including pyrite, chalcopyrite, chalcocite, and covellite, occur as minor minerals. Quartz, calcite, and adularia are the dominant gangue minerals. Colloform, crustiform, vein–veinlet, open-space filling, and bladed textures are characteristic features of the Kahyaz. Geochemical data indicate a positive correlation of Au with Ag and Sb, and negative correlations between Au and As, S, and base metals. Hydrothermal alteration is characterized by silicic, intermediate argillic, and propylitic alteration zones. Fluid inclusion studies indicate that ore-forming fluids were characterized by moderate to high homogenization temperatures (169–278°C) and low to moderate salinities (2.73–10.29 wt% NaCl eq.). These fluids were affected by mixing and boiling processes. The geological, mineralogical, geochemical, and fluid inclusion characteristics of the Kahyaz prospect are consistent with a low-sulfidation epithermal system.

How to cite this article

Rostami, M., Maanijou, M., Sholeh, A., Sepahi, A.A. and Alipoor, R., 2026. Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 1–32. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1178>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Kahyaz prospect is located 16 km northwest of Neystanak Village, and 45 km southeast of Ardestan City, Esfahan Province, central Iran. The Kahyaz epithermal gold (Au) prospect was discovered in 2018 by Pars-Olang Company. The exploration program, which included geological mapping and diamond drilling (14 drill holes), was recently conducted by Kowsar Mining and Industries Development Investment Company, resulting in the identification of 300,000 tonnes of mineral resources with an average gold grade of 1.1 ppm Au. Unlike the numerous studies conducted on porphyry and epithermal deposits in the northwestern and southeastern parts of the belt, the central segment of the Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt has received relatively little attention. The discovery of new mineralized zones, including the area investigated in this study, in the central Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt may indicate the presence of significant mineralization that has so far remained unexplored. Therefore, the geological, mineralization, geochemical, hydrothermal alteration, and fluid inclusion data presented in this study provide a basis for developing an exploration model to identify additional mineral occurrences within the central Saveh-Naein-Jiroft magmatic belt.

Materials and methods

Petrographic analyses were performed on approximately 100 thin sections was carried out at Bu-Ali Sina University (Hamedan, Iran) using a ZIESS Axioplan2 transmitted- and reflected light polarizing microscope. Textural imaging of five selected samples was performed using an FEI QEMSCAN® Quanta 650F instrument on polished carbon-coated thin sections at the Faculty of Earth Sciences, University of Geneva, Switzerland. Fifty drill-core samples were analyzed for gold using the fire assay method at Zarrin Felez Kavoshgaran Co. (Najafabad, Iran) and Zarraazma Co. (Tehran, Iran). To determine correlation coefficients, 35 samples were analyzed using ICP-OES at Zarazma Co. For fluid inclusion studies, seven quartz samples associated with gold mineralization were selected from drill cores and surface outcrops. After preparing double-polished sections with a thickness of 300 µm, petrographic and microthermometric analyses were performed at Tarbiat Modares University. Microthermometric measurements were conducted

using a Linkam THMS 600 heating-cooling stage equipped with a TP94 temperature controller and an LNP cooling system, mounted on a Zeiss microscope. The analytical system operated over a temperature range of −190 to +600 °C.

Results and Discussion

The Kahyaz mineral prospect, located in northeast Isfahan, Iran, hosts a low-sulfidation epithermal precious-metal system associated with Eocene volcanic and subvolcanic rocks. The host succession consists predominantly of andesite-trachyandesite and rhyolite, which are overlain by Oligocene basaltic andesite and rhyodacite-dacite units. Mineralization is principally confined to a quartz-calcite vein extending for approximately 2 km with a thickness ranging from 2 to 5 m. Quartz is the dominant gangue mineral and the principal host of electrum, whereas calcite and adularia occur as subordinate gangue minerals. Quartz exhibits a wide range of open-space filling textures, including crustiform, comb, colloform, bladed, plumose, cockade, brecciated, and vein-veinlet textures.

The hypogene ore assemblage comprises electrum, acanthite, pyrite, chalcopyrite, and manganite, whereas chalcocite, covellite, and goethite constitute the supergene mineral assemblage. Hydrothermal alteration includes propylitic, intermediate argillic, and silicic-carbonate alterations. Based on mineral assemblages and cross-cutting textural relationships, the hydrothermal evolution of the Kahyaz prospect is divided into three stages: (1) pre-ore alteration, (2) ore stage, and (3) post-ore supergene alteration.

During the pre-ore stage, propylitic and intermediate argillic alteration developed through interaction of near-neutral hydrothermal fluids with the andesitic-trachyandesitic host rocks, producing alteration zonation from argillic adjacent to the veins to propylitic outward. Illite, illite/smectite, montmorillonite, chlorite, epidote, and calcite constitute the principal alteration mineral assemblages. The ore stage was initiated by precipitation of quartz-calcite veins, followed by hydrothermal boiling.

Boiling promoted CO₂ degassing, increased fluid pH, and induced supersaturation of silica and potassium, resulting in the precipitation of quartz and adularia. Simultaneously, the loss of dissolved H₂S destabilized Au-Ag bisulfide complexes, triggering electrum precipitation. Bladed calcite, quartz pseudomorphs after calcite, comb and crustiform textures, together with open-space filling fabrics, provide strong evidence

for boiling during mineralization.

The post-ore stage is characterized by supergene oxidation and enrichment, leading to the formation of chalcocite, covellite, goethite, jarosite, gypsum, and zeolite-group minerals. Fluid inclusion studies of vein quartz indicate homogenization temperatures of 169–278 °C and salinities of 2.73–10.29 wt.% NaCl equivalent, suggesting mineralization from low- to moderate-salinity hydrothermal fluids. The coexistence

of fluid mixing and boiling is interpreted as the principal mechanism responsible for gold deposition. Geological setting, alteration mineralogy, quartz–adularia gangue assemblages, characteristic open-space filling textures, fluid inclusion data, and the scarcity of base-metal sulfides collectively indicate that the Kahyaz prospect represents a low-sulfidation precious-metal system.



بررسی کانه‌زایی فلزهای گران‌بهای سولفیداسیون پایین در پتانسیل معدنی کهپاز (شمال شرق اصفهان) با تکیه بر شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

مهین رستمی^۱، محمد معانی جو^{۲*}، علی شعله^۳، علی اصغر سپاهی گرو^۴، رضا علی‌پور^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ دکتری، شرکت مشاوره‌ای اس.آر.کی، آلماتی، قزاقستان

^۴ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۵ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
پتانسیل معدنی کهپاز در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اردستان در استان اصفهان، در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت قرار دارد. رگه‌های سیلیسی حاوی طلا در واحدهای آتشفشانی آندزیتی-تراکی آندزیتی الیگوسن قرار گرفته‌اند. رگه اصلی کانه‌زایی دارای حدود ۲ کیلومتر طول و عرض ۲ تا ۵ متر است. عیار طلا از ۰/۱ گرم بر تن تا ۲/۱ گرم بر تن متغیر است. الکتروم، کانی‌طالدار اصلی است. کانی‌های سولفیدی از جمله پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کوولیت به صورت فرعی تشکیل شده‌اند. کوارتز، کلسیت و آدولاریا مهم‌ترین کانی‌های باطله هستند. بافت‌های رگه-رگچه‌ای، گل کلمی، قشری، پرکننده فضای خالی و تیغه‌ای از جمله بافت‌های شاخص هستند. داده‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده همبستگی مثبت طلا با عناصر نقره و آنتیموان است و همبستگی منفی آن با آرسنیک، گوگرد و فلزهای پایه است. دگرسانی گرمابی شامل پروپیلیتیک، آرژیلیک متوسط و سیلیسی است. بررسی میان‌بارهای سیال در کوارتز مربوط به مرحله اول و اصلی کانه‌زایی نشان می‌دهد که سیالات کانه‌دار دارای دمای متوسط تا بالا (۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین تا متوسط (۲/۷۳ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) هستند که تحت تأثیر فرایندهای اختلاط و جوشش قرار گرفته‌اند. کانه‌زایی در کهپاز با کانه‌زایی در سامانه‌های سولفیداسیون پایین مطابقت دارد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴
	واژه‌های کلیدی الکتروم آدولاریا سولفیداسیون پایین کهپاز کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت
	نویسنده مسئول محمد معانی جو mohammad@basu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

رستمی، مهین؛ معانی جو، محمد؛ شعله، علی؛ سپاهی گرو، علی اصغر و علی‌پور، رضا، ۱۴۰۵. بررسی کانه‌زایی فلزهای گران‌بهای سولفیداسیون پایین در پتانسیل معدنی کهپاز (شمال شرق اصفهان) با تکیه بر شواهد زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱-۳۲.

<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1178>

مقدمه

حدود ۱۲ درصد از طلای جهان از کانسارهای سولفیداسیون پایین تأمین می‌شود (Hedenquist et al., 2000). تولید طلا از ذخایر مختلف در ایران، سالانه حدود ۱۱ تن است (Phillips, 2022). این نوع کانسارها در کنار سایر ذخایر معدنی، بخشی از نیاز طلای کشور را تأمین می‌کنند. در این مقاله، طبق طبقه‌بندی پیشنهادی کریم‌پور و همکاران (Karimpour et al., 2021)، از اصطلاح «کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت» به جای «کمان/کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر» استفاده شده است. کانسارهای طلا از این نوع اغلب در کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در طی سنوزوئیک تشکیل شده‌اند (Richards et al., 2006; Kouhestani et al., 2012). تاکنون حدود ۱۱۶ کانسار سولفیداسیون پایین، متوسط و بالای فلزهای گران‌بها، پایه و شبه فلزها در زون‌های ساختاری ایران شناسایی شده است (Yasami et al., 2025). این نوع کانسارها در ایران، در محیط‌های زمین‌ساختی مختلف تشکیل شده‌اند که از جمله این کانسارها می‌توان به ساری-گونا (Richards et al., 2006)، توزلار (Heidari et al., 2015)، آق‌دره (Daliran, 2008)، چاه‌رزد (Kouhestani et al., 2015) در کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت، گندی و ابوالحسنی (Shamanian et al., 2004) در کمان آتشفشانی البرز، چاه‌نلی (Daliran et al., 2005; Sholeh et al., 2016) و سیاه جنگل (Sholeh et al., 2016; Richards et al., 2018) در منطقه مکران اشاره کرد.

پتانسیل معدنی کهپاز در فاصله ۱۶ کیلومتری شمال غرب روستای نیستانک و ۴۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اردستان، در استان اصفهان قرار دارد. محدوده طلای سولفیداسیون پایین کهپاز در سال ۲۰۱۸ توسط شرکت پارس اولنگ کشف شد. برنامه اکتشاف شامل نقشه‌برداری زمین‌شناسی، گمانه‌های حفاری الماسه (۱۴ گمانه در مجموع به طول ۱۲۰۰ متر) و ترانشه‌برداری (۱۷۶۰ متر مکعب) به تازگی توسط شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر انجام و به معرفی ۳۰۰۰۰۰ تن منابع معدنی با عیار میانگین ۱/۱ گرم در تن طلا منجر شد.

برخلاف بررسی‌های زیادی که بر روی کانسارهای پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت انجام شده، بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت از این نظر چندان مورد توجه قرار نگرفته است. اکتشاف محدوده‌های معدنی جدید، از جمله منطقه مورد بررسی، در بخش مرکزی کمر بند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت می‌تواند نویدبخش رخداد کانه‌زایی‌های مهمی باشد که تاکنون از اکتشاف دور مانده‌اند. در این پژوهش، نوع کانه‌زایی، ساخت و بافت، دگرسانی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال بررسی می‌شود تا بتواند در ارائه الگوی اکتشافی برای شناسایی سایر رخدادهای معدنی به کار گرفته شود.

روش مطالعه

سنگ‌نگاری حدود ۱۰۰ مقطع نازک در دانشگاه بوعلی سینا همدان، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزه‌کننده عبوری و انعکاسی ZIESS Axioplan2 مورد بررسی شد. تصویربرداری بافتی ۵ نمونه از نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از دستگاه FEI QEMSCAN® Quanta 650F، در خلأ بالا، ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۵ کیلوولت و جریان پرتو ۱۰ نانوامپر بر روی مقاطع نازک صیقلی با پوشش کربن در دانشکده علوم زمین دانشگاه ژنو سوئیس انجام شد. ۵۰ نمونه از مغزه‌های حفاری انتخاب و برای تعیین میزان طلا به روش Fire Assay به شرکت‌های کاوشگران زرین فلز در نجف‌آباد و زرآزما در تهران ارسال شد. برای تعیین ضریب همبستگی، تعداد ۳۵ نمونه با روش ICP-OES در شرکت زرآزما اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها بعد از خردایش و نرمایش به نمونه‌های پودر با اندازه حدود ۲۰۰ مش تبدیل شدند. برای تعیین میزان عناصر کمیاب و فلزهای پایه به ترتیب حدود ۰/۲ و ۰/۵ گرم از هر نمونه برای تجزیه شیمیایی انتخاب شدند. نمونه‌های ۰/۲ گرمی به روش چند اسید حل شدند. نمونه‌های ۰/۵ گرمی در تیزاب سلطانی با دمای حدود ۹۵ درجه سانتی‌گراد حل شدند. در روش Fire Assay برای اندازه‌گیری مقادیر طلا، حدود ۳۰ گرم از نمونه در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شد. در این حالت، طلا از سرباره جدا شده و

محیط کمان فروورانش قرار داشت (Omran et al., 2008)، نخستین نشانه‌های فعالیت ماگمایی در کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در سنوزوئیک آغاز شد و تا کواترنری ادامه یافت (Jahangiri, 2013; Ayati et al., 2007) و در ائوسن به بیشترین میزان خود رسید (Berberian and King, 1981; Alavi, 1994; Ghasemi and Talbot, 2006; Omran et al., 2008; Azizi and Moeinvaziri, 2009). سنگ‌های آذرین کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت اغلب دارای ماهیت کلک آلکالن با گرایش تولیتی، شوشونیتی و آداکتی هستند (Shahabpour, 2007; Omran et al., 2008; Shafiei et al., 2009; Stern et al., 2021; Maanijou et al., 2022)

زمین‌شناسی

پتانسیل معدنی کهپاز در توالی‌های آتشفشانی، نیمه‌آتشفشانی و آتشفشانی-آواری ائوسن-الیگوسن، در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زواره (شهراب) قرار دارد (شکل ۱-A). قدیمی‌ترین فعالیت‌های آتشفشانی توسط سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی ائوسن مشخص می‌شود (شکل ۲-A) که منطقه وسیعی را پوشانده‌اند و توسط توده‌های نفوذی جوان‌تر قطع شده‌اند. مرز پایینی واحد آندزیتی و تراکی آندزیتی نامشخص است؛ اما مرز بالایی آن گسلی است و توسط ریولیت و ایگنیمبریت با همان سن پوشانده شده است. در بخش شرقی منطقه، آندزیت‌ها به طور هم‌تراز توسط آندزیت‌های بازالتی پوشانده شده‌اند. ریولیت و ایگنیمبریت با رنگ خاکستری یا قهوه‌ای مشخص می‌شوند و دارای لایه‌های میانی از قطعه‌های آندزیتی و بازالتی هستند. رخنمون‌های توف برشی مایل به خاکستری و توف لایلی در شمال منطقه، در بالاترین قسمت آندزیت و تراکی آندزیت مشاهده می‌شوند. فعالیت ماگمایی الیگوسن اغلب با واحد آندزیت بازالتی (شکل ۲-C و D)، سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی ریوداسیتی تا داسیتی (شکل ۲-B) و دایک‌های مافیک (شکل ۲-E) مشخص می‌شود. این توالی‌های جوان‌تر گسترده در سنگ‌های اولیه تشکیل شده نفوذ کرده و باعث ایجاد دگرسانی در سنگ‌های اطراف شده‌اند.

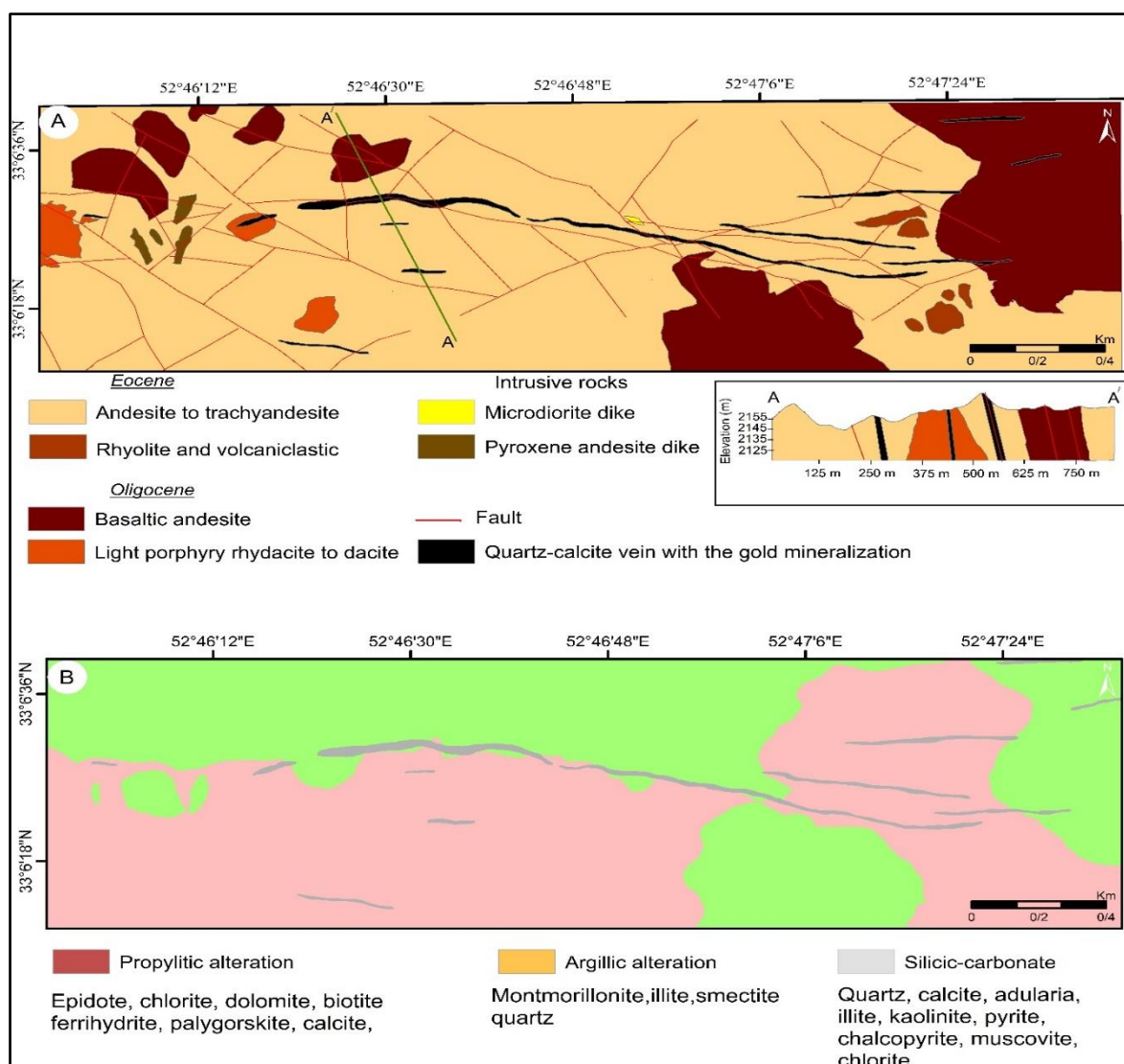
توسط ملغمه سربی جذب می‌شود. در مرحله بعد، سرب حذف شده و طلا و نقره در ملغمه نقره‌ای جدا می‌شوند. ملغمه نقره‌ای توسط تیزاب سلطانی محلول‌سازی شد. در پایان میزان طلا با استفاده از روش ICP-OES (در شرکت زرآزما) و جذب اتمی (در شرکت کاوشگران زرین فلز) تعیین شد. به منظور بررسی میان‌بارهای سیال، تعداد ۷ نمونه کوآرتز مرتبط با مرحله اصلی کانه‌زایی طلا از مغزه‌های حفاری و رخنمون‌های سطحی انتخاب شد. پس از آماده‌سازی مقاطع دوبر-صیقل با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر، بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. بررسی‌های ریزدماسنجی به وسیله دستگاه Linkam مدل THMS 600 با کنترل‌کننده حرارتی TP 94 و سردکننده LNP نصب‌شده بر روی میکروسکوپ زایس با دامنه حرارتی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ انجام شد. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با استفاده از نترات سزیم (با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد) و با دقت ± 0.6 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. در مرحله سرمایش، دقت اندازه‌گیری حدود ± 0.2 درجه سانتی‌گراد است و از ماده‌ای به نام ان-هگزان (با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد) به عنوان استاندارد استفاده می‌شود.

موقعیت ژئوتکتونیک

برخورد صفحه‌های عربی-ایران مرکزی و بسته‌شدن نهایی اقیانوس نئوتتیس، صرف نظر از زمان برخورد (پالئوسن (Alavi, 1980)؛ ائوسن (Ghasemi and Talbot, 2006; Allen and Armstrong, 2008; Dargahi et al., 2010)؛ الیگوسن (Hassanzadeh, 1993; McQuarrie et al., 2003; Allen et al., 2004; Mohajjel and Ferguson, 2014)؛ میوسن (Förster, 1978)) نقطه عطفی در کانه‌زایی، به ویژه کانی‌سازی نوع پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در ایران است. کمان ماگمایی سنوزوئیک ساوه-ناین-جیرفت به عنوان یکی از مناطق اصلی حاوی کانسارهای نوع پورفیری و سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه فروورانش نئوتتیس تشکیل شده است. هنگامی که کمرند ماگمایی ساوه-ناین-جیرفت در یک

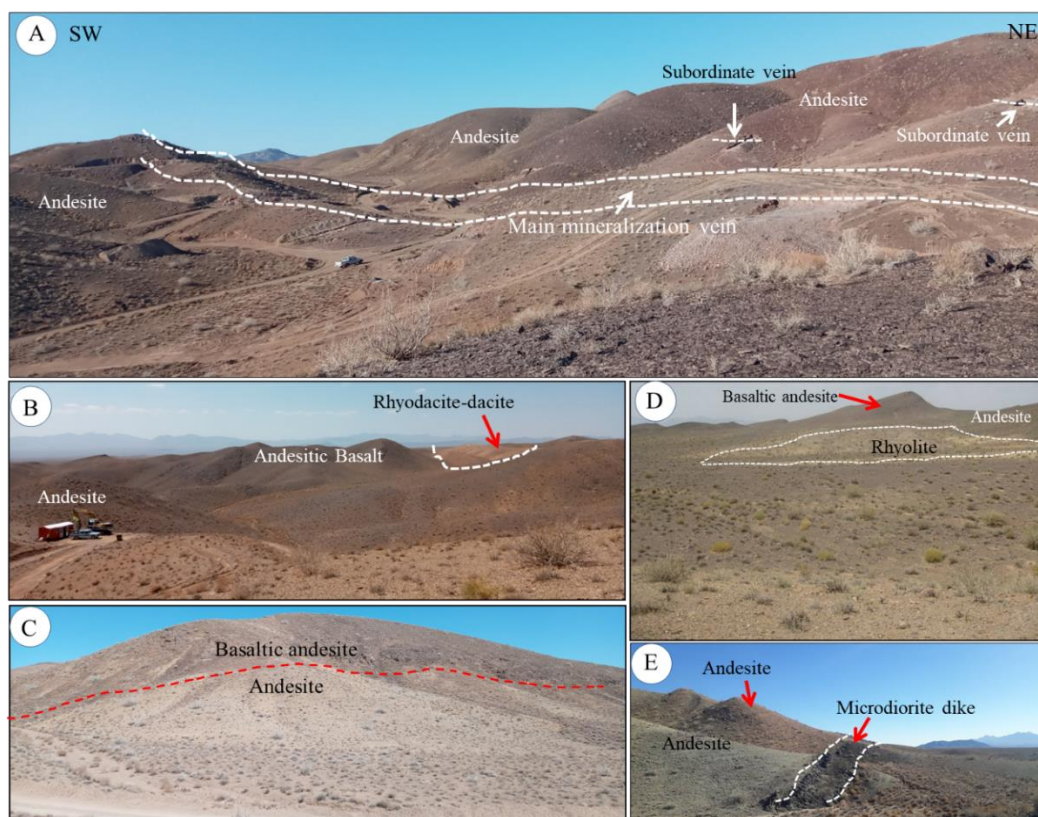
آتشفشانی آندزیت تا تراکی آندزیتی را قطع کرده‌اند. میکرودیوریت و پیروکسن آندزیت به ترتیب به صورت دایک‌هایی با روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و شرقی-غربی ظاهر می‌شوند. آنها ۱ تا ۲ متر عرض دارند و معمولاً درون آندزیت‌ها جای گرفته‌اند. در شکل ۱-B، توزیع دگرسانی‌های مختلف مرتبط با واحدهای سنگی زمین‌شناسی نشان داده شده است.

آندزیت‌های بازالتی به طور هم‌تراز در رخنمون‌های بالاتر روی آندزیت-تراکی آندزیت قرار دارند و به طور گسترده در قسمت شرقی منطقه و با وسعت کمتر در شمال‌غربی رخنمون دارند. سنگ‌های نیمه آتشفشانی گنبدی شکل، داسیت تا ریوداسیت سفید-صورتی که اغلب در جنوب‌شرقی منطقه رخنمون دارند، در طول فعالیت ماگمایی مرحله بعدی تشکیل شده‌اند. آنها اغلب سنگ‌های



شکل ۱. A: نقشه زمین‌شناسی از پتانسیل معدنی کهیاز (با تغییرات از براتی و آقازاده (Barati and Aghazadeh, 2018)) و B: نقشه دگرسانی‌های مختلف واحدهای زمین‌شناسی در محدوده مورد بررسی

Fig. 1. A: Geological map of the Kahyaz prospect (modified after Barati and Aghazadeh, 2018), and B: Alteration map showing the distribution of hydrothermal alteration zones of the geological units in the study area



شکل ۲. تصویرهای صحرایی از رخنمون واحدهای سنگی مختلف در منطقه کهیاز. A: نمایی از واحد آندزیتی که میزبان رگه کوآرتز حاوی طلاست (دید به سمت غرب)، B: نمایی از واحدهای آندزیتی و ریوداسیت-داسیت (دید به سمت جنوب شرق)، C: نمایی از رخنمون سنگ‌های آندزیتی بازالتی الیگوسن بر روی سنگ‌های آندزیتی اتوسن (دید به سمت شمال)، D: توالی آندزیت بازالتی، آندزیت و ریولیت (دید به سمت غرب) و E: دایک میکرودیوریتی که در سنگ میزبان آندزیتی نفوذ کرده است (دید به سمت شمال شرق).

Fig. 2. Field photographs of outcrops of various rock units in the Kahyaz area. A: View of the andesitic unit hosting the Au-bearing quartz vein (view to the west), B: View of the andesitic and rhyodacite-dacite units (looking southeast), C: View of the outcrop of Oligocene andesite-basaltic rocks overlying Eocene andesitic rocks (looking north), D: Sequence of basaltic andesite, andesite, and rhyolite (looking west), and E: Microdiorite dyke intruding the andesitic host rock (looking northeast).

سنگ‌شناسی

تراکی آندزیت شده است (شکل ۳-B و C). پلاژیوکلاز به سایر کانی‌های ثانویه مانند کلریت، کلسیت، سریسیت و اپیدوت تبدیل شده است. آندزیت بازالتی (شکل ۳-D) دارای درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و سانیدین، به همراه مقدار کمی هورنبلند، آپاتیت و کانی‌های کدر است. پلاژیوکلاز دارای ریخت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار، دوقلویی پلی‌سینتیک و منطقه‌بندی نوسانی است. پلاژیوکلاز، کلینوپیروکسن و کانی‌های کدر به صورت خوشه‌بندی هستند و بافت گلوومروفریک را تشکیل می‌دهند. هورنبلند به شکل

سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی در کهیاز، آندزیت و تراکی آندزیت اتوسن است. آندزیت پورفیری، دانه‌های متوسط تا ریز دارد و اغلب حاوی پلاژیوکلاز و سانیدین است (شکل ۳-A). درشت‌بلورهایی پلاژیوکلاز به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با فراوانی ۶۰ تا ۷۰ درصد قابل مشاهده هستند. سانیدین، دومین کانی فراوان است و فراوانی ۲۰ تا ۳۰ درصد دارد. در برخی نمونه‌ها، افزایش مقدار سانیدین با جهت‌گیری ترجیحی باعث ایجاد بافت تراکیتی و ترکیب

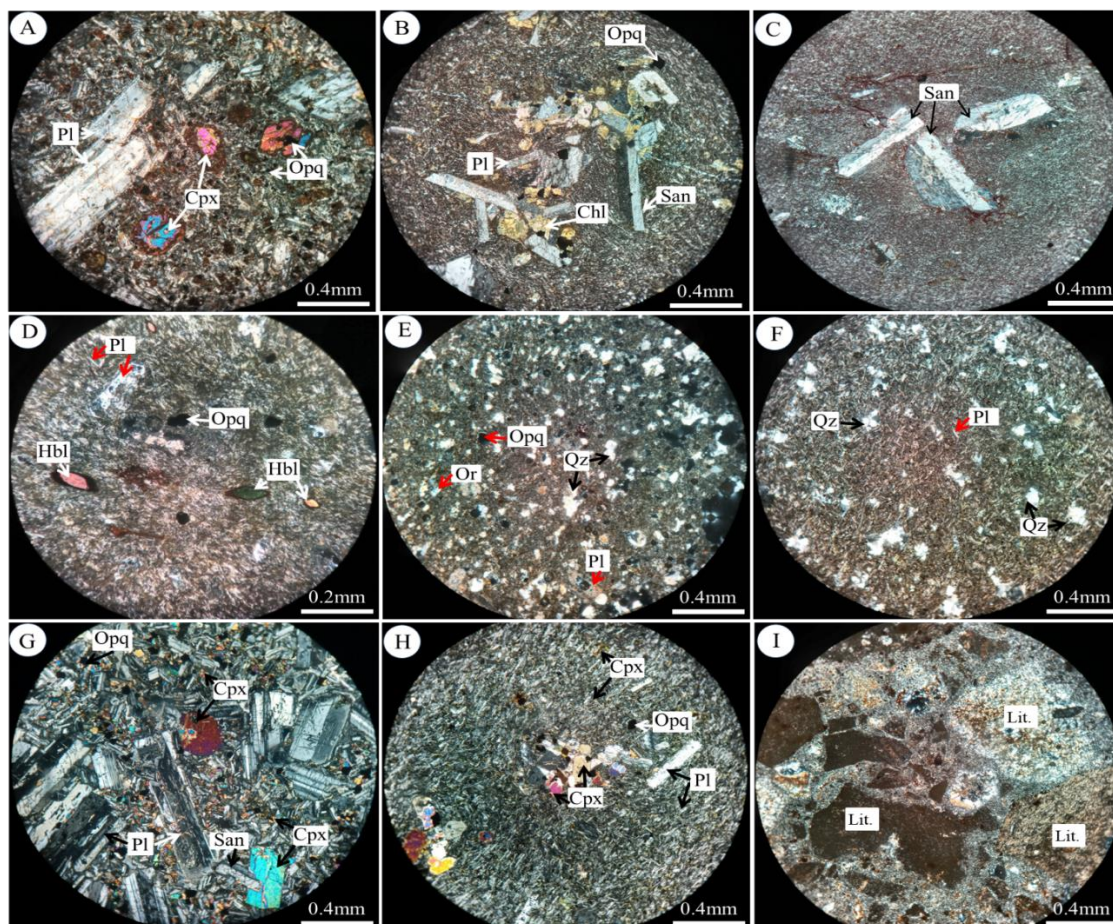
درصد) و کانی کدر (۱۰ درصد) هستند که در زمینه‌ای از میکرولیت‌های جریانی از کانی‌های یادشده قرار دارند. کانی مافیک شامل کلینوپیروکسن است که هم به صورت بلورهای درشت همراه با درشت‌بلورهای فلدسپارها مشاهده می‌شود و بافت گلوپورفیری را تشکیل می‌دهد و هم به صورت ریزبلور در بین میکرولیت‌های جهت‌یافته قرار گرفته است. حضور کلینوپیروکسن‌های فراوان سبب ظهور رنگ سبز زیتونی یا سبز تیره در این نمونه‌ها شده است. کانی‌های کدر به دو صورت درشت و ریز همراه سایر کانی‌ها مشاهده می‌شود. کانی‌های ثانویه حاصل از دگرسانی فلدسپارها به صورت کلسیت، کلریت و سیرسیت تشکیل شده‌اند. سنگ‌های آذرآواری دارای ویژگی‌های فلسیک هستند و اغلب از توف (توف سنگی)، توف بلوری (توف سنگی-بلوری) و توف پرشی تشکیل شده‌اند (شکل ۳-I). توف‌های سنگی اغلب بافت ویتروفری دارند و از قطعه‌های سنگی آندزیتی تا داسیتی تشکیل شده‌اند. قطعه‌هایی از کوارتز و فلدسپار نیز در آنها قابل مشاهده است.

نتایج

کانه‌زایی

کانه‌زایی طلا در منطقه کهپاز اغلب به صورت رگه‌ای در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌های با روند غالب شمال غربی-جنوب شرقی رخ داده است. رگه اصلی با طول حدود ۲ کیلومتر، ضخامت ۲ تا ۵ متر و شیب نزدیک به قائم، مهم‌ترین رگه کانه‌دار منطقه است (شکل ۴-۱). A و B و در برخی بخش‌ها به وسیله گسل‌های فرعی دچار جابه‌جایی‌های امتدادلغز به سمت شمال و جنوب شده است. این رگه سنگ‌های آندزیتی میزبان را قطع کرده و مرز آن با سنگ دیواره اغلب تیز و موازی با دیواره رگه است (شکل‌های ۴-A و ۵-B). علاوه بر رگه اصلی، چندین رگه فرعی (شکل ۴-C) با امتداد مشابه، به ویژه در بخش شمال شرقی منطقه، توسعه یافته‌اند که دارای عیار ۰/۳۵ تا ۱/۲۰ گرم در تن طلا هستند. این رگه‌ها نسبت به رگه اصلی باریک‌تر بوده و فراوانی کلسیت در آنها بیشتر است.

رومبوهدرال و به رنگ قهوه‌ای است و حاشیه واکنشی آن با رنگ قهوه‌ای تیره مشخص می‌شود. پلاژیوکلاز به کانی‌های ثانویه کربنات و سیرسیت تبدیل شده است. محدوده غربی منطقه مورد بررسی توسط سنگ‌های ریولیتی و آذرآواری پوشیده شده است. آنها در قسمت زیرین واحدهای آندزیتی و آندزیتی-بازالتی رخ داده‌اند و با رنگ روشن مشخص می‌شوند. ریولیت حاوی درشت‌بلورهای کوارتز (۳۰ تا ۴۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۳۰ تا ۳۵ درصد) و سانیدین (۱۰ تا ۱۵ درصد) است که در یک زمینه شیشه‌ای و دانه‌ریز قرار گرفته‌اند. کانی‌های مافیک شامل بیوتیت با حاشیه کدر، با فراوانی ۵ تا ۱۰ درصد و کانی‌های کدر هستند (شکل ۳-E). گنبد‌های نیمه‌آشفشانی داسیتی تا ریوداسیتی (شکل ۳-F)، بافت پورفیری و گلوپورفیری دارند و اغلب از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (۳۰ درصد) و کوارتز (۲۵ درصد) تشکیل شده‌اند که در یک زمینه شیشه‌ای تا ریزدانه از هر دو کانی یادشده (حدود ۵۰ درصد) قرار گرفته‌اند. در این گنبد‌ها رگه‌های کوارتز به وفور یافت می‌شوند. دایک‌های میکرودیوریتی (شکل ۳-G) و پیروکسن آندزیتی (شکل ۳-H) در واحدهای سنگی قدیمی تر نفوذ کرده‌اند. آنها معمولاً ۱ تا ۲ متر عرض دارند و روند شرقی-غربی و شمال شرقی تا جنوب غربی را نشان می‌دهند و اغلب در قسمت غربی منطقه رخمون دارند. دایک‌های میکرودیوریتی از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در زمینه‌ای با بافت بین‌دانه‌ای تشکیل شده‌اند؛ به گونه‌ای که بلورهای کلینوپیروکسن در فواصل بین بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده می‌شوند. (شکل ۳-G). گاهی اوقات، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در تماس با یکدیگر، در هم قفل شده و بافت دانه‌ای تشکیل می‌دهند. این کانی‌های اولیه را می‌توان هم در دانه‌های ریز (۰/۱ میلی‌متر) و هم در دانه‌های درشت (۱/۵ سانتی‌متر) مشاهده کرد. بیشتر پلاژیوکلازها سالم هستند؛ اما برخی از آنها تحت تأثیر کلریتی شدن قرار گرفته‌اند. سانیدین، بیوتیت و کانی‌های کدر، درشت‌بلورهای فرعی را تشکیل می‌دهند. کانی‌های ثانویه از کلسیت، کلریت و سیرسیت تشکیل شده است که از تجزیه درشت‌بلورهای اولیه حاصل شده‌اند. دایک‌های پیروکسن آندزیتی دارای درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (۷۰ درصد)، کلینوپیروکسن (۲۰



شکل ۳. تصویرهای میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از بافت و کانی‌شناسی واحدهای سنگی منطقه کهیاز. A: نمونه‌ای از آندزیت با بافت پورفیری، بلورهای درشت پلاژیوکلاز با ماکل پلی‌سنتیک و کلینوپروکسن‌های با حاشیه سوخته نیز مشاهده می‌شود، B: تراکی آندزیت با بافت گومروپورفیری با تجمع خوشه‌ای فلدسپارهای درشت در زمینه فلدسپارهای کوچک‌تر، C: نمونه تراکی آندزیتی با بلورهای جهت‌یافته فلدسپار، D: بازالت آندزیتی با بافت پورفیری. هورنبلند به صورت بلورهای لوزی شکل و حاشیه سوخته تشکیل شده است، E: ریولیت با بافت پورفیری متشکل از بلورهای کوارتز با خاموشی موجی و فلدسپار در زمینه‌ای از بلورهای ریز کوارتز و شیشه، F: ریوداسیت متشکل از کوارتز و فلدسپار، G: تصویری از میکرودیوریت با بافت اینترگرانولار. این نمونه از بلورهای ریز و درشت پلاژیوکلاز با بافت پلی‌سنتیک و اغلب دارای شکستگی تشکیل شده است و بین آنها را بلورهای ریز و درشت کلینوپروکسن و کانی کدر پر کرده است، H: بافت پورفیری در دایک پیروکسن آندزیتی که با حضور بلورهای درشت پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن در زمینه‌ای از میکروولیت‌های فلدسپار مشخص می‌شود. کلسیت و اپیدوت نیز به عنوان کانی ثانویه حضور دارند و I: واحد آذرآواری که از قطعه‌های مختلف خرده‌سنگ تشکیل شده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Chl: کلریت، Cpx: کلینوپروکسن، Hbl: هورنبلند، Lit: قطعه‌های برشی، Opq: کانی‌های کدر، Or: ارتو کلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، San: سانیدین).

Fig. 3. Photomicrographs (cross-polarized transmitted light, XPL) of the textures and mineralogy rock units in the Kahyaz area. A: Andesite with porphyritic texture; large plagioclase crystals with polysynthetic twinning and clinopyroxenes with opacitic rims are also observed, B: Glomeroporphyritic texture with clustered aggregates of coarse feldspars within a matrix of smaller feldspars, C: Trachy-andesite with aligned feldspar crystals, D: Basaltic andesite with porphyritic texture; hornblende occurs as rhomb-shaped crystals with opacitic rims, E: Rhyolite with porphyritic texture consisting of quartz crystals showing undulatory extinction and feldspar within a groundmass of fine-grained quartz and glass, F: Rhyodacite composed of quartz and feldspar, G: Microdiorite with intergranular texture. This sample consists of fine- and coarse-grained plagioclase crystals exhibiting polysynthetic twinning, commonly fractured, with fine- and coarse-grained clinopyroxene and opaque minerals occupying the interstitial spaces, H: Porphyritic texture in a pyroxene-andesite dike characterized by large plagioclase and clinopyroxene crystals in a groundmass of feldspar microlites. Calcite and epidote are also present as secondary minerals, I: Pyroclastic unit composed of fragments of various lithic clasts. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Chl: Chlorite, Cpx: Clinopyroxene, Hbl: Hornblende, Lit: Lithic fragments, Opq: Opaque minerals, Or: Orthoclase, Pl: Plagioclase, Qz: Quartz, San: Sanidine).



شکل ۴. تصویرهای صحرایی از رگه‌های کوارتز-کلسیت کانه‌دار در منطقه کهیاز. A: رخنمون رگه اصلی کوارتز-کلسیت که در امتداد شکستگی‌ها، سنگ‌های آندزیتی میزبان را قطع کرده است. مرز تیز و مشخص رگه با سنگ دیواره، کنترل ساختاری کانه‌زایی را نشان می‌دهد (دید عکس به سمت شمال غرب)، B: نمای نزدیک از رگه اصلی با ساخت توده‌ای و ضخامت ۲ تا ۵ متر و C: رگه‌ها و رگچه‌های فرعی کوارتز-کلسیت در سنگ‌های آندزیتی که با روندی مشابه رگه اصلی گسترش یافته‌اند و بیانگر توسعه سامانه رگه‌ای در منطقه هستند (دید عکس به سمت شمال شرق).

Fig. 4. Field photographs of the mineralized quartz-calcite veins in the Kahyaz prospect. A: Outcrop of the main quartz-calcite vein cutting the andesitic host rocks along fractures. The sharp and well-defined contact between the vein and the host rock indicates structural control on the mineralization (view looking northwest), B: Close-up view of the main quartz-calcite vein exhibiting a massive structure and a thickness of approximately 2–5 m, and C: Quartz-calcite subsidiary veins and veinlets cutting the andesitic host rocks, trending parallel to the main vein and indicating the development of a vein system within the prospect (view looking northeast).

دگرسانی گرمایی

(شکل ۷-C و E) و همراه با کوارتز و کلسیت، مجموعه کانی‌های شاخص رگه‌های کانه‌دار را تشکیل می‌دهد. دگرسانی کربناتی اغلب به صورت تشکیل کلسیت در رگه‌ها، رگچه‌ها و جانشینی موضعی سنگ میزبان مشاهده می‌شود. کلسیت به صورت بلورهای درشت، تیغه‌ای و **پرکننده فضای باز** همراه با کوارتز و کلسدونی رخ داده است. در برخی بخش‌ها، کلسیت توسط کوارتز جانشین شده و بافت **شبه‌ریخت کوارتز پس از کلسیت** را ایجاد کرده است که یکی از شواهد وقوع جوشش سیالات گرمایی در سامانه کم سولفید محسوب

انواع دگرسانی در منطقه مورد بررسی شامل سیلیسی، کربناتی، پروپیلیتیک، آرژلیک حدوداوسط و دگرسانی برون‌زاد است (شکل‌های ۱-B و ۵-A تا E). دگرسانی سیلیسی-کربناتی در بخش مرکزی سامانه گرمایی و در مجاورت رگه‌های کانه‌دار گسترش یافته است. این دگرسانی اغلب از کوارتز ریزدانه، کلسدونی، کلسیت و آدولاریا تشکیل شده است (شکل ۷). آدولاریا به صورت بلورهای لوزی‌شکل و در هم‌رشدی با کوارتز و کلسدونی مشاهده می‌شود

صفحه‌های کلسیت توسط کوارتز تشکیل می‌شود. اندازه تیغه‌های کوارتز بیانگر اندازه اولیه صفحه‌های کلسیت است (John et al., 2018). بعد از کوارتز، کلسیت دومین کانی فراوان در محدوده مورد بررسی است که به صورت توده‌ای، شعاعی (شکل ۷-B)، پرکننده فضای خالی (شکل ۷-D) و تیغه‌ای (شکل ۶-D و E) تشکیل شده است. کلسیت تیغه‌ای یا صفحه‌ای، شاخصی از رسوب‌گذاری در اثر جوشش سیالات گرمابی است (Browne, 1978; Simmons and Christenson, 1994). این بلورها از چند میکرومتر تا چند سانتی‌متر طول دارند و معمولاً در فضاهای باز تشکیل شده و سپس طی فرایند سیلیسی شدن توسط کوارتز جانشین و یا احاطه می‌شوند. شکل تیغه‌ای آنها تحت تأثیر رخ کامل رومبندری کلسیت در سه جهت که هیچ‌یک بر یکدیگر عمود نیستند، ایجاد می‌شود و این ویژگی در مقاطع نازک نیز قابل تشخیص است (John et al., 2018). آدولاریا به صورت بلورهای دانه‌ریز و گاهی به صورت لوزی‌شکل با کانی‌های کوارتز و کلسیت هم‌رشدی دارد.

کانی‌شناسی کانسنگ

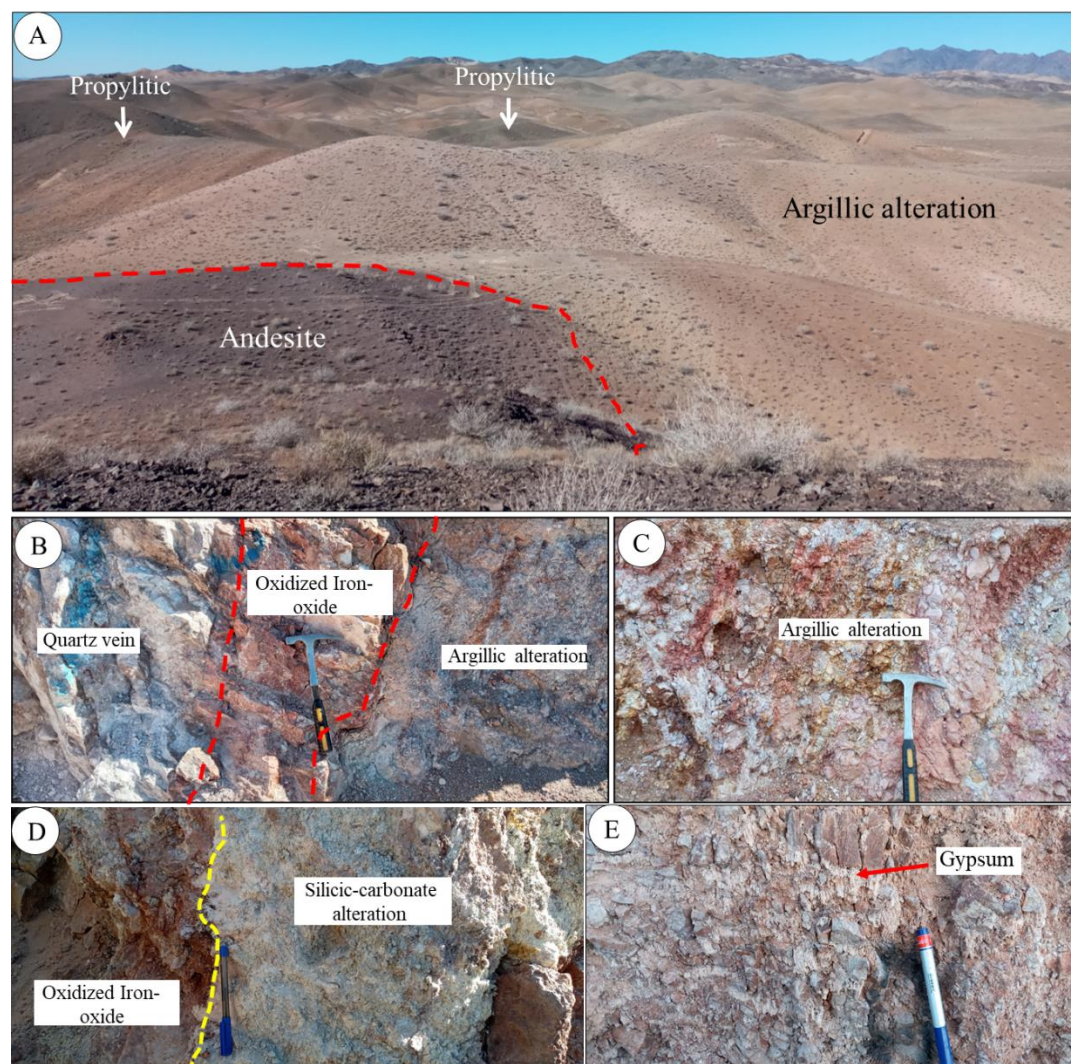
کانی‌های کدر به طور اساسی شامل الکتروم، منگانیست، سولفید نقره (آکانتیت) و به مقدار کمتر روتیل، ایلمنیت، کالکوپیریت، کالکوسیت و کوولیت است. طلا به صورت الکتروم در کوارتز تشکیل شده است (شکل ۸). الکتروم به صورت دانه‌های بسیار ریز (کمتر از ۵ میکرومتر) بی‌شکل، اغلب درون کوارتز و در مجاورت مرز دانه‌های کوارتز و کلسیت رخ می‌دهد (شکل ۸-D و E). این کانی به صورت آزاد مشاهده شده است و ارتباط مستقیمی با سولفیدهای مس نشان نمی‌دهد. آکانتیت (Ag₂S) به صورت دانه‌های بسیار ریز و پراکنده، همراه با الکتروم و درون کوارتز مشاهده می‌شود و کانی اصلی حامل نقره در کانسنگ است. فراوانی کانی‌های فلزهای پایه در کهپاز بسیار محدود است. کالکوپیریت به شکل کانی‌های بی‌نظم و با بافت جانشینی رخ داده است. این کانی به صورت دانه‌های بی‌شکل با اندازه ۵۰ میکرومتر در میان کوارتز تشکیل شده و در حاشیه آن جانشینی توسط کالکوسیت و کوولیت مشاهده می‌شود.

می‌شود. دگرسانی پروپلیتیک، گسترده‌تر از سایر دگرسانی‌هاست و شامل کانی‌های کلریت، کلسیت، دولومیت، پیریت، اپیدوت، فریهدریت، پیریت، و پالیگورسکیت است. این دگرسانی در فاصله دورتری از رگه اصلی کانی‌سازی قرار دارد و سایر مناطق دگرسانی را در بر گرفته است (شکل ۴-A). سنگ‌های تحت تأثیر این دگرسانی، رنگ‌های سبز را در رخنمون‌ها نمایان می‌کنند. کانی‌های مافیک (مانند هورنبلند و کلینوپیروکسن) سنگ‌های آندزیتی تحت تأثیر این دگرسانی قرار گرفته و توسط کلریت جایگزین شده‌اند. هاله‌های دگرسانی آرژلیک حدواسط معمولاً در اطراف رگه‌ها گسترش یافته‌اند و سنگ میزبان آندزیتی خاکستری تیره را بسته به نوع و شدت دگرسانی، به خاکستری کم‌رنگ، قرمز و کرم‌رنگ تبدیل می‌کنند. دگرسانی آرژلیک حدواسط توسط مجموعه‌های کانی‌های ایلیت، اسمکتیت، مونتموریلونیت، بیدلیت و پاراگونیت قابل تشخیص هستند. برخلاف دگرسانی پروپلیتیک، بافت‌های اولیه سنگ میزبان در دگرسانی آرژلیک حدواسط اغلب تخریب شده‌اند (شکل ۴-B و C). دگرسانی برونزاد در مرحله پس از کانه‌زایی، انواع دگرسانی‌های قبلی را می‌پوشانند و معمولاً از کانی‌های ژیس، کانی‌های گروه زئولیت (مانند کلینوپتیلولیت، فیلپسیت، هولاندیت)، اکسید و هیدروکسید آهن (مانند فری‌هیدریت، هماتیت، گوتیت، جاروسیت) تشکیل شده است.

کانی‌شناسی، ساخت و بافت و توالی هم‌یافتی

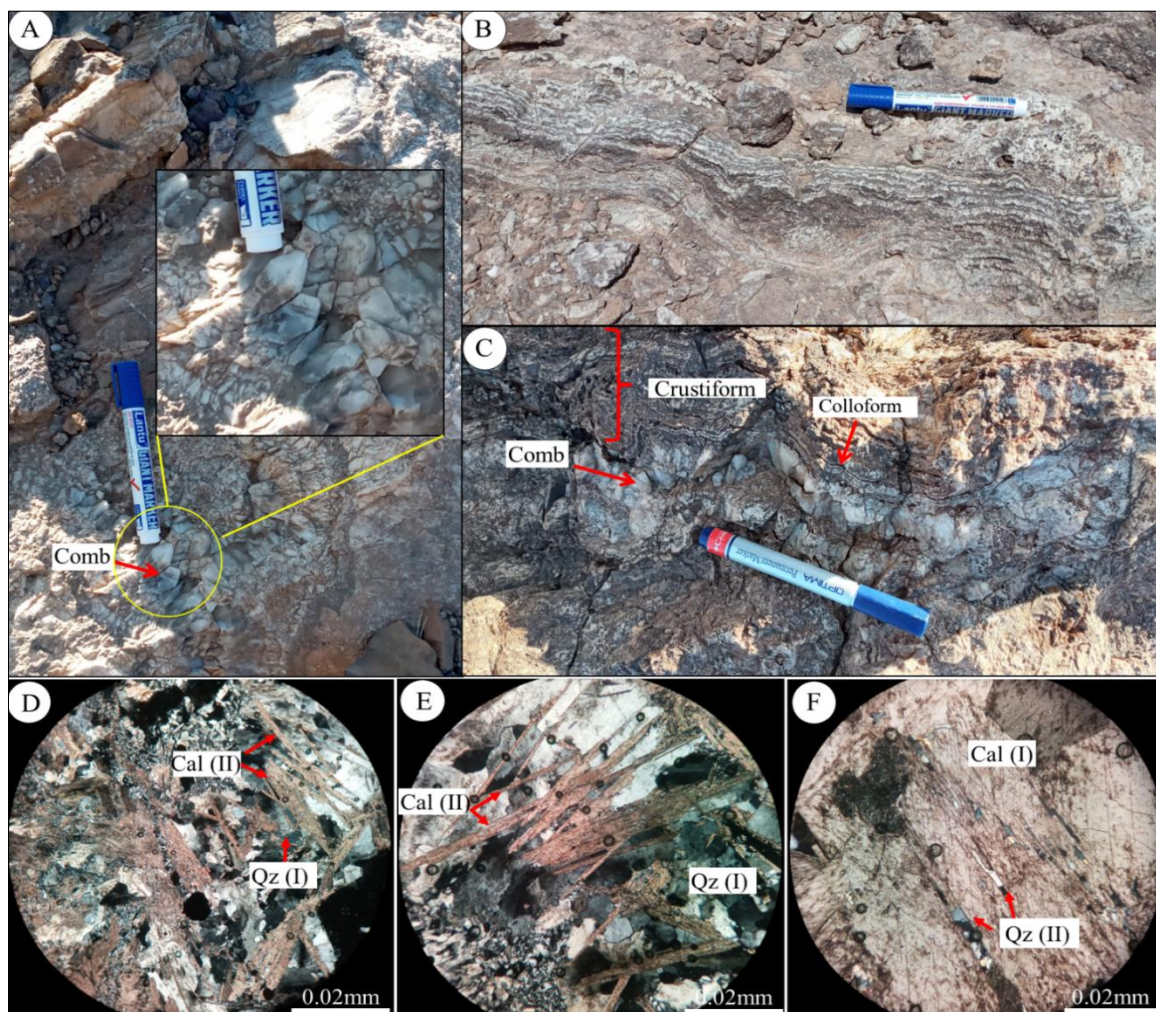
کانی‌شناسی باطله

کانی‌های باطله موجود در رگه اغلب از کوارتز، کلسدون، کلسیت و آدولاریا تشکیل شده است (شکل ۷). کوارتز معمولاً به صورت بافت‌های شانه‌ای (شکل ۶-A و C) قشری (یا پوسته‌ای) (شکل ۶-B و C)، گل‌کلی (شکل ۶-C)، کاکلی، شعله‌مانند و تیغه‌ای (شکل ۶-F) تشکیل شده است (شکل ۶). علاوه بر این، کلسدون ریزبلور نیز بخش عمده رگه را تشکیل می‌دهد (شکل ۷-A، C و E). کوارتز تیغه‌ای یا صفحه‌ای در رگه‌های کوارتز سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا فراوان است. این نوع کوارتز در اثر جانشینی شبرخی



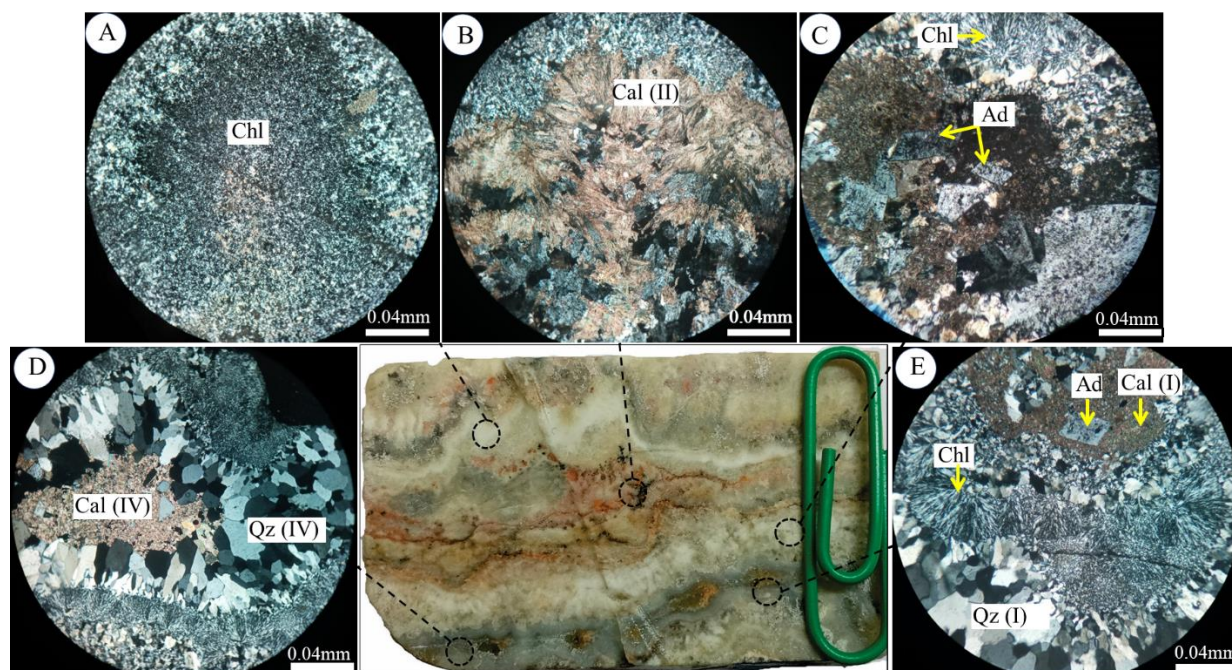
شکل ۵. تصویرهای صحرایی دگرسانی‌های گرمابی در منطقه کهیاز. A: نمای کلی از پراکندگی زون‌های دگرسانی پروپلیتیک و آرژیلیک در سنگ‌های آندزیتی میزبان. دگرسانی پروپلیتیک در حاشیه سامانه گرمابی و دگرسانی آرژیلیک در بخش مرکزی و مجاور رگه‌های کانه‌دار گسترش یافته است. B: رگه کوآرتزی که با هاله دگرسانی آرژیلیک احاطه شده و آثار اکسایش آهن در امتداد شکستگی‌ها و حاشیه رگه مشاهده می‌شود. C: رخنمون دگرسانی آرژیلیک شدید با رنگ روشن، ناشی از تشکیل کانی‌های رسی. D: دگرسانی سیلیسی-کربناته در مجاورت بخش‌های اکسید شده که با سیلیسی شدن و کربناتی شدن سنگ میزبان مشخص می‌شود و E: رگه‌ها و رگچه‌های ژپس در بخش‌های اکسید شده که به عنوان یکی از فرآورده‌های دگرسانی سوپرژن در مراحل پس از کانه‌زایی تشکیل شده‌اند.

Fig. 5. Field photographs illustrating the hydrothermal alteration zones in the Kahyaz area. A: General view of the distribution of propylitic and argillic alteration zones within the andesitic host rocks. Propylitic alteration is developed along the margins of the hydrothermal system, whereas argillic alteration is concentrated in the central part of the system and adjacent to the mineralized veins, B: Quartz vein surrounded by an argillic alteration halo, with iron oxide staining developed along fractures and vein margins, C: Outcrop of intense argillic alteration, characterized by a light-colored appearance resulting from the formation of clay minerals, D: Silicic-carbonate alteration adjacent to oxidized zones, characterized by silicification and carbonatization of the host rock, and E: Gypsum veins and veinlets developed within oxidized zones, representing supergene alteration products formed during the post-mineralization stage.



شکل ۶. تصویرهای صحرایی و میکروسکوپی از ساخت و بافت رگه‌های کوارتز-کلسیت در پتانسیل معدنی کهیاز. A: رگه کوارتز با بافت شانه‌ای که از رشد بلورهای منشوری کوارتز به سمت فضای باز ایجاد شده است. تصویر بزرگ‌نمایی شده، رشد بلورهای کوارتز در فضای باز را نشان می‌دهد، B: رگه نواری با بافت پوسته‌ای که از تناوب لایه‌های متوالی رسوب گذاری کانی‌ها تشکیل شده است، C: هم‌رخدادی بافت‌های پوسته‌ای، گل کلمی و شانه‌ای در یک رگه که نشان‌دهنده رسوب گذاری تناوبی کانی‌ها در فضای باز طی چندین پالس سیال گرمابی است. D و E: بلورهای صفحه‌ای کلسیت نسل دوم [Cal (II)] که فضای باز را پر کرده و توسط کوارتز نسل اول [Qz (I)] احاطه شده‌اند و F: جانشینی کلسیت نسل اول [Cal (I)] توسط کوارتز نسل دوم [Qz (II)] که با حفظ شکل اولیه بلورهای کلسیت، بافت شبه‌ریخت پس از کلسیت را ایجاد کرده است. این بافت از شواهد جوشش سیالات گرمابی در سامانه‌های سولفید پایین به شمار می‌رود. حروف اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Qz: کوارتز).

Fig. 6. Field photographs and photomicrographs showing the textures and structures of quartz-calcite veins in the Kahyaz prospect. A: Quartz vein exhibiting a comb texture, formed by the growth of prismatic quartz crystals into open space; the inset shows a close-up view of quartz crystal growth within the open cavity, B: Banded vein displaying a crustiform texture, produced by successive deposition of mineral layers, C: Coexistence of crustiform and comb textures within the same vein, indicating episodic mineral precipitation in open spaces during multiple pulses of hydrothermal fluids, D and E: Platy crystals of second-generation calcite [Cal (II)] filling open spaces and enclosed by first-generation quartz [Qz (I)], and F: Replacement of first-generation calcite [Cal (I)] by second-generation quartz [Qz (II)], preserving the original morphology of the calcite crystals and producing a quartz-after-calcite pseudomorph. This texture is considered one of the diagnostic indicators of boiling in low-sulfidation epithermal systems. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Qz: Quartz).



شکل ۷. تصویرهای نمونه دستی و مقاطع نازک از رگه‌های کانه‌زایی پتانسیل معدنی کهیاز. A: کلسدونی ریزبلور که بخش عمده رگه را تشکیل داده است، B: تجمع بلورهای شعاعی کلسیت در رگه، C: بلورهای لوزی شکل آدولاریا همراه با کلسدونی، D: کلسیت با بافت پرکننده فضای باز که توسط کوارتز احاطه شده است و E: هم‌رشدی آدولاریا، کوارتز و کلسدونی در رگه. تصویر مرکزی، نمونه دستی رگه نواری با محل برداشت مقاطع نازک (دایره‌های خط‌چین) را نشان می‌دهد. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ad: آدولاریا، Cal: کلسیت، Chl: کلسدونی، Qz: کوارتز).

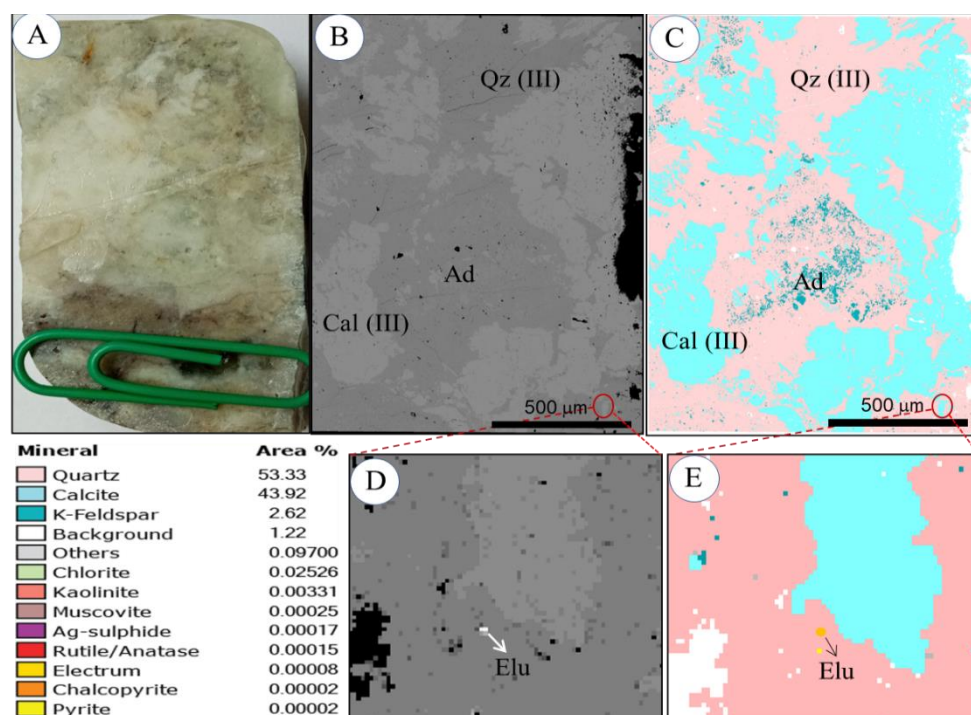
Fig. 7. Hand specimen and photomicrographs of the ore veins from the Kahyaz prospect. A: Microcrystalline chalcidony forming the major constituent of the vein, B: Radial aggregates of calcite crystals within the vein, C: Rhombic adularia crystals associated with chalcidony, D: Calcite displaying an open-space-filling texture and surrounded by quartz, and E: Intergrowth of adularia, quartz, and chalcidony within the vein. The central image shows a hand specimen of a banded vein, with the locations of the examined thin sections indicated by dashed circles. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ad: adularia, Cal: calcite, Chl: chalcidony, Qz: quartz).

بر اساس روابط بافتی و جانشینی، دست کم چهار نسل کوارتز (Qz I-IV) و چهار نسل کلسیت (Cal I-IV) قابل تشخیص است. کوارتز نسل اول همراه با کلسیت اولیه در مراحل آغازین تشکیل رگه‌ها رسوب کرده است. کلسیت تیغه‌ای نسل دوم در فضاهای باز تشکیل شده و سپس توسط کوارتز نسل دوم جانشین شده است. کوارتز نسل سوم همراه با آدولاریا، کلسدونی و کانی‌های فلزی شامل الکتروم، آکانتیت، پیریت و کالکوپیریت، مرحله اصلی کانه‌زایی را تشکیل می‌دهد. کوارتز نسل چهارم به صورت رگه‌ها و رگچه‌های دیرزاد و بدون همراهی کانی‌های فلزی مشاهده می‌شود.

کالکوپیریت در برخی نقاط توسط کالکوسیت و کوولیت جانشین شده است (شکل ۹- A). پیریت به صورت دانه‌های بسیار ریز (کمتر از ۵ میکرومتر) و پراکنده در میان کوارتز مشاهده شده و به دلیل فراوانی بسیار کم، روابط بافتی مشخصی با سایر کانی‌های کانسنک نشان نمی‌دهد. منگانیات با فرمول $MnO(OH)$ ، کانی اکسید-هیدروکسید منگنز است که در محیط‌های گرمابی کم‌دما تشکیل می‌شود. این کانی در کهیاز در نمونه‌های سطحی با بافت فیبری یا رشته‌ای همراه با کانی‌های کوارتز و کلسیت یافت می‌شود (شکل ۹- B). توالی هم‌بافتی کانی‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

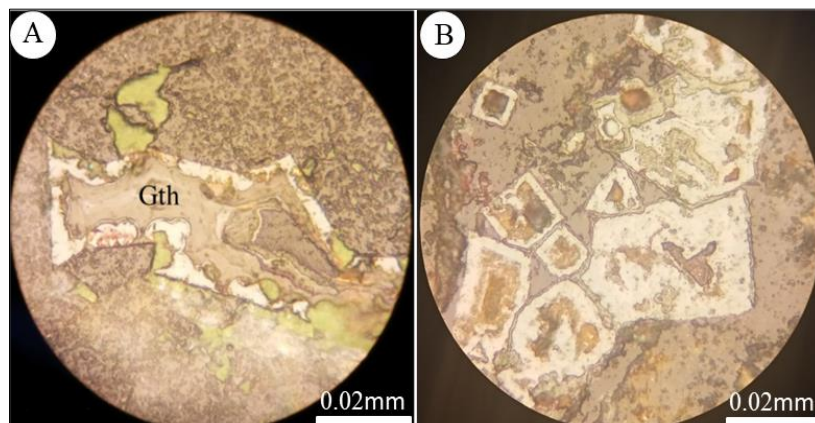
مجموعه این شواهد وقوع **جوشش** سیال گرمابی را در سامانه کم‌سولفید نشان می‌دهد. مرحله سوم، مرحله اصلی کانه‌زایی، با رسوب الکتروم، آکانتیت، مقدار کمی پیریت و کالکوپیریت همراه با نسل‌های دیرتر کوارتز مشخص می‌شود. الکتروم اغلب در داخل کوارتز و در ارتباط نزدیک با این مرحله مشاهده شده است (شکل‌های ۸-۸، ۸-۹، ۸-۱۰ و ۸-۱۱). پس از پایان کانه‌زایی، فرایندهای برون‌زاد موجب تشکیل کالکوسیت، کوولیت، منگانتیت، گوتیت، ژاروسیت و ژپس شده‌اند که اغلب به صورت جانشینی کانی‌های سولفیدی اولیه یا در امتداد شکستگی‌ها و بخش‌های اکسیدشده رگه‌ها گسترش یافته‌اند (شکل ۱۰).

بر اساس روابط بافتی، جانشینی کانی‌ها و شواهد صحرایی و میکروسکوپی، فرایند تشکیل رگه‌ها و کانه‌زایی در پتانسیل معدنی کهیاز را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم کرد: مرحله نخست با تشکیل رگه‌های اولیه کوارتز-کلسیت و رسوب‌گذاری کوارتز و کلسیت در فضاهای باز آغاز شده است. در این مرحله، بافت‌های شانهای، پوسته‌ای، تیغه‌ای و پرشدگی فضای باز شکل گرفته‌اند که بیانگر رسوب‌گذاری کانی‌ها طی چندین پالس از سیالات گرمابی در شرایط کششی و فضاهای باز هستند (شکل ۷-۷ تا ۷-۹). مرحله دوم با جانشینی کلسیت تیغه‌ای توسط کوارتز و تشکیل بافت شبه‌ریخت همراه است. هم‌زمان، آدولاریا و کلسدون نیز تشکیل شده‌اند که



شکل ۸. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکوپی از نمونه Qz-25-46 حاوی کانه‌زایی طلا در پتانسیل معدنی کهیاز. A: تصویر نمونه دستی از نمونه کوارتز دارای کانه‌زایی طلا، B: تصویر الکترون برگشتی از هم‌رشدی کوارتز، کلسیت و آدولاریا، C: تصویر QEMSCAN از هم‌رشدی کوارتز، کلسیت و آدولاریا. D و E: الکتروم به ترتیب با رنگ‌های سفید و زرد در قسمت‌های D و E مشخص شده است. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ad: آدولاریا، Cal: کلسیت، Elu: الکتروم، Qz: کوارتز).

Fig. 8. Hand-specimen and microscopic images of Qz-25-46 sample containing gold mineralization in the Kahyaz prospect. A: Hand-specimen image of a sample containing gold mineralization, B: Backscattered electron (BSE) image showing intergrowth of quartz, calcite, and adularia, C: QEMSCAN image of the intergrowth of quartz, calcite and adularia, D and E: Electrum is indicated by white and yellow colors in Figures D and E, respectively. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ad: Adularia, Cal: Calcite, Elu: Electrum, Qz: Quartz).



شکل ۹. تصویرهای میکروسکوپی از کانه‌زایی فلزهای پایه و واسطه در پتانسل معدنی کهیاز. A: کالکوپیریت درون‌زاد به همراه کالکوسیت و کوولیت برون‌زاد و B: منگائیت فیبری به همراه کوارتز و کلسیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Cc: کالکوسیت، Ccp: کالکوپیریت، Cv: کوولیت، Mnn: منگائیت، Qz: کوارتز).

Fig. 9. Microscopic images of base-metal mineralization in Kahyaz prospect. A: Hypogene chalcopyrite associated with supergene chalcocite and covellite, and B: Fibrous manganite accompanied by quartz and calcite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: Calcite, Cc: Chalcocite, Ccp: Chalcopyrite, Cv: Covellite, Mnn: Manganite, Qz: Quartz).

داده‌های زمین‌شیمیایی

نتایج تجزیه شیمیایی ICP-OES و Fire Assay به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بر اساس جدول ۱، مقدار طلا از ۶ تا ۵۱۴۳ میلی گرم بر تن متغیر است. مقدار نقره نیز دارای دامنه تغییرات ۰/۲۵ تا ۲۷/۵ گرم بر تن است. به همین ترتیب، مقدار مس از ۴ تا ۱۵۴ گرم بر تن، مقدار سرب از ۵ تا ۴۹۹ گرم بر تن و مقدار روی از کمتر از ۱ تا ۵۵۸ گرم بر تن متغیر است. مقدار مولیبدن و منگنز نیز در نمونه‌ها دارای تغییرات زیادی است و به ترتیب از ۰/۵۶ تا ۱۴۷/۱ و ۴۲ تا ۳۰۰۶ گرم بر تن تغییر می‌کند. آرسنیک و آنتیموان دامنه تغییرات کمتری دارند و در بالاترین مقدار، به ترتیب به حدود ۱۰۰ و ۳۰/۶ گرم بر تن می‌رسند. جدول ۲ نشان می‌دهد که عیار طلا از ۰/۱ تا ۲/۱ گرم بر تن تغییر می‌کند. پراکندگی طلا در بیشتر نمونه‌ها بین ۰/۲ تا ۰/۷۵ گرم بر تن است.

بررسی میان‌بارهای سیال

بررسی میان‌بارهای سیال بر روی بلورهای کوارتز موجود در رگه اصلی و رگه‌های فرعی انجام شد. نمونه‌ها از اعماق مختلف و از

چندین گمانه حفاری انتخاب شدند. از میان نمونه‌های مورد بررسی، تنها نمونه Qz-25-46 حاوی الکتروم بود و بنابراین به طور مستقیم با مرحله اصلی کانه‌زایی ارتباط دارد. با توجه به اینکه بررسی‌های میان‌بارهای سیال نیز بر روی کوارتز همین نمونه انجام شده، ویژگی‌های سیال کانه‌ساز اغلب بر اساس نتایج این نمونه تفسیر شده است؛ در حالی که سایر نمونه‌ها برای بررسی تغییرات ویژگی‌های سیالات گرمابی در بخش‌های مختلف سامانه مورد استفاده قرار گرفتند. میان‌بارهای سیال اغلب از نوع اولیه هستند و بر اساس نوع فازهای موجود در دمای اتاق، ۵ نوع میان‌بار سیال شناسایی شد (شکل ۱۱): ۱- میان‌بارهای سیال دو فاز غنی از مایع (LV): در این نوع میان‌بار سیال، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم میان‌بار سیال را فاز مایع اشغال کرده است و فاز گازی تنها ۱۰ تا ۴۰ درصد حجم را تشکیل می‌دهد. بیشترین فراوانی نوع میان‌بار سیال بررسی شده در نمونه‌ها مربوط به این نوع هستند. این میان‌بارها فراوانی خوبی در نمونه‌ها دارند و بیشتر به شکل نامنظم، بیضوی و منفی‌بلور دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۲۵ میکرون متغیر است که اغلب به فاز مایع همگن شده‌اند. ۲- میان‌بارهای دو فاز غنی از گاز (VL): در

دارند. در این نوع میان‌بار سیال علاوه بر فاز مایع و گازی یک کانی شفاف نیز حضور دارد. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۸ میکرون و شکل‌های نامنظم مشاهده می‌شوند. ۴- میان‌بارهای تک فاز مایع (L): در این نوع سیال‌های درگیر، فاز مایع تمام حجم میان‌بار سیال را در بر گرفته است و امکان مشاهده فاز گازی وجود ندارد. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ترموبارومتري استفاده کرد.

این نوع سیال‌ها، حباب گاز بیشترین حجم سیال را در بر گرفته است. در بعضی موارد بیش از ۷۰ درصد حجم سیال را حباب گاز فرا گرفته است. این میان‌بارهای سیال به فاز بخار همگن می‌شوند. این میان‌بارها فراوانی کمی دارند و بیشتر به شکل نامنظم دیده می‌شوند. اندازه آنها حدود ۱۲ میکرون است. ۳- میان‌بارهای سه فاز (LVS): این نوع میان‌بارهای سیال اغلب به صورت پراکنده هستند و فراوانی کمی

Minerals	Propylitic alteration	Argillic alteration	Silicic-Carbonate alteration	Early Ore stage	Main Ore stage	Supergene stage
Illite		_____				
Illite/Smectite		_____				
Montmorillonite		_____				
Beidellite		_____				
Paragonite		_____				
Chlorite	_____					
Epidote	_____					
Calcite (I)	_____					
Calcite (II)			_____			
Calcite (III)				_____		
Calcite (IV)					_____	
Quartz (I)			_____			
Quartz (II)			_____			
Quartz (III)				_____		
Quartz (IV)					_____	
Chalcedony				_____		
Adularia				_____	_____	
Electrum					_____	
Acanthite					_____	
Pyrite	_____			_____		
Chalcopyrite				_____		
Chalcocite						_____
Covellite						_____
Manganite						_____
Goethite						_____
Jarosite						_____
Gypsum						_____
Zeolite group						
Texture						
Bladed			_____			
Comb			_____			
Crustiform			_____			
Colloform			_____			
Massive				_____		
Open space filling			_____			

شکل ۱۰. توالی هم‌یافتی کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی در پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 10. Paragenetic sequence of ore and alteration minerals at the Kahyaz prospect

جدول ۱. نتایج تجزیه Fire Assay (برای عنصر طلا بر حسب میلی گرم در تن) و ICP-OES (بر حسب گرم در تن) برای عناصر دیگر نمونه‌های مختلف در پتانسیل معدنی کهیاز

Table 1. Fire Assay (for gold in ppb) and ICP-OES (in ppm) data for samples from the Kahyaz prospect

Element	Au	Ag	As	Ba	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Zn
Detection Limit	5	0.1	0.5	5	1	5	0.5	1	50	0.5	1
97-NN-1	15	0.6	26.5	572	7	75	10.6	14	1927	0.95	9
97-NN-2	10	0.43	11.5	711	4	47	1.79	10	1025	0.86	10
97-NN-3	46	0.52	55.8	633	6	82	15.2	17	1565	0.82	19
97-NN-4	37	0.59	2.7	44	5	800	0.89	5	147	1.28	<1
97-NN-5	5143	27.5	3.5	65	13	192	1.13	25	167	12	13
97-NN-6	1072	12.7	2.6	141	11	396	0.99	7	325	1.3	4
97-NN-7	517	10.8	2.4	65	10	1113	0.87	17	154	16.3	558
97-NN-8	16	0.46	14.4	273	31	489	13.2	26	1896	0.95	62
97-NN-9	457	0.57	30	300	10	627	16	24	779	1.16	34
97-NN-10	2161	9.6	32.3	133	15	275	0.82	11	927	20.8	14
97-NN-11	478	1.8	27.4	420	24	113	0.9	12	243	1.38	20
97-NN-12	6	1.3	30.9	644	7	68	1.56	7	973	1.05	9
97-NN-13	60	3.9	>100	749	13	297	14.5	28	678	1.3	144
97-NN-14	44	0.52	37.3	584	12	354	1.2	42	197	1.07	85
97-NN-15	190	3	13.8	272	9	194	0.83	7	107	1.35	19
97-NN-16	1739	13.4	2.7	47	8	173	0.62	6	100	18.9	9
97-NN-17	311	2.1	10.8	144	5	54	0.86	16	394	1.09	11
97-NN-18	955	8.9	3.1	94	8	671	0.63	6	737	1.35	8
97-NN-19	1615	17.2	2.1	18	6	951	0.56	6	291	1.27	5
97-NN-20	1630	23.2	2.3	113	13	487	0.65	6	266	15	8
97-NN-21	1539	9.7	2.9	107	7	375	0.96	6	1907	1.37	10
97-NN-22	3023	9.3	2.6	56	9	777	0.63	6	223	18.2	10
97-NN-23	819	16.4	2.4	49	5	769	0.63	5	237	11.8	6
97-NN-24	733	11.1	8	27	6	1144	0.6	5	352	1.47	5
97-NN-25	2054	25.6	2.4	42	7	920	0.7	6	246	11.3	6
97-NN-26	3123	37	2.4	61	5	771	0.61	6	163	12	6
97-NN-27	327	6.1	8	117	9	851	0.66	5	313	1.59	12
97-NN-28	708	14.1	4.7	87	14	985	0.61	5	209	12.7	9
97-NN-29	780	22.8	2.6	44	6	577	0.7	6	180	14.1	6
97-NN-30	64	1.8	22.4	105	7	1051	0.64	6	187	17.8	7
97-NN-31	57	14.9	96.1	213	154	630	147.1	499	1752	30.6	495
97-NN-32	46	0.38	18.1	119	28	153	9.6	6	167	1.03	18
97-NN-33		0.31	4	511	6	3006	0.74	7	115	0.92	22
97-NN-34		0.25	9.3	687	13	107	0.69	7	661	0.9	24
97-NN-35		0.27	4.7	589	18	42	0.74	6	567	1.01	6
97-NN-31	57	14.9	96.1	213	154	630	147.1	499	1752	30.6	495
97-NN-32	46	0.38	18.1	119	28	153	9.6	6	167	1.03	18
97-NN-33		0.31	4	511	6	3006	0.74	7	115	0.92	22
97-NN-34		0.25	9.3	687	13	107	0.69	7	661	0.9	24
97-NN-35		0.27	4.7	589	18	42	0.74	6	567	1.01	6

جدول ۲. خلاصه‌ای از نتایج تجزیه Fire Assay (بر حسب گرم بر تن) برای نمونه‌های حاصل از گمانه‌های حفاری کهیاز

Table 2. Summary of Fire Assay data (in ppm) for samples from drill holes in the Kahyaz

Sample Number	Au	Sample Number	Au	Sample Number	Au
KBH 16-S8	1.1	KBH21-S10	0.15	KBH24-S5	0.54
KBH 16-S9	0.6	KBH22-S5	0.2	KBH24-S6	0.5
KBH 16-S10	0.3	KBH22-S6	0.3	KBH24-S7	0.75
KBH 16-S11	0.3	KBH22-S7	0.55	KBH25-S2	0.15
KBH 16-S12	0.45	KBH22-S8	0.3	KBH25-S3	0.3
KBH18-S4	0.5	KBH22-S9	0.7	KBH25-S4	1.7
KBH18-S5	0.7	KBH22-S46	2.1	KBH25-S5	1.1
KBH18-S6	0.9	KBH22-S47	0.37	KBH25-S6	0.15
KBH18-S7	0.75	KBH22-S48	0.25	KBH25-S7	0.6
KBH20-S6	0.35	KBH22-S49	0.1	KBH25-S14	0.65
KBH20-S7	0.45	KBH22-S50	0.2	KBH25-S15	0.62
KBH20-S8	0.65	KBH23-S10	0.15	KBH25-S16	0.54
KBH20-S9	0.22	KBH23-S11	0.25	KBH25-S17	0.7
KBH21-S6	0.65	KBH23-S12	0.5	KBH25-S18	0.5
KBH21-S7	0.3	KBH23-S13	0.27	KBH26-S10	0.75
KBH21-S8	0.35	KBH23-S14	0.27	KBH26-S11	0.7
KBH21-S9	0.35	KBH24-S4	0.55	KBH26-S12	0.35

افراوانی این نوع سیال در گیر بسیار کم است. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۵ میکرون و با شکل‌های نامنظم مشاهده شده‌اند. ۵- میان‌بارهای تک فاز گازی (V): این میان‌بارها به صورت همزیست با میان‌بارهای دو فاز دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش سیال است. در این نوع از میان‌بارهای سیال، حباب گاز تنها فاز تشکیل دهنده است. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ریزدماسنجی استفاده کرد. این نوع میان‌بارهای سیال، افراوانی زیادی در نمونه دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی با رنگ تیره دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است.

داده‌های ریزدماسنجی

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال موجود در کوارتز رگه‌های اصلی و فرعی انجام شد. نمونه‌های Qz-25-8، Qz-25-2، Qz-25-46 و Qz-25-49 از یک گمانه اکتشافی (BH-25) و از اعماق مختلف انتخاب شدند تا تغییرات ویژگی‌های سیال در امتداد قائم این رگه بررسی شود. این گمانه بیشترین عیار طلا (حدود ۱ گرم در تن) را در منطقه نشان می‌دهد و نمونه Qz-25-46 نیز حاوی الکترول است. علاوه بر این، نمونه‌های Qz-BH-49 و Qz-BH-64 از گمانه دیگری و نمونه Kh-135 از رخنمون یک رگه فرعی سطحی برداشت شدند تا دامنه تغییرات ویژگی‌های سیالات کانه‌ساز در بخش‌های مختلف سامانه ارزیابی شود. با توجه به پراکندگی مکانی نمونه‌ها، داده‌های میان‌بارهای سیال اغلب برای تفسیر ویژگی‌های سیالات کانه‌ساز و مقایسه نسبی آنها در بخش‌های مختلف سامانه به کار رفته‌اند و برای بازسازی کامل روند تحول زمانی سیال به کار نرفته‌اند. در این بررسی، حدود ۶۹ میان‌بار سیال اولیه نوع LV (شکل ۱۱-A و ۱۱-D)، ۵ میان‌بار سیال اولیه نوع VL (شکل ۱۱-A) و ۲ تا ۱۱ میان‌بار سیال اولیه LVS (شکل ۱۱-B و C) در میزبان کوارتز به دست آمده از اعماق مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند. دمای

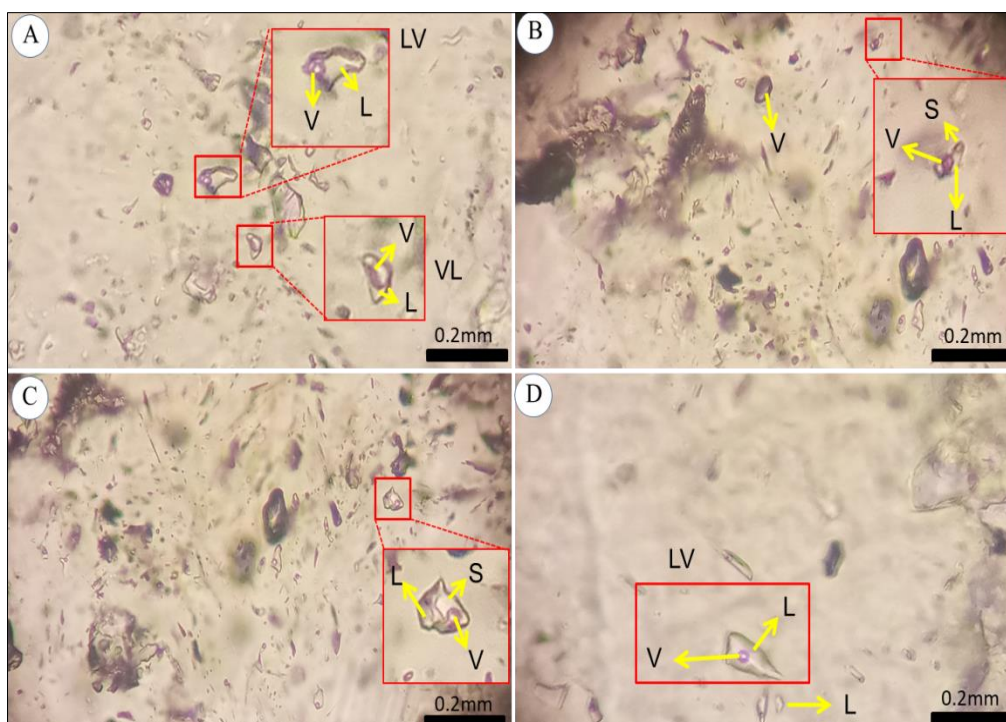
افراوانی این نوع سیال در گیر بسیار کم است. این میان‌بارها با اندازه حدود ۱۵ میکرون و با شکل‌های نامنظم مشاهده شده‌اند. ۵- میان‌بارهای تک فاز گازی (V): این میان‌بارها به صورت همزیست با میان‌بارهای دو فاز دیده می‌شوند که نشان‌دهنده جوشش سیال است. در این نوع از میان‌بارهای سیال، حباب گاز تنها فاز تشکیل دهنده است. لذا از این نوع سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری ریزدماسنجی استفاده کرد. این نوع میان‌بارهای سیال، افراوانی زیادی در نمونه دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی با رنگ تیره دیده می‌شوند. اندازه آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است.

داده‌های ریزدماسنجی

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی میان‌بارهای سیال موجود در کوارتز رگه‌های اصلی و فرعی انجام شد. نمونه‌های Qz-25-8، Qz-25-2، Qz-25-46 و Qz-25-49 از یک گمانه اکتشافی (BH-25) و از

۲۲۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند. این میان‌بارهای سیال دارای دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) ۰/۵- تا ۷- درجه سانتی‌گراد هستند و با شوری ۰/۸۸ تا ۱۰/۴۹ معادل درصد وزنی نمک طعام مشخص می‌شوند.

یوتکتیک (Te) یا دمای ذوب اولیه یخ در میان‌بارهای نوع LV از ۲۳- تا ۲۹- درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۳). دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال LV در کوارتز از ۱۱۰ تا ۲۹۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است که اغلب آنها دارای دمای همگن‌شدگی بین



شکل ۱۱. تصویرهای میکروسکوپی از انواع میان‌بارهای سیال در پتانسیل معدنی کهیاز. A: میان‌بارهای سیال اولیه دو فازی غنی از مایع (LV) و غنی از گاز (VL). B: میان‌بارهای سه فازی نوع LVS و میان‌بار تک فاز گازی نوع V. C: میان‌بار سیال سه فازی نوع LVS و D: میان‌بارهای سیال دو فازی غنی از مایع و تک فاز مایع. (S: فاز جامد، L: فاز مایع، V: فاز بخار)

Fig. 11. Photomicrographs of different types of fluid inclusions in the Kahyaz mineralized area. A: Primary two-phase fluid inclusions, liquid-rich (LV) and vapor-rich (VL), B: Three-phase LVS-type inclusions and single-phase vapor inclusions (V-type), C: Three-phase LVS-type fluid inclusion, and D: Two-phase liquid-rich and single-phase liquid fluid inclusions (S: solid, L: liquid, V: vapor)

سیال نوع VL در نمونه‌های QZ-۲۵-۲ و QZ-۲۵-۴۶ در کنار میان‌بارهای نوع LV مشاهده شدند. دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال نوع VL از ۲۱۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. شوری این نوع میان‌بارهای سیال از ۳/۳۸ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند.

چگالی این نوع میان‌بارهای سیال از ۰/۷۳ تا ۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. میان‌بارهای سیال نوع LVS با شوری ۷/۸۰ تا ۹/۵۸ درصد وزنی معادل نمک طعام فقط در نمونه QZ-۲۵-۴۶ مشاهده شده است. دمای همگن‌شدگی این میان‌بارهای سیال نیز زیاد است و از ۲۵۷ تا ۲۶۸ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. میان‌بارهای

جدول ۳. نتایج بررسی‌های ریزدماسنجی انواع میان‌بارهای سیال اولیه در پتانسیل معدنی کهیاز

Table 3. Microthermometric data of primary fluid inclusion types in the Kahyaz prospect

Mineral	Description	Depth of sample collection (m)	Phase	T _{m-ice} range (°C)	T _{h(L-V)} range (°C)	T _{h(V-L)} range (°C)	Te range (°C)	Salinity range (wt. % NaCl)	Bulk Density (g/cm ³)
Qz-Kh-135 (n=10)	Minor vein	0	LV	-2.6 to -0.5	110 to 270		-26 to -23.1	0.88 to 4.34	0.77 to 0.97
Qz-25-2 (n=13)	Major vein	7	LV	-3.5 to -0.5	163 to 290		-23	0.88 to 5.69	0.74 to 0.93
Qz-25-2 (n=2)	Major vein	7	VL	-2		210 to 268		3.38	
Qz-25-8 (n=10)	Major vein	18	LV	-6.10 to -1	168 to 236			1.74 to 9.21	0.85 to 0.91
Qz-25-46 (n=13)	Major vein	37	LV	-7 to -1.6	169 to 278		-23 to -29	2.73 to 10.29	0.82 to 0.95
Qz-25-46 (n=2)	Major vein	37	VL	-7 to -2.9	-	215 to 270		4.79 to 10.29	-
Qz-25-46 (n=2)	Major vein	37	LVS	-6.4 to -5	-	257 to 268		7.80 to 9.58	-
Qz-25-49 (n=10)	Major vein	40	LV	-4 to -0.9	217 to 270			1.57 to 6.41	0.79 to 0.89
Qz-BH-49 (n=7)	Major vein	57	LV	-3 to -1	121 to 298			1.74 to 4.94	0.73 to 0.95
Qz-BH-64 (n=9)	Major vein	108	LV	-5 to -1	126 to 280		-29	1.74 to 7.80	0.77 to 0.97

بحث

طلا (۰/۲۸-) دارای همبستگی منفی است. همبستگی منفی فلزهای پایه (مس، سرب، روی) با طلا نشان‌دهنده ارتباط زایشی ضعیف بین این عناصر و طلاست. همبستگی مثبت قوی بین طلا و نقره از یک سو و همبستگی منفی بین طلا و عناصر آرسنیک و گوگرد از سوی دیگر، نشان می‌دهد که طلا به صورت الکتروم تشکیل شده است و احتمال حضور آن همراه با کانی‌هایی مثل پیریت یا آرسنوپیریت وجود ندارد.

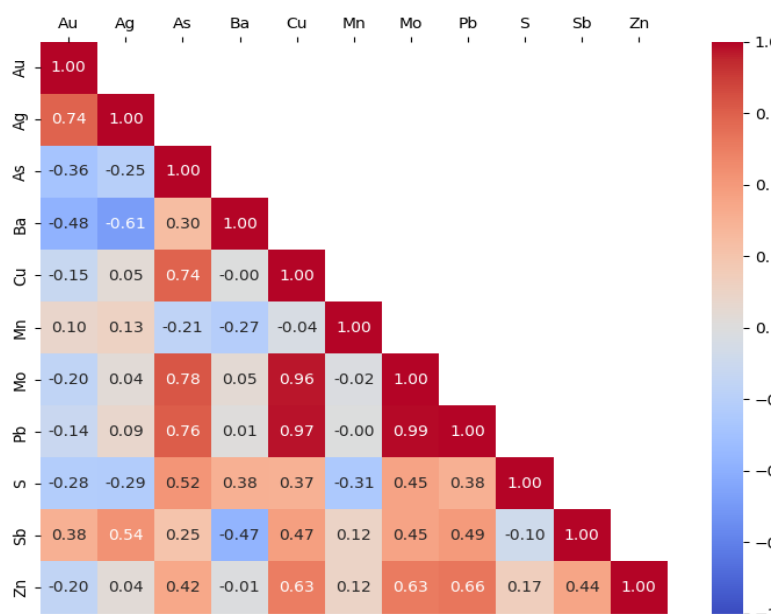
تحول سیال کانه‌ساز

نمودار دمای همگن‌شدگی نهایی در برابر شوری (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که میان‌بارهای سیال در محدوده متداول سامانه‌های گرمایی سولفیداسیون پایین قرار می‌گیرند. داده‌های مربوط به نمونه‌های گمانه ۲۵ (Qz-25-2، Qz-25-8، Qz-25-46، Qz-25-49) به طور کلی بیانگر افزایش نسبی دمای همگن‌شدگی و شوری در برخی نمونه‌های عمیق‌تر هستند. هرچند با توجه به محدود بودن تعداد نمونه‌ها و

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ضرایب همبستگی عناصر کانه‌ساز را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهند. بر این اساس، طلا دارای همبستگی مثبت قوی با عناصر نقره (۰/۷۴) و همبستگی مثبت متوسط با آنتیموان (۰/۳۸) است. همبستگی ضعیف طلا با منگنز (۰/۱) نیز مشاهده می‌شود. طلا با بقیه عناصر مثل باریم (۰/۴۸-)، آرسنیک (۰/۳۶-)، گوگرد (۰/۲۸-) دارای همبستگی منفی متوسط است. نقره دارای همبستگی مثبت متوسط با عنصر آنتیموان (۰/۵۴) است. نقره کمترین میزان همبستگی را با عنصر باریم (۰/۶۱-) دارد. همبستگی آرسنیک با عناصری مثل مولیبدن (۰/۷۸)، سرب (۰/۷۶) و مس (۰/۷۴) زیاد و مثبت است. مس همبستگی مثبت بسیار قوی با سرب (۰/۹۷) و مولیبدن (۰/۹۶) دارد. گوگرد همبستگی مثبتی با عنصر آرسنیک (۰/۵۲)، مولیبدن (۰/۴۵)، باریم و سرب (۰/۳۸) و مس (۰/۳۷) نشان می‌دهد؛ در حالی که با عناصری مثل منگنز (۰/۳۱-)، نقره (۰/۲۹-) و

بلور هالیت و نتیجه‌گیری درباره منشأ ماگمایی سیال خودداری شد. دامنه شوری اندازه‌گیری‌شده (۸/۱۰ تا ۲۹/۱۰ درصد وزنی معادل NaCl) می‌تواند حاصل تغییرات موضعی در شرایط سیال، از جمله برهم‌کنش سیال با سنگ میزبان، اختلاط محدود سیالات و یا وقوع جوشش در بخش‌هایی از سامانه باشد. از این رو، تعیین سازوکار غالب نیازمند شواهد تکمیلی است.

هم‌پوشانی مقادیر دما و شوری، این روند را نمی‌توان به عنوان یک روند قطعی تحول سیال در نظر گرفت. بنابراین، داده‌های میان‌بارهای سیال بیشتر نشان‌دهنده تغییرات محلی در شرایط فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز هستند تا یک روند تکاملی یکنواخت. حضور تعداد محدودی میان‌بار دارای فاز جامد نیز ممکن است نشان‌دهنده سهم موضعی سیالات با شوری بیشتر باشد. با این حال، با توجه به اینکه ماهیت فاز جامد به طور قطعی تعیین نشده است، از تفسیر آن به عنوان



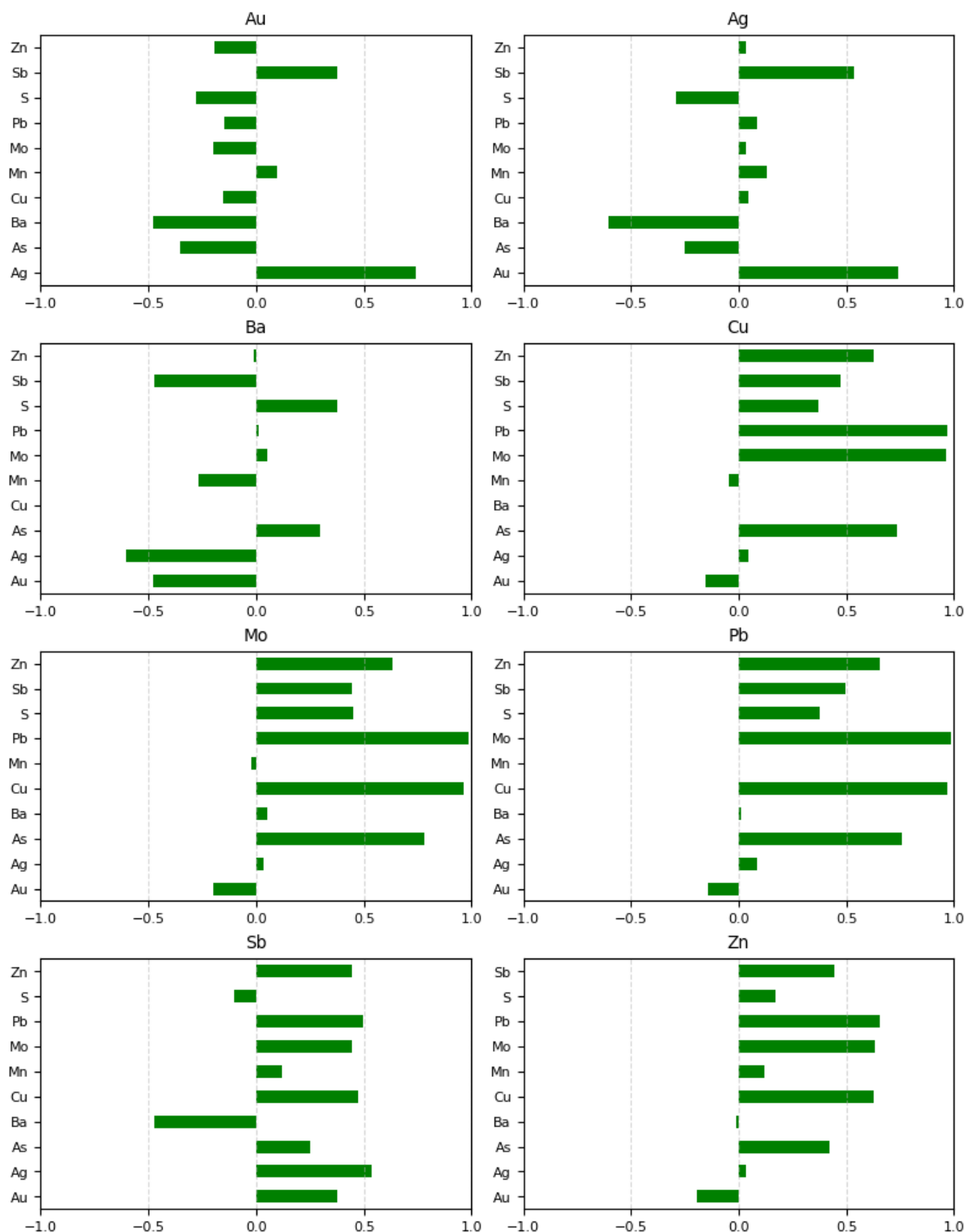
شکل ۱۲. ضریب همبستگی عناصر برای نمونه‌های مختلف پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 12. Correlation coefficients of elements for various samples from the Kahyaz prospect

(al., 2017). احتمال رخداد جوشش با حضور آدولاریا و کلسیت تیغه‌ای (شکل ۶-D و F) نیز تأیید می‌شود (Browne, 1978; Keith and Muffler, 1978; Simmons and Christenson, 1994; Chauvet et al., 2006). رسوب کوارتز کلسدونایی نشان‌دهنده ته‌نشست سریع SiO_2 است که احتمالاً به دلیل کاهش دماهای همراه با جوشش آدیاباتیک و از دست دادن گرما به دلیل تشکیل بخار آب (Thiersch et al., 1997) است.

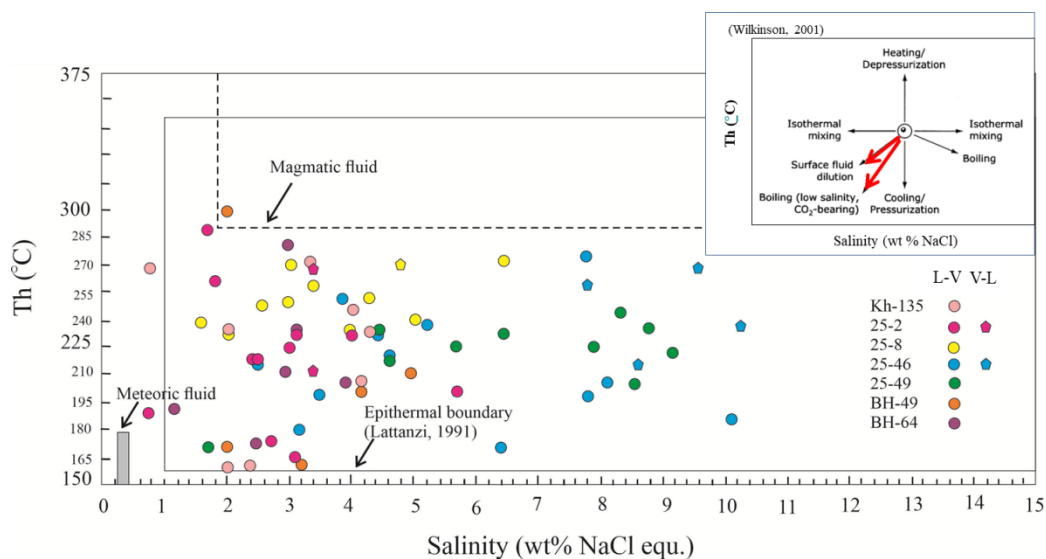
شواهد جوشش سیال کانه‌دار

شواهد قوی بافتی و میان‌بار سیال بیانگر رخداد جوشش در طی رویدادهای کانی‌سازی در کهیاز است. همزیستی میان‌بارهای اولیه VL و LV (شکل ۱۱-A) با نسبت بخار به مایع متغیر، شاخص‌های احتمالی جوشش در سامانه گرمایی هستند (White and Hedenquist, 1995; Thiersch et al., 1997; Ronacher et al., 2000; Simmons et al., 2005). میان‌بارهای سیال تک فاز نوع V نیز رخداد جوشش را تأیید می‌کنند (Moncada et



شکل ۱۳. نمودار همبستگی عناصر مختلف پتانسیل معدنی کهیاز

Fig. 13. Correlation diagram of various elements in the Kahyaz prospect



شکل ۱۴. نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال در پتانسیل معدنی کهیاز. توزیع داده‌ها با فرایندهای اختلاط و/یا جوشش سیالات گرمایی سازگار است. ترکیب‌های فرضی آب‌های ماگمایی و جوی بر اساس لاتانزی (Lattanzi, 1991)، نادن و همکاران (Naden et al., 2005) و هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al., 1998) و روندهای جوشش و اختلاط سیال از ویلکینسون (Wilkinson, 2001) اقتباس شده است.

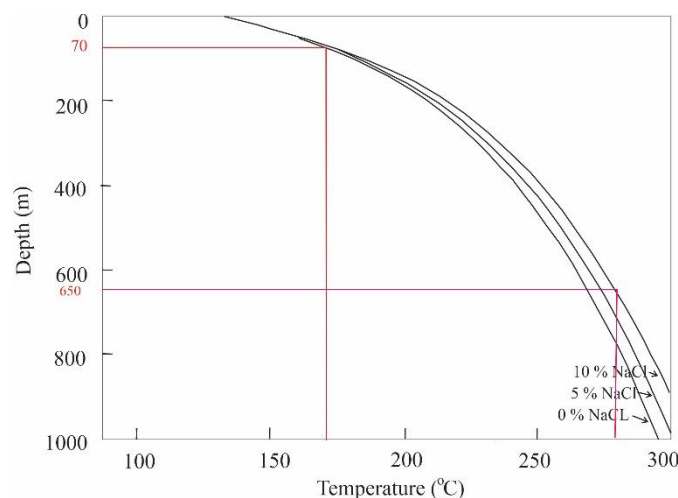
Fig. 14. Salinity versus homogenization temperature (Th) diagram for fluid inclusions from the Kahyaz prospect. The distribution of the data is consistent with fluid mixing and/or boiling processes. The inferred compositions of magmatic and meteoric waters are after Lattanzi (1991), Naden et al. (2005), and Hedenquist et al. (1998), whereas the boiling and fluid-mixing trends are modified after Wilkinson (2001).

در صورت وجود شواهد جوشش، نیازی به اصلاح فشار نیست (Simeone and Simmons, 1999). بنابراین دماها و فشارهای همگن‌سازی مایع-بخار را می‌توان به طور مستقیم به عنوان دما و فشار ته‌نشست سیال استفاده کرد (Roedder and Bodnar, 1980). تمام نمونه‌های انتخاب‌شده برای بررسی میان‌بارهای سیال، دارای شواهد رخداد جوشش بودند. دو نمونه، هم‌زمان هر دو میان‌بارهای نوع LV و VL را داشتند (Qz-25-2 و Qz-25-46) و شواهد جوشش را ثبت کردند. به دلیل اینکه تشکیل طلا در نمونه Qz-25-46 ثابت شده است، این نمونه برای تعیین عمق جوشش انتخاب شد. بر این اساس، نمودار هاس (Haas, 1971) و کمترین و بیشترین مقدار دمای همگن‌شدگی مرتبط با این نمونه (به ترتیب برابر با ۱۶۹ و ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری (به ترتیب ۲/۷۳ و ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) برای تعیین عمق جوشش استفاده شد که اعماق ۷۰ تا ۶۵۰ متر را نشان داد (شکل ۱۵).

بافت‌هایی مثل گل کلمی و شعله‌ای که از نشانه‌های جوشش است (Dong et al., 1995) در منطقه مورد بررسی مشاهده شد. توزیع نمونه‌های دارای نشانه‌های جوشش در نقاط و اعماق مختلف نشان می‌دهد که این رخداد چند بار و در اعماق مختلف رخ داده است و سبب تشکیل زون جوشش و کانه‌زایی شده است. هنگام جوشش، بخشی از آب و گازهای فرار (به ویژه CO_2) از سیال جدا می‌شوند و محلول باقی‌مانده به نسبت شورتر می‌شود. بنابراین میان‌بارهایی که پس از جوشش به دام افتاده‌اند، می‌توانند شوری بالاتری نسبت به سیال اولیه نشان دهند. این موضوع با وجود کلسیت تیغه‌ای، بافت شبه‌ریخت کوارتز پس از کلسیت، بافت‌های شانه‌ای و قشری نیز سازگار است.

تعیین عمق و فشار سیال

عمق تشکیل در زیر سطح آب دیرینه را می‌توان با استفاده از منحنی‌های نقطه جوش هیدروستاتیکی تخمین زد (Haas, 1971).



شکل ۱۵. نمودار دمای جوشش سیال در مقابل عمق برای سیال با شوری ۵، ۱۰ و درصد وزنی معادل نمک طعام و دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای سیال از هاس (Haas, 1971). خطوط قرمز نشان‌دهنده عمق جوشش ۷۰ تا ۶۵۰ متری در پتانسیل معدنی کهیاز است.

Fig. 15. Fluid boiling temperature versus depth for fluids with 0, 5, and 10 wt.% NaCl-equivalent salinity and homogenization temperatures of fluid inclusions (Haas, 1971). The red lines indicate a boiling depth range of 70 to 650 meters in the Kahyaz prospect.

نوع کانه‌زایی

برای طبقه‌بندی یک کانسار می‌توان از ویژگی‌های شاخص آن استفاده کرد. کانسارهای اپی‌ترمال را می‌توان بر اساس مجموعه کانی‌های دگرسانی و باطله، محتوای فلز و سولفید و مجموعه کانی‌های سولفیدی طبقه‌بندی کرد (Simmons et al., 2005). کانسارهای سولفیداسیون پایین با مجموعه کانی‌های کوارتز، کلسیت، آدولاریا شناخته می‌شوند و دارای فلزهای مهم Au و Ag هستند که معمولاً به صورت طلای آزاد، الکتروم، سولفوسالت، سلنید نقره و آکانتیت تشکیل می‌شوند (White and Hedenquist, 1995; Sillitoe and Hedenquist, 2005; Simmons et al., 2005). کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی باطله با بافت‌های قشری، گل کلمی و تیغه‌ای مشخص می‌شود (Simmons et al., 2005). میزان سولفید در این نوع کانسارها کم و از حدود ۲ تا ۱۰ درصد تغییر می‌کند (Sillitoe and Hedenquist, 2005). این کانسارها در دمای حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و از سیالی با pH تقریباً خنثی تشکیل می‌شوند و با کانی‌هایی مثل ایلیت، اسمکتیت، آدولاریا و کلسیت

مشخص می‌شود (White and Hedenquist, 1995). ویژگی‌های زیر نشان می‌دهد که کانه‌زایی اپی‌ترمال در پتانسیل معدنی کهیاز از نوع سولفیداسیون پایین است: کانه‌زایی طلا در رگه‌های سیلیسی و در میزبان سنگ‌های آتشفشانی الیگوسن تشکیل شده است. کانه‌ها شامل الکتروم و آکانتیت است و فلزهای پایه از قبیل کالکوپریت، کوولیت، کالکوسیت و فلز واسطه شامل منگنیت به صورت فرعی حضور دارند. کانی‌های باطله شامل کوارتز، کلسیت و آدولاریاست و کوارتز به عنوان فراوان‌ترین کانی‌های باطله دارای ساخت-بافت‌های رگه‌ای-رگچه‌ای، گل کلمی، قشری، تیغه‌ای، شعله‌ای و پرکننده فضای خالی است. در منطقه مورد بررسی، دگرسانی آرژلیک پیشرفته با کانی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت مشخص می‌شود و شاخص سامانه‌های اپی‌ترمال سولفیداسیون بالاست (du Bray, 2017)، وجود ندارد. بررسی‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیالات کانه‌ساز دارای دمای همگن‌شدگی ۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد و شوری کم تا متوسط (۷۳/۲ تا ۲۹/۱۰ درصد وزنی معادل NaCl) هستند. میان‌بارهای سیال اغلب از نوع دو فاز غنی از مایع

کانسارهای سولفیداسیون پایین، طلا همراه با کانی‌های باطله فراوان کوارتز، کلسیت و آدولاریا همراه است (Sillitoe, 1977; Buchanan, 1981; White et al., 1995). گسترش هاله‌های دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک، جانشینی پلاژیوکلاز توسط ایلیت و اسمکتیت و کلریتی‌شدن کانی‌های فرومنیزین، بیانگر برهم‌کنش سیالات گرمابی با سنگ‌های آندزیتی می‌زبان است. بنابراین، ویژگی‌هایی مثل فراوانی آدولاریا، نبود کائولینیت، آلونیت و باریت، فراوانی کلسدون و کوارتز نهشته‌شده بر روی کلسیت تیغه‌ای، در مجموع نشان‌دهنده واکنش یک سیال دما پایین، pH خنثی، احیایی، حاوی CO_2 و H_2S در حال جوشش با سنگ‌های دیواره است. دگرسانی‌های آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک از سیالات گرمابی تقریباً خنثی تا اسیدی ضعیف و فوق‌اشباع از کوارتز تشکیل می‌شوند. سپس، رگه‌های کوارتزی غنی از آدولاریا و کلسیت از سیالات غنی از سیلیس و پتاسیم در حال جوشش به همراه الکتروم تشکیل می‌شود (John et al., 2003).

در منطقه مورد بررسی، گنبد‌های نیمه‌آتشفشانی داسیتی-ریوداسیتی منشأ سیالات گرمابی هستند که سبب توسعه دگرسانی و کانه‌زایی شده‌اند. بر اساس بررسی‌های میان‌بارهای سیال، سیالات با منشأ ماگمایی (با دما و شوری بالا؛ به ترتیب ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) از طریق مناطق ضعف ساختاری مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها به سطوح کم‌عمق راه یافته‌اند و سپس در نتیجه اختلاط با سیالات جوی (با دما و شوری پایین؛ به ترتیب ۱۶۹ درجه سانتی‌گراد و ۲/۷۳ درصد وزنی معادل نمک طعام) و رخداد جوشش، بار فلزی خود را ته‌نشین کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

در منطقه پی‌جویی کهپاز، رگه‌های سیلیسی طلادار در سنگ میزبان آندزیتی-تراکی آندزیتی الیگوسن قرار گرفته‌اند. کوارتز فراوان‌ترین کانی باطله است که با ساخت-بافت رگه-رگچه‌ای، گل‌کلمی، قشری، تیغه‌ای مشخص می‌شود و میزبان اصلی طلاست. کلسیت و آدولاریا از دیگر کانی‌های باطله هستند که همراه کوارتز در رگه

(LV) بوده و حضور تعداد اندکی میان‌بارهای سه‌فازی حاوی فاز جامد، همراه با بافت‌های شاخصی نظیر کلسیت تیغه‌ای، کوارتز جانشین کلسیت، بافت‌های شانه‌ای و قشری، بیانگر وقوع جوشش موضعی سیال گرمابی است. علاوه بر این، دامنه تغییرات شوری و دمای همگن‌شدگی، اختلاط سیال گرمابی با سیالات کم‌شور را نیز نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها با سیالات با pH نزدیک به خنثی، دمای متوسط و شوری کم تا متوسط که مشخصه سامانه‌های سولفیداسیون پایین هستند، مطابقت دارد. بنابراین، بر اساس بافت کانی‌ها، مجموعه کانی‌های باطله، مجموعه کانی‌های دگرسانی و ماهیت سیالات کانه‌ساز، می‌توان کانه‌زایی در کهپاز را به عنوان یک سامانه سولفیداسیون پایین طبقه‌بندی کرد.

فرایند کانه‌زایی

جوشش و اختلاط سیال از جمله فرایندهای اصلی هستند که در سامانه‌های زمین‌گرمایی رخ می‌دهند (Giggenbach and Stewart, 1982). در جریان سیال بالارونده در یک محیط سولفیداسیون پایین، متوسط و بالا، رخداد جوشش سبب خارج‌شدن CO_2 و در نتیجه افزایش pH می‌شود (White and Hedenquist, 1995). این امر سبب ناپایداری ایلیت شده و آدولاریا به عنوان کانی پتاسیم‌دار به همراه کلسیت در این شرایط قلیایی تشکیل می‌شوند (Drummond and Ohmoto, 1985; Hedenquist et al., 2000). همچنین در طی جوشش، با ورود لیگاند سولفید به فاز بخار، کمپلکس‌های بی‌سولفید حاوی طلا ناپایدار شده و به ته‌نشست طلا منجر می‌شود (Buchanan, 1981; Henley et al., 1984; Brown, 1986; Cooke and Simmons, 2000). فرایند جوشش همچنین از طریق سردشدن و تغلیظ کاتیون‌های محلول از قیل سیلیس، سبب فوق‌اشباع شدن کوارتز و در نتیجه تشکیل کلونیدهای سیلیس می‌شود (Hedenquist et al., 2000; Taksavas, 2021). این کلونیدها به صورت ژل ته‌نشین شده و به کلسدون و کوارتز با بافت گل‌کلمی تبلور مجدد می‌یابند (Lindgren, 1933; Hedenquist et al., 2000). شاید به همین دلیل است که در

جوشش به کانه‌زایی منجر شده‌اند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه بوعلی سینا، همچنین از شرکت سرمایه‌گذاری توسعه صنایع و معادن کوثر و شرکت پارس اولنگ برای ارائه گزارش اکتشافی و کمک و راهنمایی برای نمونه‌برداری از مغزه‌های حفاری کمال تشکر و قدردانی را دارند. از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی نیز به خاطر راهنمایی‌های علمی قدردانی می‌کنند.

مشاهده می‌شوند. رگه اصلی کانه‌زایی با دگرسانی‌های آرژیلیک متوسط و پروپلیتیک در برگرفته شده است. میزان گوگرد و در نتیجه کانی‌های فلزهای پایه مثل پیریت و کالکوپیریت پایین است. مشاهده ویژگی‌هایی از قبیل مجموعه کانی‌های دگرسانی، کانی‌های باطله، شواهد بافتی-ساختی، دما و شوری میان‌بارهای سیال، پایین بودن محتوای گوگرد و فلزهای پایه، کهیاز را به عنوان سامانه سولفیداسیون پایین طبقه‌بندی می‌کند. بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که طلا دارای بیشترین همبستگی با نقره است و کمترین همبستگی را با گوگرد و فلزهای پایه دارد. بررسی میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیالات مرتبط با کانه‌زایی دارای دمای متوسط تا بالا (۱۶۹ تا ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) و شوری پایین تا متوسط (۲/۷۳ تا ۱۰/۲۹ درصد وزنی معادل نمک طعام) بودند که در نتیجه فرایندهای اختلاط و

1. early and main ore stage
2. Opacity
3. open-space filling
4. Quartz pseudomorph after calcite
5. Comb
6. Crustiform
7. Colloform
8. Bladed
9. Chalcedony
10. Platy
11. pseudomorphic replacement
12. Intergrowth
13. banded vein
14. boiling

References

- Alavi, M., 1980. Tectonostratigraphic evolution of the Zagrosides of Iran. *Geology*, 8(3): 144–149. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1980\)8<144:TEOTZO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1980)8<144:TEOTZO>2.0.CO;2)
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3–4): 211–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia–Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2): TC2008. <http://dx.doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Allen, M.B. and Armstrong, H.A., 2008. Arabia–Eurasia collision and the forcing of mid-Cenozoic global cooling. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 265(1–2): 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.04.021>
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H., Richards, J.P. and Jourdan, F., 2013. Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper-gold deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Review*, 55(2):158–184. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.689640>
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009. Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics*, 47(4): 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2008.12.002>
- Barati, B. and Aghazadeh, M., 2018. Geological map of Kahyaz, scale 1:1000, Kowsar Industries and Mines Development Investment Company.
- Berberian, F. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Brown, K.L., 1986. Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand. *Economic Geology*, 81(4): 979–983. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.979>
- Browne, P.R.L., 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual Reviews Earth Planetary Sciences*, 6: 229–250. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.06.050178.001305>
- Buchanan, L.J., 1981. Precious metal deposits associated with volcanic environments in the southwest. *Arizona Geological Society Digest*, 14, pp. 237–262. Retrieved July 28, 2026 from <https://eurekamag.com/research/019/767/019767786.php>
- Chauvet, A., Bailly, L., André, A.S., Monié, P., Cassard, D., Tajada, F.L. and Tuduri, J., 2006. Internal vein texture and vein evolution of the epithermal Shila-Paula district, southern Peru. *Mineralium Deposita*, 41(4): 387–410. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0068-4>
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F., 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Reviews in Economic Geology*, V. 13, Society of Economic Geologists pp. 221–244. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.06>
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran—hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x>
- Daliran, F., Paar, W.H., Neubauer, F. and Rashidi, B., 2005. New discovery of epithermal gold at Chahnali prospect, Bazman volcano, SE-Iran. In: J. Mao (Editor), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 18–21 August 2005*, Vol. 2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 917–919.
- Dargahi, S., Arvin, M., Pan, Y. and Babaei, A., 2010. Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh–Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: constraints on the Arabian–Eurasian continental collision. *Lithos*, 115(1–4): 190–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.002>
- Dong, G., Morrison, G. and Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland—classification, origin, and implication. *Economic Geology*, 90(6): 1841–1856. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1841>
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80(1): 126–147. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.1.126>
- du Bray, E.A., 2017. Geochemical characteristics of igneous rocks associated with epithermal mineral deposits—a review. *Ore Geology Reviews*, 80: 767–783.

- <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.023>
- Förster, H., 1978. Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran. *Journal of the Geological Society, London*, 135(4): 443–455.
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.135.4.0443>
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.01.003>
- Giggenbach, W.F. and Stewart, M.K., 1982. Processes controlling the iso topic composition of steam and water discharges from steam vents and steam-heated pools in geothermal areas. *Geothermics*, 11 (2): 71–80. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(82\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0375-6505(82)90009-8)
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66(6): 940–946.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.6.940>
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province). Unpublished Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, USA, 204 pp.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Jr. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000, Reviews in Economic Geology*, V. 13. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA, pp. 245–277.
<https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (–Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(part 2): 460–486.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013>
- Henley, R.W., Truesdell, A.H., Barton, P.B. and Whitney, J.A., 1984. Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. *Society of Economic Geologists*, V. 1. <https://doi.org/10.5382/Rev.01>
- Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: Geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3–4): 433–447.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.11.008>
- John, D.A., Hofstra, A.H. and Theodore, T.G., 2003. Part 1. Regional studies and epithermal deposits. *Economic Geology*, 98(2): 225–234.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.2.225>
- John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits. U.S. Geological Survey, Reston, Scientific Investigations, Report 2010–5070–Q, 247 pp.
<https://doi.org/10.3133/sir20105070Q>
- Karimpour, M.H., Rezaei, M., Zarasvandi, A. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2021. Saveh-Nain-Jiroft Magmatic Belt replaces Urumieh-Dokhtar Magmatic Belt: Investigation of genetic relationship between porphyry copper deposits and adakitic and non-adakitic granitoids. *Journal of Economic Geology*, 13(3): 465–506. (in Persian with English abstract)
<https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i3.1034>
- Keith, T.E. and Muffler, L.J.P., 1978. Minerals produced during cooling and hydrothermal alteration of ash flow tuff from Yellowstone drill hole Y-5. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3(3–4): 373–402.
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90044-6)
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Chang, Z. and Zaw, K., 2015. Constraints on the ore fluids in the Chah Zard breccia-hosted epithermal Au–Ag deposit, Iran: Fluid inclusions and stable isotope studies. *Ore Geology Reviews*, 65(part 2): 512–521.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.003>
- Kouhestani, H., Ghaderi, M., Zaw, K., Meffre, S. and Emami, M.H., 2012. Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold–silver deposit in the Tethyan belt of Iran. *Mineralium Deposita*, 47(4): 425–440.
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0382-3>
- Lattanzi, P., 1991. Applications of fluid inclusions in the study and exploration of mineral deposits. *European Journal of Mineralogy*, 3(4): 689–702.
<https://doi.org/10.1127/ejm/3/4/0689>
- Lindgren, W., 1933. *Mineral deposits*. McGraw-Hill, New York, USA, 930 pp.
- Maanijou, M., Mostaghimi, M., Riseh, M.A., Lentz, D.R. and Sepahi Gerow, A.A., 2022.

- Petrology and geochemistry of adakitic intrusions and dykes at Sarcheshmeh porphyry Cu-Mo±Au deposit, Iran: Insights into their source. *Resource Geology*, 72(1): e12297. <https://doi.org/10.1111/rge.12297>
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2036. <https://doi.org/10.1029/2003GL017992>
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3): 263–287. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Moncada, D., Baker, D. and Bodnar, R.J., 2017. Mineralogical, petrographic, and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato mining district, Mexico. *Ore Geology Reviews*, 89: 143–170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.024>
- Naden, J., Kilias, S.P. and Darbyshire, D.F., 2005. Active geothermal systems with entrained seawater as modern analogs for transitional volcanic-hosted massive sulfide and continental magmato-hydrothermal mineralization: The example of Milos Island, Greece. *Geology*, 33(7): 541–544. <https://doi.org/10.1130/G21307.1>
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.008>
- Phillips, G.N., 2022. *Formation of Gold Deposits*. Springer, Singapore, 291 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3081-1>
- Richards, J.P., Razavi, A.M., Spell, T.L., Locock, A., Sholeh, A. and Aghazadeh, M., 2018. Magmatic evolution and porphyry–epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 95: 258–279. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.018>
- Richards, J.P., Wilkinson, D. and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic Geology*, 101(8): 1455–1496. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8(1): 263–301. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.001403>
- Ronacher, E., Richards, J.P. and Johnston, M.D., 2000. Evidence for fluid phase separation in high-grade ore zones at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea. *Mineralium Deposita*, 35(7): 683–688. <https://doi.org/10.1007/s001260050271>
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009. Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265–283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Shahabpour, J., 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Science*, 30(5–6): 652–665. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.02.004>
- Shamanian, G.H., Hedenquist, J.W., Hattori, K.H. and Hassanzadeh, J., 2004. The Gandy and Abolhassani epithermal prospects in the Alborz magmatic arc, Semnan province, Northern Iran. *Economic Geology*, 99(4): 691–712. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.4.691>
- Sholeh, A., Rastad, E., Huston, D., Gemmell, J.B. and Taylor, R.D., 2016. The Chahnalay low-sulfidation epithermal gold deposit, western Makran volcanic arc, Southeast Iran. *Economic Geology*, 111(3): 619–639. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.619>
- Sillitoe, R.H., 1977. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: A review, *Geological Society, London, Special Publications*, 7: 99–116. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1977.007.01.13>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2005. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*, V. 10. Society of Economic Geologists Special Publication, pp. 315–343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Simeone, R. and Simmons, S.F., 1999. Mineralogical and fluid inclusion studies of low-sulfidation epithermal veins at Osilo (Sardinia), Italy. *Mineralium Deposita*, 34(7): 705–717.

- <https://doi.org/10.1007/s001260050229>
- Simmons, S.F. and Christenson, B.W., 1994. Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*, 294(3): 361–400. <https://doi.org/10.2475/ajs.294.3.361>
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W., Hedenquist, J.F.H. Thompson, J.R. Goldfarb and J.P. Richards, (Editors), *Economic Geology*, 100th Anniversary, Society of Economic Geologists, pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Stern, R.J., Moghadam, H.S., Pirouz, M. and Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1): 9–36. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>
- Taksavas, T., 2021. Fluid-Fluid Interaction in Shallow Hydrothermal Systems: Implications to Silica Vein Textures in Epithermal Deposits. Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, 212 pp.
- Thiersch, P.C., Williams-Jones, A.E. and Clark, J.R., 1997. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Au-Ag deposit, Toadogone district, British Columbia, Canada. *Mineralium Deposita*, 32(1): 44–57. <https://doi.org/10.1007/s001260050071>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Discovery*, (23): 1–13. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>
- White, N.C., Leake, M.J., McCaughey, S.N. and Parris, B.W., 1995. Epithermal gold deposits of the southwest Pacific. *Journal of geochemical exploration*, 54(2): 87–136. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00027-6](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00027-6)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Yasami, N., Motlagh, S.H.M. and Ghaderi, M., 2025. Stable isotope, fluid inclusion, and petrological-mineralogical features of epithermal deposits in the structural zones of Iran: A review. *Ore Geology Reviews*, 186: 106851. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106851>



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2026.1165



Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution

Mahdiah Bamorovat ¹ , Sara Dargahi ^{2*} , Mohsen Arvin ³ , Alireza Shaker ⁴ , Jamie J Wilkinson ⁵ , Edgar A Cortes-Calderon ⁶ , Majid Aminzadeh ⁷

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁵ Professor, Department of Earth Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imperial College London, London, United Kingdom

⁶ Researcher, Imaging and Analysis Centre, Natural History Museum, London, United Kingdom

⁷ Head of Geology and Drainage Department, Sarcheshmeh copper complex, National Iranian Copper Industries Company, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 21 November 2025

Revised: 09 July 2026

Accepted: 14 July 2026

Keywords

Monzonitic intrusive body

Seridune porphyry copper deposit

Crystal size distribution

Nucleation rate

Residence time

Plagioclase

*Corresponding author

Sara Dargahi

✉ s.dargahi@uk.ac.ir

ABSTRACT

The Seridune porphyry copper deposit is located in the central part of the Kerman porphyry copper belt, Iran, three kilometers northeast of the Sarcheshmeh copper mine. This research focuses on reconstructing magmatic crystallization processes through a qualitative and quantitative study of plagioclase crystals in the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit using petrology, mineral chemistry, and crystal size distribution studies. This unit rock, which ranges in composition from monzonite to quartz monzonite, comprises plagioclase, quartz, alkali feldspar, biotite, amphibole, as well as accessory minerals such as magnetite, apatite and zircon. The composition of the plagioclase crystals studied varies from labradorite to albite ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$, $n = 89$). Based on crystal size distribution (CSD) studies, the semi-logarithmic patterns of the studied plagioclase crystals indicate multi-stage crystallization of magma at varying depths. Also, the presence of sieve texture, oscillatory zoning, and CSD data indicate decompression and injection of mafic pulses in a dynamic system. Assuming a constant growth rate and nucleation density (n_0), the nucleation rate of plagioclase crystals was determined to be between $64 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ and $66 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$. Also, based on the 3D crystal size distribution data and using a growth rate ($G = 10^{-10}$), the residence time of plagioclase crystals was calculated to be between 56 and 63 years. The calculated residence time, along with excess aluminum in the plagioclase crystals are consistent with the emplacement of the magma at shallow crustal levels and its high potential for the exsolution of fluids; although the monzonite body is not considered to be the responsible phase for mineralization in the Seridune porphyry copper deposit.

How to cite this article

Bamorovat, M., Dargahi, S., Arvin, M., Shaker, A., Wilkinson, J.J., Cortes-Calderon, E.A. and Aminzadeh, M., 2026. Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution. Journal of Economic Geology, 18(2): 33–59. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1165>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Urumieh–Dokhtar Magmatic Assemblage (UDMA) in the Kerman province contains numerous porphyry copper deposits, known collectively as the Kerman porphyry copper belt (KPCB; Fig. 1A) (Ghorbani, 2013). This belt, the primary source of copper ore in Iran, is primarily composed of folded and faulted early Tertiary volcano-sedimentary rocks (Aghazadeh et al., 2015). The Seridune porphyry copper deposit (SPCD) is located in the central KPCB within the UDMA (Fig. 1A). It is hosted by Eocene volcanic rocks cut by hypabyssal felsic intrusions and all of the rock units have undergone variably intense hydrothermal alteration (Barzgar, 2007). Phyllic, argillic and advanced argillic alterations are widely exposed at the surface, whereas potassic alteration is concentrated at depth and is only accessible through drill core samples. Porphyry copper deposits form under the influence of dynamic processes governing a magma reservoir within the crust. These processes influence the magma's potential for metal enrichment and fluid dynamics (Park et al., 2021). Consequently, examining the physical and chemical evolution of minerals in igneous rocks is crucial for understanding the processes and dynamics of magmatic systems (Blundy and Cashman, 2008; Ellis et al., 2023) that lead to the formation of these deposits. Magmatic processes such as fractional melting, partial melting, fractional crystallization, and magma mixing (Higgins et al., 2015), which directly affect crystal nucleation and growth, are important petrological processes (Deb and Bhattacharyya, 2018). These processes do not change the bulk-rock chemical composition. Then, they cannot be constrained through chemical and isotopic studies of rocks (Higgins and Roberge, 2007). Instead, these processes have to be investigated through textural studies of rocks and crystal-scale mineral chemistry. Crystal size distribution (CSD) is a quantitative petrographic method which can provide important insights into the conditions within magma reservoirs or crystal mushes, including the rates of nucleation and growth, fractionation, coarsening, and mixing processes (Ngonge et al., 2013; Klein et al., 2017). This research aims to constrain the magmatic processes that governed the evolution of the monzonitic

intrusive body in the Seridune porphyry copper deposit. This aim is achieved through the integration of petrographic observations with the determination of three-dimensional crystal shapes, Crystal Size Distribution analysis, and mineral chemistry of plagioclase crystals. This implications of the quantitative textural analyses on the studied samples are that they enable a more comprehensive understanding of the kinetic evolutionary history and the different processes—such as magma mixing and textural coarsening—that contributed to the formation of this intrusive body.

Material and methods

To identify the rock units and structures in the Seridune area, extensive field studies were conducted. For the present study, samples from the monzonite body of the Seridune porphyry copper deposit (Fig. 1B) exhibiting the least alteration were selected for preparation into polished thin sections. These sections were examined using a polarizing microscope to identify plagioclase crystals suitable for chemical microanalysis. Plagioclase compositions were determined using a JEOL 8530 F electron probe microanalyzer (EPMA) equipped with five tunable Wavelength Dispersive Spectrometers (WDS) hosted at the Imaging and Analysis Centre in the Natural History Museum, London. Operating conditions were 15 kV acceleration voltage, 20 nA beam current and a defocused beam of 10 μm diameter. On-peak counting times were set to 20 - 30 s for all elements and the background was acquired before and after the peak position for 10 - 15 s. Sodium, and potassium were analyzed first to reduce alkali migration due to prolonged electron dose. Standards were albite for Si $\text{K}\alpha$ and Na $\text{K}\alpha$, corundum for Al $\text{K}\alpha$, wollastonite for Ca $\text{K}\alpha$, anorthoclase for K $\text{K}\alpha$, fayalite for Fe $\text{K}\alpha$, forsterite for Mg $\text{K}\alpha$, celestine for Sr $\text{K}\alpha$, barite for Ba $\text{K}\alpha$, rutile for Ti $\text{K}\alpha$ and Mn-titanate for Mn $\text{K}\alpha$. An internal secondary standard, plagioclase from the Isle of Rhum, was measured along with the unknowns to test the standardization and assess reproducibility. Oxygen was calculated by cation stoichiometry and included in the matrix correction. (Moy et al., 2023). Matrix correction was performed using the Phi-Rho-Z method, with mass absorption coefficients obtained from the FFAST (NIST version 2.1; Chantler et al., 2005). According to Armstrong (1998), the specific Phi-Rho-Z algorithm employed

was the Armstrong/Brown/Scott-Love model. Quantitative measurements of crystal sizes were conducted on two representative, least-altered samples using a polarizing microscope. Digital images were captured, and image processing was performed using Adobe Photoshop (Adobe Creative Cloud version) to isolate plagioclase crystals in binary images. The long axis, short axis, area, and centroid of the crystals were measured using ImageJ software. The ShapeCalc spreadsheet program was then employed to convert two-dimensional data to three-dimensional data, allowing for the calculation of crystal dimensions based on the ratios of the short (S), intermediate (I), and long (L) axes. Finally, Crystal Size Distribution (CSD) plots were generated for each sample using CSD Correction 1.40 software. The residence time of the crystals for each sample was determined using the slopes from the CSD plots. This calculation was performed using the formula $Tr = (-1/G \times m) / 31536000$, where Tr is the residence time in years, m is the slope of the crystal population trend line, and G refers to the crystal growth rate in mm/s. The selected G value was based on the suggested value for intrusive magma ($G = 10^{-10}$ mm/s, [Cashman, 1993](#)) and 31536000 is the conversion factor from seconds to years.

Results

Sample petrography

The Seridune Monzonite exhibits a porphyritic texture characterized by phenocrysts of plagioclase, alkali feldspar, quartz and biotite set in a microcrystalline groundmass. Secondary minerals resulting from hydrothermal alteration include biotite, alkali feldspar, chlorite, sericite and clay minerals.

Plagioclase is the most abundant mineral in the Seridune Monzonite. It occurs both as subhedral to euhedral phenocrysts and microcrystals in the groundmass. Phenocrysts display polysynthetic and Carlsbad-albite twinning, along with oscillatory zoning. In some occurrences, these phenocrysts have even grown intergrown in a cruciform shape. It has commonly been replaced by sericite ([Fig. 2B](#)). This alteration is focused on the rim of the phenocrysts and the central parts of plagioclase microlites within the groundmass. Furthermore, these phenocrysts are occasionally crosscut by late-stage veinlets

containing quartz, opaque minerals, and anhydrite. This crosscutting phenomenon is definitive evidence that the fluids bearing quartz, opaque minerals, and anhydrite are younger than the time of plagioclase crystallization, and it emphasizes the secondary permeability of the system ([Sillitoe, 2000](#); [Sillitoe, 2010](#)).

Plagioclase composition

The results of 7 plagioclase EPMA analyses from two samples, together with the calculated (Wt.%) of anorthite, albite and orthoclase are presented in [Table 1](#). The studied plagioclase crystals have a compositional range from labradorite to albite ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$) ([Fig. 3A](#)). Some of these crystals show oscillatory zoning.

Crystal size/shape analysis

The crystals shapes were determined by applying Zingg's diagram ([Zingg, 1935](#)). This classification scheme categorizes crystals into four categories: tabular, bladed, prolate (acicular) and spherical (equant), based on the ratios of their short, intermediate, and long axes. In the Seridune monzonite samples, plagioclase crystals are predominantly tabular and bladed in shape ([Fig. 7B](#)).

Discussion

Some of these crystals exhibit oscillatory zoning, indicating that fractional crystallization and magma mixing play significant roles in influencing the evolving magmatic composition within the magma chamber ([Kumar and Ashok, 2024](#); [Ou et al., 2024](#)). The plagioclase crystals are tabular and bladed in shape. This morphological variation is likely due to the thermodynamic conditions governing the crystallization process. The deformation of plagioclase crystals in the studied samples resulted from changes in undercooling, chemical potential gradients, and material diffusion. The non-linear trend observed in the CSD plots for plagioclase crystals suggests multi-stage cooling process for the crystals ([Fig. 8](#)). The initial stage is marked by plagioclase phenocrysts with few nuclei, whereas in the following stage, they develop as microcrystalline formed under a high nucleation rate.

The nonlinear CSD trends may show the multi-stage crystallization process of magma, magma mixing, and Ostwald Ripening (textural coarsening) processes, as well as modifications in the crystallization course due to changing environments and magma chambers at different depths. The observation of a porphyritic texture with a microlithic groundmass in the Seridune Monzonite, along with features such as oscillatory zoning and sieve texture, indicates multi-stage crystallization at varying depths. The process textural coarsening take place only when a crystal is kept at a temperature near to its liquidus for a prolonged period. Under such conditions, the nucleation rate approaches, while crystals larger than the critical size exhibit a high growth rate. According to [Yang \(2012\)](#), this does not necessarily imply that the temperature remains constant. The nucleation rate and residence time determined for the studied monzonitic intrusive body indicate a high nucleation rate and short residence time for the samples. Based on the Ca+Na+K versus Si+Al diagram, plagioclase

crystals in the monzonitic body show a trend similar to those observed in the mineralizing magmatic systems and hydrous porphyries ([Williamson et al., 2016](#)). This trend, coupled with the calculated Al^* values, reflects magmatic conditions favorable for porphyry-style mineralization; Although, despite these favorable indicators, this body itself is not considered the responsible phase for mineralization in the Seridune deposit.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial and logistical support provided by the Vice Chancellor for Research at Shahid Bahonar University of Kerman and National Iranian Copper Industries Company (NICICO). Sincere thanks are also extended to the editor and anonymous reviewers of the Journal of Economic Geology for their constructive comments and valuable suggestions, which helped improve this manuscript.



شیمی کانی و توزیع اندازه بلور پلاژیوکلازها در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون، ایران: با تأکید بر فرایندهای کنترل کننده تکامل ماگما

مهديه بامروت^۱، سارا درگاهی^{۲*}، محسن آروین^۳، علیرضا شاکر^۴، جیمی جی ویلکینسون^۵، ادگار ای کورتس-کالدرون^۶، مجید امین‌زاده^۷

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۵ استاد، گروه علوم زمین و مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه امپریال کالج لندن، لندن، بریتانیا

^۶ پژوهشگر، مرکز تصویربرداری و تحلیل، موزه تاریخ طبیعی، لندن، بریتانیا

^۷ رئیس بخش زمین‌شناسی و زهکشی، مجتمع مس سرچشمه، شرکت صنایع ملی مس ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

کانسار مس پورفیری سریدون، در بخش میانی کمربند مس پورفیری کرمان و سه کیلومتری شمال شرقی معدن مس سرچشمه واقع شده است. این پژوهش، با توجه به نقش پلاژیوکلاز در بازسازی فرایندهای تبلور ماگما، بررسی کیفی و کمی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی کانسار مس سریدون با بهره‌گیری از بررسی‌های سنگ‌شناسی، شیمی کانی و پراکندگی اندازه متمرکز است. این واحد سنگی که از نظر ترکیب از مونزونیت تا کوارتز مونزونیت متغیر است، شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول و همچنین کانی‌های فرعی کدر اغلب از نوع مگنتیت، آپاتیت و زیرکن است. ترکیب بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی از لابرادوریت تا آلپیت ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$, $n = 80$) متغیر است. بر اساس بررسی‌های پراکندگی اندازه بلور، الگوهای نیمه لگاریتمی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نشان‌دهنده تبلور چند مرحله‌ای ماگما در اعماق مختلف است. همچنین، وجود بافت غربالی، منطقه‌بندی نوسانی و نتایج پراکندگی اندازه بلور نشان‌دهنده کاهش فشار و تزریق پالس‌های مافیک در یک سامانه پویاست. با فرض نرخ رشد ثابت و چگالی هسته (n_0)، نرخ هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز بین $66 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تا $64 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تعیین شد. همچنین، بر اساس داده‌های توزیع اندازه بلورهای سه‌بعدی و با استفاده از نرخ رشد 10^{-10} ، زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلازها بین ۵۶ تا ۶۳ سال برآورد شد. زمان اقامت محاسبه‌شده و آلومینیم اضافی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی با جای‌گیری ماگما در سطوح کم‌عمق‌تر و پتانسیل بالای آن برای آزادسازی سیالات همخوانی دارد؛ هرچند توده مونزونیتی فاز مسئول کانه‌زایی در کانسار مس پورفیری سریدون محسوب نمی‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

واژه‌های کلیدی

توده نفوذی مونزونیتی

کانسار مس پورفیری سریدون

پراکندگی اندازه بلور

نرخ هسته‌بندی

زمان اقامت

پلاژیوکلاز

نویسنده مسئول

سارا درگاهی

s.dargahi@uk.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

بامروت، مهديه؛ درگاهی، سارا؛ آروین، محسن؛ شاکر، علیرضا؛ ویلکینسون، جیمی جی؛ کورتس-کالدرون، ادگار ای و امین‌زاده، مجید، ۱۴۰۵. شیمی کانی و توزیع اندازه بلور پلاژیوکلازها در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون، ایران: با تأکید بر فرایندهای کنترل کننده تکامل ماگما. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۳۳-۵۹

https://doi.org/10.22067/econg.2026.1165

مقدمه

بررسی تکامل فیزیکی و شیمیایی بلورها، به ویژه کانی‌هایی مانند پلاژیو کلاز، پیروکسن و آمفیبول، نقشی بسیار مهم در درک فرایندهای حاکم بر آشیانه ماگمایی و دینامیک سامانه‌های ماگمایی ایفا می‌کند (Blundy and Cashman, 2008; Ellis et al., 2023) دارد. بررسی شیمی کانی، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات دما، فشار، محتوای آب، ترکیب شیمیایی مذاب و فوگاسیته اکسیژن در طی تکامل ماگما و تشکیل سنگ ارائه می‌دهد. بهره‌گیری از این اطلاعات، امکان درک فرایندهایی همچون جدایش، صعود، انباشتگی و اختلاط ماگمایی را فراهم می‌کند (Housh and Luhr, 1991; Ariskin et al., 1993; Panjasawatwong et al., 1995; Al'meev and Ariskin, 1996; Kamaci and Altunkaynak, 2019). این فرایندها با ایجاد عدم تعادل در محیط تبلور ماگما، بر هسته‌زایی و سرعت رشد بلورها تأثیر می‌گذارند و به ایجاد تنوع بافتی در سنگ‌های آذرین منجر می‌شوند (Slaby and Gotze, 2004; Higgins et al., 2015; Deb and Bhattacharyya, 2018). فرایندهای هسته‌بندی، رشد و درشت‌شدگی بافت، ترکیب شیمیایی کل سنگ را تغییر نمی‌دهند (Marsh, 1988; Marsh, 1998; Higgins, 2006; Higgins and Roberge, 2007)؛ از این‌رو، شناسایی این تحولات بافتی از طریق تحلیل‌های متداول شیمیایی و ایزوتوپی امکان‌پذیر نیست (Higgins and Roberge, 2007). بررسی بافت سنگ با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور، نقشی مهم بر درک فرایندهای فیزیکی تبلور ماگما مانند هسته‌بندی و رشد، تفریق، تراکم، درشت‌شدگی بافتی، سرد شدن مرحله‌ای و اختلاط ماگما ایفا می‌کند. با این حال، دستیابی به یک تصویر جامع از تکامل ماگما، مستلزم تلفیق نتایج پراکندگی اندازه بلور با تحلیل‌های شیمیایی و ایزوتوپی است (Marsh, 1988; Cashman and Marsh, 1988; Resmini and Marsh, 1995; Higgins, 1996; Higgins, 2000; Higgins and Roberge, 2007; Brugger and Hammer, 2010; Ngonge et al., 2013; Klein et al., 2017; Deb and Bhattacharyya, 2018; Kamaci and Altunkaynak,

2019; Bell et al., 2019). در همین راستا، کانی پلاژیو کلاز، به دلیل پایداری در طیف گسترده‌ای از شرایط ماگمایی و حفظ الگوهای منطقه‌بندی بافتی و ترکیبی (Browne et al., 2006)، یک کانی شاخص در بررسی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرین است. بررسی کمی و کیفی این کانی، امکان استنباط سینتیک و دینامیک فرایندهای ماگمایی (Lofgren, 1980; Smith and Lofgren, 1983; Tsuchiyama, 1985; Pearce et al., 1987; Nelson and Montana, 1992; Johannes et al., 1994; Singer et al., 1995; Nakamura and Shimakita, 1998; Viccaro et al., 2010)، بازسازی روند تکاملی ماگما و تعیین توالی رویدادهای هم‌زمان با تبلور را فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه تحولات بافتی می‌تواند منعکس‌کننده سازوکار انتقال فلزها، خروج فاز سیال و تغییرات فیزیکوشیمیایی در سطوح مختلف پوسته باشد، تلفیق نتایج پراکندگی اندازه بلور و شیمی کانی، نقش مؤثری در شناسایی پویایی سامانه‌های کانه‌زا ایفا می‌کند (Higgins, 1999; Higgins, 2011; Babazadeh et al., 2024).

کانسار مس سریدون در بخش میانی کمربند مس پورفیری کرمان و در جنوب شرقی مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. این کانسار، به دلیل نزدیکی (حدود ۳ کیلومتری شمال شرقی) به کانسار سرچشمه، از اهمیت اکتشافی و اقتصادی ویژه‌ای برخوردار بوده و طی سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. با وجود آنکه پژوهش‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، دگرسانی و سنجش از دور در مورد این کانسار انجام شده است (Barzegar, 2007; Kazemi Mehrnia et al., 2010; Shahriari et al., 2014; Abedi et al., 2013; Abedi et al., 2017; Bamorovat et al., 2024)، برای درک عمیق‌تر عوامل مؤثر بر تشکیل کانسار لازم است تا بر تلفیق فرایندهای زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناختی تمرکز شود. توده مونزونیتی سریدون در بخش محدودی از منطقه دارای برونزد سطحی است. مشاهدات میدانی و بررسی‌های سنگ‌شناسی بیانگر دگرسانی گسترده این رخنمون‌هاست. از این‌رو، با هدف بازسازی

در جدول ۱ ارائه شده است. در پردازش داده‌ها از نرم‌افزارهای GCDkit, Igpet و CorelDRAW (نسخه ۲۰۱۷) استفاده شد. برای بررسی پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز، دو مقطع نازک با کمترین میزان دگرسانی از توده نفوذی مونزونیتی سریدون انتخاب شد. پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار Adobe Photoshop انجام شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، مؤلفه‌های هندسی بلورهای پلاژیوکلاز اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار ShapeCalc (Mangler et al., 2022)، ابعاد بلورها محاسبه و شکل آنها با نمودار زینگ (Zingg, 1935) مشخص شد. در نهایت، نمودار نیمه لگاریتمی طبیعی چگالی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون توسط نرم‌افزار CSD Correction (نسخه ۱/۴) رسم شد.

زمین‌شناسی منطقه

کمرند ماگمایی ارومیه- دختر در استان کرمان حاوی ذخایر مس پورفیری متعددی است که در مجموع به عنوان کمرند مس پورفیری کرمان شناخته می‌شوند (Ghorbani, 2013). این کمرند با روند شمال شرقی- جنوب غربی، بخش جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه- دختر را تشکیل می‌دهد. این کمرند حاصل فرایندهای تکتونوماگمایی پیچیده‌ای است که در دوران ترشیری رخ داده است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که کانی‌زایی مس پورفیری در این کمرند، اغلب مرتبط با توده‌های نفوذی جوان از نوع کوه‌پنج است (McInnes et al., 2003). کانسار مس پورفیری سریدون در بخش مرکزی کمرند مس پورفیری کرمان از لحاظ ژنتیکی و کانی‌شناسی شبیه سایر کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی نوع کوه‌پنج است (Hassanzadeh, 1993; Aghazadeh et al., 2015; Bamorovat et al., 2024). در این منطقه قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های آذر آواری ائوسن می‌باشند. این واحدهای آتشفشانی توسط توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و دایک‌های پورفیری قطع شده‌اند.

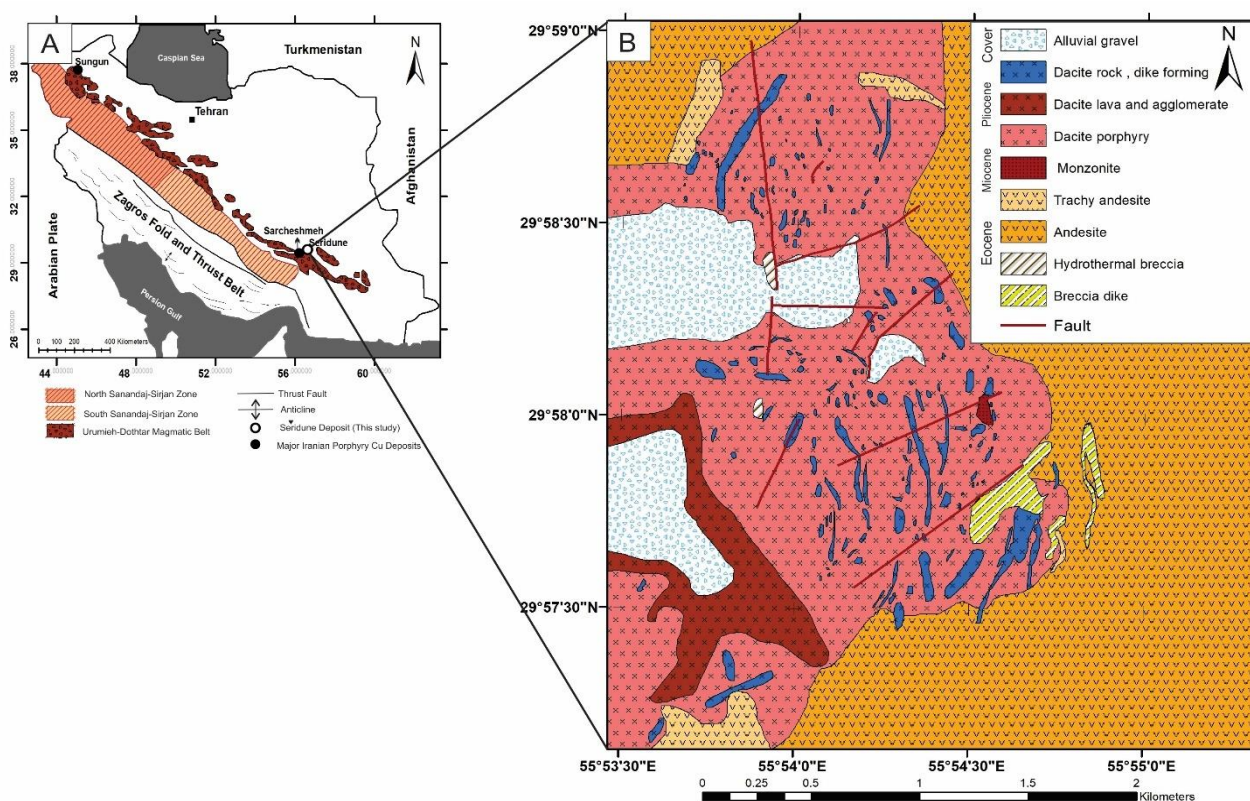
تاریخچه سنگ، بررسی‌هایی بر نمونه‌های کم‌دگرسان حاصل از مغزه‌های حفاری صورت گرفت. در این پژوهش، نرخ هسته‌زایی، نرخ رشد و زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلاز با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور برآورد شد، تا با تلفیق این نتایج و داده‌های شیمی کانی، درک جامع‌تری از تاریخچه تکامل ماگما و فرایندهای تشکیل‌دهنده توده مونزونیتی کانسار سریدون حاصل شود.

روش مطالعه

بررسی‌های میدانی گسترده‌ای به منظور شناسایی واحدهای سنگی و ساختارهای حاکم بر منطقه سریدون انجام شد. نمونه‌هایی از توده مونزونیتی سریدون، با کمترین میزان دگرسانی برای تهیه مقاطع نازک- صیقلی انتخاب شدند. سپس، مقاطع توسط میکروسکوپ پلاریزان بررسی شدند تا بلورهای پلاژیوکلاز مناسب برای ریز آنالیز شیمیایی مشخص شود. ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها با استفاده از دستگاه ریز کاو الکترونی پرتو JEOL 8530 F مجهز به پنج طیف‌سنج انتشار طول موج در مرکز تصویربرداری و آنالیز موزه تاریخ طبیعی لندن در کشور انگلیس تعیین شد. آنالیزهای EPMA با ولتاژ شتاب ۱۵ کیلوولت، جریان پرتو ۲۰ نانو آمپر و پرتوی فوکوس‌نشده با قطر ۱۰ میکرومتر انجام شد. برای کمینه‌سازی اثر قلیایی، عناصر Na و K در اولویت سنجش قرار گرفتند. زمان شمارش برای پیک‌ها و پس‌زمینه به ترتیب ۲۰ تا ۳۰ و ۱۰ تا ۱۵ ثانیه تنظیم شد و درستی داده‌ها با استانداردهای کانی مرجع و داخلی اعتبارسنجی شد. تصحیح ماتریس بر اساس روش Phi-Rho-Z (الگوریتم Armstrong/Brown/Scott-Love) و با بهره‌گیری از ضرایب جذب جرمی FFAST Chantler انجام شد (Chantler et al., 1988; Armstrong, 2005). در نهایت، اکسیژن از طریق استوکیومتری کاتیونی محاسبه و در تصحیح ماتریس لحاظ شد (Armstrong, 1988; Moy et al., 2023). نتایج به دست آمده از تجزیه ۸۰ نقطه پلاژیوکلاز در نمونه‌های مورد بررسی برحسب درصد وزنی و مقادیر محاسبه‌شده آنورتیت، آلکیت و ارتوز بر حسب درصد مولی

۱- A و B). هوازدگی و عملکرد سیالات گرمابی ناشی از فعالیت‌های ماگمایی، دگرسانی‌های گسترده‌ای همچون پتاسیک، فلیک و آرژیلیک و آرژیلیک را ایجاد کرده است. دگرسانی‌های فلیک و آرژیلیک تا آرژیلیک پیشرفته به صورت گسترده در سطح رخنمون دارند. در حالی که، دگرسانی پتاسیک در اعماق متمرکز شده و تنها از طریق حفاری‌های انجام شده در منطقه قابل دسترسی است.

علاوه بر این، گدازه‌های داسیتی پلیوسن نیز بخش‌هایی از توالی‌های سنگی قدیمی‌تر را پوشانده‌اند. ساختارهای زمین‌ساختی به ویژه گسل‌ها و دایک‌های متعدد با روند شمال-جنوب مشاهده شده در منطقه بر شکل‌گیری و کنترل کانه‌زایی در منطقه مؤثر بوده است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی و توالی سنگ‌شناسی کانسار مس پورفیری سریدون در نقشه تهیه شده توسط برزگر (Barzegar, 2007) و شرکت کان ایران (Kan Iran exploration co, 2007) ارائه شده است (شکل ۱).



شکل ۱. A: موقعیت جغرافیایی کانسار مس پورفیری سریدون همراه با کانسارهای مس پورفیری معروف در ایران و B: نقشه زمین‌شناسی ساده کانسار مس پورفیری سریدون (بعد از برزگر (Barzegar, 2007) و شرکت کان ایران (Kan Iran exploration co, 2007))

Fig 1. A: The geographical location of the Seridune porphyry copper deposit, along with well-known porphyry copper deposits in Iran, and B: A simplified geological map of the Seridune porphyry copper deposit (After Barzegar, 2007 and Kan Iran exploration co, 2007)

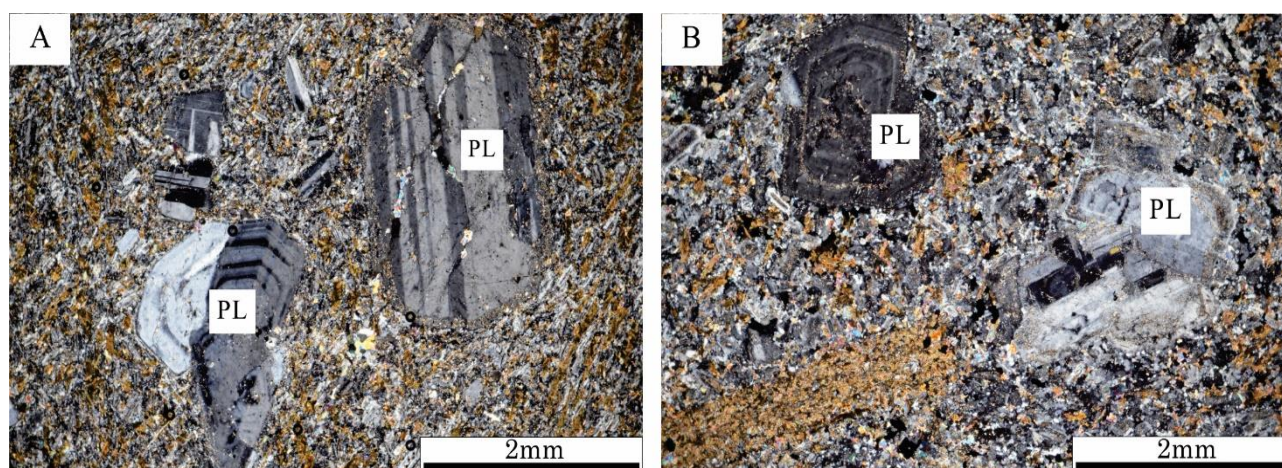
سنگ‌شناسی

پورفیری سریدون دارای تنوع ترکیبی مونزونیت تا کوارتز مونزونیت پورفیری است. در این سنگ‌ها بافت پورفیریتیک با

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی توده مونزونیتی، کانسار مس

تغییرات از دگرسانی جزئی و تبدیل به فلدسپار قلیایی و سریسیت تا جایگزینی کامل توسط کانی‌های رسی و سریسیت متغیر است. سریسیتی شدن بلورهای پلاژیوکلاز، به ویژه در حاشیه و امتداد صفحه‌ها، نشان‌دهنده شدت‌های متفاوتی از دگرسانی فیلیک و تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات گرمابی است که این مسئله همراه با حضور بیوتیت ثانویه می‌تواند به خوبی بیانگر رخداد دگرسانی پتاسیک-فیلیک باشد (شکل ۲-۲B). فلدسپار قلیایی در این سنگ‌ها اغلب به صورت ریزبلور در زمینه و یا با منشأ ثانویه مشاهده می‌شود. بیوتیت به عنوان یکی از کانی‌های شاخص در این سنگ‌ها، در دو نسل اولیه و ثانویه مشاهده می‌شوند. بیوتیت‌های اولیه اغلب به صورت بلورهای درشت هستند. با این حال، بسیاری از بیوتیت‌های اولیه تحت تأثیر فرایندهای گرمابی قرار گرفته است. این کانی‌ها توسط کانی‌های بیوتیت ثانویه، کلریت و یا کانی‌های کدر، مانند مگنتیت، پیریت و کالکوپریت جایگزین شده‌اند.

زمینه میکروولیتی به خوبی توسعه یافته است. این توده به طور کلی شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (۳۵ تا ۴۰ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳۰ تا ۳۵ درصد)، کوارتز (۳ تا ۱۰ درصد)، بیوتیت و آمفیبول (۱۰ تا ۱۵ درصد) همراه با کانی‌های فرعی کدر از جمله پیریت، کالکوپریت و مگنتیت، آپاتیت و زیرکن (۵ تا ۱۰ درصد) است. بلورهای پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها به صورت بلورهای درشت و میکروولیتی در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. این کانی‌ها اغلب دارای ماکل‌های چندگانه‌ای نظیر کارلسباد آلپیتی و پلی سنتتیک هستند. ساختارهای منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی که در این کانی‌ها مشاهده می‌شود، بیانگر تغییرات در ترکیب شیمیایی مذاب و شرایط آشیانه ماگمایی طی فرایند تبلور است (Perugini et al., 2005; Yousefi et al., 2024) (شکل ۲-۲A). بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه‌های مورد بررسی، طی فرایند دگرسانی گرمابی، تغییرات قابل توجهی را متحمل شده‌اند. این



شکل ۲. تصاویرهای میکروسکوپی از توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون در نور (XPL)، A: وجود منطقه‌بندی نوسانی در بلورهای پلاژیوکلاز همراه با بیوتیت ثانویه که بیانگر دگرسانی پتاسیک است B: دگرسانی پتاسیک-فیلیک معمولاً به صورت تبدیل بخش‌هایی از بلور پلاژیوکلاز به سریسیت هم‌زمان با حضور بیوتیت ثانویه مشاهده می‌شود. این پدیده در کانسارهای پورفیری، نشان‌دهنده فعالیت سیالات گرمابی پس از تبلور اولیه ماگماست (XPL). علامت اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (PL: پلاژیوکلاز).

Fig. 2. microphotographs of the monzonitic intrusive body of the Saridun porphyry copper deposit. A: Oscillatory zoning in plagioclase crystals associated with secondary biotite, indicating potassic alteration. (XPL), and B: Potassic-phylic alteration is typically observed as the partial replacement of plagioclase crystals by sericite, along with the presence of secondary biotite. This phenomenon, in porphyry deposits, indicates the activity of hydrothermal fluids following the initial crystallization of the magma. (XPL). Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (PL: Plagioclase).

نقاط تجزیه و تحلیل شده بلورهای پلاژیوکلاز در توده نفوذی مونزونیتی سریدون و پروفیل‌های EMPA اندازه‌گیری شده برای بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی در **شکل ۴-A** و **B** ارائه شده است. تغییرات ترکیبی از هسته تا حاشیه بلورها، بیانگر وجود منطقه‌بندی نوسانی است که می‌تواند بیانگر نقش فرایندهای تبلور تفریقی و اختلاط ماگمایی در تکامل ترکیب ماگما درون محفظه ماگمایی باشد (Kumar and Ashok, 2024; Ou et al., 2024). برای ارزیابی پتانسیل باروری و کانه‌زایی توده مورد بررسی، رفتار زمین‌شیمیایی بلورهای پلاژیوکلاز بر مبنای شاخص آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت (Williamson et al., 2016). چنان‌که در **شکل ۳-B** مشاهده می‌شود، بلورهای پلاژیوکلاز توزیع متنوعی را نشان می‌دهند؛ به طوری که غالب نمونه‌ها از محتوی $Al^* \leq 1$ و تعداد اندکی از محتوی $Al^* > 1$ برخوردارند.

پراکندگی اندازه بلور

درک سازوکارهای کنترل‌کننده فرایند انجماد ماگما، یکی از چالش‌های اساسی در سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرین محسوب می‌شود (Yang, 2012). روش کمی پراکندگی اندازه بلور، نقش مهمی در درک فرایندهای هسته‌زایی و رشد بلورها طی تکامل ماگما دارد. برای این منظور، تصویرها با وضوح بالا از مقاطع نازک توسط اسکنر لام تهیه و پردازش تصویرها در نرم‌افزار فتوشاپ انجام شد (**شکل ۵-A** و **B**). تصویرهای پردازش شده، برای استخراج محورهای بلند، کوتاه و مساحت بیش از ۳۰۰۰ بلور به محیط نرم‌افزار ImageJ منتقل شدند. با توجه به ضرورت تبدیل داده‌های دوبعدی به حجمی، از برنامه ShapeCalc (Mangler et al., 2022) برای تعیین نسبت منظر (S:I:L) بلورها استفاده شد (**شکل ۷-A**). انتخاب این برنامه به دلیل برتری عملیاتی آن نسبت به مدل‌های پیشین نظیر 5 CSDslice صورت گرفت. ShapeCalc با بهره‌گیری از پایگاه داده گسترده‌تر شامل ۲۶۱۸ توزیع مدل و استفاده از معیار آماری دقیق تر $Rc2$ ، تطابق بهتری میان توزیع‌های نمونه و مدل ایجاد می‌کند. در محیط این

بیوتیت‌های ثانویه، فراوان‌ترین کانی ثانویه در این سنگ‌ها هستند که به صورت پولک‌های ریز در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. حضور گسترده بیوتیت ثانویه به همراه فلدسپار قلیایی ثانویه، نشان‌دهنده رخداد دگرسانی پتاسیک در این کانسار است. تمامی نسل‌های بیوتیت با شدت متفاوت به کلریت تبدیل شده‌اند که بیانگر سیر تکاملی حرارتی سامانه از شرایط پایداری پتاسیک به فازهای دما پایین‌تر است. همچنین، در این سنگ‌ها، بلورهای آمفیبول نیز توسط بیوتیت ثانویه جایگزین شده‌اند. این فرایند به تشکیل شکل‌های دروغین آمفیبول منجر شده است. حضور این شکل‌های دروغین، شاهی بر وجود این کانی در هم‌یافت اولیه سنگ است. علاوه بر آن، قطع‌شدگی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز توسط رگچه‌های متأخر کوارتز-انیدریت-کانی کدر، می‌تواند شاهی بر تأخر زمانی عملکرد سیالات نسبت به تبلور پلاژیوکلاز و نقش نفوذپذیری ثانویه در سامانه باشد (Sillitoe, 2000; Sillitoe, 2010).

شیمی کانی

شیمی کانی پلاژیوکلاز

پلاژیوکلاز، به عنوان یکی از کانی‌های شاخص در سنگ‌های آذرین، اطلاعات ارزشمندی را در مورد شرایط فیزیکی‌شیمیایی حاکم بر تبلور ماگما ارائه می‌دهد. تغییرات در ترکیب شیمیایی پلاژیوکلاز، به ویژه نسبت آنورتیت به آل بیت و غلظت عناصر کمیاب مانند آهن، منیزیم و تیتانیوم، امکان بازسازی تبلور ماگما و تعیین دمای تبلور کانی‌ها را فراهم می‌آورد (Pietraniket al., 2006). داده‌های ریز کاو الکترونی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی به صورت گزینشی و با اختصار در جدول ۱ ارائه شده‌اند. گزینش داده‌های جدول بر مبنای پوشش کامل دامنه تغییرات ترکیبی بلورهای پلاژیوکلاز صورت گرفته است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، ترکیب بلورهای پلاژیوکلاز از لابرادوریت تا آل بیت ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$) متغیر است (**شکل ۳-A**). تصویرهای ریز پردازش الکترونی به همراه

۲). با توجه به نقش مهم زمان در کنترل بافت سنگ‌های آذرین (Zieg and Marsh, 2002)، زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون با استفاده از شیب منحنی توزیع اندازه بلورها (M) و با استفاده از فرمول $Tr = (-1 / (G \times m))$ 31536000 محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است.

برنامه، شکل نهایی بلورها نیز در نمودار زینگ مشخص شد (شکل B-۶). در نهایت، نسبت ابعاد بلورها با هدف محاسبه مؤلفه‌های سینتیکی تبلور و رسم نمودارهای نیمه لگاریتمی چگالی تجمع به نرم افزار 1.4 CSD Corrections منتقل شد (شکل ۸). سرعت هسته‌بندی (J) با فرض نرخ رشد 10^{-11} mm/s، با استفاده از فرمول $J = n0 \times G$ محاسبه شد. محل تقاطع نمودار CSD با محور تراکم جمعیت، بیانگر چگالی هسته‌بندی n0 است (جدول

جدول ۱. نتایج داده‌های منتخب ریزکاو الکترونی پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون؛ مقادیر اکسیدها بر حسب درصد وزنی (wt.%) و اعضای انتهایی بر حسب درصد مولی (mol%) ارائه شده است (b.d= کمتر از حد تشخیص).

Table 1. Results of representative EMPA analyses of plagioclase in the Seridune Monzonite intrusive body; Oxide concentrations are in wt.% and end-member components are in mol% (b.d= below detection limit).

Sample		SiO ₂	TiO ₃	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO
SE-31		60.04	0.02	24.17	0.01	b.d	6.09	7.89	0.39	0.04
SE-31		58.5	b.d	24.96	0.01	b.d	6.99	7.42	0.35	b.d
SE-31		59.7	b.d	24.73	0.01	b.d	6.66	7.55	0.37	0.06
SE-31	Rim	51.67	0.03	27.15	0.01	0.06	12.47	5.17	0.14	b.d
SE-31	To	56.8	0.03	26.27	0.01	0.05	8.51	6.17	0.4	b.d
SE-31	Core	53.86	0.02	27.85	0.01	0.04	10.41	5.44	0.21	0.02
SE-31	Rim	59.56	0.01	24.19	0.01	b.d	6.14	7.95	0.36	0.01
SE-31	To	58.93	0.01	24.99	b.d	b.d	6.97	7.38	0.41	0.02
SE-31	Core	60.47	b.d	23.72	0.01	b.d	5.43	8.39	0.34	0.02
SE-31	Rim	59.49	b.d	24.22	b.d	b.d	6.28	7.82	0.33	0.01
SE-31	To	60.98	0.01	23.25	b.d	b.d	4.94	8.43	0.49	0.02
SE-31	Core	61.22	0.01	23.92	b.d	b.d	5.64	8.06	0.34	b.d
SE-25	Core	59.22	b.d	23.94	b.d	b.d	6.01	7.89	0.5	0.06
SE-25	To	61.27	b.d	25.3	b.d	b.d	6.44	8.31	0.47	0.03
SE-25	Rim	58.79	0.01	24.65	b.d	0.01	6.83	7.6	0.44	0.03
SE-25	Core	59.08	b.d	23.83	b.d	0.2	4.15	7.2	2.41	0.06
SE-25	To	58.23	b.d	23.82	0.01	0.01	6.48	7.73	0.37	0.07
SE-25	Rim	59.42	b.d	23.7	0.01	b.d	5.75	8.3	0.34	0.04
SE-25	Core	58.13	0.02	25.47	b.d	0.01	7.42	7.29	0.31	0.02
SE-25	To	55.87	0.02	27.09	b.d	b.d	9.05	6.3	0.2	0.02
SE-25	Rim	62.82	0.02	22.09	b.d	0.01	3.26	9.64	0.49	0.08

ادامه جدول ۱. نتایج داده‌های منتخب ریزکاو الکترونی پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون؛ مقادیر اکسیدها بر حسب درصد وزنی (wt.%) و اعضای انتهایی بر حسب درصد مولی (mol%) ارائه شده است (b.d = کمتر از حد تشخیص).

Table 1 (Continued). Results of representative EMPA analyses of plagioclase in the Seridune Monzonite intrusive body; Oxide concentrations are in wt.% and end-member components are in mol% (b.d= below detection limit).

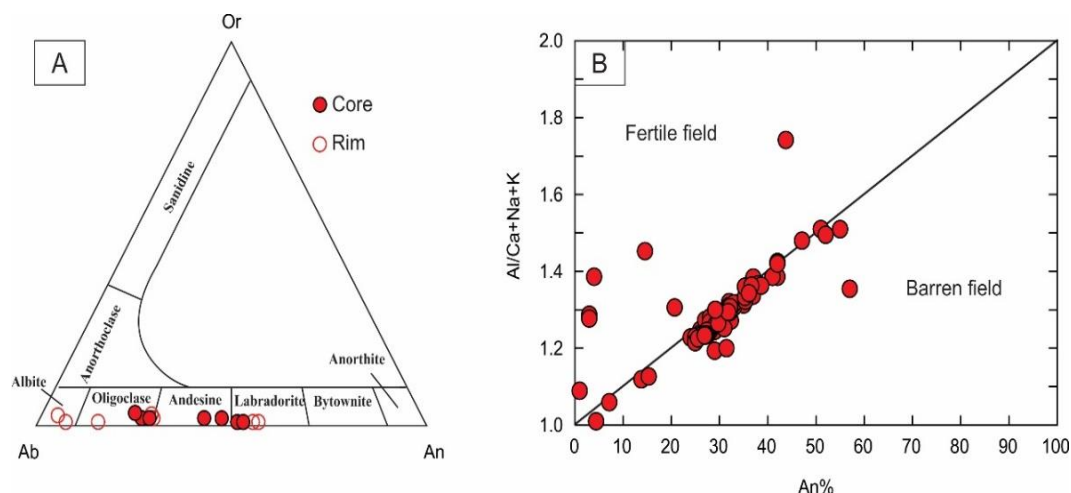
Sample		SrO	Fe ₂ O ₃	FeO	Total	Si	An	Ab	Or
SE-31		0.21	0.17	b.d	99.04	2.7	29	69	2
SE-31		0.21	0.23	b.d	98.67	2.65	34	64	2
SE-31		0.19	0.09	0.12	99.46	2.68	32	66	2
SE-31	Rim	0.4	0.17	b.d	97.27	2.4	57	43	1
SE-31	to	0.26	b.d	0.22	98.72	2.59	42	55	2
SE-31	Core	0.34	0.37	b.d	98.57	2.47	51	48	1
SE-31	Rim	0.19	0.11	b.d	98.52	2.69	29	69	2
SE-31	to	0.17	0.17	b.d	99.05	2.66	33	64	2
SE-31	Core	0.2	0.08	b.d	98.65	2.72	26	72	2
SE-31	Rim	0.22	0.13	b.d	98.5	2.69	3	68	2
SE-31	to	0.16	0.1	b.d	98.38	2.75	24	73	3
SE-31	core	0.17	b.d	0.17	99.47	2.74	27	71	2
SE-25	Core	0.22	b.d	0.16	98	2.69	29	68	3
SE-25	to	0.23	0.17	0.17	102.22	2.67	29	68	3
SE-25	Rim	0.19	0.17	0.17	98.73	2.66	32	65	2
SE-25	Core	0.16	0.49	0.49	97.58	2.7	21	65	3
SE-25	to	0.18	0.16	0.16	97.06	2.67	31	67	2
SE-25	Rim	0.19	0.18	0.18	97.92	2.7	27	71	1
SE-25	Core	0.38	0.22	0.22	99.25	2.62	35	63	2
SE-25	to	0.46	0.26	0.26	99.27	55.87	44	55	2
SE-25	Rim	0.23	0.07	0.07	98.72	2.81	15	82	1

بحث

شیمی کانی پلاژیوکلاز

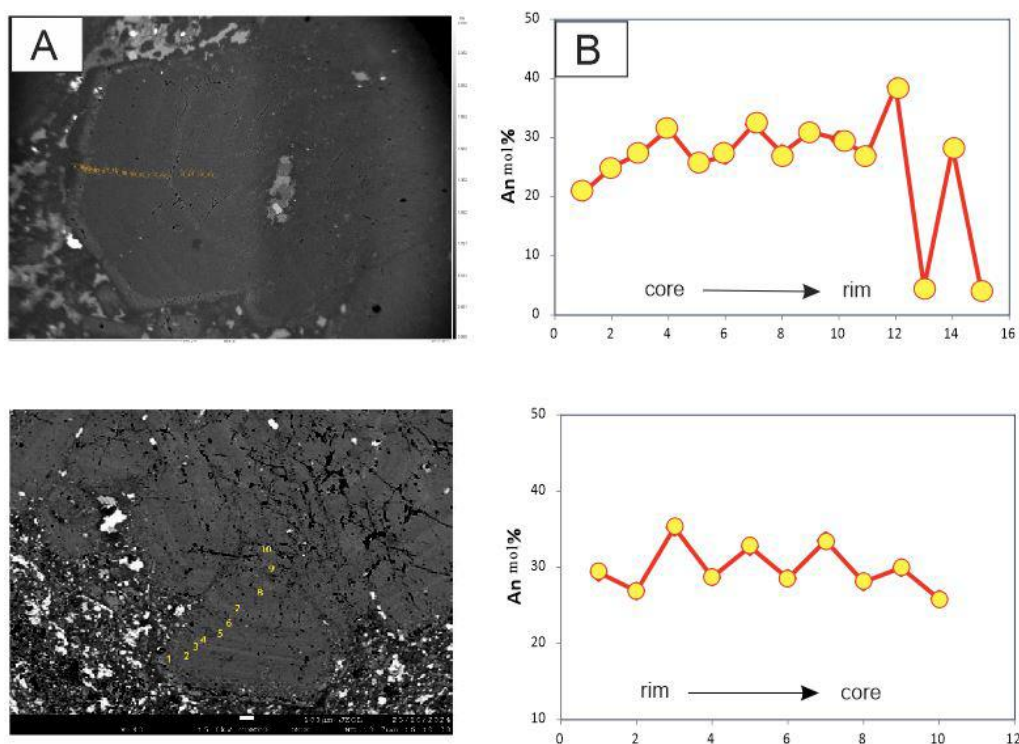
از ۱ را نشان می‌دهند (شکل ۳-B). از آنجا که مقدار $Al^* = 1$ به عنوان مرز جداکننده سامانه‌های بارور ($Al^* > 1$) از سامانه‌های نابارور ($Al^* < 1$) معرفی شده است (Williamson et al., 2016)، تمرکز بخش قابل توجهی از داده‌ها در مجاورت این مرز نشان می‌دهد که ترکیب پلاژیوکلازها به شرایط تشکیل آلومینیم اضافی نزدیک شده است.

آلومینیم اضافی در بلورهای پلاژیوکلاز به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی برای شناسایی توده‌های بارور در نظر گرفته می‌شود (Williamson et al., 2016). در توده مونزونیتی مورد مطالعه، بررسی شاخص Al^* نشان می‌دهد که داده‌ها اغلب در محدوده ۰/۹ تا ۱ متمرکز شده‌اند و تعداد محدودی مقادیر بالاتر



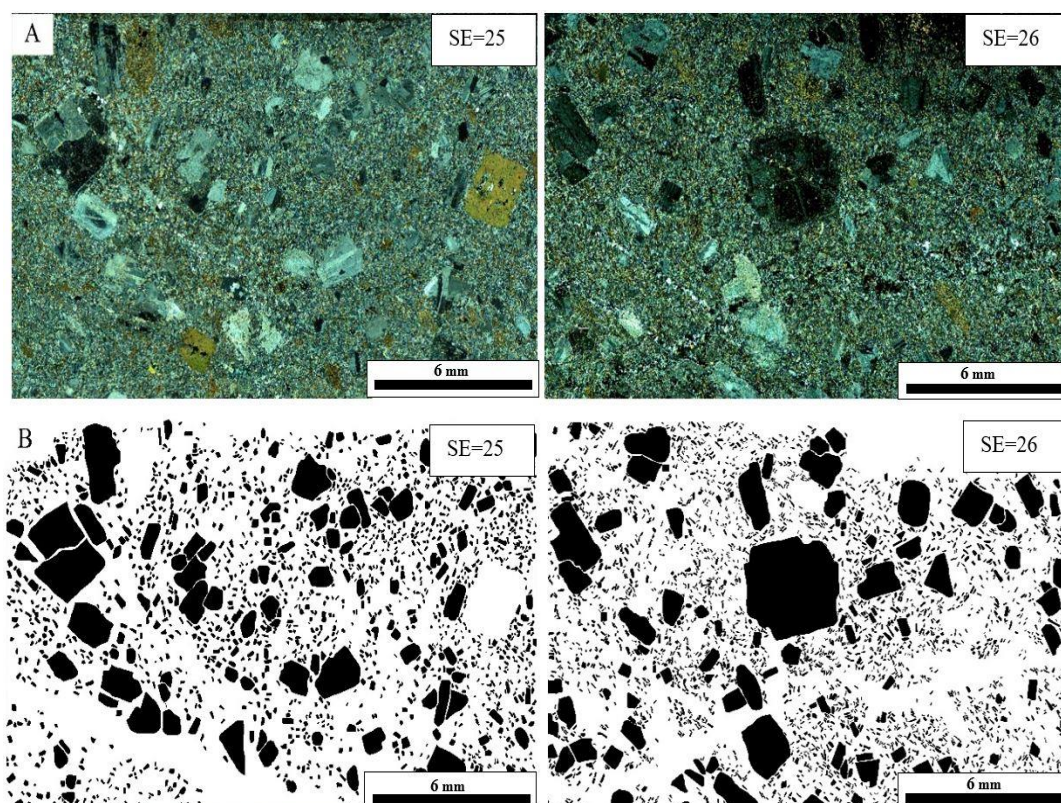
شکل ۳. A: ترکیب شیمیایی بلورهای پلاژیوکلاز در نمودار سه تایی Ab-An-Or (Deer et al., 2013) و B: تعیین وضعیت باروری توده مونزونیتی سریدون بر اساس شاخص Al^*

Fig. 3. A: The chemical composition of plagioclase crystals within Ab-An-Or ternary diagram (Deer et al., 2013), and B: Determining the fertility status of the monzonitic body of the Seridune based on the Al^* index



شکل ۴. A: تصاویرهای ریزپردازش الکترونی و نقاط تجزیه شده بلورهای پلاژیوکلاز در توده نفوذی مونزونیتی سریدون و B: پروفیل های EMPA اندازه گیری شده در بلورهای پلاژیوکلاز

Fig. 4. A: Backscattered electron (BSE) images and analyzed points in plagioclase in the Seridune monzonitic intrusive body, and B: Electron microprobe analysis (EMPA) profiles obtained from the plagioclase crystals



شکل ۵. A: تصویرهای میکروسکوپی از توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مجهز به سامانه اسکن لام و B: تصویرهای پردازش شده بلورهای پلاژیوکلاز در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون با استفاده از نرم افزار Adobe Photoshop

Fig. 5. A: Microscopic images of the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit, captured using a polarized light microscope equipped with a scanning system, and B: Processed images of plagioclase crystals within the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit, edited using Adobe Photoshop software

جدول ۲. نتایج بررسی‌های کمی پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون

Table 2. Results of quantitative studies of the size distribution of plagioclase crystals in monzonite intrusive body in the Seridune porphyry copper deposit

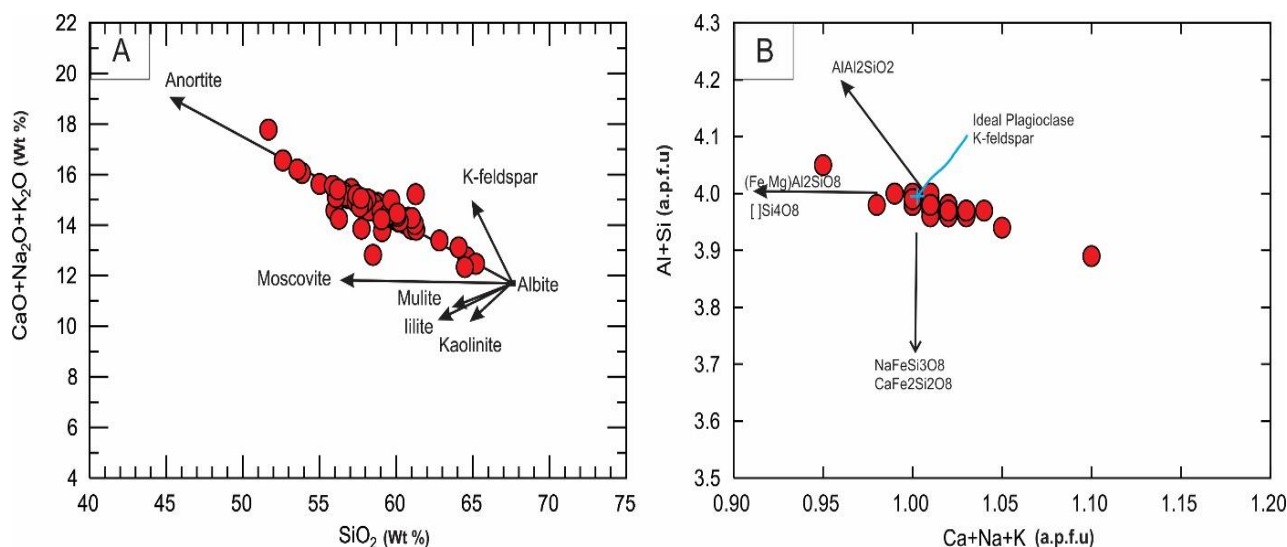
Sample	Slope	n0	Tr	G	J	S : I : L
SE-25	-5.03	6.44	63	10^{-10}	64×10^{-11}	1 : 1.75 : 2.50
SE-26	-5.59	6.67	56	10^{-10}	66×10^{-11}	1 : 2.80 : 4.60

حاکم بر تشکیل توده مونزونیتی، نیازمند اطمینان از حفظ ترکیب اولیه بلورهای پلاژیوکلاز و عدم تأثیر فرایندهای ثانویه است. برای

این یافته با حضور مقادیر $Al^* > 1$ در تعدادی از داده‌ها تأیید می‌شود. با این حال، بررسی منشأ آلومینیم اضافی و درک شرایط

تکامل را مشخص می‌سازد؛ به‌طوری‌که کاهش کلسیم در نواحی مجاور هسته‌های غنی از آنورتیت (An)، بیانگر تبلور در یک سامانه پویا با فشار و دمای متغیر است. در مقابل، حضور حاشیه‌های غنی از An در برخی از بلورها می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی نظیر تزریق ماگمای مافیک جدید یا نوسان‌های حرارتی در مخزن باشد (Brown et al., 2024). این تغییرات در ویژگی‌های بافتی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نیز منعکس شده است. بافت‌های غربالی در این نمونه‌ها را می‌توان محصول اختلاط ماگمایی یا کاهش فشار طی صعود ماگما دانست (Guo and Chen, 2025). در فرایند اختلاط، تشکیل حاشیه‌های کلسیک (An بالا) در حاشیه هسته‌ها، شاهدهی بر تزریق مجدد ماگما و ورود فازهای مافیک به مخزن است که به تبلور مجدد در محیطی غنی از کلسیم منجر شده است. در مقابل، فراوانی درشت‌بلورهایی که در آنها هسته‌ها توسط حاشیه‌های سدیک (An پایین) احاطه شده‌اند، بر رخداد کاهش فشار هم‌دما دلالت دارد (Nelson and Montana, 1992; Brown et al., 2024). در این مرحله، گاززدایی نهایی و کاهش حلالیت مواد فرار در حین صعود به سطوح کم‌عمق‌تر، پایداری آنورتیت را کاهش داده و به تبلور حاشیه‌های غنی از سدیم در تعادل با مذاب منجر شده است. علاوه بر آن، منطقه‌بندی نوسانی در این درشت‌بلورها که در پروفیل‌های ترکیبی مشخص است، توالی پیچیده‌ای از تحولات ماگمایی را تأیید می‌کند (شکل ۴-B). نوسان‌های شدید مقدار An (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) در مرزهای ترکیبی تیز، ناشی از اختلاط ماگمایی است؛ در حالی که نوسان‌های تدریجی و محدودتر (کمتر از ۱۰ درصد)، از شرایط عدم تعادل موضعی نشأت گرفته است (Guo and Chen, 2025). از این‌رو، توده مونزونیتی سریدون، توالی پیچیده‌ای از جای‌گیری در آشیانه‌های عمیق و صعود نهایی به اعماق کمتر را تجربه کرده است؛ به‌طوری‌که تشکیل بلورهای بدون منطقه‌بندی در مراحل پایانی، نشان‌دهنده رسیدن سامانه به یک ثبات نسبی در مذاب‌های تکامل یافته است.

ارزیابی نقش فرایندهای ثانویه از جمله دگرسانی، شاخص شیمیایی دگرسانی (CIA) برای شیمی سنگ کل محاسبه شد (Nesbitt and Young, 1982). مقادیر CIA محاسبه‌شده در بازه ۴۶ تا ۴۷ و در محدوده سنگ‌های آذرین بدون دگرسانی (۳۲ تا ۵۰) است که نشان می‌دهد ترکیب کلی نمونه‌ها بدون دگرسانی است. علاوه بر این، چنان‌که در شکل ۶-A مشاهده می‌شود، نمونه‌ها اغلب در امتداد خط اتصال آلیت و آنورتیت قرار گرفته‌اند. از این‌رو، آلومینیم اضافی در بیشتر بلورهای مورد بررسی، یک ویژگی اولیه ماگمایی بوده و ناشی از فرایندهای ثانویه همچون دگرسانی نیست. این کانی‌ها روند کاهشی منظمی با افزایش Si+Al نشان می‌دهند (شکل ۶-B) که بیانگر جانشینی Al به جای Ca و Na است (Williamson et al., 2016). فرایندهای ماگمایی ثبت‌شده توسط بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون با تغییرات در محتوای آنورتیت در حد فاصل هسته تا حاشیه مشخص می‌شوند. این کانی‌ها اغلب دارای بافت غربالی و منطقه‌بندی هستند. با توجه به اینکه محتوای آنورتیت (An) در پلاژیوکلاز تحت تأثیر دمای تبلور، فشار، ترکیب مذاب و محتوای H₂O است (Sisson and Grove, 1993; Panjasawatwong et al., 1995; Ustunisik et al., 2014; Brown et al., 2024)، تغییرات محتوای آنورتیت در بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی می‌تواند بیانگر اطلاعات ارزشمندی از تاریخچه مخزن ماگمای سازنده باشد. افت ناگهانی محتوای An در حد فاصل هسته و حاشیه که در برخی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود، با روند معمول تبلور تفریقی همخوانی ندارد و نشان‌دهنده تغییر ناگهانی در شرایط تبلور است (Namur et al., 2020; Brown et al., 2024). حاشیه‌های دارای An پایین‌تر در برخی نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده نقش تبلور از یک مذاب تکامل یافته با نسبت CaO/Na₂O کمتر، دمای پایین‌تر و یا محتوای پایین H₂O ناشی از خروج H₂O از این مذاب در حین صعود به سمت سطح و یا تأثیر هم‌زمان هر دو فرایند باشد (Brown et al., 2024). با این حال، تحلیل جامع داده‌های شیمی کانی‌ها، ابعاد گسترده‌تری از این



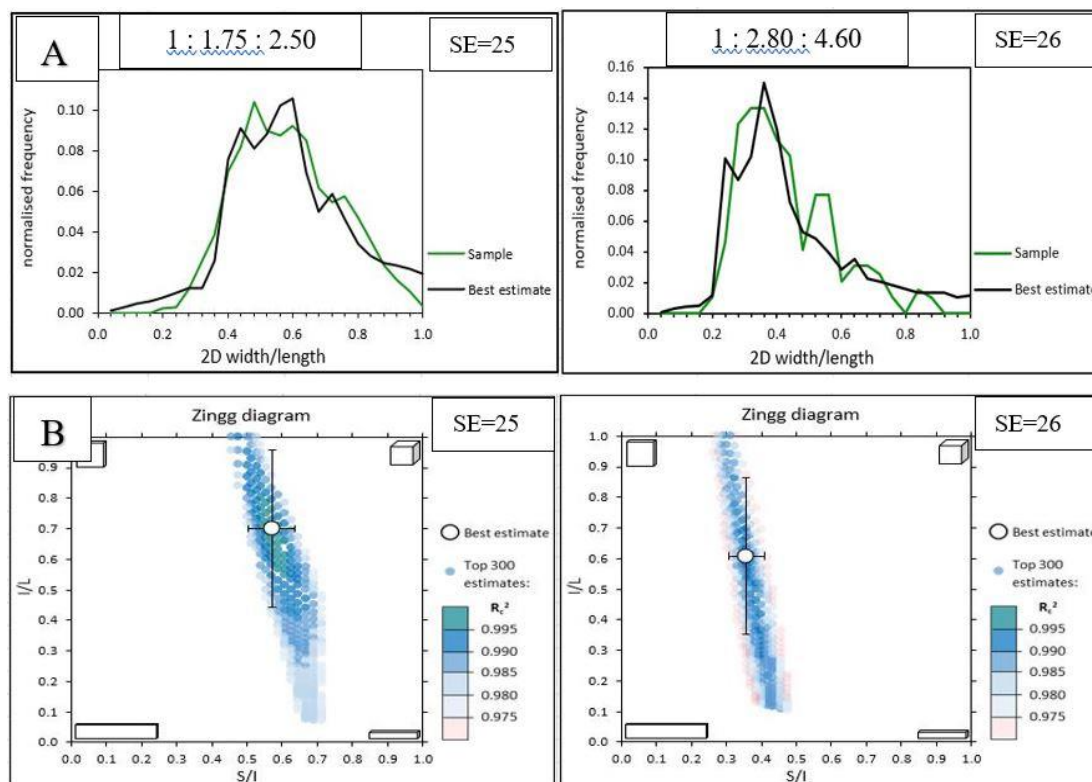
شکل ۶. A: تعیین شدت دگرسانی بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 و B: تعیین ساختار بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار $\text{Al}+\text{Si}$ در مقابل $\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$

Fig. 6. A: Determining the intensity of alteration of plagioclase crystals of the Seridune monzonite intrusive body in the $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 diagram, and B: Determining the structure of plagioclase crystals of the Seridune monzonite intrusive massif in the $\text{Al}+\text{Si}$ versus $\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ diagram

شکل بلور

شکل بلورها، توسط شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تبلور ماگما کنترل می‌شود. بر این اساس، بررسی دقیق شکل بلور می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از شرایط حاکم بر محیط تبلور ارائه دهد. نمودار زینگ بر اساس نسبت ابعاد بلورها نقش مهمی در تعیین شکل بلورها دارد. در این نمودار، بلورها به دسته‌های هم‌بعد، منشوری، تخته‌ای و تیغه‌ای تقسیم می‌شوند. شکل‌های پیچیده‌ای مانند اسفرولیت‌ها، دندریت‌ها و بلورهای دم‌چلچله‌ای به دلیل ساختار پیچیده و عدم امکان اندازه‌گیری دقیق، در این طبقه‌بندی قرار نمی‌گیرند. به طور معمول، شکل بلورها متناسب با محیط رشد و اندازه بلورها تغییر می‌کند (Kostov and Kostov, 1999). شکل بلورهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های پلوتونیک مانند آنورتوزیت، گابرو، دیوریت و گرانودیوریت، تابعی از ترکیب مذاب و شرایط تبلور است (Higgins, 1991). بلورهای پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی مورد بررسی به شکل‌های تیغه‌ای و

تخته‌ای هستند (شکل ۷-B). این تنوع در شکل بلورهای پلاژیوکلاز نشان‌دهنده تغییر شرایط ترمودینامیکی محیط تبلور است. بلورهای تخته‌ای در فروچالیدگی بالا و نرخ رشد بیشتر لیه‌های صفحه‌ای نسبت به سطوح جانبی بلور شکل گرفته‌اند (Higgins, 2006). افزایش فروچالیدگی با تغییر شدید پتانسیل شیمیایی محیط تبلور به کاهش نرخ انتشار مواد اولیه به سمت بلور منجر می‌شود. از این رو، وجه بلورشناسی (۰۱۰) پلاژیوکلاز، نسبت به سایر وجوه، واکنش‌پذیری کمتری نسبت به تغییرات پتانسیل شیمیایی سطحی داشته و به تشکیل بلورهای تخته‌ای منجر می‌شود (Higgins, 2006). در مقابل، کاهش فروچالیدگی ناشی از آزادشدن گرمای نهان تبلور به کاهش گرادیان شیمیایی و افزایش سرعت انتشار مواد اولیه منجر می‌شود. از این رو، کاهش نرخ رشد ترجیحی لیه‌ها به تشکیل بلورهای کشیده از جمله تیغه‌ای منجر شده است.



شکل ۷. A. هیستوگرام‌های فراوانی در برابر نسبت 2D Width/Length نمونه‌های اندازه‌گیری شده از توده مونزونیتی سریدون (خط سبز)، به همراه بهترین برازش که توسط نرم‌افزار Shapecalc رسم شده (خط سیاه) و همچنین نسبت‌های ابعادی پیشنهادی، ارائه شده‌اند، B: شکل بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار زینگ با استفاده از برنامه Shapecalc ارائه شده توسط منگلر و همکاران (Mangler et al., 2022)

Fig. 7. A: Frequency versus 2D Width/Length histograms of the measured samples from the Seridune Monzonite (green line) are presented, along with the best-fit shape drawn by the Shapecalc software (black line) and the proposed aspect ratios, B: Shape of plagioclase crystals in the Seridune Monzonite, represented in the Zingg diagram using the Shapecalc program as provided by Mangler et al. (2022)

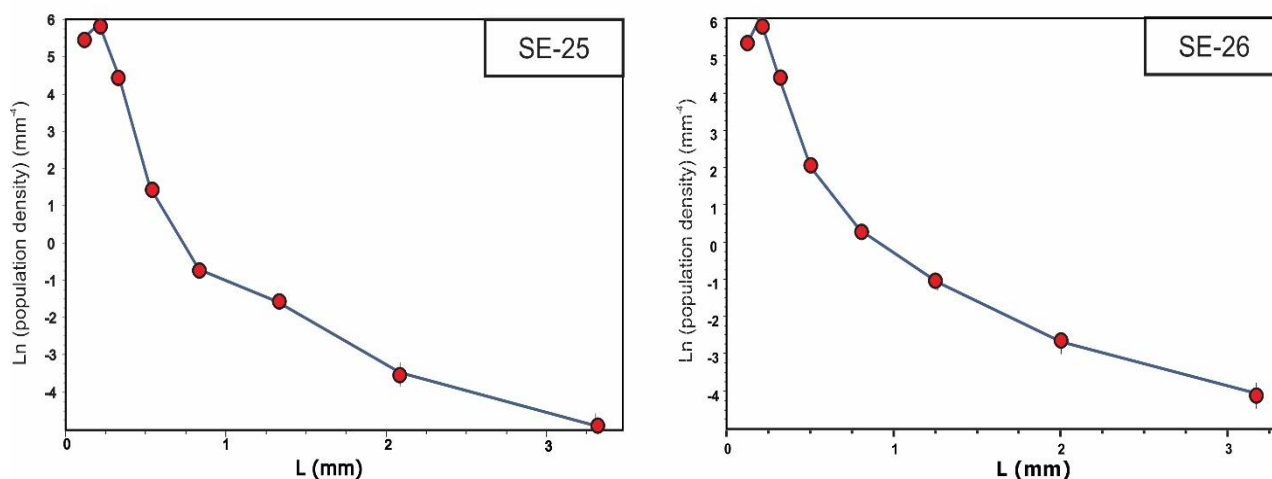
پراکندگی اندازه بلور

(et al., 2021). نمودارهای نیمه لگاریتمی توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون (شکل ۸)، از روندی غیر خطی برخوردارند که بیانگر تبلور چند مرحله‌ای ماگمای سازنده است. بافت پورفیریتیک با زمینه میکروولیتی و شواهد بافتی دیگر از جمله منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی تبلور چندمرحله‌ای ماگما را تأیید می‌کند. بلورهای درشت پلاژیوکلاز در مراحل اولیه تبلور در اعماق زیاد تشکیل شده‌اند و بیانگر تبلور اولیه ماگما در محفظه ماگمایی عمیق هستند. در مقابل، زمینه میکروولیتی مشاهده شده می‌تواند ناشی از تبلور طی

نمودارهای پراکندگی اندازه بلور، بیانگر حقایقی از فرایندهای سینتیکی تبلور هستند؛ به طوری که، روند خطی این نمودارها بیانگر تبلور پیوسته و پایدار سامانه ماگمایی است (Higgins and Roberge, 2007). در این شرایط، تشکیل سنگ طی یک فرایند تبلور ماگمایی ساده همراه با کاهش تدریجی دمای مذاب رخ می‌دهد (Higgins, 2016). انحنای شکستگی در نمودارهای CSD، بیانگر عملکرد فرایندهای ماگمایی متنوع و پیچیدگی روند تبلور است (Kamaci and Altunkaynak, 2019; Boraiaha)

(سمت راست نمودار)، تقعری رو به پایین نشان می دهند. این الگو در سامانه‌های ماگمایی نزدیک به تعادل مانند توده‌های ماگمای سیلیسی حجیم متداول است و بر فرایند درشت‌شدگی بافتی دلالت دارد (Bindeman, 2003; Inanli and Huff, 2009; Yang, 2012). این فرایند زمانی رخ می‌دهد که بلورها برای مدت طولانی در دمای نزدیک به دمای لیکوئیدوس قرار گیرند. در این شرایط، نرخ هسته‌زایی صفر است؛ اما نرخ رشد برای بلورهای بزرگ‌تر از اندازه بحرانی بالاست. این الزاماً به معنای ثابت بودن دما نیست، بلکه بیانگر فروچائیدگی پایین و دمای بالاتر از دمای انجماد است. درشت‌شدگی بافتی بدون هرگونه تغییر در ترکیب کلی سنگ بر توزیع اندازه بلورها مؤثر است. بنابراین فقط با تحلیل‌های دقیق بافت‌شناسی قابل شناسایی است (Yang, 2011; Higgins, 2012).

صعود و افزایش فروچائیدگی بلورها بر اثر کاهش فشار یا خروج سیالات باشد (Renjith, 2014; Hamzah et al., 2018). نمودارهای رسم‌شده در بلورهای درشت (سمت چپ نمودار)، تقعری رو به بالا نشان می‌دهند که بیانگر عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی است (Higgins, 1996; Brugger and Hammer, 2010). منطقه‌بندی نوسانی، بافت‌های پوئی‌کلپتیک و غربالی (Tsuchiyama, 1985; Renjith, 2014) مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی و تغییرات فیزیکوشیمیایی طی تبلور ماگما را تأیید می‌کند. تزریق ماگمای جدید و اختلاط ماگما باعث تبلور تدریجی و طولانی مدت بلورها در مخزن عمیق شده است (Gualda et al., 2004; Pamukcu et al., 2012; Higgins, 2016; Seitz et al., 2024). شرایط پایدار و نرخ سردشدن آهسته در این مخزن، فرصت کافی را برای رشد بلورها فراهم کرده است. نمودارها، در بلورهای کوچک‌تر



شکل ۸. نمودار نیمه لگاریتمی چگالی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون

Fig. 8. Semi-Logarithmic diagrams of the population density of plagioclase crystals in the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit

قرار می‌دهد. از این‌رو، در منطقه مورد بررسی، تزریق ماگمای جدید یا وقوع اختلاط ماگمایی باعث افزایش نرخ هسته‌زایی و افزایش چگالی جمعیتی (تعداد بلور در واحد حجم) شده است. در

اندازه و فراوانی بلورها وابسته به سرعت هسته‌زایی و نرخ رشد در محیط ماگمایی است (Kretz, 1974; Hartmeier et al., 2024). هر تغییر در آنها، الگوی توزیع اندازه بلورها را تحت‌تأثیر

آورده است (Annen et al., 2005; Chiaradia and Caricchi, 2017). پایداری این شرایط، ضمن تسهیل رشد بلورهای درشت (درشت‌شدگی)، بستری مناسب برای فعالیت گرمایی و آزادسازی حجم گسترده‌ای از آب و مس به سطوح بالایی پوسته ایجاد کرده است (Chelle-Michou et al., 2017; Chiaradia and Caricchi, 2017; Park et al., 2021). حضور کانی‌های سولفیدی مس مانند پیریت، کالکوپیریت در کنار فراوانی انیدریت - که شاخصی برای شرایط اکسیدان و محتوی بالای گوگرد در ماگماست - نشان‌دهنده پتانسیل این سامانه در تمرکز مواد معدنی است (Pallister et al., 1996; Kress, 1997).

ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها نظیر وجود بافت غربالی و منطقه‌بندی نوسانی همراه با نتایج حاصل از پراکندگی اندازه بلور و شیمی کانی در بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی، تکامل سنگ‌ها در یک سامانه ماگمایی باز و تحت تأثیر عملکرد فرایندهای تفریق بلوری و تزریق‌های مکرر ماگمای مافیک را تأیید می‌کند (Cao et al., 2022). مذاب‌های فلسیک حلالیت کمی برای گوگرد داشته و محتوای فلزها در آنها محدود است، بنابراین تزریق ماگمای مافیک می‌تواند نقش حیاتی در تأمین مواد معدنی ایفا کند. مذاب مافیک به دلیل حلالیت بالای گوگرد، ظرفیت زیادی برای انتقال گوگرد و فلزها از گوشته به مخزن ماگمایی دارد و تزریق حتی مقدار نسبتاً کمی از آن می‌تواند برای توجیه ذخیره گوگرد و فلز یک کانسار عظیم کافی باشد (Hattori et al., 2001).

بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی در نمودار $Ca+Na+K$ در مقابل $Si+Al$ ، روندی بینابین بردارهای $AlAl_3SiO_8$ و $[Si_4O_8]$ نشان می‌دهند (شکل ۶-B) که این روند، مشابه با روند پلاژیوکلازهای مرتبط با سامانه‌های ماگمایی کانه‌زا و مذاب‌های پورفیری آبدار است (Williamson et al., 2016). همچنین شاخص Al^* ، بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی، اغلب برابر با یک و یا اندکی کمتر از آن است و فقط تعداد

مقابل، در مراحل پایانی انجماد، کاهش نرخ هسته‌زایی با افت قابل توجه چگالی جمعیتی همراه بوده که بیانگر کاهش فعالیت تبلور و نزدیک شدن سامانه به تعادل حرارتی است. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در سامانه‌های ماگمایی، سرعت سرد شدن به طور مستقیم با نرخ رشد بلورهای پلاژیوکلاز مرتبط است. سرعت رشد 10^{-9} mm/s تا 10^{-11} mm/s متناسب با بازه‌های زمانی مختلف سرد شدن ماگما در توده‌های نفوذی است (Cashman, 1993). نرخ رشد 10^{-10} mm/s برای توده‌های آذرین نفوذی کم عمق تأیید شده است (Garrido et al., 2001; Cheng and Zeng, 2013). از این رو، با احتساب نرخ رشد 10^{-10} در محاسبه‌ها (Cashman, 1993)، زمان اقامت کمتر از ۱۰۰۰ سال برای بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی مورد بررسی به دست آمد که این مسئله می‌تواند بیانگر صعود نسبتاً سریع ماگما و استقرار آن در سطوح کم عمق تر باشد که از ویژگی‌های بارز سامانه‌های پورفیری کانه‌زاست.

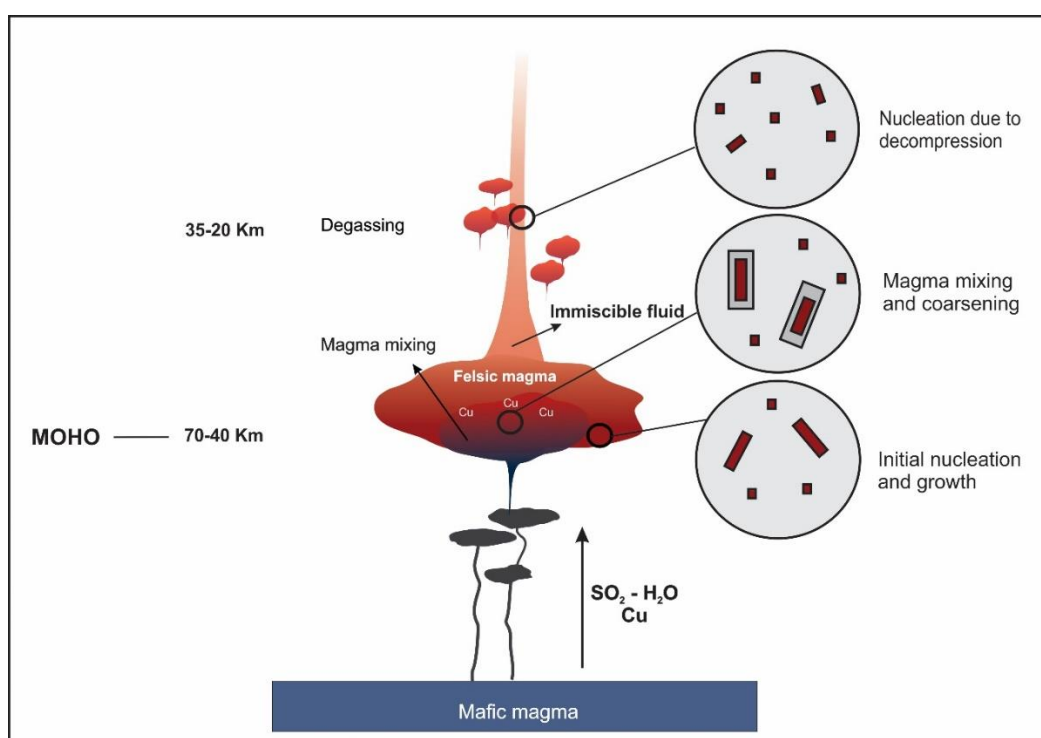
روند تکاملی و کانه‌زایی ماگمای سازنده توده مونزونیتی کانسار سریدون

سامانه‌های پورفیری کانه‌زا اغلب با جای‌گیری سنگ‌های نفوذی آبدار و اکسیدان در حاشیه‌های فعال قاره‌ای همراه هستند (Park et al., 2021). بررسی‌های سنگ‌نگاری، تحلیل کمی CSD و پروفیل‌های ترکیبی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون، بیانگر یک روند تکاملی چندمرحله‌ای در سطوح مختلف پوسته است. تغذیه مجدد، تخلیه و فرایندهای تفریق مکرر ماگما در اعماق عمیق تا میانی (۷۰ تا ۳۰ کیلومتر)، می‌تواند به طور مؤثری محتوای آب و فوگاسیته اکسیژن ماگمای در حال تکامل را افزایش دهد؛ زیرا H_2O و Fe^{+3} در طول این فرایندها به صورت ناسازگار عمل می‌کنند (Lee et al., 2014). از این رو، در منطقه مورد مطالعه، استقرار ماگما در مخازن ماگمایی در سطوح زیرین تا میانی پوسته، شرایط ایده‌آلی را برای تولید مقادیر بالایی از ماگمای اکسیدان و غنی از آب در یک بازه زمانی قابل توجه فراهم

آن افزایش یافته و در نتیجه جدایش سیالات غنی از آب صورت می گیرد. در طول این صعود ماگمایی، فلزهای کانسار ساز به ویژه مس با تمایل شدیدی که به فاز سیال دارند، از مذاب سیلیکاتی به فاز سیال منتقل می شوند. در این مدل، باروری فلزی اولیه در مخزن عمیق، نقش تعیین کننده ای در ذخیره فلزی سیالات نهایی ایفا می کند. در ادامه، کانه زایی در منطقه در بخش های بالایی و سقف توده های نفوذی نیمه عمیق متمرکز می شود (Sillitoe, 2010; Park et al., 2021). به نظر می رسد انتقال ماگما در اعماق مختلف پوسته و عملکرد فرایندهای اختلاط و درشت شدگی بافت، نقش مهمی در تکامل و محتوای فلزی توده نفوذی مورد بررسی داشته است. از این رو، توده مونزونیتی سریدون در کنار توده نفوذی اصلی سریدون پورفیری به عنوان توده ای فرعی، بخشی از یک سامانه ماگمایی بارور است (شکل ۹).

محدودی از داده ها مقادیر بالاتر از یک نشان می دهند (شکل ۳-B). این مسئله می تواند بیانگر شرایط ماگمایی مستعد کانه زایی باشد؛ هر چند خود توده مونزونیتی به عنوان فاز اصلی کانه زا در منطقه سریدون معرفی نمی شود. علاوه بر آن، اقامت قابل توجه ماگما و عدم افت حرارتی ناشی از این تزریق ها، علاوه بر ایجاد نوسان های ترکیبی، با پایین نگه داشتن میزان فروچائیدگی، می تواند شرایط را برای رشد درشت بلورها فراهم کند که در مقیاس سنگ نگاری، با حضور بافت گلو مرو پورفیری و خوشه های کانیایی در نمونه های مورد بررسی مشخص است (Higgins, 1999; Higgins, 2011).

در سامانه ماگمایی سریدون، ماگمایی که از مخزن پوسته زیرین به سمت سطوح کم عمق تر صعود کرده است، تحت تأثیر کاهش فشار و تبلور کانی های بدون آب مانند پلاژیوکلاز، فشار فاز سیال



شکل ۹. مدل شماتیک روند تکامل ماگمای اولیه توده مونزونیتی سریدون. این مدل الزاماً نشان دهنده مقیاس واقعی عمق نیست.

Fig. 9. Schematic model for the evolution of the initial magma of the Seridune monzonitic body. This model does not necessarily represent the actual depth scale.

نتیجه گیری

بررسی های سنگ شناسی، شیمی کانی و پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون، بیانگر یک تاریخچه پیچیده تبلور ماگمایی برای این توده است. مشاهده بافت پورفیریتیک با زمینه میکرولیتی در نمونه های مورد بررسی نشان دهنده تبلور چند مرحله ای در اعماق مختلف است. بلورهای درشت پلاژیوکلاز موجود در این توده، در مراحل اولیه تبلور و در عمق زیاد تشکیل شده اند. با انتقال ماگما به اعماق کمتر، شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تغییر کرده و به تشکیل زمینه میکرولیتی و همچنین ایجاد ویژگی های بافتی مانند منطقه بندی نوسانی و بافت غربالی در درشت بلورهای پلاژیوکلاز منجر شده است. ویژگی های بافتی مشاهده شده بیانگر تغییر ترکیب شیمیایی مذاب طی تبلور است. با توجه به بررسی های انجام شده در این پژوهش، این تغییرات احتمالاً طی عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی صورت گرفته است. بافت غربالی و منطقه بندی نوسانی شاهدی بر عملکرد این فرایند در طی تشکیل توده مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون هستند. بر اساس محاسبه های انجام شده نرخ هسته بندی و زمان اقامت ماگما در مرحله نهایی رشد بلورها در توده مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون به ترتیب $\text{mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تا $10^{-12} \times 668$ و 56 تا 63 سال برآورد شد. علاوه بر این، روند نمودارهای نیمه لگاریتمی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز نمونه های مورد بررسی بیانگر آن است که تزریق ماگماهای جدید به محفظه ماگمایی به افزایش نرخ

هسته بندی، افزایش چگالی تراکمی و تشکیل بلورهای کوچک تر منجر شده است؛ در حالی که، در ادامه روند تبلور، عملکرد درشت شدگی به کاهش نرخ هسته زایی همراه با کاهش چگالی تراکمی بافتی منجر شده است که این روند می تواند نشان دهنده کاهش فعالیت تبلور و نزدیک شدن سامانه به تعادل است. در کل، این تغییرهای ترکیبی و شواهد بافتی در پلاژیوکلازهای مورد بررسی، فراتر از یک تفریق ساده بوده و بیانگر عملکرد فرایندهای کاهش فشار همراه با تزریق پالس های ماگمای مافیک در یک سامانه پویاست. این شرایط در کنار حضور آلومینیم اضافی با منشأ اولیه، نشان دهنده ظرفیت بالای سامانه برای آزادسازی سیالات کانسار ساز در مراحل پایانی صعود و جای گیری تلقی می شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان و شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است. از این رو، نویسندگان نهایت سپاس خود را از سازمان های مربوطه اعلام می نمایند. همچنین صمیمانه از سردبیر محترم و داوران گرامی نشریه زمین شناسی اقتصادی برای نظرات سازنده و پیشنهادهای ارزشمندشان که به بهبود این مقاله کمک کرد، تشکر می کنند.

1. CSD
2. EMPA
3. WDS
4. BSE

References

- Abedi, M., Kashani, S.B.M., Norouzi, G.H. and Yousefi, M., 2017. A deposit scale mineral prospectivity analysis: A comparison of various knowledge-driven approaches for porphyry copper targeting in Seridune, Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 128: 127–46. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.028>
- Abedi, M., Torabi, S. and Norouzi, G., 2013. Application of fuzzy AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: Seridune copper deposit. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 54(2): 145–164. <https://doi.org/10.4430/bgta0085>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Al'meev, R. and Ariskin, A., 1996. Mineral-melt equilibria in a hydrous basaltic system: computer modeling. *Geochemistry International*, 34(7): 563–573. Retrieved March 10, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/281130750_MineralMelt_Equilibria_in_a_Hydrous_Basaltic_System_Computer_Modeling
- Annen, C., Blundy J. and Sparks R., 2005. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, 47 (3): 505–539. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi084>
- Ariskin, A.A., Frenkel, M.Y., Barmina, G.S. and Nielsen, R.L., 1993. Comagmat: a Fortran program to model magma differentiation processes. *Computers and Geosciences*, 19(8): 1155–1170. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6)
- Armstrong, J.T., 1988. Quantitative analysis of silicate and oxide materials: comparison of Monte Carlo, ZAF, and phi-rho-z procedures. In *Microbeam Analysis — 1988*, San Francisco Press, San Francisco, CA, pp. 239–245.
- Babazadeh, S., D'Antonio, M., Raeisi D., Furman, T., Santosh, M., Di Renzo, V., Klotzli, U., Choi, S.H., Ghalamghash, J., Cottle, J.M. and Plain, R.M., 2024. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence for Cenozoic partial melting of mantle beneath Natanz, Central Iran. *Lithos*, 468–469: 107489. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107489>
- Bamorovat, M., Dargahi, S., Arvin, M., Shaker, A. and Aminzadeh, M., 2024. Petrography, geochemistry, and tectonic setting of intrusive bodies of the Seridune deposit, northeast of Sarcheshmeh mine, Kerman Province, with an emphasis on Seridune porphyry intrusive body. *Petrological Journal*, 15(2): 79–104. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.141595.1334>
- Barzegar, H., 2007. Geology, petrology and geochemical characteristics of alteration zones within the Seridune prospect, Kerman, Iran. Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 161 pp.
- Bell, S.K., Hartley, M.E., Joy, K.H. and Pernet-Fisher, J.F., 2019. Crystal Size Distribution Analysis of Apollo 15 Mare Basalts: New Methods and Some Recommendations. 50th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA. Retrieved March 10, 2025 from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019LPI....50.1789B/abstract>
- Bindeman, I.N., 2003. Crystal sizes in evolving silicic magma chambers. *Geology*, 31(4): 367–370. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0367:CSIESM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0367:CSIESM>2.0.CO;2)
- Blundy, J. and Cashman, K., 2008. Petrologic reconstruction of magmatic system variables and processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 179–239. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.6>
- Boraiaha, C.K., Ugarkar, A.G., Padhi, J.K., Chandan, R. and Kallapur, M.V., 2021. Genesis of the Late Archean granitoids of the northern part of the Dharwar foreland (Dharwar Craton), south India—Insights from field, crystal size distribution, thermobarometry, microgeochemical and bulk-rock geochemical studies. *Geochemistry*, 81(1): 125688. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125688>
- Brown, J.R., Buisman, I., Castellanos Melendez, M.P., Dikaung, J.B., Steenssens, L.D., Edmonds, M., Ellis, B.s., Hartley, M.E., Itikarai, I., Mulina, K., Neave, D.A., Nicoli, G., Salem, L.C., Vukmanovic, Z. and McCormick Kilbride, D.A., 2024. Petrographic and geochemical evidence for a complex magmatic plumbing system beneath Bagana volcano, Papua New Guinea. *Journal of*

- Petrology, 65(7): egae065.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egae065>
- Browne, B.L., Eichelberger, J.C., Patino, L.C., Vogel, T.A., Uto, K. and Hoshizumi, H., 2006. Magma mingling as indicated by texture and Sr/Ba ratios of plagioclase phenocrysts from Unzen volcano, SW Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1–2): 103–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.09.022>
- Brugger, C.R. and Hammer, J.E., 2010. Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3–4): 246–254.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.046>
- Cao, K., Yang, Z.M., White, N.C. and Hou, Z.Q., 2022. Generation of the giant porphyry Cu-Au deposit by repeated recharge of mafic magmas at Pulang in eastern Tibet. *Economic Geology*, 117(1): 57–90.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.4860>
- Cashman, K.V., 1993. Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 126–142.
<https://doi.org/10.1007/BF00320836>
- Cashman, K.V. and Marsh, B.D., 1998. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3): 292–305.
<https://doi.org/10.1007/BF00375363>
- Chantler, C.T., Olsen, K., Dragoset, R.A., Kishore, A.R., Kotochigova, S.A., and Zucker, D.S., 2005. X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering Tables (version 2.1). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Retrieved March 10, 2025 from <http://physics.nist.gov/ffast>
- Chelle-Michou, C., Rottier, B., Caricchi, L. and Simpson, G., 2017. Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits. *Scientific Reports*, 7: 40566.
<https://doi.org/10.1038/srep40566>
- Cheng, L. and Zeng, L., 2013. Nature of subvolcanic magma chambers in Emeishan province, China: evidence from quantitative textural analysis of plagioclase megacrysts in the giant plagioclase basalts. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, Abstract Vol., pp. 79. Retrieved June 09, 2026 from https://kazan.or.jp/iavcei2013/iavcei_hp/PDF/3P1_1B-O17.pdf
- Chiaradia, M. and Caricchi L., 2017. Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowment. *Scientific Reports* 7: 44523.
<https://doi.org/10.1038/srep44523>
- Deb, T. and Bhattacharyya, T., 2018. Interaction between felsic granitoids and mafic dykes in Bundelkhand Craton: A field, petrographic and crystal size distribution study. *Journal of Earth System Science*, 127: 102.
<https://doi.org/10.1007/s12040-018-1003-7>
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 2013. An introduction to the rock-forming minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, Middlesex, UK, 498 pp.
<https://doi.org/10.1180/DHZ>
- Ellis, B.S., Wolff, J.A., Szymanowski, D., Forni, F., Cortes-Calderon, E.A. and Bachmann, O., 2023. Cumulate recycling in igneous systems: the volcanic record. *Lithos*, 456–457: 107284.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107284>
- Garrido, C.J., Kelemen, P.B. and Hirth, G., 2001. Variation of cooling rate with depth in lower crust formed at an oceanic spreading ridge: Plagioclase crystal size distributions in gabbros from the Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(10).
<https://doi.org/10.1029/2000GC000136>
- Ghorbani, M., 2013. The economic geology of Iran: Mineral deposits and natural resources. Springer Dordrecht. 572 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0>
- Gualda, G.A., Cook, D.L., Chopra, R., Qin, L., Anderson, Jr, A.T. and Rivers, M., 2004. Rivers M. Fragmentation, nucleation and migration of crystals and bubbles in the Bishop Tuff rhyolitic magma. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1–2): 375–390.
<https://doi.org/10.1017/S0263593300001139>
- Guo, X. and Chen, N., 2025. Hornblende and Plagioclase Micro-Texture and Compositions: Evidence for Magma Mixing in High-Mg Adakitic Pluton, North China Craton. *Minerals*. 15(6): 604. <https://doi.org/10.3390/min15060604>

- Hamzah, W., Kurniawan, I., Abdurrachman, M., Sucipta, I. and Suparka, M., 2018. Textural analysis and crystal size distribution of plagioclase from Ciremai's a'a lava: Interpretation magmatic processes and crystallization time. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, V. 212. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012039>
- Hartmeier, P., Lanari, P., Forshaw, J.B. and Markmann, T.A., 2024. Tracking garnet dissolution kinetics in 3D using deep learning grain shape classification. *Journal of Petrology*, 65(3): egae005. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae005>
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province). Unpublished Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, 204 pp.
- Hattori, K.H. and Keith, J.D., 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 36 (8): 799–806. <https://doi.org/10.1007/s001260100209>
- Higgins, M.D., 1991. The origin of laminated and massive anorthosite, Sept Iles layered intrusion, Quebec, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106: 340–354. <https://doi.org/10.1007/BF00324562>
- Higgins, M.D., 1996. Crystal size distributions and other quantitative textural measurements in lavas and tuff from Egmont volcano (Mt. Taranaki), New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 58(2): 194–204. <https://doi.org/10.1007/s004450050135>
- Higgins, M.D., 1999. Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: a crystal size distribution (CSD) study of microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California. *Geological Society, London, Special Publications*, 168: 207–219. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.168.01.14>
- Higgins, M.D., 2000. Measurement of crystal size distributions. *American Mineralogist*, 85(9): 1105–1016. <https://doi.org/10.2138/am-2000-8-901>
- Higgins, M.D., 2006. Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press. Canada, 260 pp. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511535574.009>
- Higgins, M.D., 2011. Textural coarsening in igneous rocks. *International Geology Review*, 53(3–4): 354–376. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.496177>
- Higgins, M.D., 2016. Quantitative investigation of felsic rock textures using cathodoluminescence images and other techniques. *Lithos*, 277: 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.05.006>
- Higgins, M.D. and Roberge, J., 2007. Three magmatic components in the 1973 eruption of Eldfell volcano, Iceland: Evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161(3): 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.12.002>
- Higgins, M.D., Voos, S. and Vander Auwera J., 2015. Magmatic processes under Quizapu volcano, Chile, identified from geochemical and textural studies. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170: 51. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1209-5>
- Housh, T.B. and Luhr, J.F., 1991. Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems. *American Mineralogist*, 76(3–4): 477–492. Retrieved March 10, 2025 from https://msaweb.org/AmMin/AM76/AM76_477.pdf
- Inanli, F.O. and Huff, W.D., 2009. Quartz crystal size distribution of the Ordovician Millbrig K-bentonite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3–4): 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.007>
- Johannes, W., Koepke, J. and Behrens, H., 1994. Partial melting reactions of plagioclases and plagioclase-bearing systems. In: I. Parsons (Editor), *Feldspars and their Reactions*. Springer, Dordrecht, pp. 161–194. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1106-5_4
- Kamaci, Ö. and Altunkaynak, Ş., 2019. Magma chamber processes and dynamics beneath northwestern Anatolia: Insights from mineral chemistry and crystal size distributions (CSDs) of the Kepsut volcanic complex (NW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103889. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103889>
- Kan Iran Exploration Company, 2007. Geological

- map of Seridune area, NICICO. scale 1:1500.
- Kazemi Mehrnia, A., Rasa, I., Alirezaei, S., Asadi, H. and Karami, J., 2010. Alteration mapping at saridoon porphyry copper prospect using short wave infrared spectrometry (PIMA), ASTER satellite image and XRD. 20(79): 3–12. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.54987>
- Klein, J., Mueller, S.P. and Castro, J.M., 2017. The influence of crystal size distributions on the rheology of magmas: New insights from analog experiments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 4055–4073. <https://doi.org/10.1002/2017GC007114>
- Kostov, I. and Kostov, R.I., 1999. Crystal habits of minerals. Pensoft Publishers and Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, Sofia, 415 pp.
- Kress, V., 1997. Magma mixing as a source for Pinatubo sulphur. *Nature*, 389(6651): 591–593. <https://doi.org/10.1038/39299>
- Kretz, R., 1974., Some models for the rate of crystallization of garnet in metamorphic rocks. *Lithos*, 7(3): 123–131. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(74\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(74)90025-5)
- Kumar, A.A. and Ashok, C., 2024. Geochemistry and mineral chemistry of the armoor granitoids, eastern dharwar craton: implications for the redox conditions and tectono-magmatic environment. *Acta Geochimica*. 43(1): 110–133. <https://doi.org/10.1007/s11631-023-00647-1>
- Lee, C.T.A., Lee, T.C. and Wu, C.T., 2014. Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating, and fractionating (REFC) magma chambers: Implications for differentiation of arc magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.009>
- Lofgren, G., 1980. Experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts. In: R.B. Hargraves, (Editor), *Physics of Magmatic Processes*. Princeton University Press, Princeton, pp. 487–551. <https://doi.org/10.1515/9781400854493.487>
- Mangler, M.F., Humphreys, M.C., Wadsworth, F.B., Iveson, A.A. and Higgins, M.D., 2022. Variation of plagioclase shape with size in intermediate magmas: a window into incipient plagioclase crystallisation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(6): 64. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01922-9>
- Marsh, B.D., 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization: I. Theory. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 277–291. <https://doi.org/10.1007/BF00375362>
- Marsh, B.D., 1998. On the Interpretation of Crystal Size Distributions in Magmatic Systems. *Journal of Petrology*, 39(4): 553–599. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.4.553>
- McInnes, B., Evans, N., Belousova, E. and Griffin, W., 2003. Porphyry copper deposits of the Kerman belt, Iran: timing of mineralization and exhumation processes. *Science Research Report*, Australia CSIRO, 41 pp.
- Moy, A., Fournelle, J., Nachlas, W., Dungan, M., Locock, A., Bullock, E., Bullock, E., Donovan, J., Cathey, H., Allaz, J. and Von der Handt, A., 2023. On the Importance of Including all elements in the EPMA matrix correction. *Microscopy and Microanalysis*, 29(1): 855–856. <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad067.424>
- Nakamura, M. and Shimakita, S., 1998. Dissolution origin and syn-entrapment compositional change of melt inclusion in plagioclase. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1–4): 119–133. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00144-7)
- Namur, O., Montalbano, S., Bolle, O. and Vander Auwera, J., 2020. Petrology of the April 2015 eruption of Calbuco volcano, southern Chile. *Journal of Petrology* 61(8): egaa084. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa084>
- Nelson, S.T. and Montana, A., 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, 77(11–12): 1242–1249. Retrieved March 10, 2025 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/77/11-12/1242/42641/Sieve-textured-plagioclase-in-volcanic-rocks?redirectedFrom=fulltext>
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Ngonge, E.D., Archanjo, C.J. and Hollanda M.H.B.M., 2013. Plagioclase crystal size distribution in some tholeiitic mafic dykes in Cabo Frio–Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 255: 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.009>

- Ou, O., Qian S.P., Hoernle, K., Carvalho, B.B., Zi, F., Wang, K., Zhang, L., Liu, J.Y. and Liao, J., 2024. Magmatic processes within the plumbing system of the ultraslow-spreading southwest Indian ridge: constraints from olivine, plagioclase and melt inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(3): 20. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02098-0>
- Pallister, J.S., Hoblitt, R.P., Meeker, G.P., Knight, R.J. and Siems, D.F., 1996. Magma Mixing at Mount Pinatubo: Petrographic and Chemical Evidence from the 1991 Deposits. In: C.G. Newhall and R.S. Punongbayan, (Editors), *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, and University of Washington, Seattle, 1126 pp.
- Pamukcu, A.S., Gualda, G.A. and Anderson, J.R., 2012. Crystallization stages of the Bishop Tuff magma body recorded in crystal textures in pumice clasts. *Journal of Petrology*, 53(3): 589–609. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr072>
- Panjasawatwong, Y., Danyushevsky, L.V., Crawford, A.J. and Harris, K.L., 1995. An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar: implications for the origin of magmatic high-An plagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118: 420–432. <https://doi.org/10.1007/s004100050024>
- Park, J.W., Campbell, I.H., Chiaradia, M., Hao, H. and Lee, C.T., 2021. Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(8): 542–557. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00182-8>
- Pearce, T., Russell, J. and Wolfson, I., 1987. Laser-interference and Nomarski interference imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. *American Mineralogist*, 72(11–12): 1131–1143. Retrieved June 29, 2026 from http://www.minsocam.org/ammin/AM72/AM72_1131.pdf
- Perugini, D., Poli, G. and Valentini, L., 2005. Strange attractors in plagioclase oscillatory zoning: petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149: 482–497. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0667-6>
- Pietranik, A., Koepke, J. and Puziewicz, J., 2006. Crystallization and resorption in plutonic plagioclase: implications on the evolution of granodiorite magma (Gęsiniec granodiorite, Strzelin Crystalline Massif, SW Poland). *Lithos*, 86(3–4): 260–280. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.05.008>
- Renjith, M., 2014. Micro-textures in plagioclase from 1994–1995 eruption, Barren Island Volcano: evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geoscience frontiers*, 5(1): 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.03.006>
- Resmini, R.G. and Marsh, B.D., 1995. Steady-state volcanism, paleoeffusion rates, and magma system volume inferred from plagioclase crystal size distributions in mafic lavas: Dome Mountain, Nevada. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(4): 273–296. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00003-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00003-5)
- Seitz, S., Gualda, G.A. and Harmon, L.J., 2024. On the origin of alkali feldspar megacrysts in granitoids. Part 2: evidence for nucleation and growth under magmatic conditions from crystal size distributions of the Cathedral Peak Granodiorite, California, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(7): 70. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02152-x>
- Shahriari, H., Ranjbar, H., Honarmand, M. and Carranza, E.J.M., 2014. Selection of less biased threshold angles for SAM classification using the real value–area fractal technique. *Resource Geology*, 64(4): 301–315. <https://doi.org/10.1111/rge.12042>
- Sillitoe, R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13: 315–345. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.09>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Singer, B.S., Dungan, M.A. and Layne, G.D., 1995. Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K, and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. *American Mineralogist*, 80(7–8): 776–798. <https://doi.org/10.2138/am-1995-7-819>
- Sisson, T. and Grove, T., 1993. Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline

- differentiation and subduction zone magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143–166.
<https://doi.org/10.1007/BF00283225>
- Slaby, E. and Götze, J., 2004. Feldspar crystallization under magma-mixing conditions shown by cathodoluminescence and geochemical modelling—a case study from the Karkonosze pluton (SW Poland). *Mineralogical Magazine*, 68(4): 561–577.
<https://doi.org/10.1180/0026461046840205>
- Smith, R.K. and Lofgren, G.E., 1983. An analytical and experimental study of zoning in plagioclase. *Lithos*, 16(2): 153–168.
[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(83\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(83)90012-9)
- Tsuchiyama, A., 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(1): 1–16.
<https://doi.org/10.1007/BF01177585>
- Ustunisik, G., Kilinc, A. and Nielsen, R., 2014. New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos*, 200–201: 80–93.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.021>
- Viccaro, M., Giacomoni, P.P., Ferlito, C. and Cristofolini, R., 2010. Dynamics of magma supply at Mt. Etna volcano (Southern Italy) as revealed by textural and compositional features of plagioclase phenocrysts. *Lithos*, 116(1–2): 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.012>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Williamson, B.J., Herrington, R.J. and Morris, A., 2016. Porphyry copper enrichment linked to excess aluminium in plagioclase. *Nature Geoscience*, 9(3): 237–241. Retrieved June 29, 2026 from
<https://www.nature.com/articles/ngeo2651>
- Yang, Z-F., 2012. Combining quantitative textural and geochemical studies to understand the solidification processes of a granite porphyry: Shanggusi, East Qinling, China. *Journal of Petrology*, 53(9): 1807–1835.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egs034>
- Yousefi, F., Lentz, D.R. and Papadopoulou, L., 2024. Plagioclase-hosted Crystallized Melt Inclusions within Hypabyssal Volcanic Rocks of the Torud-Ahmad Abad Magmatic Belt, Iran: Analysis of Origin and Fractionation Processes. *Earth Science Research*, 13(1).
<https://doi.org/10.5539/esr.v13n1p13>
- Zieg, M. and Marsh, B., 2002. Crystal size distributions and scaling laws in the quantification of igneous textures. *Journal of Petrology*, 43(1): 85–101.
<https://doi.org/10.1093/petrology/43.1.85>
- Zingg, Th., 1935. Beitrag zur Schotteranalyse. Unpublish Ph.D. Thesis, Universität Zürich, Switzerland, 140 pp.



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2026.1173



Origin and Genesis of the Color of Variscite in the Koushk Zn-Pb Deposit, Yazd Province: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Fluid Inclusions

Kiamars Hosseini ¹ , Mohammad Yazdi ^{2*} , Hossein Azizi ³

¹ Ph.D. student, Department of Minerals and Groundwater Resources, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Shahid Beheshti University Tehran, Iran

³ Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 12 May 2026

Revised: 22 June 2026

Accepted: 28 June 2026

Keywords

Variscite

Mineralogy

Geochemistry

fluid inclusions

Koushk Zn-Pb Deposit

Central Iran

*Corresponding author

Mohammad Yazdi

✉ m-yazdi@sbu.ac.ir

ABSTRACT

The Koushk Zn-Pb deposit in Central Iran is considered the largest mineral potential for variscite mineralization. Macroscopic and microscopic observations indicated minor variscite mineralization occurring in veinlet-vein form and as disseminations, associated with massive and layered ore zones, as well as extensive mineralization related to zinc- and lead-barren marginal shales, dioritic sills, and late carbonate $\pm$ quartz veinlets. Textural features and chemical characteristics indicated that variscite formed through multi-stage phosphatization of Al-rich shales with minor silica. XRD data reveal variscite and strengite as the dominant phases. Other phosphates such as phosphosiderite, metavariscite, and crandallite were also identified, occurring as intergrowth mixtures with variscite. Color variations in the Koushk variscites are attributed to intergrowth with other phosphates, sulfates, or silicates; electronic transitions; crystal field transitions of chromophore elements; structural defects; and the arrangement of water molecules within the variscite structure. The highest intensity Raman peak observed in the spiderweb variscites occurs at approximately 1033 cm^{-1} , whereas in the simple green variscites and soapy variscites (pale green-blue to white), the strongest peak appears at around 1022 cm^{-1} . Three additional peaks with lower intensities are also present, all corresponding to the symmetric stretching vibrations of the phosphate (PO_4) group in minerals of the variscite-metavariscite group. The REE+Y patterns, LREE enrichment, and negative Ce anomaly indicate low-temperature hydrothermal fluids with a composition approaching seawater. Microthermometric studies of fluid inclusions reveal that fluid mixing and temperature decrease played a significant role in variscite mineralization, with formation temperatures ranging from 110 to 340°C .

How to cite this article

Hosseini, K., Yazdi, Y. and Azizi, H., 2026. Origin and Genesis of the Color of Variscite in the Koushk Zn-Pb Deposit, Yazd Province: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Fluid Inclusions. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 61–103. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1173>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Koushk zinc-lead deposit is the most important variscite mineral mass in Central Iran. Variscite is a relatively common mineral that forms as a result of phosphate-bearing surface solutions reacting with aluminum-rich rocks (Calas et al., 2005). First described in 1837 from a source close to Variscia, the former name of the Vogtland region in northeastern Germany, its chemical formula was determined in 1896 (Willing et al., 2008). Variscite was used in Neolithic jewelry and is found in many archaeological sites (e.g., Ervedosa, Portugal; Pannecé, France; and Sardinia, Italy; see Calas et al., 2005; Querré et al., 2019; Willing et al., 2008). Variscite is a member of the hydrous aluminum phosphate group, $\text{Al}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, while strengite is part of the iron phosphate group, $\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Both are orthorhombic phosphate members of the variscite mineral group, while mansfieldite, scorodite, and yanomamite are the arsenate isostructural members of this group. The general chemical formula of variscite group minerals is $\text{A}(\text{XO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, where $\text{A} = \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{In}$ and $\text{X} = \text{P}, \text{As}$.

Regional Geology

The Koushk Zn–Pb deposit is situated within the upper part of the Lower Cambrian volcano-sedimentary sequences, in the central part of the Zarigan–Chahmir Basin in Central Iran (Fig. 1). Two major stratigraphic sequences have been recognized in the area (Fig. 2): (1) a mineralized sequence comprising the Upper interval of the Lower Cambrian volcano-sedimentary sequences at the base, and (2) an overlying volcano-sedimentary sequence that includes Lower Paleozoic shales, argillaceous limestone, dolomitic units which are hosting Fe-mineralization, as well as the rhyolitic and tuffaceous rocks (Gibbs, 1976). Rhyolitic and dacitic domes are present in the southeastern part of the deposit, adjacent to the mineralized sequence, as well as to the north and northwest of the deposit.

Materials and Methods

In this study, 35 variscite samples were collected from ore-bearing rocks across different geological sections. Petrographic and mineralogical investigations were carried out on 23 thin and polished-thin sections using transmitted and

reflected light microscopy at Shahid Beheshti University, Iran. In addition, 7 samples representing different generations of variscite were analyzed by using scanning electron microscopy (SEM) at Aria Electron Optics Company, Iran. To complement the mineralogical data, one variscite sample was analyzed via XRD at Kansaran Binalud Company, and three variscite samples of varying colors were examined using Raman spectroscopy at Shahid Beheshti University. For geochemical studies, a deep-green variscite sample was analyzed at 10 points using a CAMECA SXFive X-ray Probe Microanalysis (XPMA) (France) at Kansaran Binalud Company, Iran. Furthermore, 6 samples were analyzed by ICP-MS using a PerkinElmer NexION 300 instrument at Zarazma Laboratory, Iran. 10 samples were analyzed by XRF at Tarbiat Modares University of Iran. Petrographic examination and microthermometric studies of fluid inclusions were performed on 2 quartz and calcite samples associated with variscite mineralization in the marginal zone, using a Linkam THMCG 600 heating–freezing stage at the Microthermometry Laboratory of Tarbiat Modares University, Iran.

Results

Macroscopic and microscopic observations indicate that variscite mineralization occurring as veins, veinlets, and disseminated form associated with the massive and stratiform sulfide ore zone, as well as extensive mineralization related to the marginal zone and microdioritic sills. These variscites occur intergrown with strengite and minor amounts of other minerals belonging to the variscite and metavariscite groups. The color variations in these variscites are attributed to intergrowths with other phosphates, sulfates, or silicates, electronic transitions, crystal field transitions in chromophore elements, structural defects, and the arrangement of water molecules within the variscite structure. These factors may lead to significant fluctuations in both the green hues and the apparently low Cr^{3+} content. In the variscites from the Koushk Zn–Pb deposit, the Cr^{3+} content is low compared to that of similar worldwide variscites. However, our samples containing higher amounts of Cr^{3+} exhibit a more intense and deeper green color. The highest Raman spectral peak intensity shows that spiderweb variscite occurs at approximately 1033 cm^{-1} , whereas in the simple green variscites and the soapy

variscites (pale greenish-blue to white), the most intense peak occurs at around 1022 cm^{-1} . In addition, three lower-intensity peaks are present, all of which are attributed to the symmetric stretching vibrations of the phosphate (PO_4) group in minerals of the variscite and meta-variscite groups. The Raman spectra of variscite from the Koushk Zn–Pb deposit and Tajikistan show a remarkable overlap. The ΣREE values in the variscite ore are negligible. The REE+Y pattern, characterized by LREE enrichment and a negative Ce anomaly which is similar to that of seawater. Such evidence may indicate the involvement of low-temperature hydrothermal fluids, which is further supported by microthermometric studies of fluid inclusions, confirming the corresponding temperature range.

Discussion

In the Koushk deposit, aluminum was derived from the weathering of the host rock, whereas phosphate originated from the leaching of ancient sedimentary phosphorites or phosphorites contemporaneous with the carbonate rocks of the Soltanieh Formation, Ediacaran deposits, or evaporitic and phosphatic crustal units in Central Iran by magmatic and hydrothermal fluids related to the intrusion of granitoid bodies (Hosseini and Rajabzadeh, 2022). The interaction of aluminum-rich and phosphate-bearing hydrothermal fluids resulted in variscite mineralization. In the Koushk Zn–Pb deposit, variscite commonly displays a wide range of green hues, including bluish green, olive green, moss green, and pale bluish white. These color variations are not dependent on depth. The color variation in variscite is, in part, attributed to intergrowth with phosphates, silicates, sulfates, and oxides. SEM–BSE, EDS, and XRD studies confirm this interpretation. On the other hand, color variations in

minerals are associated with various mechanisms, such as electronic transitions (Nassau, 1978), crystal field transitions in chromophores (Burns, 1993) such as Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and V, charge transfer between elements (Mattson and Rossman, 1987; Bill and Calas, 1978), as well as color centers caused by structural defects in the crystal lattice and variations in the concentration of Cr^{3+} and V^{4+} (Krambrock et al., 2007). Therefore, the green color of variscite is related not only to the presence of combined structural impurities but also to crystal defects and the arrangement of water molecules within the variscite structure, which has led to the formation of different variscite polymorphs. Furthermore, color variations are attributed to metasomatic replacement processes and the development of zoning within the primary microcrystalline and porous minerals, driven by successive pulses of late-stage fluids (Díaz-Acha et al., 2022). Consequently, the color changes gradually along the veins and nodules. Some variscite samples from Koushk area exhibit a progressive color transition from a gray phosphosiderite core to a pale green unit (consisting of phosphosiderite-dominated mixtures with variscite) and, ultimately, to dark green margins dominated by variscite. The diversity in microscopic textures and ore geochemistry points to multistage mineralization and reflects dissolution–reprecipitation processes controlled by the prevailing physicochemical conditions during formation.

Acknowledgements

The authors appreciate Shahid Beheshti University Research Council that supported this work. The Director General and personal of the Koushk Mine Company are acknowledged for their assistance in the field works.



پیدایش و منشأ رنگ کانی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک (استان یزد): شواهدی از کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال

کیامرث حسینی^۱، محمد یزدی^{۲*}، حسین عزیزی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده منابع معدنی و آب‌های زیرزمینی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران ایران
^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، گروه منابع معدنی و آب‌های زیرزمینی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۳ استاد، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
کانسار کوشک در مرکز ایران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین پتانسیل‌های معدنی کانی واریسکیت به شمار می‌رود. مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی بیانگر کانی‌زایی ناچیز واریسکیت به صورت رگه-رگچه‌ای، انتشاری، مرتبط با زون کانسنگ توده‌ای و لایه‌ای و کانی‌زایی گسترده مرتبط با شیل‌های بدون کانی‌زایی روی و سرب در زون حاشیه‌ای، سیل‌های دیوریتی و همراه رگچه‌های تأخیری کربناتی $\pm$ کوارتز است. بافت‌ها و ویژگی‌های شیمیایی بیانگر تشکیل واریسکیت از طریق فسفاته شدن چند مرحله‌ای شیل‌های غنی از آلومینیم با سیلیس جزئی است. بررسی‌های پراش پرتو ایکس بیانگر وجود فازهای غالب واریسکیت و استرنگیت هستند. فسفات‌های دیگری مانند فسفوسیدریت، متاواریسکیت و کراندالیت نیز شناسایی شدند که به صورت درهم‌رشدی با واریسکیت دیده می‌شود. تغییرات رنگ در واریسکیت‌های کوشک، ناشی از درهم‌رشدی با دیگر فسفات‌ها، سولفات‌ها، یا سیلیکات‌ها، گذارهای الکترونی، گذارهای میدان بلوری در عناصر رنگ‌زا، نقص ساختار بلوری و نحوه آرایش ملکول‌های آب در ساختار واریسکیت است. بیشترین شدت پیک طیف‌های رامان مشاهده شده در واریسکیت‌های تار عنکبوتی در حدود ۱۰۳۳ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است. در واریسکیت‌های سبز ساده و واریسکیت‌های صابونی (سبز-آبی کم‌رنگ تا سفید) بیشترین شدت پیک در حدود ۱۰۲۲ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است و سه پیک با شدت کمتر وجود دارد که همگی به دلیل ارتعاش‌های کششی متقارن گروه فسفات (PO_4)، در مواد معدنی گروه واریسکیت و متاواریسکیت هستند. الگوی REE+Y، غنی‌شدگی LREEs و ناهنجاری منفی Ce، روند دمای پایین سیالات گرمابی تا شبیه آب دریا را پوشش می‌دهند. بررسی ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال بیانگر نقش اختلاط سیالات و کاهش دما و بازه دمایی ۱۱۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد در کانی‌زایی واریسکیت است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷
	واژه‌های کلیدی واریسکیت کانی‌شناسی زمین‌شیمی ریزدماسنجی کانسار کوشک ایران مرکزی
	نویسنده مسئول محمد یزدی m-yazdi@sbu.ac.ir

استناد به این مقاله

حسینی، کیامرث؛ یزدی، محمد و عزیزی، حسین، ۱۴۰۵. پیدایش و منشأ رنگ کانی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک (استان یزد): شواهدی از کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۶۱-۱۰۳. <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1173>

مقدمه

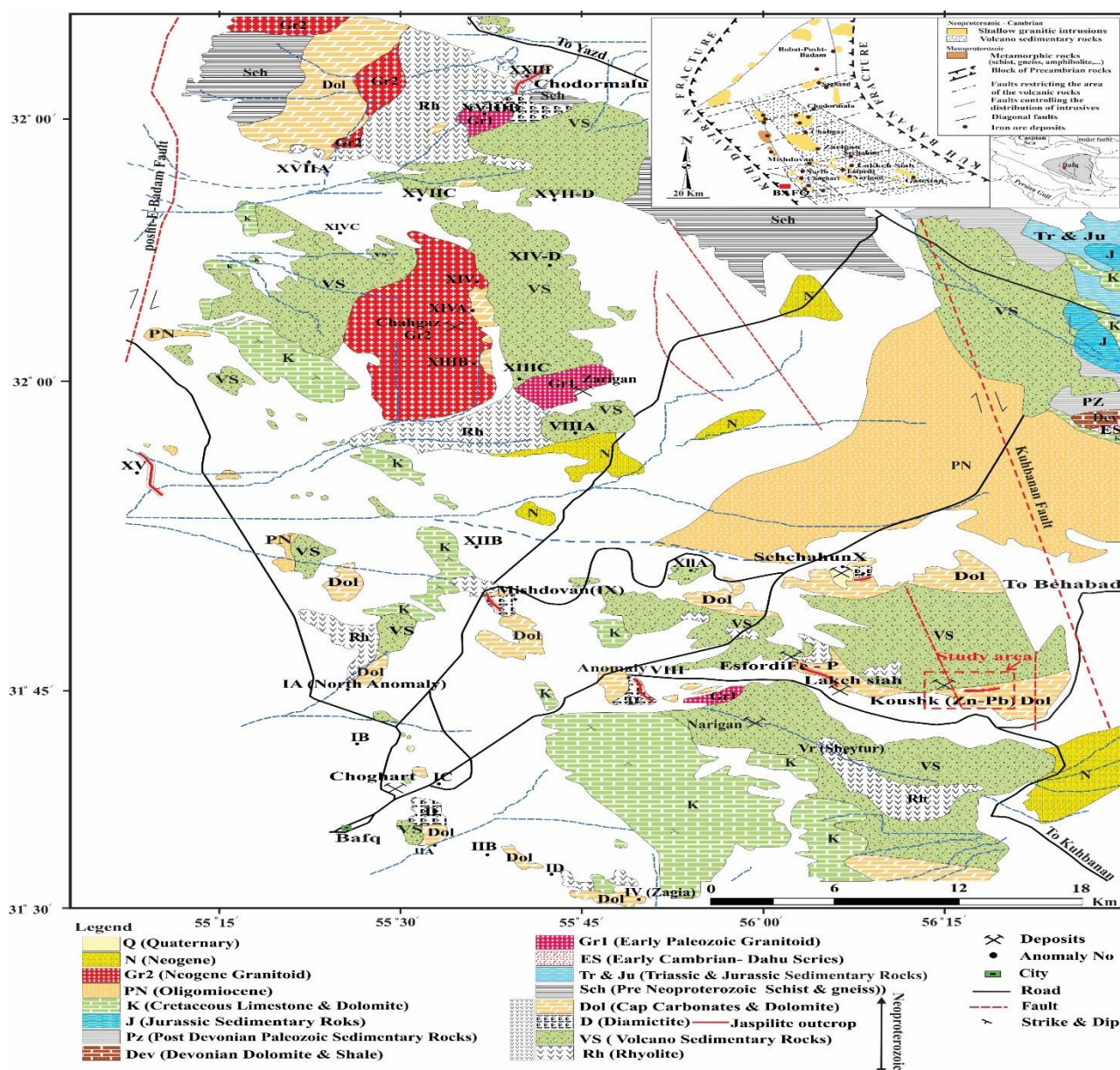
واریسکیت در سال ۱۸۳۷ توسط **بارستو** در کشور آلمان کشف شد. نام‌های دیگری مانند **اماتریس**، **کلر-یوتاهیت** و **یوتاهیت** نیز برای این کانی پیشنهاد شده است. ذخایر واریسکیت در سرتاسر جهان بسیار کمیاب است و تعداد محدود سازندهای زمین‌شناسی حاوی واریسکیت هستند (Dominguez-Bella, 2004; Odriozola and Linares-Catela, 2012). واریسکیت اغلب به عنوان یک ماده معدنی ثانویه به صورت رشته‌ای-شعاعی، شکل‌های توده‌ای، رگه‌ای، انتشاری، گرهک‌مانند و کانکریون‌های ریزبلورین در حفره‌ها و شکاف‌ها تشکیل می‌شود و ممکن است همراه با کوارتز و کلسیت باشد (Calas et al., 2005). دیل (Dill, 2001) در تقسیم‌بندی خود، واریسکیت را از دسته کانی‌های سولفات-فسفات-آلومینیم به شمار آورده است. این کانی در نتیجه واکنش محلول‌های سطحی حاوی فوسفات با سنگ‌های غنی از آلومینیم تشکیل می‌شود (Calas et al., 2005; Ghanei Ardakan, 2024). از طرفی اکسایش سولفیدها در محیط سوپرژن سبب تشکیل یک سیال غنی از اسید سولفوریک شده که در نهایت باعث شست‌وشوی فوسفات‌ها و تشکیل ژپسیت $\text{Al}(\text{OH})_3$ از سنگ میزبان در یک محیط اسیدی و واکنش آنها برای شکل‌گیری واریسکیت شده است (Sherafat et al., 2007). کانسنگ واریسکیت شامل فوسفات‌های هیدراته ارتورمبیک با فرمول کلی $\text{MPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ است که در آن Fe^{3+} ، Cr^{3+} ، V^{3+} و $\text{M} = \text{Al}^{3+}$ است و از واکنش اسید فسفریک با سنگ‌های غنی از آلومینیم تشکیل می‌شود (Larsen, 1942). واریسکیت و استرنگیت (منوکلینیک)، به همراه ایزومورف‌هایشان متاواریسکیت (منوکلینیک) و فسفوسیدریت، رایج‌ترین کانی‌ها در این گروه هستند. واریسکیت سولفات-فسفات آلومینیم آبدار به شمار می‌رود. در اصل فوسفات‌های آهن و آلومینیم با نام **باراندیت**، یک محلول جامد از اعضای نهایی **استرنگیت** و واریسکیت را تشکیل می‌دهند (Slansky, 1986). استرنگیت اغلب در معادن آهن و یا

داخل پگماتیت‌ها یافت می‌شود. کانی واریسکیت به عنوان یک کانی ثانویه و نزدیک سطح، در جایی به وجود می‌آید که کانی‌های رسی و کانی‌های فوسفاته با یکدیگر همراه باشند. این کانی می‌تواند به دیگر کانی‌های فوسفاته تجزیه‌شود. معمول‌ترین کانی حاصل از تجزیه آن، کانی **کراندالیت**، فوسفات آبدار آلومینیم و کلسیم است. کانی واریسکیت به رنگ‌های سبز کم‌رنگ تا سبز پررنگ، آبی روشن، بنفش، نارنجی و به ندرت قرمز قرار دارد و به عنوان یک گوهرسنگ اهمیت خاص و ویژه‌ای دارد که می‌توان با شناخت و بررسی صحیح آن از لحاظ اقتصادی و گوهرشناسی موجب توسعه این گوهرسنگ در صنعت جواهرسازی شد. این گوهرسنگ را می‌توان به شکل دامله (گنبدی) برش داد و در صنعت مجسمه‌سازی و یا در طرح‌های سنگ‌های قیمتی و نیمه‌قیمتی استفاده کرد مانند مهره و آویزه‌هایی که در چندین نقطه از غرب اروپا و ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد دارای واریسکیت بوده‌اند (Sheridan, 2000). اعتقاد بر این است که هم واریسکیت و هم فوسفات‌های بعدی از آب‌های زیرزمینی ته‌نشست می‌شوند؛ در صورتی که آب‌های زیرزمینی فوسفات‌دار در تماس با سنگ‌های آلومینیمی موجب ته‌نشست و تشکیل این کانی می‌شود (Palache et al., 1951). واریسکیت معمولاً با سایر کانی‌های ثانویه مانند آپاتیت، ویولایت و کراندالیت ته‌نشست می‌شوند و به عنوان ماتریکس همراه با سنگ‌های آذرین و دگرگونی وجود دارند (Larsen, 1942). واریسکیت در بسیاری از مناطق جهان یافت می‌شود؛ اما در حال حاضر بزرگ‌ترین معدن در ایالت یوتای آمریکا قرار دارد. سایر منابع اصلی واریسکیت در آلمان، جمهوری چک، اسپانیا، فرانسه، انگلیس، قزاقستان و تاجیکستان است (Litvinenko et al., 2016). در ایران نیز کانسار کوشک به عنوان بزرگ‌ترین پتانسیل معدنی کانی واریسکیت به شمار می‌رود. هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمی به منظور تعیین خاستگاه و خواص رنگ کانی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

نایینی و گرو در غرب قرار گرفته است. این گستره معدنی دربردارنده کانسارهای آهن-آپاتیت-منگنز، سرب-روی و اورانیوم-توریوم-عنصر کمیاب خاکی متعددی است (شکل ۱).

گستره معدنی باقی در بخش جنوبی پهنه زمین‌ساختی کرمان-کاشمر به شکل کمائی محصور بین سامانه‌های گسل‌های کوه‌بنان، کلمرد، ازبک کوه و مهدی‌آباد در شرق و داوران، پشت‌بادام،



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه‌ای ذخایر آهن-فسفر-منگنز در منطقه معدنی باقی (اصلاح شده پس از شرکت ملی فولاد ایران (NISCO, 1980) و هوکریده و همکاران (Huckreide et al., 1962))

Fig. 1. Regional geological map of Fe-P-Mn deposits of Bafq Mining district (BMD) (modified after Huckreide et al., 1962; NISCO, 1980)

پژوهش محسنی و آفتابی (Mohseni and Aftabi, 2015) و آفتابی و همکاران (Aftabi et al., 2021)، مگنتیت در حال تعادل با آب دریاها و کانسارهای جهانی BIFs بوده و در محدوده دمایی ۲۸۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد تشکیل شده است. کانه‌زایی مگنتیت-آپاتیت هم‌زمان با ماگماتیسیم کمان قاره‌ای پروتوتیتس از ۵۴۷ تا ۵۲۵ میلیون سال قبل انجام شده است (Nayebi, et al., 2021). همچنین مقایسه سن سنگ‌های آذرین و کانه‌زایی، ارتباط ژنتیکی کانسارهای اولیه آهن-آپاتیت (۴۹۰-۵۴۳ Ma) را با گابرو، دیوریت، کوارتز دیوریت و گرانیت‌های با منشأ ماگمایی مشترک (۵۴۷-۵۲۵ Ma) نشان می‌دهد (Zolala et al., 2025)؛ آپاتیت‌های تیره و موناژیت‌های ثانویه (۴۴۰ Ma و ۴۳۷ Ma) با نفوذهای سینیتی در اواخر اردوئیسین تا اوایل سیلورین (۴۳۰-۴۵۲) مرتبط هستند. این رویدادها با ماگماتیسیم و رسوب‌گذاری در یک محیط کشتی منطقه‌ای و توسعه حوضه در نئوپروتروژوئیک پسین-کامبرین پیشین تا سیلورین در منطقه بافق سازگار است (Zolala et al., 2025). از طرفی پژوهش‌های مهدی‌پور قاضی و همکاران (Mehdipour Ghazi et al., 2019; Mehdipour Ghazi et al., 2020) و همچنین مهدی‌پور قاضی و موزن (Mehdipour Ghazi and Moazzen, 2024)، بیانگر وجود یک ماگمای مافیک هیدراته و اکسیدی، غنی از آهن و فسفر و مشتق از گوشته است که در یک محیط ریفت پس‌برخوردی کشتی شکل گرفته است و آن را به عنوان منشأ کانسارهای آهن اکسیدی-آپاتیتی نوع کیرونا در ایالت فلززایی بافق ساغند پیشنهاد کرده‌اند.

زمین‌شناسی کانسار کوشک

کانسار روی-سرب کوشک در بخش بالایی توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین، در مرکز حوضه زیرگان-چاه‌میر (شکل ۱) قرار دارد. در این منطقه، دو توالی شناسایی شده‌اند (شکل ۲): یک توالی دارای کانی‌زایی روی و سرب که شامل بخش بالایی توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین در قاعده است و یک توالی آتشفشانی-رسوبی بالایی که شامل شیل‌های پالئوزوئیک

میانگین عیار آهن در این کانسارها ۵۰ درصد و فسفر ۰/۰۱ تا ۷/۸ درصد وزنی است (NISCO, 1980). سنگ میزبان این کانسارها را توالی رسوبی-آتشفشانی فلسیک نئوپروتروژوئیک-کامبرین زیرین سازند اسفوردی (ساغند) تشکیل می‌دهد و کانه‌زایی، مرتبط با بخش ۴ سازند ساغند است (Samani, 1988). سازند اسفوردی با ضخامتی حدود ۸۰۰ متر از قاعده به طرف بالا از ماسه‌سنگ چرتی، سنگ آهک دولومیتی، گنبد‌های ریولیتی-ریوداستیتی نزدیک به منشأ با کانه‌زایی آهن-فسفر، توف‌های ریولیتی-ریوداستیتی و بازالت‌های اسپیلیتی با کانه‌زایی آهن-فسفر نواری، دولومیت چرت‌دار، جاسپیلیت، کلاهک‌های کربناته و شیل‌های سیاه‌رنگ به همراه دولومیت‌های چرتی میزبان کانسارهای سدکس سرب-روی دور از منشأ تشکیل شده است. توده‌های گرانیتوئیدی تا گابرو-دیوریتی کامبرین و دایک‌های دیابازی تا لامپروفری تأخیری، توالی آتشفشانی-رسوبی اسفوردی را قطع کرده‌اند (Mohseni and Aftabi, 2015). ماده معدنی مگنتیت-آپاتیت در گستره معدنی بافق اغلب همراه گنبد‌های ریولیتی-ریوداستیتی و توالی آذرآواری زیردریایی سازند اسفوردی (معادل سری ریزو) یافت می‌شود. ریولیت‌های میزبان این کانسارها، دگرسانی‌های گرمابی زیردریایی را با تشکیل آلپیت، اکتینولیت، کلریت، سرپسیت، تورمالین و کربنات‌ها تحمل کرده‌اند (Aftabi et al., 2021). برای توضیح تشکیل کانسارهای مگنتیت-هماتیت-آپاتیت گستره معدنی بافق، محیط کافت‌های ولکانوژنیک آلکالن داخل قاره‌ای نئوپروتروژوئیک-کامبرین زیرین (Aftabi and Mohseni, 2020)، ولکانیسم زیردریایی حوضه‌های کافتی حاشیه‌ای زیبی (Atapour, 2015; Mohseni and Aftabi, 2015) یا کمان ماگمایی ناشی از فرورائش اقیانوس پروتوتیتس به زیر ایران مرکزی با زایش ماگماتیسیم کالک آلکالن پتاسیک-شوشونیتی تا ساب آلکالن (Mehdipour Ghazi et al., 2021; Vesali et al., 2021; Nayebi, et al., 2020) و الگوی BIF نوع یخچال‌زاد ادیاکارن (Mohseni and Aftabi, 2021) پیشنهاد شده است. بر اساس

الکترونی روبشی در شرکت آریا الکترون اپتیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای تکمیل داده‌های کانی‌شناسی، تعداد یک نمونه واریسکیت به روش پراش پرتو ایکس در شرکت کانساران بینالود و سه نمونه واریسکیت با رنگ‌های مختلف به روش طیف‌سنجی رامان توسط میکروسکوپ رامان مدل Takram P50C0R10 ساخت شرکت Taksan با طول موج لیزر ۵۳۲ nm و توان لیزر ۰/۵ الی ۷۰ میلی‌وات و Accuracy: $\pm 1\text{cm}$ و Raman resolution: 6 cm^{-1} در دانشگاه شهید بهشتی مورد تجزیه قرار گرفت. ترکیب‌های شیمیایی واریسکیت‌ها با استفاده از دستگاه **میکروپروپ اشعه ایکس** ساخت کشور فرانسه مدل CAMECA-SXFive در شرکت کانساران بینالود تعیین شدند. همچنین ۶ نمونه با استفاده از دستگاه Perkin Elmer (NexION 300) در آزمایشگاه شرکت زرآرما با روش **طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی** و ۱۰ نمونه به روش XRF در دانشگاه تربیت مدرس تجزیه شدند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال بر روی ۲ نمونه کانی کوارتز و کلسیت مرتبط با کانی‌سازی واریسکیت در شیل‌ها و سیلتستون‌های سیاه زون حاشیه‌ای توسط دستگاه Linkam THMCG 600 در آزمایشگاه میکروترمومتری دانشگاه تربیت مدرس ایران انجام شد. این دستگاه قادر به اندازه‌گیری محدوده دمایی ۱۹۶- درجه سانتی‌گراد تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است.

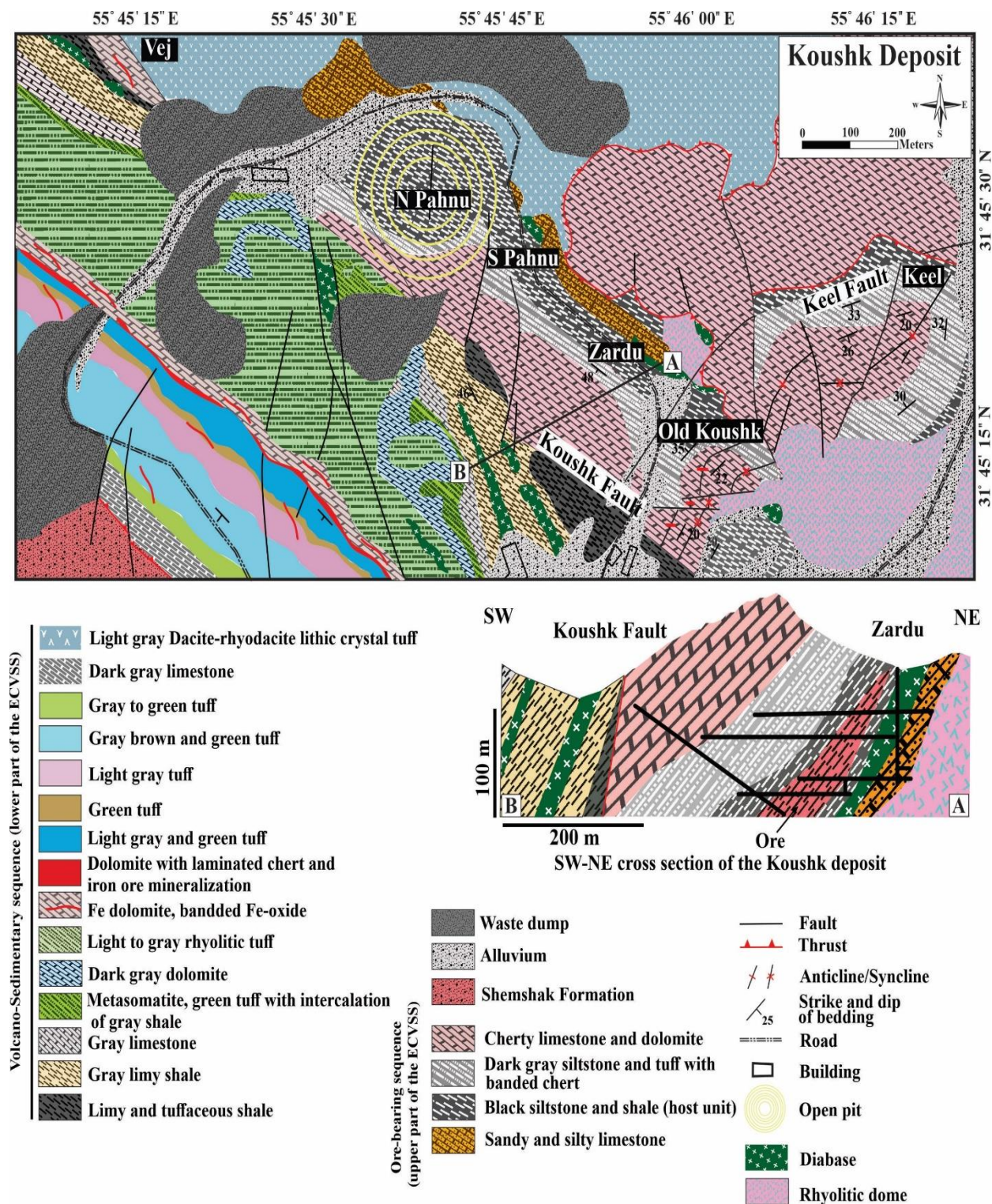
سنگ‌نگاری

مشاهدات ماکروسکوپی و میکروسکوپی بیانگر کانی‌زایی واریسکیت به صورت رگه- رگچه‌ای، انتشاری و گاهی **لکه‌مانند** مرتبط با شیل‌های سیاه دارای کانی‌زایی روی و سرب مرتبط با کانسنگ توده‌ای و لایه‌ای (**شکل ۳-۱** تا E)، و کانی‌زایی گسترده مرتبط با شیل‌های بدون کانی‌زایی روی و سرب در زون حاشیه‌ای (**شکل ۳-۲** تا F)، سیل‌های دیوریتی (**شکل ۳-۳** تا L) و رگچه‌های تأخیری کربناتی $\pm$ کوارتز (**شکل ۳-۴** تا O) در بخش روباز و به مقدار کمتر در معدن زیرزمین کانسار روی و سرب کوشک است.

پایینی، سنگ آهک آرژیلیکی، واحدهای دولومیتی دارای کانی‌زایی آهن، ریولیت و توف است (Gibbs, 1976). بخش قاعده‌ای شامل توف‌های خاکستری، غنی از فلدسپات‌های قلیایی، کوارتز و قطعه‌های سنگی است که توسط سنگ آهک‌های ماسه‌ای تا سیلنی خاکستری تیره و به صورت محلی دولومیتی شده و به سمت بالا با سیلتستون‌ها پوشیده شده‌اند. سیلت سنگ‌های آهکی میزبان افق کانه‌دار روی و سرب هستند که غنی از مواد آلی است. بالای این واحد توسط توف‌ها و شیل‌ها با میان‌لایه‌های چرت پوشیده شده است (Rajabi et al., 2012). سنگ‌های آهکی و دولومیت‌های چرتی دارای کانی‌زایی آهن، بالاترین قسمت توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین را تشکیل می‌دهند (Rajabi et al., 2012; Hosseini et al., 2025). توالی کانه‌دار از سنگ آهک‌های فرودیواره تا دولومیت‌های فرادیواره، در ناودیس زردو رخمون دارد و توسط گسل کوشک قطع می‌شود (**شکل ۲**). این توالی آتشفشانی- رسوبی جوان‌تر از توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین و احتمالاً مربوط به سن پالئوژوئیک زیرین در نظر گرفته می‌شود (Gibbs, 1976). با این حال، با توجه به وجود توف‌های ریولیتی و افق‌های اکسید آهن، این توالی می‌تواند با بخش پایینی توالی آتشفشانی رسوبی کامبرین زیرین در حوضه زیرگان- چاه‌میر نیز مرتبط باشد. یک گنبد ریولیتی در بخش جنوب‌شرقی کانسار و یک گنبد داسیتی و ریوداسیتی در شمال و شمال‌غرب کانسار، در مجاورت توالی کانه‌دار قرار دارد و چندین دایک دیابازی، کل توالی آتشفشانی- رسوبی را قطع کرده‌اند (**شکل ۲**).

مواد و روش‌ها

در راستای انجام این پژوهش، ۳۵ نمونه کانی واریسکیت از واحدهای سنگی کانه‌دار در مقاطع زمین‌شناسی مختلف برداشت شد. بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ نوری و انعکاسی بر روی ۲۳ مقطع نازک و نازک- صیقلی در دانشگاه شهید بهشتی تهران انجام شد. علاوه بر این، ۷ نمونه از نسل‌های مختلف واریسکیت با استفاده از **میکروسکوپ**

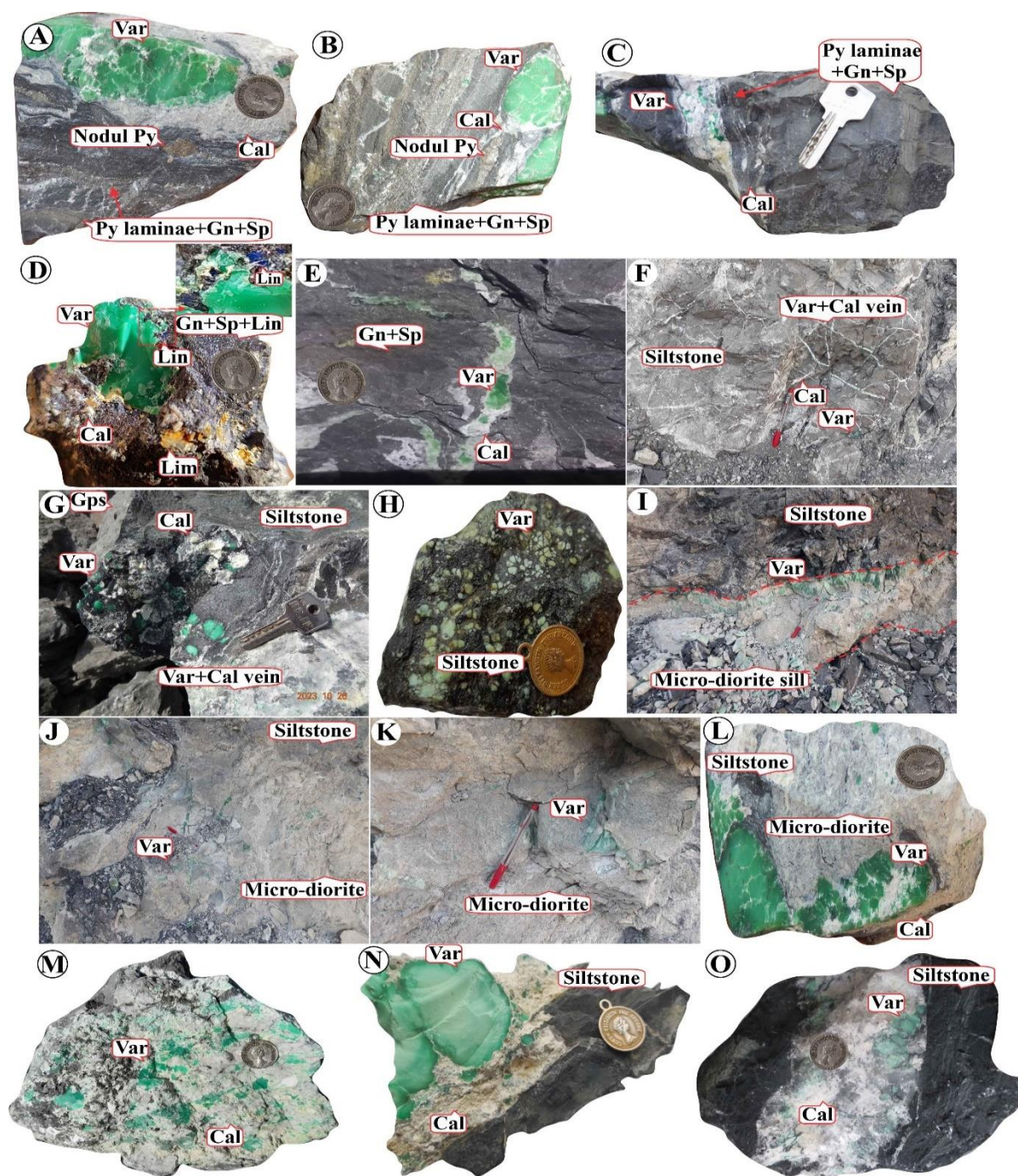


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کانسار روی و سرب کوشک و برش عرضی جنوب‌غربی - شمال‌شرقی کانسار (Rajabi et al., 2012)

Fig. 2. Geological map of the Koushk Zn-Pb deposit and the SW-NE cross section of the deposit (Rajabi et al., 2012)

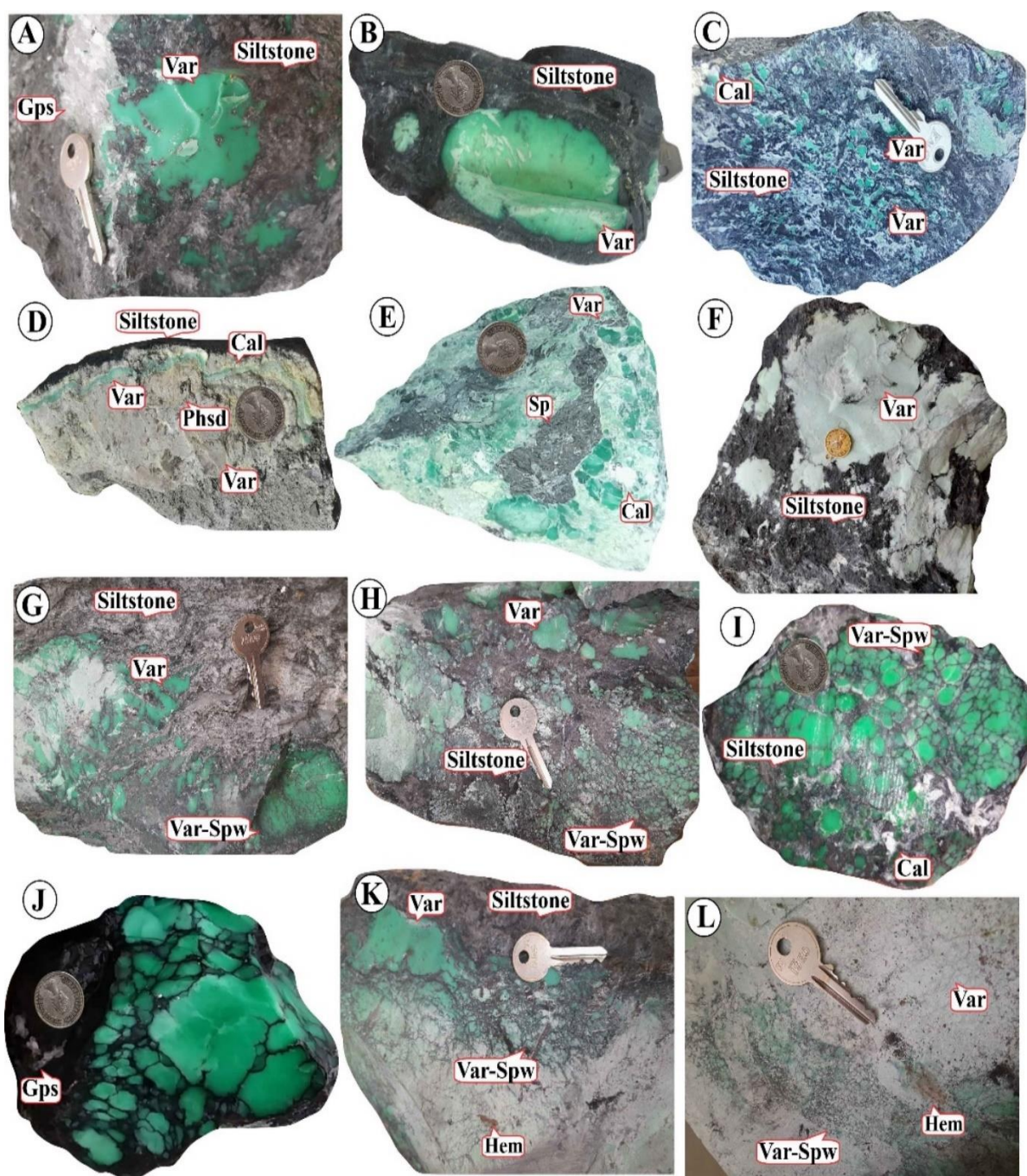
در بخش‌های معدنی شیل‌های سیاه، مجموعه‌ای از کانی‌های سولفیدی شامل گالن، پیریت، اسفالریت و مجموعه کانی‌های کربناته شامل کلسیت، دولومیت، اسمیت زونیت، ژپس و واریسکیت مشاهده می‌شود. در شیل‌های سیاه بدون کانی‌زایی روی و سرب و سیل‌های دیوریتی، واریسکیت اغلب همراه با کلسیت، ژپس و آغشتگی‌های اکسید آهن مشاهده می‌شود (شکل ۳ و شکل ۴-A). واریسکیت‌های خالص اغلب مرتبط با زون‌های کانی‌زایی روی و سرب و سیل دیوریتی است؛ اما در شیل‌های سیاه بدون کانی‌زایی روی و سرب علاوه بر واریسکیت‌های خالص، واریسکیت **تار عنکبوتی** (دارای رگه‌هایی از شیل‌های سیاه) مشاهده می‌شود (شکل ۳-A تا O، شکل ۴-A تا L). ویژگی‌های اصلی واریسکیت‌ها رنگ سبز، دارای درخشندگی شیشه‌ای تا رزینی، طبیعت نیمه شفاف، شکستگی نامواری، بافت ریزبلورین با سطح همگن یا نامنظم هستند. علاوه بر این، برخی از قطعه‌های دارای منافذ فراوان در سطح خود، رگه‌های سفید با ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر و آخال‌های معدنی مات هستند. بافت‌های شناسایی شده شامل بافت‌های کروی، رگه‌های واریسکیتی در امتداد جهت‌های مختلف، جایگزینی کانی‌های باقی‌مانده و بافت‌های نواری هستند. این روابط بافتی چندین نسل از رسوب فسفات را نشان می‌دهد که با سامانه‌های حفره‌ای نامنظم متعددی پراکنده شده است؛ جایی که محیط رسوبی، مسیرهای جریان انتقال آب‌های فسفات‌دار را ثبت می‌کند که باعث تشکیل واریسکیت در واحدهای شیلی و میکرودیوریت‌ها شده است. روابط ترکیبی و بافتی نیز از روی نقشه‌های پرتو ایکس در واریسکیت‌های با بافت کروی در زون حاشیه‌ای به عنوان رایج‌ترین مورد در میان بافت‌های مورد بررسی قرار گرفت. نقشه‌های توالی تبلور کانی واریسکیت، نشان می‌دهد که کانی‌زایی با انواع فسفات غنی‌تر از آهن شروع می‌شود و با نوسان‌های مکرر در محتوای آلومینیم و آهن و با ته‌نشست کلسدونی و کلسیم در شکستگی‌ها و حفره‌ها (مناطق غنی‌تر سیلیس و کلسیم) پایان می‌یابد. بافت‌ها و ویژگی‌های شیمیایی نشان می‌دهد که احتمالاً

واریسکیت از طریق فسفات‌شدن چندمرحله‌ای یک سنگ غنی از آلومینیم و سیلیس تشکیل شده است. وجود رگچه‌های سفیدرنگ در زمینه کانی واریسکیت بیانگر وجود کانی‌های فسفوسیدریت و فسفات است (شکل‌های ۵-A و B و ۹-A تا G). برخی از واریسکیت‌ها دارای اذخال‌های تیره‌مانند هماتیت هستند که گاهی فسفات شده‌اند. اسفالریت و گالن به صورت رگه-رگچه‌ای و انکلوژن‌های کوچک در ساختار واریسکیت وجود دارد (شکل ۴-A و E). بررسی‌های میکروسکوپی بر روی واریسکیت‌های مرتبط با زون کانسنک لایه‌ای بیانگر وجود میان لایه‌های شیل، همراه مواد آلی و پیریت به صورت رگه-رگچه‌ای و انتشاری در ساختارهای شکستگی واریسکیت است (شکل ۶-A تا E، شکل ۷-A تا H و شکل ۸-A تا N). در برخی کانی‌های واریسکیت زون‌بندی مشاهده می‌شود. این نواحی از نظر ترکیب شیمیایی، رنگ، بافت یا ویژگی‌های نوری با یکدیگر تفاوت دارند و بیانگر تشکیل آنها در شرایط محیطی متغیر است و این تغییرات به صورت لایه‌های متفاوت در ساختار آن ثبت شده است (شکل ۶-E و F). در واریسکیت‌های ساده (شکل ۶-F تا I) و واریسکیت تار عنکبوتی (شکل ۶-J تا M) مرتبط با زون حاشیه‌ای، رگچه‌های شیلی سیاه اغلب از ساختار شکستگی‌ها پیروی می‌کند و در برخی از کانی‌های واریسکیت، به خصوص واریسکیت‌های مرتبط با سیل‌های میکرودیوریتی، کوارتز، آمفیبول و اپیدوت به صورت ناچیز دیده می‌شود (شکل ۶-G و H، N تا P). برای تکمیل داده‌های کانی‌شناسی، تجزیه پراش پرتو ایکس بر روی واریسکیت‌های سبز پررنگ ساده در شیل‌های بدون کانی‌زایی روی و سرب مرتبط با زون حاشیه‌ای انجام شد. فازهای غالب در دانه‌های تجزیه و تحلیل شده واریسکیت و استرنیگیت هستند. فسفات‌های دیگری مانند فسفوسیدریت و متاواریسکیت و کراندالیت شناسایی شدند. فسفوسیدریت یافت شده در کانسار کوشک نهان‌بلور بوده و رنگ آن خاکستری است و به صورت درهم‌رشدی با واریسکیت دیده می‌شود. عامل ایجاد بیشتر طیف‌های متفاوت در واریسکیت محسوب می‌شود.



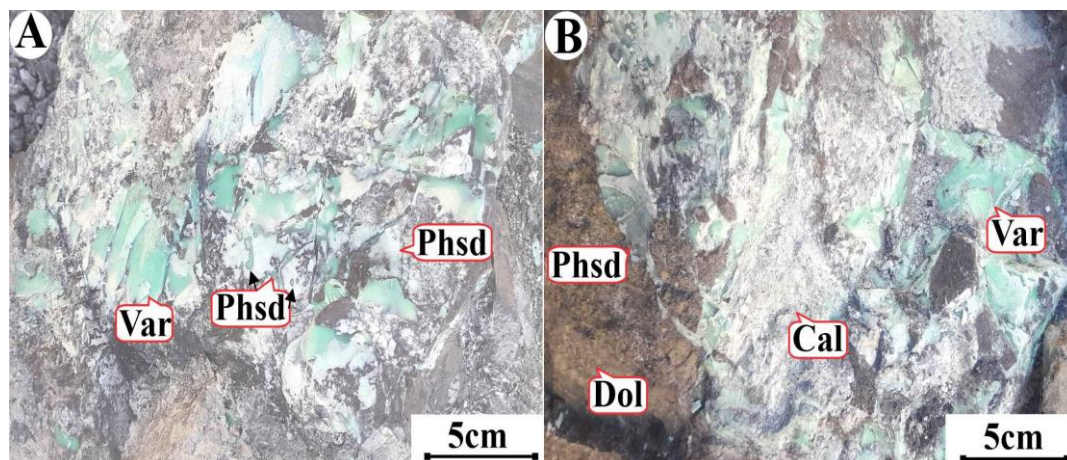
شکل ۳. کانی‌زایی واریسکیت مرتبط با A تا C: کانسنگ لایه‌ای، D و E: کانسنگ توده‌ای، F تا H: زون حاشیه‌ای، I تا L: سیل‌های دیوریتی و M تا O: رگه‌های تأخیری کربناتی ± کوارتز در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Gn: گالن، Gps: ژپس، Lim: لیمونیت، Lin: لیناریت، Py: پیریت، Sp: اسفالریت، Var: واریسکیت ساده).

Fig. 3. Variscite mineralization associated with: A to C: stratiform ore, D and E: massive ore; F to H: the marginal zone, I to L: microdioritic sills, and M to O: late carbonate $\pm$ quartz veins, in the Koushk Zn-Pb Deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Gn: galena, Gps: Gypsum, Lim: limonite, Lin: linarite, Py: pyrite, Sp: sphalerite, Var: Simple variscite).



شکل ۴. A تا F: کانی‌زایی رگه‌ای و انتشاری واریسکیت‌های سبز ساده و G تا L: واریسکیت سبز تار عنکبوتی به همراه واریسکیت‌های سفید تا سبز کم‌رنگ در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Gps: ژپس، Hem: هماتیت، Phsd: فسفوسیدریت، Sp: اسفالریت، Var: واریسکیت ساده، Var-Spw: واریسکیت تار عنکبوتی).

Fig. 4. A to F: Vein-type and disseminated mineralization of simple green variscite, and G to L: spiderweb green variscite associated with white to light-green variscite, in the Koushk Zn-Pb Deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Gps: gypsum, Hem: hematite, Phsd: phosphosiderite, Sp: sphalerite, Var: simple variscite, Var-Spw: spiderweb variscite).



شکل ۵. A و B: کانی‌زایی واریسکیت و فسفوسیدریت مرتبط با شیل‌های بدون کانی‌زایی روی و سرب در زون حاشیه‌ای کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Dol: دولومیت، Phsd: فسفوسیدریت، Var: واریسکیت ساده).

Fig. 5. A and B: Variscite and phosphosiderite mineralization associated with unmineralized shale in the marginal zone of the Koushk Zn-Pb deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Cal: calcite, Dol: dolomite, Phsd: phosphosiderite, Var: simple variscite).

کانی‌های مختلف و نسبت‌های هر یک از آنها بستگی دارد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). استنتاج‌های مشابهی در رابطه با نقش مخلوط‌ها (نتیجه ترکیب فیزیکی آن با کانی‌های دیگر) بر رنگ واریسکیت توسط فریتش و همکاران (Fritsch et al., 2019) طی بررسی طیف‌های رامان واریسکیت سبز گوهری (که امروزه در معدن‌های مختلف جهان برای ساخت اشیاء زینتی استخراج می‌شود) به دست آمد. این نویسندگان تغییرات معناداری در طیف‌های رامان مشاهده نکردند؛ اما خاطرنشان کردند که اگر رنگ به سایه‌های روشن‌تر متمایل شود، این امر را می‌توان با اختلاط طیف‌های سایر کانی‌ها توضیح داد.

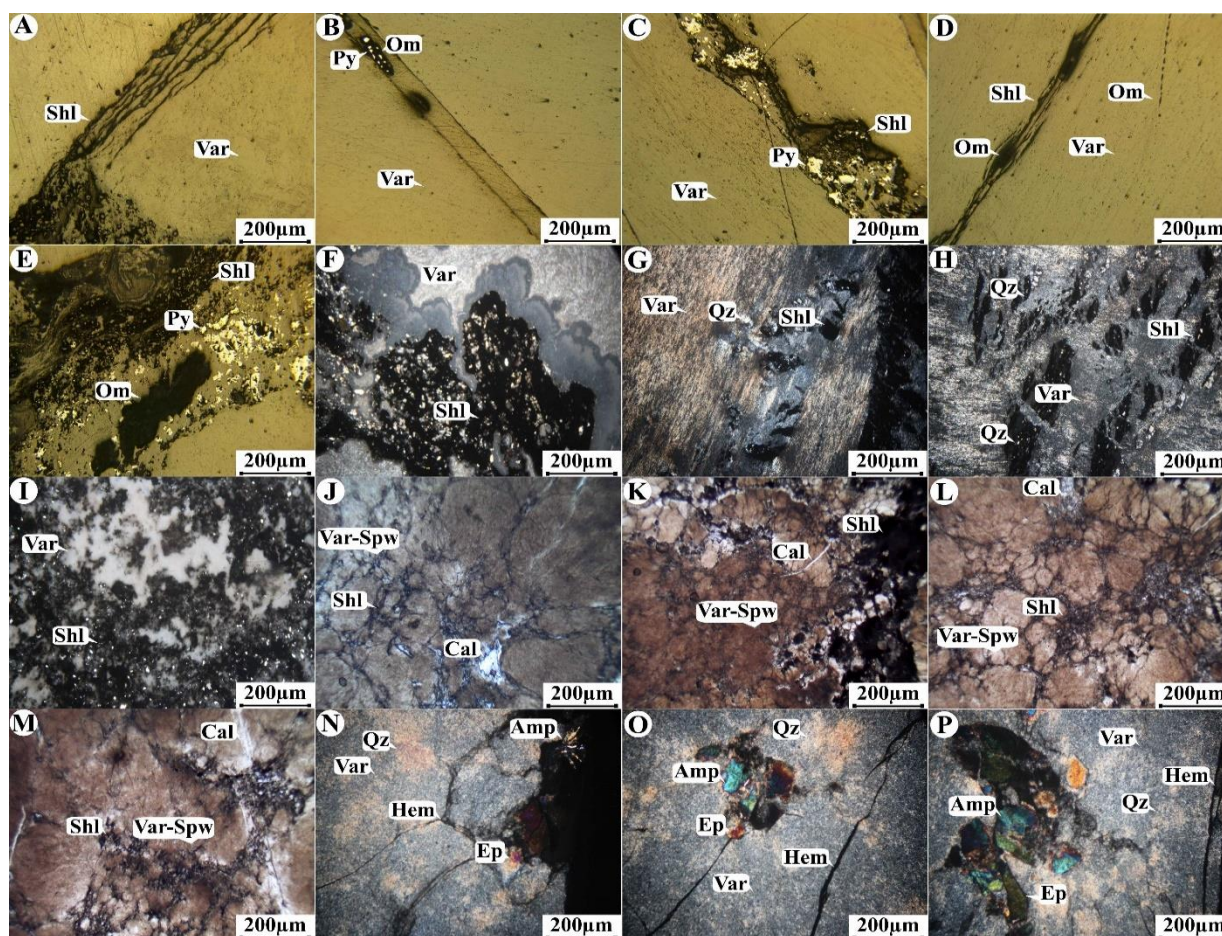
طیف‌سنجی رامان

شکل ۱۲-A تا C، طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های واریسکیت‌های سبز تار عنکبوتی، واریسکیت‌های سبز ساده و واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ تا آبی کم‌رنگ را نشان می‌دهد. بیشترین شدت پیک مشاهده شده در واریسکیت‌های تار عنکبوتی

موضوع مشابهی در مورد مخلوط‌های جاروسیت- واریسکیت نیز صدق می‌کند. از سوی دیگر، دست کم در بخشی از نمونه‌های واریسکیت، محتوای Fe^{+3} به دست آمده پیک‌های حاصل از تجزیه‌های XMPA می‌تواند ناشی از حضور مقادیر ناچیزی از گوتیت ریزبلور و احتمالاً جاروسیت باشد. هر دو کانی می‌توانند در این امر نقش داشته باشند و گاهی رنگی اخراپی به نمونه‌ها بدهند. آلونیت، هالوزیت و کراندالیت در حالت خالص اغلب بی‌رنگ یا شیری‌رنگ هستند؛ اما هنگامی که به طور درهم‌رشدی با گوتیت مخلوط می‌شوند، رنگی اخراپی پیدا می‌کنند (Díaz- Acha et al., 2022). این کانی‌ها در همراهی با واریسکیت ممکن است به صورت نوارها یا لکه‌های مجزایی ظاهر شوند. با این حال، بررسی دقیق نمونه‌ها با استفاده از SEM-BSE و EDS و وقوع نظام‌مند مخلوط‌های درهم‌رشدی را در مقیاس نهمان‌بلور شامل این فسفات‌ها، سیلیکات‌ها، سولفات‌ها و اکسیدها آشکار ساخت. بنابراین، در تمامی این موارد، رنگ مخلوط، نتیجه ترکیب رنگ کانی‌های مربوطه است. رنگ‌بندی نهایی به رنگ

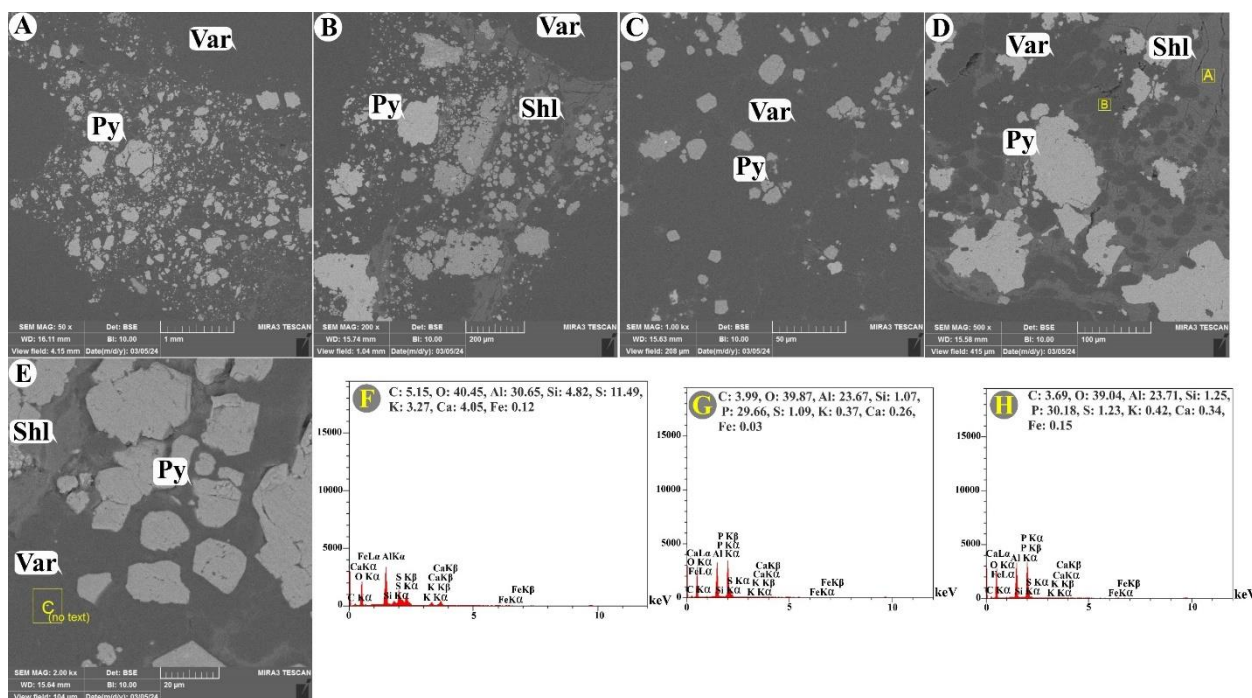
کمتر در حدود ۴۲۲، ۵۴۴ و ۵۵۰ سانتی متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد که همگی به دلیل ارتعاش‌های کششی متقارن گروه فسفات (PO_4) در مواد معدنی گروه واریسکیت و متاوریسکیت هستند (Frost et al., 2004; Onac et al., 2004).

در حدود ۱۰۳۳ سانتی متر معکوس (cm^{-1}) است و دو پیک با شدت کمتر در حدود ۴۳۴ و ۳۵۸۰ سانتی متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد. در واریسکیت‌های سبز ساده و واریسکیت‌های صابونی (سبز-آبی کم رنگ تا سفید)، بیشترین شدت پیک در حدود ۱۰۲۲ سانتی متر معکوس (cm^{-1}) است و سه پیک با شدت



شکل ۶. A تا E: تصویرهای میکروسکوپی از واریسکیت‌های مرتبط با زون کانسنگ لایه‌ای، F تا I: واریسکیت‌های ساده مرتبط با شیل‌ها و سیلتستون‌های سیاه و وجود منطقه‌بندی در برخی از واریسکیت‌ها، J تا M: واریسکیت‌های تار عنکبوتی مرتبط با شیل‌ها و سیلتستون‌های سیاه و P تا N: واریسکیت‌های سبز آبی مرتبط با سیل‌های دیوریتی در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Amp: آمفیبول، Cal: کلسیت، Ep: اپیدوت، Hem: هماتیت، Om: مواد آلی، Py: پیریت، Phsd: فسفوسیدریت، Qz: کوارتز، Shl: شیل، Var: واریسکیت ساده، Var-Spw: واریسکیت تار عنکبوتی).

Fig. 6. A to E: Microscopic images of variscite associated with stratiform ore zone, F to I: simple variscite related to black shales and siltstones, showing zoning in some crystals, J to M: spiderweb variscite associated with black shales and siltstones, N to P: bluish-green variscite related to dioritic sills in the Koushk Zn-Pb deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Amp: amphibole, Cal: calcite, Ep: epidote, Hem: hematite, Om: organic matter, Py: pyrite, Phsd: phosphosiderite, Qz: quartz, Shl: shale, Var: simple variscite, Var-Spw: spiderweb variscite).



شکل ۷. A تا H: تصویرهای FE-SEM و EDS از واریسکیت‌های مرتبط با زون کانسنگ لایه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Py: پیریت، Shl: شیل، Var: واریسکیت ساده).

Fig. 7. A to H: Fe-SEM and EDS images of variscites associated with the stratiform ore zone in the Koushk Zn-Pb deposit. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Py: pyrite, Shl: shale, Var: simple variscite).

گوهر تراشی دانشگاه شهید بهشتی برش و تراش داده شد (شکل ۱۳- A تا D). چنان‌که دیده می‌شود، این گوهرها دارای رنگ سبز کم‌رنگ تا آبی کم‌رنگ و سبز پررنگ است که رگچه‌های سیاه‌رنگ در آن دیده می‌شود که اغلب سیلستون‌های سیاه گاهی اکسید آهن است. این گوهر سنگ‌ها نسبتاً نرم بوده و خوب پالایش می‌شود. سنگ‌زنی (ساب) باید به صورت خیس انجام شود؛ زیرا با دیدن حرارت ممکن است آب بین مولکولی تبخیر شده و رنگ کانی تغییر کند. ویژگی‌های گوهری واریسکیت‌های مورد بررسی و مقایسه آن با واریسکیت‌های استرالیای غربی (Willing et al., 2008) در جدول ۱ ملاحظه می‌شود (Rahimzadeh et al., 2022). واریسکیت‌ها از آبی روشن تا سبز تیره متغیر بود. نمونه‌های سبز از کیفیت گوهر برخوردار بودند و معمولاً دارای رگه‌های تیره یا الگوی تار عنکبوتی بودند که اغلب از خاک رس

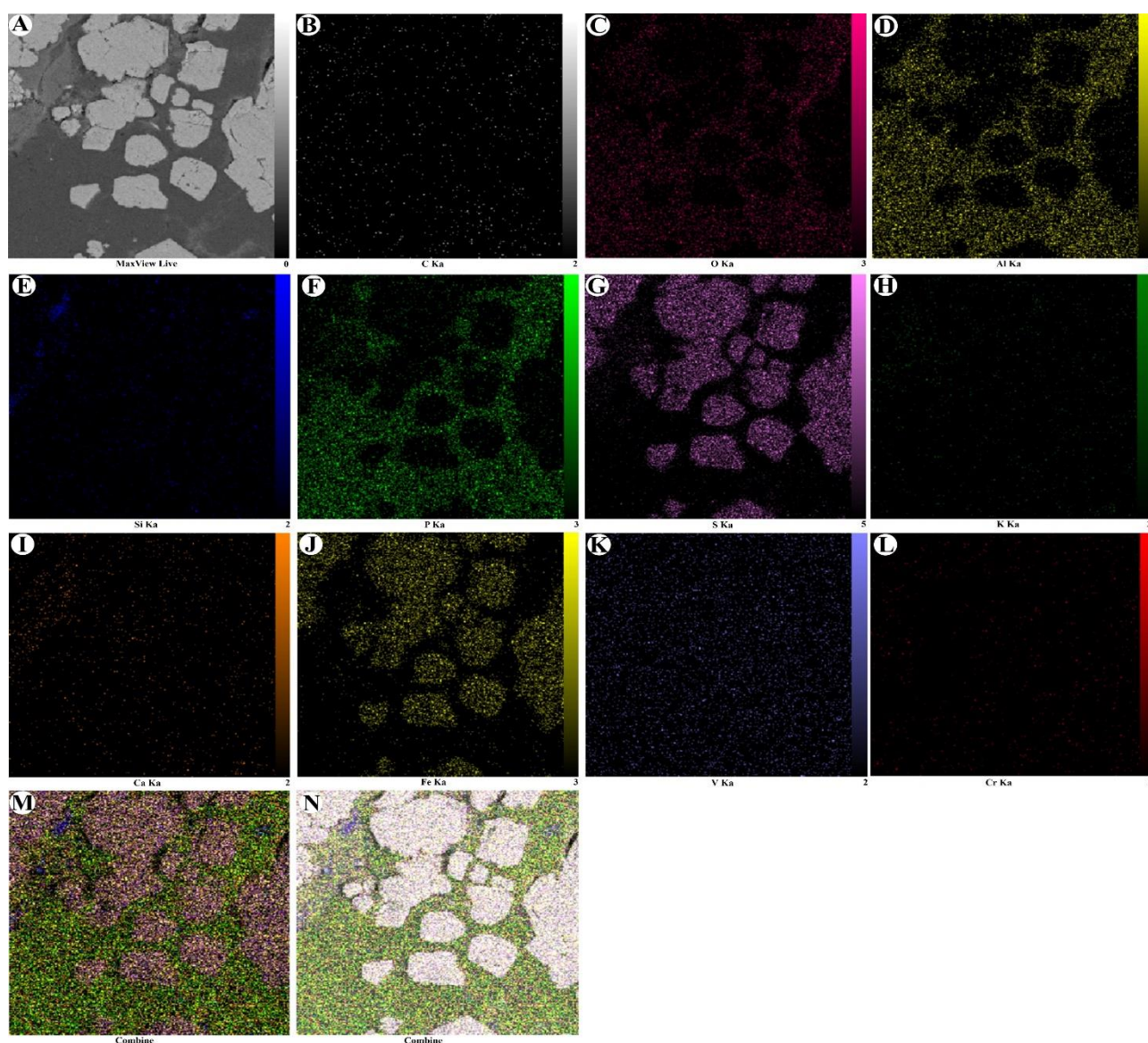
شدیدترین باندها مربوط به ارتعاش‌های کششی واریسکیت هستند؛ اما موقعیت و شکل دقیق آنها احتمالاً به دلیل وجود سایر مواد معدنی از گروه‌های واریسکیت و متا واریسکیت، مانند استرنگیت و فسفوسیدریت است. مجموعه‌ای از باندهای با شدت کمتر در نسل‌های مختلف واریسکیت، نتیجه مدهای خمشی PO_4 است. طیف‌های رامان واریسکیت کانسار روی و سرب کوشک و تاجیکستان هم‌پوشانی قابل توجهی با پیک‌هایی در حدود ۲۲۳، ۴۳۴، ۱۰۳۳ و ۱۰۲۲ سانتی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهند (Litvinenko et al., 2016).

ویژگی‌های گوهری واریسکیت

برای بررسی پتانسیل تراش و کیفیت محصول ناشی از واریسکیت‌های معدن کوشک، تعدادی نگین در گارگاه

میکروسکوپی نمونه‌های ما ناخالصی‌هایی متشکل از رس، کوارتز، اکسیدهای آهن و شیل (شکل ۶-A تا P) را نشان داد؛ در حالی که نمونه‌های استرالیایی علاوه بر ماتریس متشکل از رس، کوارتز و اکسیدهای آهن، ممکن است دارای انکلوژن‌هایی طلا نیز باشند.

و کمی اکسید آهن تشکیل شده بودند. اگرچه ویژگی‌های نمونه‌های با واریسکیت استرالیایی غربی (Willing et al., 2008) از بسیاری جنبه‌ها شبیه است؛ اما واریسکیت کوشک به فیلتر رنگ چلسی واکنش نشان نداد و سختی کمتری نسبت به نمونه‌های استرالیایی داشت (Rahimzadeh et al., 2022). بررسی



شکل ۸. A تا N: نقشه پراکندگی عنصری توسط پراش پرتو ایکس بر روی واریسکیت‌های مرتبط با زون کانسنگ لایه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک

Fig. 8. A to N: X-ray elemental distribution maps of variscites associated with the stratiform ore zone in the Koushk Zn–Pb deposit

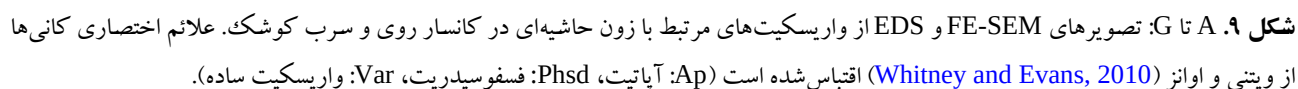


Fig. 9. A to G: FE-SEM and EDS images of variscites associated with the marginal ore zone in the Koushk Zn–Pb deposit. Abbreviations after [Whitney and Evans \(2010\)](#) (Ap: apatite, Phsd: phosphosiderite, Var: simple variscite).

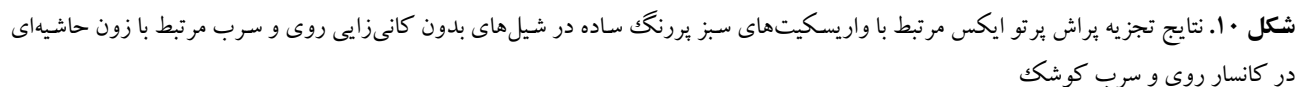
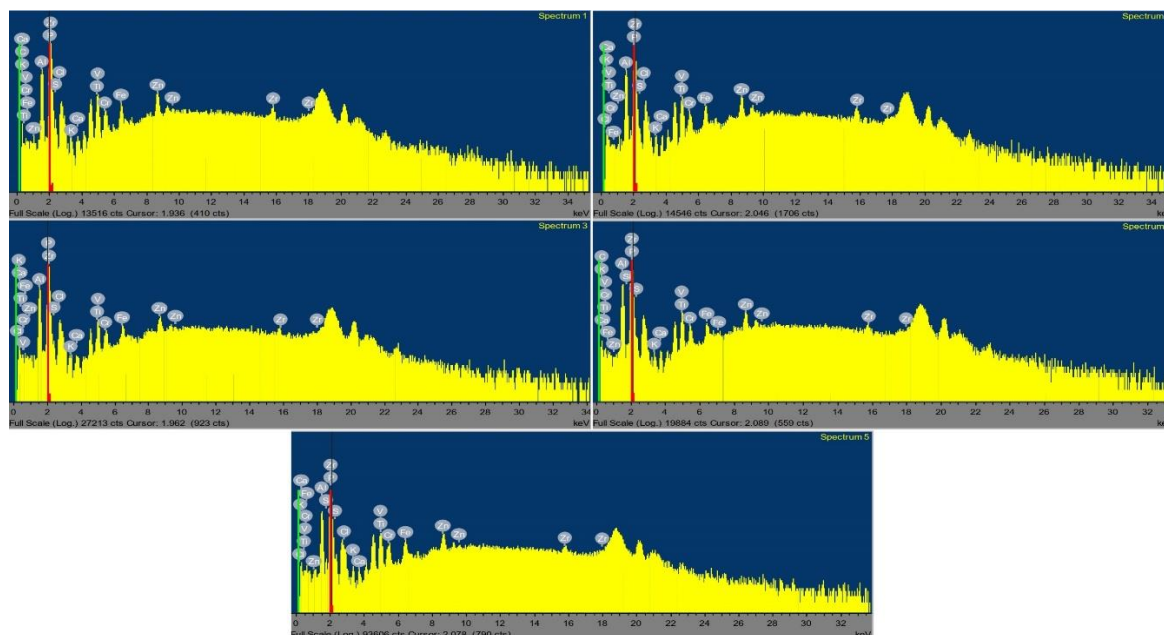


Fig. 10. X-ray diffraction results of deep-green simple variscites in non-mineralized Zn–Pb shales associated with the marginal zone of the Koushk Zn–Pb deposit



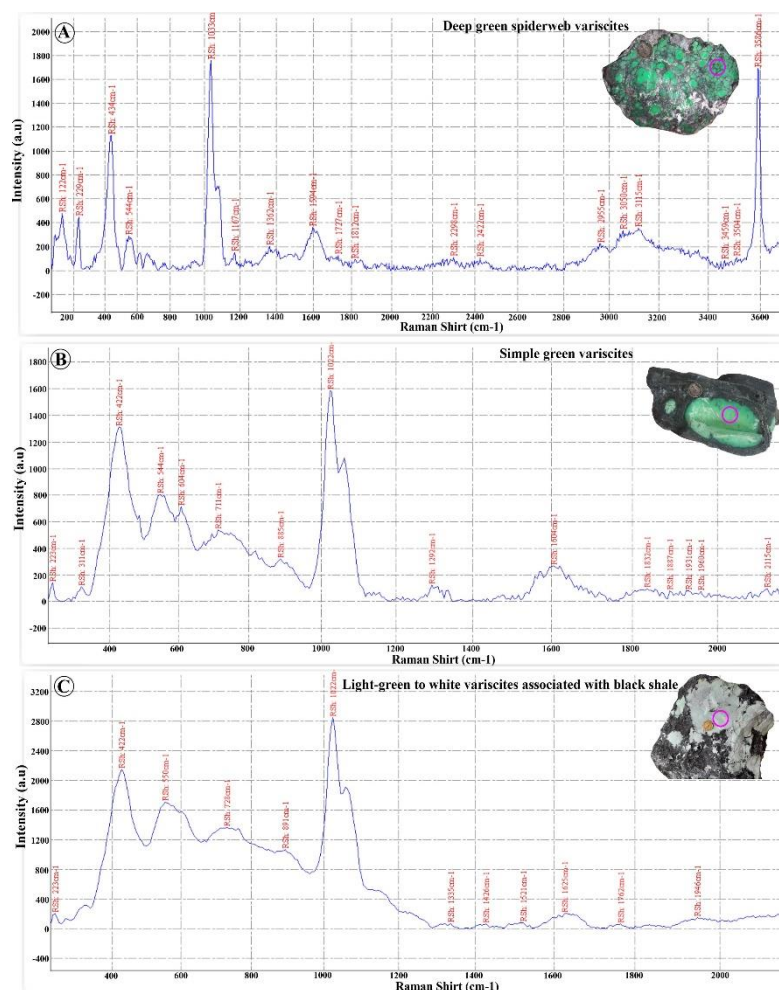
شکل ۱۱. نتایج عنصری پراش پرتو ایکس به روش XPMA بر روی کانی واریسکیت‌های سبز تیره در کانسار روی و سرب کوشک
Fig. 11. X-ray elemental microprobe (XPMA) results on deep-green variscite from the Koushk Zn-Pb deposit

۱۴، اکسیدهای عناصر اصلی و نمودارهای تغییرات آنها را در کانسنگ‌های واریسکیت‌های ساده و تار عنکبوتی با شدت رنگ مختلف نشان می‌دهند. جدول ۱ نشان می‌دهد که متوسط مقادیر Al_2O_3 و P_2O_5 در کانسنگ واریسکیت به ترتیب ۴۰/۵۵ و ۲۷/۰۱ درصد وزنی و متوسط مقادیر Fe_2O_3 ، ۰/۵ درصد وزنی متغیر است. متوسط مقادیر SiO_2 ، CaO و TiO_2 در کانسنگ واریسکیت به ترتیب ۲/۵۴، ۰/۸۲ و ۰/۱۲۷ درصد وزنی متغیر است. مقادیر CaO ناشی از وجود اذخال‌های کلسیت در ساختار واریسکیت و همراهی این عنصر با بنیان‌های فسفات است. مقادیر TiO_2 ناشی از همراهی کانی‌های رسی با واریسکیت است. مؤلفه‌های آماری برای عناصر در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. برای ارزیابی همبستگی‌های زمین‌شیمیایی میان عناصر در سامانه کانی‌سازی، از تابع ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده که نتایج محاسبات به صورت ماتریس ضرایب همبستگی در جدول ۴ ارائه شده است.

کانسنگ واریسکیت کوشک به دلیل سختی نسبتاً کم و وجود رگه‌ها، در حین برش دچار شکستگی و خردشدگی می‌شود؛ هرچند که به دلیل سختی نسبتاً پایین آن، صیقل دادن آن آسان است. همچنین دریافتیم که برای جلوگیری از داغ شدن کانسنگ واریسکیت و رنگ‌پریدگی آن، بهتر است در طول فرایند تراش، آن را خنک و مرطوب نگه داریم. معدن کوشک ذخایر عظیمی از واریسکیت را در خود جای داده است و می‌تواند در آینده منبع مهمی از این سنگ برای مصارف جواهری باشد.

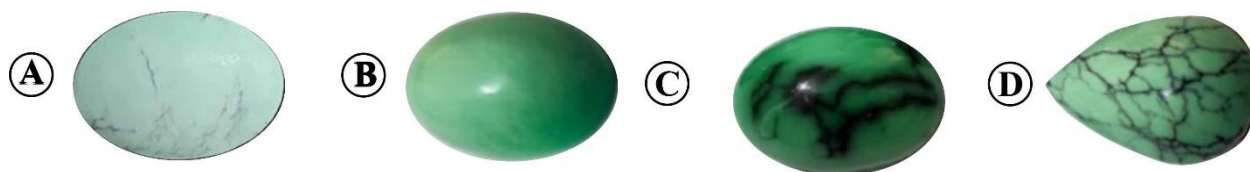
زمین‌شیمی عناصر اصلی و جزئی در کانسنگ

با توجه به گسترش کانی‌زایی واریسکیت در شیل‌های سیاه بدون کانی‌زایی روی و سرب مرتبط با زون حاشیه‌ای، بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی نسل‌های مختلف واریسکیت در این زون کانی‌زایی انجام شد. نتایج تجزیه شیمیایی به روش XRF، XPMA و ICP-MS بر روی واریسکیت‌ها با رنگ‌های مختلف در جدول‌های ۲، ۳ و ۶ ارائه شده است. جدول‌های ۲، ۳ و شکل



شکل ۱۲. طیف‌های رامان مرتبط با A: واریسکیت‌های سبز تار عنکبوتی، بازه 100 تا 4000 cm^{-1} ، B: واریسکیت‌های سبز ساده، بازه 400 تا 2000 cm^{-1} و C: واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ و سفید، بازه 400 تا 2000 cm^{-1} در کانسار روی و سرب کوشک

Fig. 12. Raman spectra of A: spider-web green variscites samples from the Koushk Zn-Pb deposit, over the 100 - 4000 cm^{-1} spectral Range, B: Simple green variscites, over the 400 - 2000 cm^{-1} spectral Range, and C: Light-green to white variscites, over the 400 - 2000 cm^{-1} spectral range, in the Koushk Zn-Pb Deposit



شکل ۱۳. نمونه‌های برش کابوشن از واریسکیت‌های کانسار روی و سرب کوشک. A: واریسکیت سبز-آبی کم‌رنگ با رگه‌های خیلی سیاه (۳/۵ سانتی‌متر طول)، B: واریسکیت سبز روشن خالص (۴ سانتی‌متر طول)، C: واریسکیت سبز پررنگ با رگه‌های تیره (۱/۸ سانتی‌متر طول) و D: سنگ‌ها با الگوی تار عنکبوتی (۳/۱ سانتی‌متر طول). تصویر قسمت‌های B تا D از رحیم‌زاده و همکاران (Rahimzadeh et al., 2022)

Fig. 13. Cabochon-cut variscite samples from the Koushk Zn-Pb deposit. A: light blue-green variscite with black shale veins (3.5 cm long), B: pure light-green variscite (4 cm long), C: dark-green variscite with dark veins (1.8 cm long), and D: stones with a spider-web pattern (3.1 cm long). Photographs B to D from Rahimzadeh et al. (2022)

جدول ۱. مقایسه گهرشناسی واریسکیت کانسار روی و سرب کوشک و واریسکیت استرالیای غربی (Willing et al., 2008; Rahimzadeh et al., 2022)

Table 1. Gemological comparison of variscite from the Koushk Zn-Pb deposit and Western Australian variscite (Willing et al., 2008; Rahimzadeh et al., 2022)

Physical data	Koushk Mine	Western Australia
Crystallization system	Orthorhombic	Orthorhombic
Color	Light bluish-green	Light bluish-green
Streak	White	White
Luster	Oily	Waxy; takes a high polish
Transparency	Opaque	Opaque to translucent
Refractive Index	1.582 (Spot)	1.570 to 1.582
Hardness	3.5 to 4.5	~ 5
Specific Gravity	2.57	2.49 to 2.55
Cleavage	-	-
Fracture	Splintery	Uneven
Fluoresc	Very weak	Inert
LW	J inert	Inert
SW	38.28 ct	Unknown
Weight	Inert	Grey to pale
CF		Gold inclusions. Matrix: clay, quartz, iron oxides.
Microscopic features	Clay, quartz, iron oxiders	Chrysocolla, Chrysoprase, Turquoise
Similar Minerals	-	

سبز کم‌رنگ مرتبط با سیل‌های دیوریتی، در مقادیر SiO_2 تهی‌شدگی و در مقادیر P_2O_5 و Al_2O_3 غنی‌شدگی نشان می‌دهند. مقادیر SO_3 در واریسکیت‌های سبز پررنگ، واریسکیت‌های تار عنکبوتی مرتبط با شیل‌های سیاه و واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ مرتبط با سیل‌های دیوریتی غنی‌شدگی بالاتری (۲/۴۶ تا ۷/۱۶ درصد وزنی) نسبت به واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ (۱/۳۹ تا ۳/۱۹ درصد وزنی) مرتبط با شیل‌های سیاه نشان می‌دهد که این ناشی از وجود میان‌بارهای پیریت در ساختار واریسکیت و درهم‌رشدی کانی واریسکیت با سولفات‌ها (آلونیت، ژاروسیت) است و سبب کاهش خلوص واریسکیت شده است. همبستگی مثبت SO_3 با CaO ، SiO_2 ، PbS و ZnS در نسل‌های مختلف واریسکیت تأییدکننده این مطلب است. نسبت وزنی $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ در واریسکیت ایده‌آل ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) حدود ۰/۵۵ است (۲۷ درصد Al_2O_3 در مقابل ۴۴ درصد P_2O_5).

مقادیر SiO_2 در برابر Al_2O_3 ، P_2O_5 و TiO_2 در برابر CaO ، P_2O_5 در برابر CaO و Fe_2O_3 در برابر TiO_2 ، Cr و V دارای همبستگی منفی است. از طرفی مقادیر Al_2O_3 در برابر P_2O_5 ، Cr و V ، و P_2O_5 در برابر Cr و V در برابر SO_3 ، V و Cr ، SiO_2 ، CaO ، Zn و Pb و $\text{Cu}+\text{Zn}$ در برابر Pb همبستگی مثبت نشان می‌دهد (شکل ۱۴-ا تا س). در واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ مرتبط با شیل‌های سیاه، مقادیر SiO_2 بین ۰/۰۷۸ تا ۱/۴۹ درصد وزنی در تغییر است. در واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ مرتبط با سیل‌های دیوریتی مقادیر SiO_2 برابر با ۲/۴۶ درصد وزنی است؛ در حالی که واریسکیت‌های سبز پررنگ و واریسکیت تار عنکبوتی مقادیر SiO_2 بین ۲/۱۴ تا ۷/۱۴ درصد وزنی در تغییر است. تنها در یک نمونه از واریسکیت‌های سبز پررنگ مقادیر SiO_2 کمتر از ۰/۱ درصد وزنی است. واریسکیت‌های سبز کم‌رنگ مرتبط با شیل‌های سیاه، نسبت به واریسکیت سبز پررنگ، واریسکیت‌های تار عنکبوتی مرتبط با شیل‌های سیاه و واریسکیت

جدول ۲. نتایج تجزیه XRF بر روی واریسکیت‌های با رنگ‌های مختلف مرتبط با زون حاشیه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک

Table 2. XRF analytical results for variscite samples of different colors associated with the marginal zone in the koushk Zn-Pb deposit

NO	WS-1	WS-2	WS-3	WS-4	WS-5	WS-6	WS-7	WS-8	WS-9	WS-10
Sample	Light-green variscite associated with black shale				Deep-green variscite associated with black shale		Spiderweb deep green variscites associated with black shale		Light-green variscite associated with microdiorite	
Major elements (wt.%)										
SiO2	1.497	0.316	0.887	0.836	0.078	4.708	7.148	5.413	2.142	2.46
Al2O3	28.21	28.763	28.012	27.936	28.903	27.807	23.857	24.222	27.304	25.166
CaO	0.343	0.111	0.07	1.111	0.04	0.141	2.2	1.385	0.635	2.246
Na2O	nd	nd	nd	0.046	nd	0.2	0.052	0.099	0.147	0.135
K2O	0.021	0.025	0.016	0.015	0.039	0.293	0.04	0.025	0.023	0.444
P2O5	43.32	43.413	43.385	42.13	44.659	40.007	36.576	37.096	41.694	34.812
Fe2O3	0.647	0.399	1.258	0.203	0.429	0.174	0.152	0.98	0.466	0.247
MgO	0.053	0.079	0.078	0.067	0.087	0.045	0.041	0.051	0.022	0.035
MnO	0.019	nd	0.012	nd	0.013	nd	nd	nd	0.017	nd
TiO2	0.147	0.045	0.06	0.06	0.172	0.099	0.27	0.082	0.12	0.223
SO3	1.602	1.506	1.399	3.191	1.088	2.463	5.476	5.352	2.968	7.167
L.O.I	23.22	24.55	24.07	23.96	23.82	22.67	23.48	24.38	23.19	26.17
Al/P	0.65	0.66	0.64	0.66	0.64	0.69	0.96	0.65	0.65	0.72
Trace elements (ppm)										
Cl	290	360	160	280	300	240	220	390	200	740
Sc	100	70	180	nd	50	nd	nd	200	380	180
V	1560	730	2120	600	1270	2290	1060	1520	1820	1540
Cr	350	370	360	340	480	410	370	330	380	320
Ni	60	nd	30	50	30	40	nd	40	nd	30
Cu	3170	1390	850	1550	200	2280	1400	2190	2690	1190
Zn	3250	4780	3200	1430	3950	7720	1410	2150	5290	4660
Ga	130	110	140	80	150	140	140	120	170	120
Sr	30	nd	10	10	nd	270	20	100	40	20
Pb	200	90	400	110	90	310	110	2100	1290	90

جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای به روش XPMA بر روی واریسکیت‌های سبز مرتبط با زون حاشیه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک. مقادیر بر حسب درصد هستند.

Table 3. XPMA spot-analysis results of deep green variscite associated with the marginal zone in the Koushk Zn-Pb Deposit. The values are in percent.

Deep-green variscite associated with black shale										
No	ws-1	ws-2	ws-3	ws-4	ws-5	ws-6	ws-7	ws-8	ws-9	ws-10
Major elements(wt.%)										
SiO ₂	ND	ND	ND	0.36	0.63	0.18	ND	ND	0.41	0.39
Al ₂ O ₃	33.87	33.65	34.12	33.09	33.5	33.65	34.62	32.75	34.31	33.67
P ₂ O ₅	44.01	42.68	42.81	41.68	39.88	42.92	40.42	44.75	38.79	40.77
Fe ₂ O ₃	0.23	0.24	0.13	0.13	0.2	0.27	0.18	0.14	0.23	0.42
TiO ₂	0.86	1	0.33	0.56	1.04	0.63	0.65	0.67	0.78	0.74
CaO	0.14	0.09	0.07	0.12	0.13	0.09	0.12	0.12	0.1	0.14
K ₂ O	0.21	0.2	0.13	0.13	0.16	0.18	0.13	0.15	0.16	0.16
V ₂ O ₅	1.04	1.03	0.57	0.8	1.02	0.84	0.74	0.83	0.91	0.67
Cr ₂ O ₃	0.19	0.05	0.08	0.18	0.09	0.13	0.09	0.16	0.14	0.17
SO ₃	0.84	0.47	0.46	0.77	0.85	0.95	0.57	0.71	0.58	0.75
Cl	0.29	0.26	0.18	ND	0.26	0.23	0.23	0.19	0.27	0.26
ZnO	0.24	0.25	0.14	0.17	0.2	0.19	0.27	0.16	0.17	0.18

جدول ۴. ضریب همبستگی عناصر به روش پیرسون مرتبط با نسل‌های مختلف واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک

Table 4. Pearson correlation coefficients of elements related to different generations of variscite in the Koushk Zn-Pb deposit

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	SO ₃	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
SiO ₂	1.00																
Al ₂ O ₃	-0.83	1.00															
CaO	0.60	-0.88	1.00														
Na ₂ O	0.51	-0.36	0.29	1.00													
K ₂ O	0.19	-0.24	0.37	0.64	1.00												
P ₂ O ₅	-0.76	0.92	-0.89	-0.58	-0.59	1.00											
Fe ₂ O ₃	-0.18	0.05	-0.33	-0.35	-0.41	0.25	1.00										
MgO	-0.59	0.58	-0.56	-0.76	-0.41	0.66	0.30	1.00									
MnO	-0.35	0.30	-0.33	-0.06	-0.20	0.38	0.09	0.23	1.00								
TiO ₂	0.46	-0.54	0.64	0.11	0.36	-0.54	-0.44	-0.43	0.04	1.00							
SO ₃	0.63	-0.90	0.95	0.49	0.53	-0.97	-0.26	-0.63	-0.32	0.54	1.00						
V	0.20	0.01	-0.27	0.50	0.34	-0.07	0.39	-0.33	0.13	-0.03	-0.08	1.00					
Cr	-0.21	0.49	-0.56	-0.11	-0.14	0.52	-0.19	0.38	0.72	0.10	-0.57	0.12	1.00				
Ni	-0.16	0.19	-0.14	-0.05	0.12	0.12	0.20	0.18	-0.35	-0.21	-0.11	0.16	-0.17	1.00			
Cu	0.28	-0.09	-0.02	0.38	-0.06	-0.09	0.00	-0.62	-0.51	-0.14	0.03	0.26	-0.38	0.23	1.00		
Zn	-0.12	0.38	-0.44	0.57	0.54	0.11	-0.22	-0.21	0.17	-0.15	-0.24	0.58	0.37	-0.12	0.18	1.00	
Pb	0.35	-0.41	0.09	0.35	-0.24	-0.25	0.49	-0.36	0.09	-0.27	0.24	0.29	-0.25	-0.02	0.41	-0.08	1.00

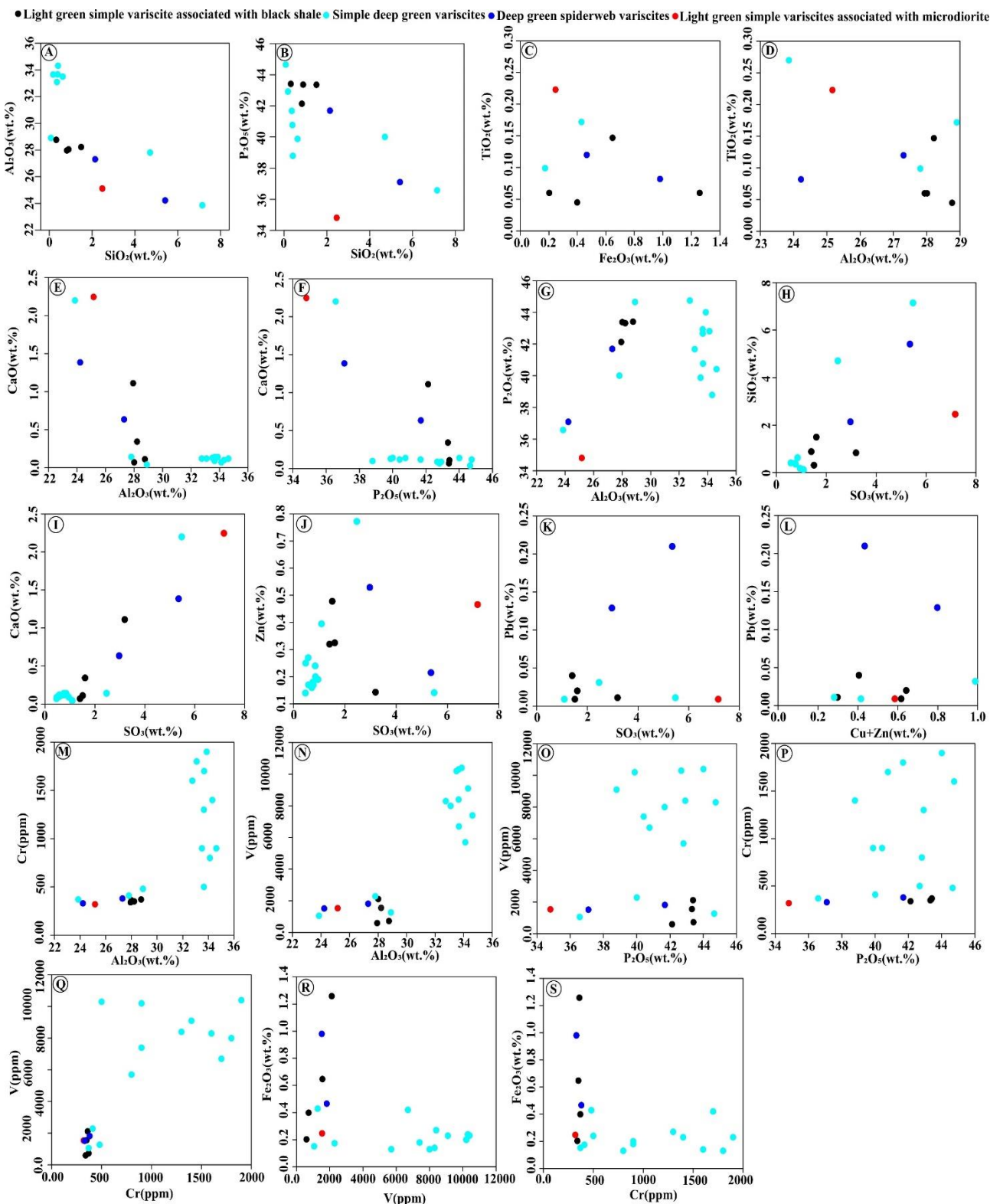
جدول ۵. مؤلفه‌های آماری عناصر در واریسکیت‌های تجزیه‌شده در کانسار روی و سرب کوشک

Table 5. Statistical parameters of the analyzed variscites, Kushk Zn-Pb deposit

	Mean	Confidence	Confidence	Median	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Standard	Skewness	Std.Err.	Kurtosis	Std.Err.
SiO ₂	2.55	0.83	4.27	1.82	0.08	7.15	5.79	2.41	0.76	0.94	0.69	-0.32	1.33
Al ₂ O ₃	27.02	25.67	28.36	27.87	23.86	28.90	3.53	1.88	0.59	-0.92	0.69	-0.86	1.33
CaO	0.83	0.21	1.45	0.49	0.04	2.25	0.75	0.87	0.27	0.83	0.69	-0.86	1.33
Na ₂ O	0.07	0.02	0.12	0.05	0.00	0.20	0.01	0.07	0.02	0.66	0.69	-0.93	1.33
K ₂ O	0.09	-0.01	0.20	0.03	0.02	0.44	0.02	0.15	0.05	2.01	0.69	3.04	1.33
P ₂ O ₅	40.71	38.26	43.16	41.91	34.81	44.66	11.70	3.42	1.08	-0.70	0.69	-1.04	1.33
Fe ₂ O ₃	0.50	0.23	0.76	0.41	0.15	1.26	0.14	0.37	0.12	1.24	0.69	0.74	1.33
MgO	0.06	0.04	0.07	0.05	0.02	0.09	0.00	0.02	0.01	0.04	0.69	-1.09	1.33
TiO ₂	0.13	0.07	0.18	0.11	0.05	0.27	0.01	0.08	0.02	0.83	0.69	-0.28	1.33
SO ₃	3.22	1.73	4.72	2.72	1.09	7.17	4.36	2.09	0.66	0.87	0.69	-0.48	1.33
L.O.I	23.95	23.26	24.65	23.89	22.67	26.17	0.94	0.97	0.31	1.24	0.69	2.50	1.33
Cl	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.07	0.00	0.02	0.01	2.16	0.69	5.52	1.33
Sc	10.21	-12.86	33.28	0.01	0.00	102.00	1040.14	32.25	10.20	3.16	0.69	10.00	1.33
V	0.15	0.11	0.18	0.15	0.06	0.23	0.00	0.06	0.02	-0.09	0.69	-0.73	1.33
Cr	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	1.56	0.69	2.99	1.33
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.26	0.69	-1.10	1.33
Cu	0.17	0.11	0.23	0.15	0.02	0.32	0.01	0.09	0.03	0.09	0.69	-0.38	1.33
Zn	0.38	0.24	0.52	0.36	0.14	0.77	0.04	0.19	0.06	0.66	0.69	0.50	1.33
Ga	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.57	0.69	1.23	1.33
Sr	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	2.55	0.69	6.77	1.33
Pb	0.05	0.00	0.10	0.02	0.01	0.21	0.00	0.07	0.02	2.01	0.69	3.40	1.33

مشاهده می‌شود. مقادیر روی در تمامی نمونه‌های مورد بررسی مشابه بوده و متوسط مقادیر آن ۲۸۷۷ ppm است؛ اما مقادیر سرب تنها در واریسکیت‌های تار عنکبوتی غنی‌شدگی بالایی نسبت واریسکیت‌های سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ مرتبط با شیل‌های سیاه و سیل‌های دیوریتی نشان می‌دهد. وجود این مقدار روی و سرب در نمونه‌های مورد بررسی ناشی از وجود ادخال‌های گالن و اسفالریت و پیریت‌های کانه‌دار به صورت انتشاری یا رگه-رگچه‌ای در ساختار واریسکیت و رگچه‌های شیلی همراه با واریسکیت است (شکل ۴-ع).

در واریسکیت‌های کوشک نسبت Al_2O_3/P_2O_5 بالاتری از واریسکیت خالص دارند که نشانه آرایش با کانی‌های آلومینوسیلیکاتی (رس، کائولینیت، هالوزیت) است. نتایج پراش پرتو ایکس بیانگر این مطلب است. مقادیر مس در نمونه‌های مورد بررسی بین ۲۰۰ تا ۳۱۷۰ ppm در تغییر است و که احتمالاً ناشی از وجود ادخال‌های ناچیز کالکوپریت، لینارایت $PbCu[(OH)_2]$ یا فازهای اکسیدی مس مانند مالاکیت در کانی واریسکیت یا واحدهای شیلی میزبان است. کانی‌زایی مالاکیت در کانسار خارنگان همراه با کریستال‌های روی در مجاورت کانسار کوشک



شکل ۱۴. A تا S: نمودار همبستگی عناصر در واریسکیت‌های با رنگ‌های مختلف در کانسار روی و سرب کوشک

Fig. 14. A to S: Correlation diagrams of elements in variscites of different colors from the Koushk Pb-Zn deposit

تفاوت رنگ در واریسکیت کوشک

در کانسار کوشک، واریسکیت معمولاً طیف گسترده‌ای از رنگ‌های سبز را نشان می‌دهد؛ از جمله سبز مایل به سفید، سبز زیتونی، سبز خزه‌ای و سبز مایل به آبی. بررسی کانی‌زایی واریسکیت از سطح به عمق نشان می‌دهد که رنگ به طور مستقیم به عمق وابسته نیست. اما نمونه‌های سبز تیره حاوی بالاترین مقادیر Cr^{3+} هستند. در صورت وجود بافت مخفی بلور با جاروسیت، فسفوسیدریت یا گوتیت، واریسکیت تمایل به کسب رنگ قهوه‌ای مایل به سبز تا زیتونی دارد. اگر مواد معدنی سفید رنگ مانند کوارتز، کاندیت، کراندالیت یا آلونیت در این مخلوط‌ها دخیل باشند، رنگ واریسکیت کم‌رنگ‌تر می‌شود. رنگ یکی از ویژگی‌های بسیار قابل توجه مواد معدنی است. گاهی اوقات می‌تواند یک ویژگی تشخیصی قدرتمند باشد؛ اما در موارد دیگر، بسیار متغیر و غیرقابل اعتماد است. دلایل متعددی وجود دارند که رنگ‌دانه‌ی مواد معدنی را کنترل می‌کنند. بیشتر آنها به گذارهای الکترونی (Nassau, 1978) مربوط می‌شوند. به عنوان مثال، گذارهای میدان بلوری در یک عنصر رنگ‌زا (Burns, 1993) مانند Cu ، Ni ، Co ، Fe ، Mn ، Cr یا V ؛ انتقال بار بین عناصر و مراکز رنگی مرتبط با نقص‌های ساختاری (Krambrock et al., 2007). ناخالصی‌های فیزیکی و ساختارهای هم‌رشد نیز می‌توانند منبع رنگ باشند.

بر اساس ترکیب استوکیومتری، واریسکیت باید بی‌رنگ باشد؛ اما این حالت بسیار نادر است و این کانی معمولاً رنگ‌های بسیار شدیدی نشان می‌دهد. واریسکیت درشت‌بلور کمیاب است و معمولاً به عنوان محصول هوازگی پگماتیت‌های گرانیته تکامل یافته غنی از منگنز تشکیل می‌شود و به صورت تجمع‌های شعاعی که حفره‌ها یا ریزرگه‌ها را پر می‌کنند، دیده می‌شود. این گونه، جلای شیشه‌ای شاخص و رنگ‌های سبز زمردی یا قرمز شدید را به نمایش می‌گذارد. علت این رنگ‌ها به جانشینی Al توسط Fe^{3+} ، Mn^{2+} یا Mn^{3+} نسبت داده می‌شود (Lindberg

and Pecora, 1958; Cassedanne and Baptista, 1999).

سایر پژوهشگران نیز اشاره کرده‌اند که این رنگ آمیزی می‌تواند ناشی از حضور یون‌های V^{4+} یا V^{3+} نیز باشد (Rossman, 2004). در سال‌های اخیر، یک بررسی نظام‌مند که نمونه‌های واریسکیت را از سه منطقه مختلف در اروپا مقایسه کرده است، به این نتیجه رسید که کروم سه‌ظرفیتی در موقعیت هشت‌وجهی Cr^{3+} به احتمال زیاد عامل ایجاد رنگ سبز واریسکیت است (Calas et al., 2005).

علاوه بر این، تغییرات در رنگ واریسکیت به درجه اکسایش آهن نسبت داده شده است (Díaz-Acha et al., 2020) و بنابراین می‌تواند اطلاعاتی در مورد سطح یافت شدن آن در یک ذخیره معدنی واحد ارائه دهد (Melgarejo et al., 2019). نخستین بررسی‌های متمرکز بر بررسی رنگ‌دهی واریسکیت نشان دادند که رنگ سبز معمولی احتمالاً به دلیل وجود رنگ‌زاها مانند Cr^{3+} تولید شده است (Fritsch and Rossman, 1987). با این حال، شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد رنگ سبز واریسکیت تنها به حضور ناخالصی‌های ترکیبی ساختاری (رنگ‌دانه) مرتبط نیست؛ بلکه با نقص‌های بلوری نیز ارتباط دارد. در واقع، دو نوع چندریخت از واریسکیت شناخته شده است: نوع مس‌باخ و نوع لوسین. تفاوت میان این دو چندریخت به موقعیت ساختاری مولکول‌های آب، یعنی W1 و W2 ، مربوط می‌شود. مولکول‌های W2 از طریق یک پیوند هیدروژنی متصل می‌شوند؛ در حالی که W1 با دو پیوند هیدروژنی به شبکه بلوری متصل است. نسبت W1 به W2 از ۱:۱ در نوع لوسین تا ۳:۱ در نوع مس‌باخ متغیر است (Salvador and Fayos, 1972). با توجه به تفاوت میان دو چندگونه ساخت، به خوبی شناخته شده است که واریسکیت می‌تواند در اثر تابش پیوسته چراغ هالوژن که نور خورشید را شبیه‌سازی می‌کند، از نوع مس‌باخ به نوع لوسین تبدیل شود (García-Guinea et al., 2008). این تغییر چندریختی همچنین باعث کاهش محسوس رنگ می‌شود که نشان می‌دهد تغییرات

ساختاری نیز می‌توانند بر رنگ‌زایی واریسکیت تأثیر گذار باشند. برخی از کانی‌ها مانند کاندیت، آلونیت، جاروسیت و کراندالیت، اجزای شاخص **دگرسانی اسیدی اکسایشی** هستند که در این مورد، با هوازدگی سولفیدهای پراکنده در شیل‌های سیاه مرتبط هستند. واریسکیت و فسفوسیدریت نیز کانی‌هایی هستند که به طور معمول در خاک‌های اسیدی یافت می‌شوند (Nriagu and Moore, 1984; Werner et al., 2017). از این رو، سیالات اسیدی اکسایشی قادر بوده‌اند به درون شیل‌های سیاه **رنگ‌باخته** نفوذ کرده و با آنها واکنش دهند تا این کانی‌ها را تولید کنند. نمونه‌های واریسکیت خالص کوشک ممکن است طیف‌های گوناگونی از رنگ سبز داشته باشند که در این میان گونه‌های کلاسیک با رنگ سبز تند، بیش از همه مورد توجه برای ارزش‌گذاری هستند. در این گونه‌های نهان‌بلور، نمی‌توان رنگ سبز را به حضور یک مؤلفه شیمیایی اصلی، مانند آهن (Fe)، نسبت داد. در حقیقت، محتوای آهن در تک‌دانه‌های واریسکیت هیچ ارتباطی با رنگ قطعه ندارد. سایر عناصر رنگ‌زای احتمالی در واریسکیت، مانند منگنز (Mn)، در نمونه‌های کوشک ناچیز است.

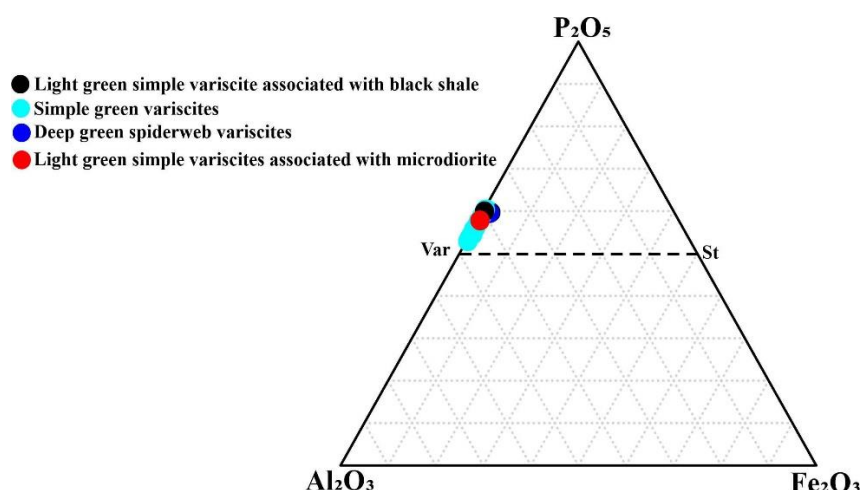
تفاوت در طیف‌های رنگی سبز/آبی را می‌توان به طور تقریبی به تفاوت در محتوای Cr^{3+} نسبت داد. در واریسکیت‌های سبز پررنگ و واریسکیت‌های سبز پررنگ تار عنکبوتی مرتبط با شیل‌های سیاه میانگین محتوای کرم و وانادیوم به ترتیب ۹۸۰ ppm و ۶۱۶۴ ppm است؛ در حالی که در واریسکیت سبز کم‌رنگ مرتبط با شیل‌های سیاه و سیل‌های دیوریتی میانگین محتوای کرم و وانادیوم به ترتیب ۳۴۸ ppm و ۱۳۱۰ ppm است. مقادیر پایین V و Cr در واریسکیت کوشک، ناشی از درهم‌رشدی با مقادیر متغیری از سایر کانی‌های نهان‌بلور بدون Cr یا V، مانند کوارتز، کانی‌های رسی، سایر فسفات‌ها، جاروزیت یا گوتیت است. در تمامی این موارد، چنان‌که نتایج تجزیه‌های XRD، SEM-EDS و XMPA نشان داده‌اند، واریسکیت نهان‌بلور به طور درهم‌رشدی با کانی‌های دیگر که رنگ‌های متفاوتی دارند، مشاهده می‌شود. از این رو، رنگ نهایی این مخلوط‌ها برآیندی از رنگ‌های مختلف کانی‌های

مربوطه است و بسته به درهم‌رشدی کانی‌ها، تغییر می‌کند. بنابراین، بخش عمده‌ای از واریسکیت در کانسار کوشک با درجه‌های مختلف با کانی‌های دیگر مخلوط شده است که این امر می‌تواند باعث ایجاد نوسان‌های گسترده در هر دو زمینه، یعنی رنگ‌مایه‌های سبز و محتوای به ظاهر کم Cr^{3+} شود. در نهایت، چنان‌که اشاره شد، محتوای Fe^{3+} در واریسکیت ممکن است مربوط به **درهم‌رشدی‌های** بسیار ظریف با فسفوسیدریت، ژاروسیت، گوتیت و شاید دیگر کانی‌های غنی از Fe^{3+} است. از این رو، برخلاف آنچه توسط کوثره و همکاران (Querrel et al., 2019) پیشنهاد شده است، محتوای Cr^{3+} احتمالاً برای تشخیص خاستگاه‌ها به اندازه کافی تعیین‌کننده نیست و باید در استفاده از آن احتیاط کرد؛ مگر در مواردی که Fe^{3+} به طور قطع در ساختار بلوری واریسکیت جای گرفته باشد. رنگ در رگه‌های اصلی می‌تواند به صورت ناگهانی یا تدریجی تغییر کند. حالت دوم تغییرات تدریجی به دلیل وجود جبهه‌های جاننشینی متاسوماتیک و ایجاد رگه‌بندی در کانی‌های نهان‌بلور و متخلخل اولیه توسط پالس‌های متوالی سیالات تأخیری، رایج‌ترین حالت است (Díaz-Acha et al., 2022). در نتیجه، رنگ در امتداد رگه‌ها و **گرهک‌ها** به صورت تدریجی تغییر می‌کند (شکل ۳-N). نمونه بارزی از این موضوع در (شکل ۵-A و B) مشاهده می‌شود. تغییرات تدریجی، رنگ را از هسته خاکستری فسفوسیدریتی به یک واحد سبز کم‌رنگ (متشکل از مخلوط‌های با غالبیت فسفوسیدریت همراه با واریسکیت) و در نهایت به حاشیه‌های سبز تیره با غالبیت واریسکیت نشان می‌دهد.

بررسی‌های کیفی اولیه بر اساس مشاهده‌های طیف‌سنجی انجام شده، نشان می‌دهد رنگ سبز واریسکیت به علت وجود Cr^{3+} است (Fritsch and Rossman, 1987; Calas et al., 2005). رنگ موجود در نمونه‌های واریسکیت و متاواریسکیت‌های آرکانزاس به علت وجود مقدار کمی از V^{4+} و Cr^{3+} است (Foster and Schaller, 1966).

می تواند ناشی از مقادیر کم فسفات های آهن مانند استرنگیت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، ارتورومبیک (و فسفوسیدریت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، مونوکلینیک) باشد. در واریسکیت های با رنگ سبز مایل به آبی (سبز کم رنگ)، که رنگ اغلب ناشی از وجود آهن دوظرفیتی است، مقادیر Cr و V نسبت به واریسکیت های سبز پر رنگ و واریسکیت های تار عنکبوتی ناچیز است. تجزیه زمین شیمیایی دانه های واریسکیت، نشان دهنده ترکیب اصلی کانی های واریسکیت متعلق به گروه واریسکیت و سری واریسکیت- استرنگیت ($[\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] - [\text{Fe}^{+3}\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$) است. (شکل ۱۵).

هر چه ناخالصی های آهن موجود در واریسکیت بالاتر باشد، رنگ قهوه ای تری خواهد داشت. در واریسکیت های کوشک رنگ سازهای Cr، V و Fe همراه با مقادیر کمی CaO ، Na_2O ، TiO_2 و K_2O شناسایی شدند. حضور SO_3 ناشی از حضور کانی های سولفیدی (پیریت، اسفالریت، گالن) و سولفاتی (آلونیت، ژاروسیت) است. در مقایسه با واریسکیت استرالیا (Willing et al., 2008) و ایالات متحده، پرتغال، فرانسه و ایتالیا (Calas et al., 2005) و تاجیکستان مرکزی (Litvinenko et al., 2016)، مقادیر V_2O_5 ، Fe_2O_3 و Cr_2O_3 در واریسکیت های کوشک کمتر است (جدول های ۲، ۳ و ۴). مقادیر پایین آهن



شکل ۱۵. نمودار سه تایی $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ و قرارگیری واریسکیت در امتداد اتصال واریسکیت- استرنگیت در کانسار روی سرب کوشک

Fig. 15. Ternary diagram of $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ showing the position of variscite along the variscite-strengite join in the Koushk Pb-Zn deposit

زمین شیمی عناصر کمیاب

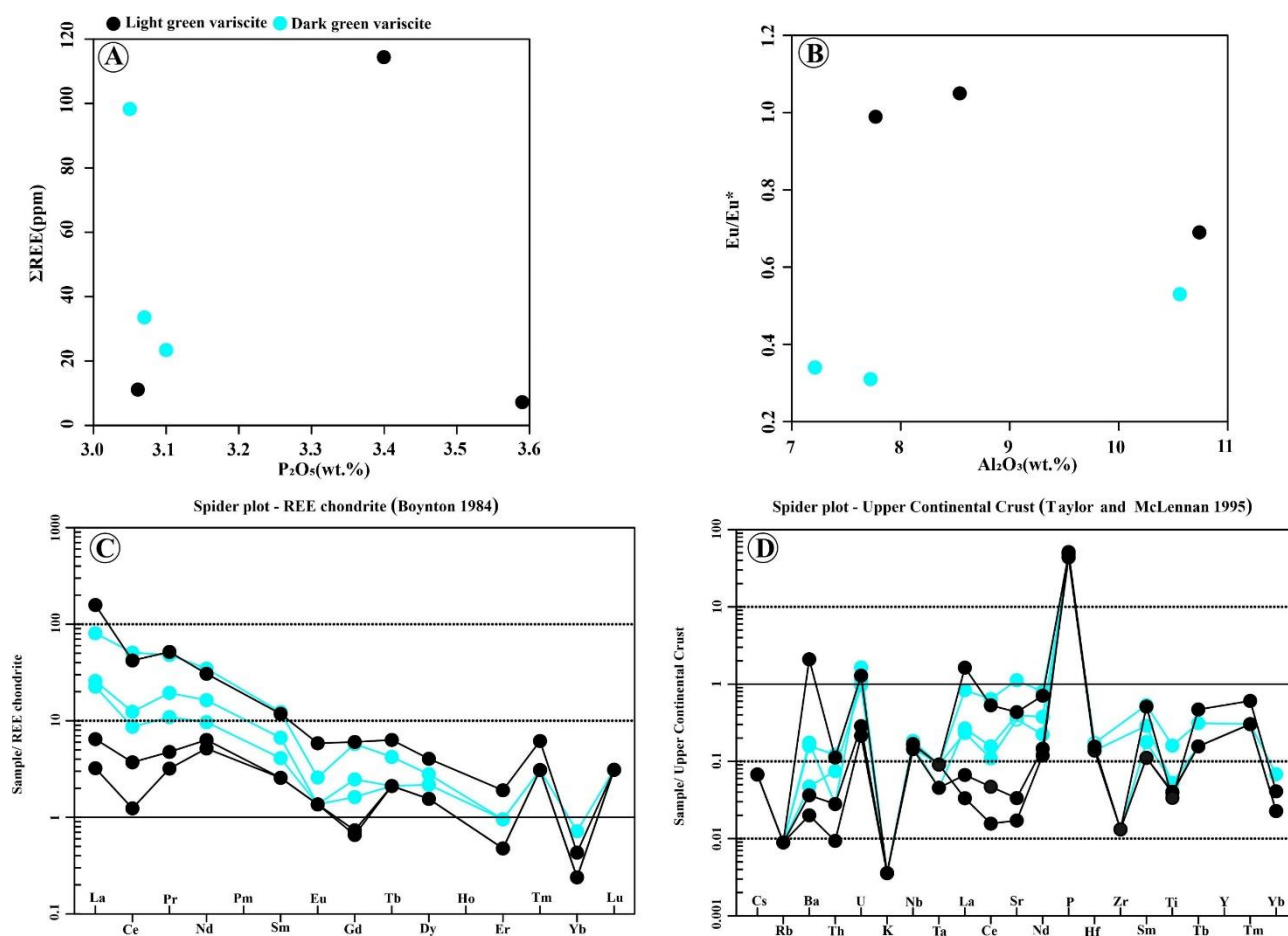
بهنجار شده نسبت به کندریت (شکل ۱۶-C و D)، غنی شدگی ناچیز عناصر نادر خاکی سبک با آنومالی منفی Eu، Ce و عناصر کمیاب Ti، K و Rb و ناهنجاری مثبت U، Ba و P در بیشتر نمونه ها نشان می دهد. الگوی REE+Y، غنی شدگی LREEs و ناهنجاری منفی Ce نشان می دهند و روند دمای پایین سیالات گرمابی تا شبیه آب دریا را پوشش می دهند.

مقادیر $\sum \text{REE}$ (جدول ۶) در کانسنگ واریسکیت ناچیز است و این مقادیر از ۷/۲۱ ppm تا ۱۱۴/۲۸ (میانگین ۴۷/۹۹ sh) متغیر است. شکل ۱۶-A و B، همبستگی مثبت P_2O_5 را در برابر $\sum \text{REE}$ و کوواریانس ناهنجاری Eu/Eu^* را در برابر Al_2O_3 نشان می دهند که در آن ناهنجاری های منفی Eu به خوبی تعریف شده اند. نمودار عناصر نادر خاکی و عناصر کمیاب معمولی

جدول ۶. نتایج تجزیه ICP-MS برای تعیین محتوای عناصر اصلی و کمیاب کانسنگ واریسکیت در کانسار روی سرب کوشک

Table 6. ICP-MS results of major and trace element contents of variscite ore at the Koushk Zn-Pb deposit

NO	Dark-green variscite associated with black shale			Light-green variscite associated with black shale		
Element	WS11	WS12	WS13	WS14	WS15	WS16
Majore elemente						
Al	>10%	77231	72128	77697	85414	>10%
P	>3%	>3%	>3%	>3%	>3%	>3%
Ca	22502	23745	17957	878	525	2711
Ti	157	480	158	117	121	101
Fe	1122	1061	1015	657	1010	1213
Mg	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Mn	12	14	16	5	12	14
K	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Na	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Trace elemente						
As	5.4	5.9	5.7	1.6	2.9	2.1
Co	4.3	4.6	3.6	4.6	3.9	5.1
Cr	245	112	117	89	108	135
Cu	2099	1111	728	261	639	448
Ni	24	12	11	8	9	10
S	14709	15426	11950	747	489	2930
Cs	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Rb	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Ba	96	87	26	11	20	1152
Th	0.3	1.3	0.8	0.1	0.3	1.2
U	4.6	3.2	2.7	0.6	0.8	3.6
Nb	3.7	4.6	3.9	3.6	4.1	4.2
Ta	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2
Sr	121.8	392.3	138.6	11.7	6	151.8
Hf	0.8	1	0.8	0.8	0.9	0.9
Zr	<5	9	7	<5	<5	<5
V	600	427	777	160	248	265
Rare Earth Elements						
La	7	25	8	2	1	49
Ce	7	41	10	3	1	34
Pr	1.33	5.86	2.37	0.58	0.39	6.3
Nd	5.8	20.8	9.8	3.8	3.1	18.4
Sm	0.8	2.4	1.3	0.5	0.5	2.3
Eu	<0.1	0.19	<0.1	<0.1	<0.1	0.43
Gd	0.42	1.49	0.64	0.19	0.17	1.56
Tb	0.1	0.2	0.1	<0.1	<0.1	0.3
Dy	0.5	0.9	0.7	0.5	0.5	1.3
Er	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4
Tm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Yb	<0.05	<0.05	0.15	<0.05	<0.05	0.09
Lu	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Y	1.2	2.1	1.9	0.7	0.7	3.3
(La/Yb)n	94.39	337.1	35.96	26.97	13.48	367.06
(La/Sm)n	5.5	6.55	3.87	2.52	1.26	13.4
(Ce/Yb)n	36.21	212.1	17.24	15.52	5.17	97.72
(Ce/Sm)n	2.11	4.12	1.86	1.45	0.48	3.57
(Eu/Yb)n	5.69	10.81	1.9	5.69	5.69	13.59
Eu/Eu*	0.53	0.31	0.34	0.99	1.05	0.69
Ce/Ce*	0.55	0.82	0.55	0.67	0.39	0.47
ΣREE	23.4	98.29	33.56	11.12	7.21	114.38



شکل ۱۶. نمودارهای تغییرات در کانسننگ واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک. A: P_2O_5 -REE+Y (Marchig et al., 1982; Al-bassam and Magna, 2018), B: Al_2O_3 -Eu/Eu*chondrite (Lawrence et al., 2006), C: الگوهای REE+Y نرمال شده با کندریت (Boynton, 1985) و D: الگوهای عناصر کمیاب نرمال شده با کندریت، پوسته قاره‌ای بالایی (Taylor and McLennan, 1995)

Fig. 16. Variation diagrams in variscite ores at Koushk Zn-Pb deposit. A: P_2O_5 -REE+Y (Marchig et al., 1982; Al-bassam and Magna, 2018), B: Al_2O_3 -Eu/Eu*chondrite (Lawrence et al., 2006), C: chondrite normalized REE+Y patterns (Boynton, 1985), and D: chondrite normalized Trace elements patterns upper continental crust (Taylor and McLennan, 1995)

کانی‌سازی چندمرحله‌ای است و نشان‌دهنده فرایندهای انحلال و رسوب مجدد با توجه به شرایط فیزیکی-شیمیایی حاکم بر فرایند تشکیل است. علاوه بر این، نقشه‌های عنصری پرتو ایکس (شکل ۸)، تغییراتی را در محتوای P، Al و Fe نشان می‌دهند که توالی رسوب شناسایی شده آنها در دانه‌ها و سنگ‌های تجزیه و تحلیل شده منطبق است. همه این شواهد نشان می‌دهد که سنگ‌های کوشک مورد بررسی تحت فرایندهای زمین‌شناسی

تجزیه و تحلیل‌های نمودار سه‌تایی P-Al-Fe را در امتداد اتصال واریسکیت-استرنگیت نشان می‌دهد که یک محلول جامد کامل بین اعضای انتهایی را پیشنهاد می‌کند (Acevedo et al., 2021). تنوع بافت میکروسکوپی و زمین‌شیمی کانسننگ، امکان شناسایی رابطه مستقیم بین دانه‌ها و سنگ‌های مورد بررسی را فراهم می‌کند. این رابطه با شرایط شکل‌گیری از طریق رسوب واریسکیت و سایر فسفات‌های شناسایی شده مرتبط است که بیانگر

نوع C: دوفاز بخار-مایع غنی از بخار $V+L$ (شکل ۱۷-A تا H).
نوع D: میان‌بارهای دو مایعی حاوی CO_2 و بخار- LH_2O+LCO_2 (همراه با تشکیل کلاتریت)، در این نوع میان‌بارهای سیال فازهای مایع حاوی CO_2+H_2O حضور دارند و حضور اندک CO_2 در آب باعث می‌شود که در طی فرایند انجماد و اندازه‌گیری T_m-ice و CO_2 به صورت تشکیل کلاتریت دیده شود و باعث اندازه‌گیری مقادیر مثبت برای T_m شود (شکل ۱۷-A).

نوع E: تک‌فاز مایع (L) (شکل ۱۷-F تا H)
نوع F: تک‌فاز بخار (V) (شکل ۱۷-F تا I)
ادخال‌های سیال انواع B و C بیشترین فراوانی را در کوارتز و کلسیت مورد بررسی دارند. در این پژوهش، سیالات درگیر نوع B و C تحت بررسی‌های میکروترمومتری قرار گرفتند.

ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال

بررسی‌های سرمایشی

در این مرحله، دمای میان‌بارها تا انجماد کامل فازها به حالت جامد کاهش داده شد (کمترین دمای اندازه‌گیری $190^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد است) و سپس با گرم کردن مجدد، تغییرات در مرحله ذوب ثبت شد. دمای یوتیکتیک (T_e)، دمای مربوط به زمانی است که نخستین قطره مایع پدید می‌آید و مقدار آن به میزان کاتیون‌های حل شده در سیال وابسته است. نقطه یوتیکتیک برای سامانه خالص متشکل از $NaCl+H_2O$ معادل $-20/8^\circ C$ $T_e < -20/8^\circ C$ است (Williams-Jones et al., 1992). با توجه به اینکه T_e میان‌بارهای نوع B و C پایین‌تر از $-20/8^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد (۳۸- تا $-30/5^\circ C$ - درجه سلسیوس) است (شکل ۱۸-A)، بنابراین $NaCl$ و سایر نمک‌ها مانند KCl و $NaSO_4$ ممکن است در سیال کانه‌زا حضور داشته باشند (شکل ۱۸-F) (Williams-Jones et al., 1992). با افزایش دما، آخرین بلورهای یخ ناپدید می‌شوند. در میان‌بارهای نوع B و C، دامنه تغییرات ذوب آخرین قطعه یخ (T_m) در کانی کوارتز و کلسیت از $16^\circ C$ - تا $4^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد

یکسان و در شرایط محیطی مشابه تشکیل شده‌اند. فرایند فسفات‌شدن برای واریسکیت‌ها با یک ارتباط کانی‌شناسی خاص همراه است (Díaz-Acha et al., 2019). این امر امکان رد سایر محیط‌های تشکیل واریسکیت، مانند فرایندهای سوپرژنیک در سنگ‌های رسی را فراهم می‌کند (Díaz-Acha et al., 2019).

میان‌بارهای سیال

بررسی‌های سنگ‌نگاری

بررسی‌های سنگ‌نگاری و میکروترمومتری سیالات درگیر بر روی دوکانی کوارتز و کلسیت انجام شد (شکل ۱۷ و جدول ۷). بیشتر سیالات درگیر اولیه در کوارتز و کلسیت مرتبط با کانسنک واریسکیت، گرد تا بی‌شکل، گاهی اوقات میله‌ای شکل هستند و در برخی از آنها آثار نازک‌شدگی دیده می‌شود. اندازه بیشتر سیالات درگیر از ۵ تا ۵۰ میکرون متغیر است. مجموعه‌های سیالات درگیر شامل میان‌بارهای سیال از چند فاز تشکیل شده‌اند که از این پس به عنوان میان‌بارهای چندبلوری نامیده می‌شوند (شکل ۱۷-A). میان‌بارهای سیال حاوی مایع، بخار و یک کانی دختر هالیت (بلورهای مات یا شفاف) هستند که به دیواره‌های میان‌بار سیال چسبیده و از آنجا به سمت داخل امتداد می‌یابند (شکل ۱۷-A). میان‌بارهای چندبلوری در کوارتز همیشه در کنار میان‌بارهای مایع در مجموعه‌های هم‌سن رخ می‌دهند و اغلب از جامدات بلوری دانه‌ای و میله‌ای شکل تشکیل شده‌اند (شکل ۱۷-A). وجود سه میان‌بار مجزا، مایع، بخار و فازهای چندبلوری در همان مجموعه‌ها، گواه روشنی بر به دام افتادن هم‌زمان آنهاست. نمک‌های کلریدی شامل هالیت و سیلویت به عنوان نمک‌های غالب هستند (شکل ۱۷-A).

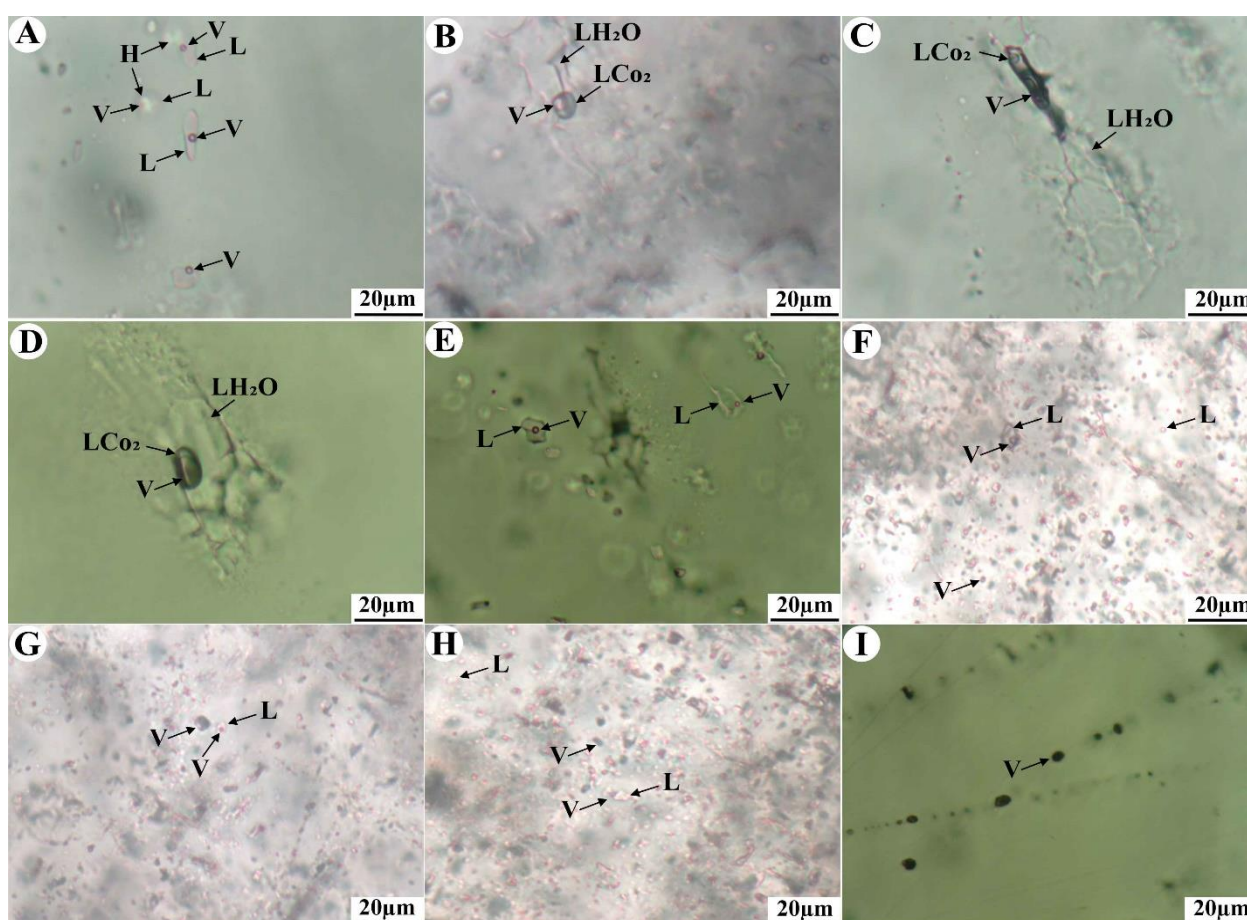
این میان‌بارها تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز هستند و می‌توان آنها را به ۶ گروه تقسیم کرد که عبارتند از:

نوع A: سه‌فاز مایع-بخار-جامد ($L+V+S$) (فاز جامد: هالیت $\pm$ کانی مات) (شکل ۱۷-A).

نوع B: دوفاز مایع-بخار غنی از مایع $L+V$ (شکل ۱۷-A تا H).

1985) دماهای اندازه گیری شده در میان بارهای مورد بررسی به ترتیب با بیشترین شوری (معادل ۱۹/۷۶ درصد وزنی نمک طعام) و کمترین میزان شوری (معادل ۵/۶۹ درصد وزنی نمک طعام) همخوانی دارند (شکل ۱۸-E). میان بارهای سیال نوع B و C دارای شوری بین ۵/۶۹ تا ۱۹/۷۶ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند (شکل ۱۸-F).

است (شکل ۱۸-B). در این مرحله، در میان بارهای مرتبط با کانی کوارتز، کلاتریت در میان بارهای L+V تشکیل شد و بنابراین میزان CO₂ بیشتر از ۲/۷ درصد وزنی تخمین زده می شود (Fan et al., 2000). دمای Tm-CO₂ بین ۵۹- تا ۵۲- متغیر است و Tm کلاتریت ۴ تا ۹/۵ است (شکل ۱۸-C و D). بر اساس آخرین دمای ثبت شده طی ذوب یخ (T_m)، می توان میزان شوری و نوع نمک حل شده در یک سیال را تعیین کرد (Shepherd et al.,



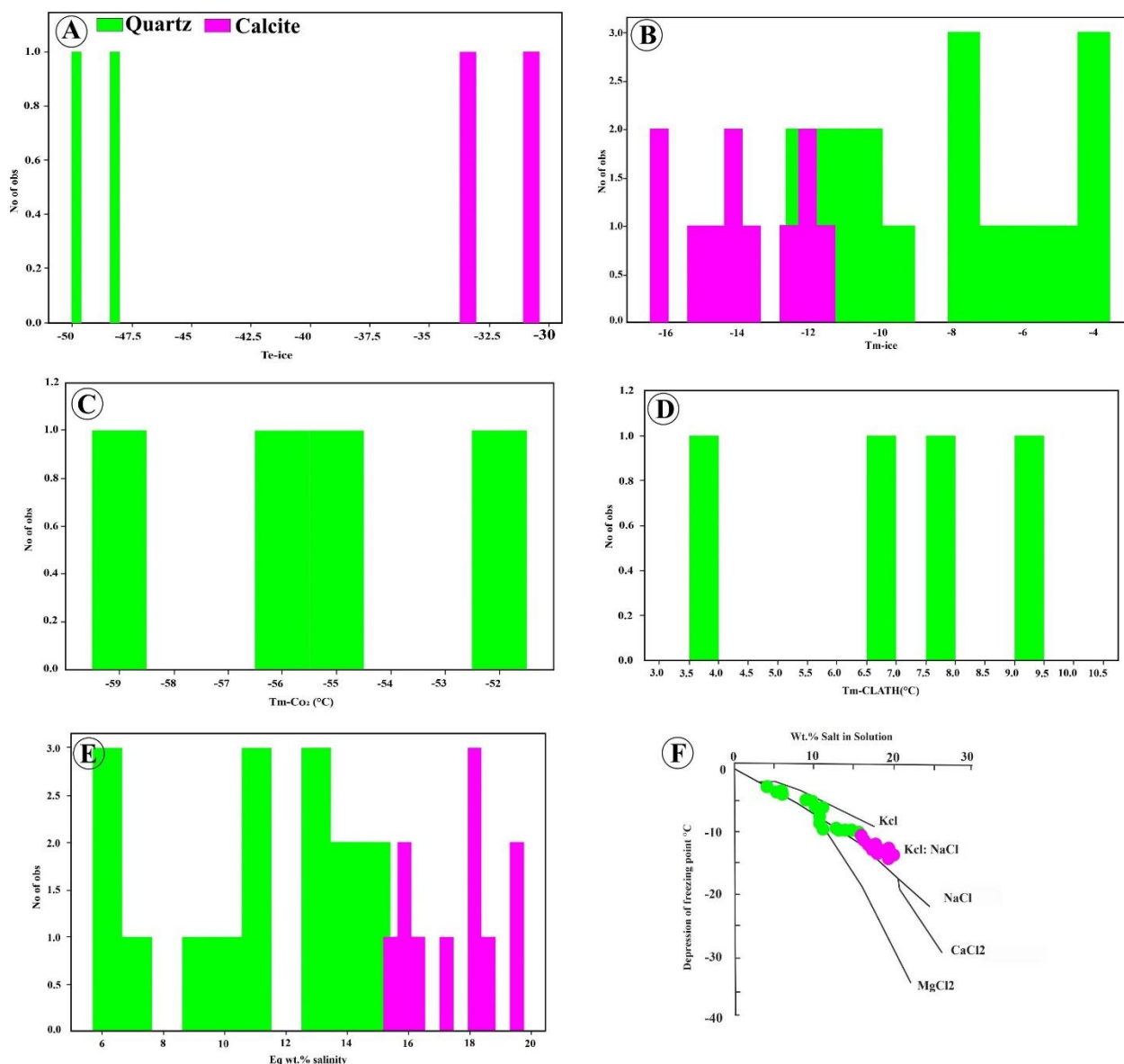
شکل ۱۷. میان بارهای سیال در کانی کوارتز (قسمت های A تا E و I) و کلسیت (قسمت های F تا H) مرتبط با افق های کانی زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک. A: میان بارهای سه فاز (LVS)، دوفازی غنی از مایع (LV)، B تا D: میان بارهای دوفازی همراه با فاز CO₂، E تا H: میان بارهای دوفازی غنی از مایع و میان بارهای تک فاز (L) و بخار (V) و I: میان بارهای تک فاز گازی به صورت منفرد (V)

Fig. 17. Fluid inclusions of the Quartz and calcite mineral associated with variscite mineralization horizons in the Koushk Zn-Pb deposit. A: three-phase inclusions (LVS), Liquid-rich two-phase inclusions (LV), B to D: Two-phase inclusions with clathrat, E to H: double-phase liquid inclusions (LV), and one-phase liquid inclusions and one-phase vapor inclusions, I: mono-phase vapor inclusions (V)

جدول ۲. داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال کانی کوارتز و کلسیت مرتبط با افق‌های کانی‌زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک

Table 7. Microthermometric data of fluid inclusions of Quartz and calcite mineral associated with variscite mineralization horizons in the Koushk Zn-Pb deposit

No	sample	Rock type	fluid inclusion type	phase	Tutec	Tice	salinity	Th V-l	Tm-CO ₂ (°C)	Tm-CLATH(°C)	Density
1	kh-2	QZ	p	L-V		-4.5	7.11	219			0.85
2	kh-2	QZ	p	L ₁ +L ₂ +V			0.00	244	-52	9.5	0.78
3	kh-2	QZ	p	L-V		-10	13.38	188			0.98
4	kh-2	QZ	p	L-V	-48	-	14.23	180			0.97
5	kh-2	QZ	p	L-V		-8	11.41	222			0.92
6	kh-2	QZ	p	L-V		-6.9	10.18	260			0.9
7	kh-2	QZ	p	L-V	-50	-11.2	14.39	191			0.95
8	kh-2	QZ	p	L-V		-12.6	15.41	240			0.92
9	kh-2	QZ	p	L-V		-4	6.41	278			0.78
10	kh-2	QZ	p	L-V		-9.2	12.63	310			0.82
11	kh-2	QZ	p	L ₁ +L ₂ +V			0.00	340	-55	4	0.5
12	kh-2	QZ	p	L-V		-3.5	5.69	270			0.79
13	kh-2	QZ	p	L-V		-6.1	9.21	241			0.88
14	kh-2	QZ	p	L-V		-7.8	11.19	236			0.93
15	kh-2	QZ	p	L ₁ +L ₂ +V			0.00	247.00	-59	8	0.9
16	kh-2	QZ	p	L-V		-10	13.38	268			0.92
17	kh-2	QZ	p	L-V		-12.4	15.28	315			0.82
18	kh-2	QZ	p	L ₁ +L ₂ +V			0.00	245	-56	6.8	0.79
19	kh-2	QZ	p	L-V		-3.9	6.27	229			0.88
20	kh-2	QZ	p	L-V		-7.5	10.86	162			0.97
23	1-WS	Cal	p	L-V		-12	15.96	146			1.02
24	1-WS	Cal	p	L-V	-33.7	-13.5	17.34	165			1.04
25	1-WS	Cal	p	L-V		-14.6	18.30	170			1.01
26	1-WS	Cal	p	L-V		-14.9	18.55	136			1.06
27	1-WS	Cal	p	L-V		-12.6	16.53	153			1.02
28	1-WS	Cal	p	L-V		-16	19.45	110			1.09
29	1-WS	Cal	p	L-V		-	15.96	193			0.98
30	1-WS	Cal	p	L-V	-30.4	-14.2	17.96	153			1.05
31	1-WS	Cal	p	L-V		-16.4	19.76	116			1.08
32	1-WS	Cal	p	L-V		-11.2	15.17	146			1.03
33	1-WS	Cal	p	L-V		-14.3	18.04	138.0			1.04



شکل ۱۸. A: نمودار اولین دمای ذوب یخ در میان‌بارهای سیال همراه کانی کوارتز و کلسیت در کانسار روی و سرب کوشک، B: نمودار دمای ذوب آخرین قطعه یخ، C: دمای CO₂، D: دمای تشکیل کلاتریت، E: نمودار میزان شوری سیال کانه‌ساز و F: رابطه بین نقطه ذوب یخ با مقدار و نوع نمک حل‌شده در سیال کانه‌زا (Shepherd et al., 1985)

Fig. 18. A: Melting temperature for the first ice melting of fluid inclusions associated with quartz and calcite mineral in the Koushk Zn-Pb deposit, B: Melting temperature for the last ice melting, C: temperature of CO₂, D: Clathrate formation temperature, E: Salinity values of the mineralizing fluid, and F: The relationship between the ice melting point and the salt type and content in the mineralizing fluid (standard diagrams after Shepherd et al., 1985)

بررسی‌های گرمایشی

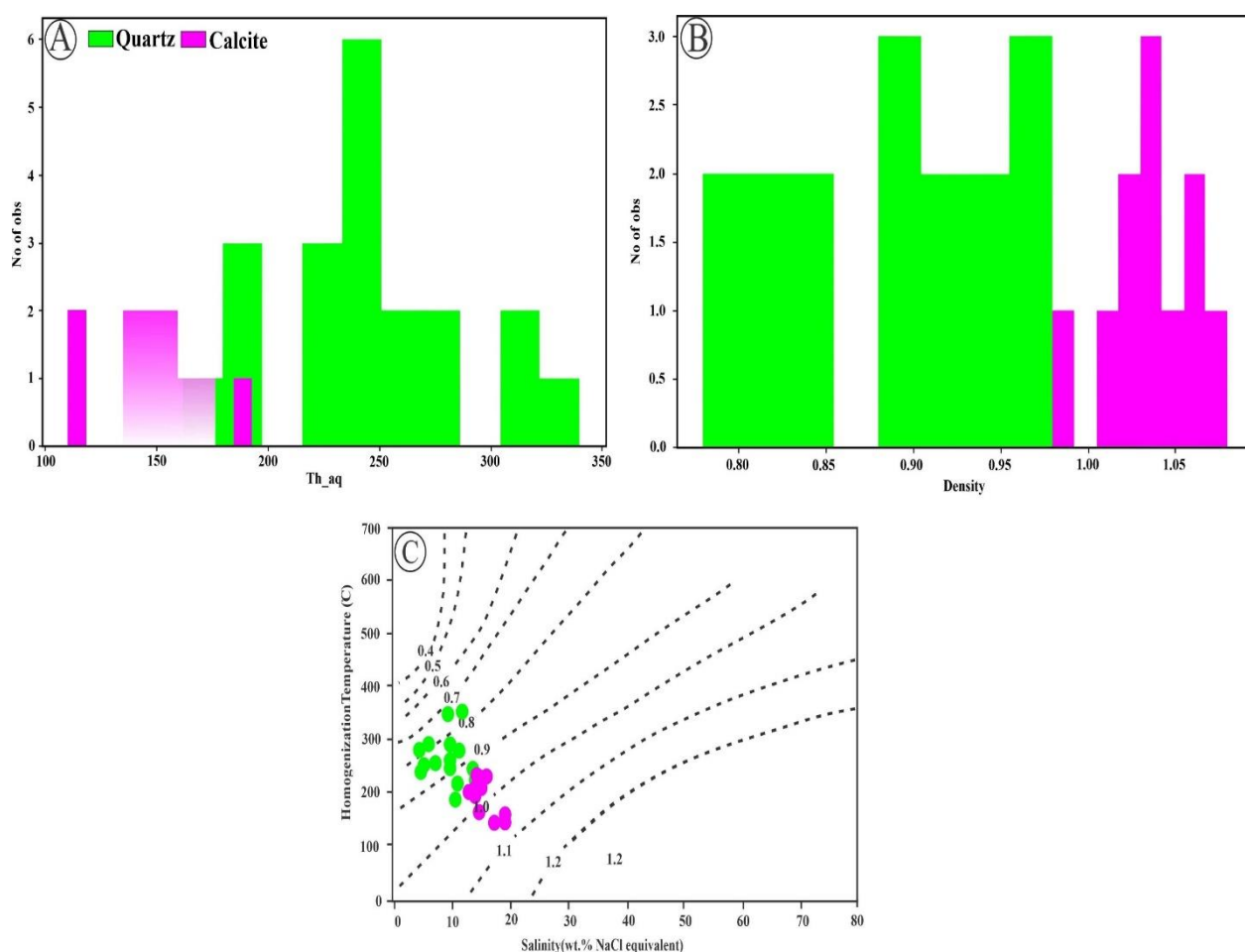
مایع و در نمونه‌های غنی از فاز بخار با تبدیل مایع به بخار

صورت گرفته است (بیشترین دمای اندازه‌گیری توسط دستگاه ۶۰۰

همگن شدن میان‌بارهای سیال دوفازی غنی از مایع با تبدیل بخار به

محدودی از آنها محدوده دمایی ۳۱۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهند (شکل ۱۹-A). چنان‌که در نمودار شوری سیال در مقابل دمای همگن‌سازی نشان داده شده است، چگالی سیال برای میان‌بارهای (۵/۶۹ تا ۱۹/۷۶ درصد وزنی معادل NaCl) بین 0.78 تا 1.08 gr/cm³ به دست می‌آید (شکل ۱۹-B و C). این امر نشان‌دهنده نقش شورابه‌های حوضه‌ای و اختلاط سیالات گرمابی-جوی با دما و شوری کم تا متوسط در کانی‌زایی واریسکیت در کانسار کوشک است.

درجه سانتی گراد است). وجود میان‌بارهای تک‌فازی گازی و همگن شدن فاز بخار به فاز مایع و نیز حضور میان‌بارهای غنی از بخار، شواهدی از پدیده جوشش در سامانه کانی‌زایی واریسکیت در کانسار کوشک، در هنگام به دام افتادن میان‌بارها را به نمایش می‌گذارند. در هیستوگرام دمای همگن‌شدگی (T_h)، گروه‌های دمایی مختلفی از ۱۱۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی گراد مشاهده می‌شوند. بیشترین فراوانی T_h در محدوده دمایی ۱۴۶ تا ۲۷۸ درجه سانتی گراد برای میان‌بارهای نوع B و C یافت شد و تعداد



شکل ۱۹. A: نمودار دمای همگن شدن میان‌بارهای سیال مورد بررسی مرتبط به کانی‌زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک، B: نمودار فراوانی چگالی در میان‌بارهای سیال و C: نمودار شماتیک دمای همگن شدن شوری برای تعیین چگالی (Wilkinson, 2001)

Fig. 19. A: Histogram of homogenization temperatures of the studied fluid inclusions associated with variscite mineralization in the Koushk Zn-Pb deposit, B: Histogram of density frequency of the fluid inclusions, and C: Schematic diagram of homogenization temperature- salinity for density determination (Wilkinson, 2001)

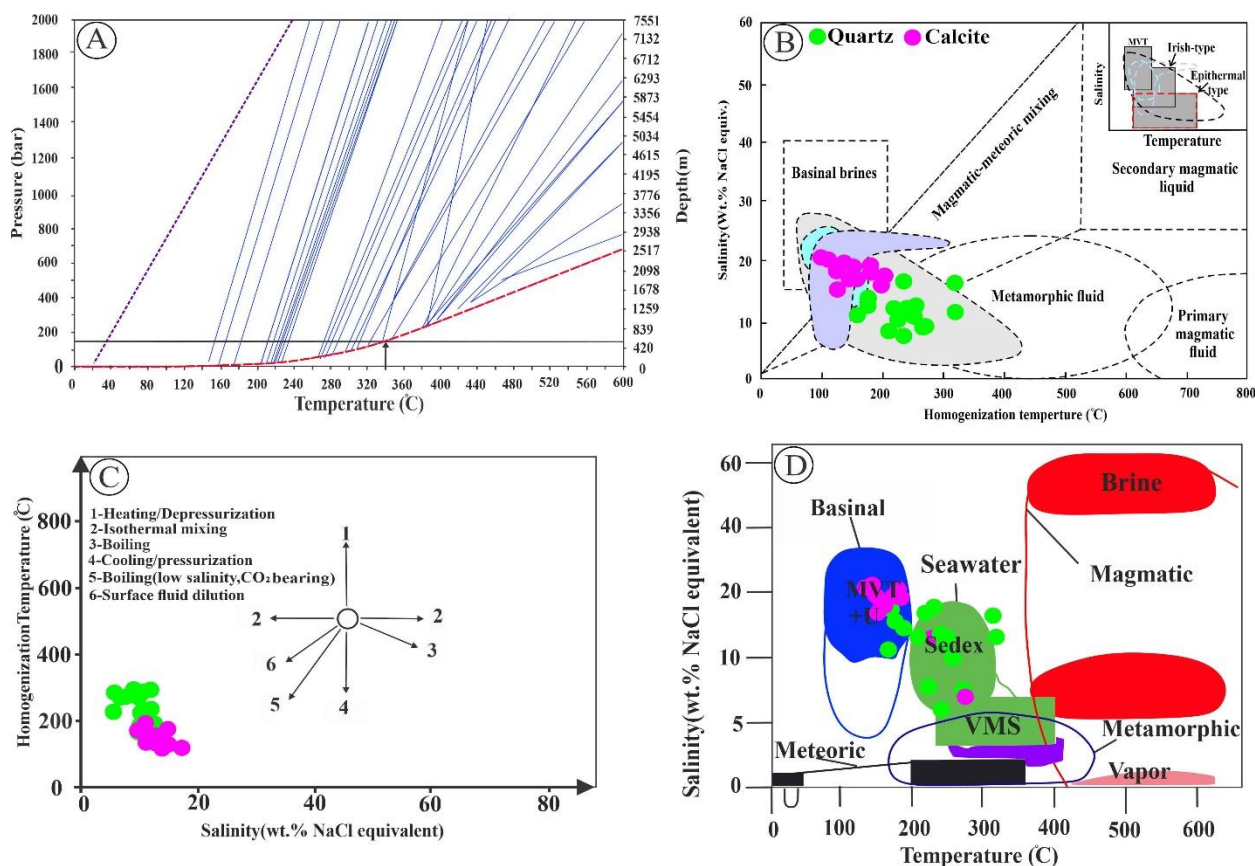
تعیین عمق و نوع محیط تشکیل کانسنگ واریسکیت در کانسار کوشک

برای تعیین عمق و فشار ایستایی تحمیل شده بر میان بارهای سیال، از نرم افزار مدلینگ استفاده شد. با توجه به منحنی خط چین فشار-عمق، بیشترین دمای همگن شدگی با بیشترین عمق (۵۰۰ متر و معادل ۱۵۰ بار فشار) و کمترین دمای همگن شدگی با کمترین عمق (۵۰ متر و معادل ۲۰ بار فشار) تعیین شد. بنابراین، کانی زایی واریسکیت در کوشک در اعماق بین ۵۰ تا ۵۰۰ متری از سطح زمین صورت گرفته است (شکل ۲۰- A). با استفاده از نمودار دوتایی شوری در مقابل دمای همگن شدن، می توان منشأ سیال کانه‌زا را ردیابی کرد؛ چنان که که کسلر و همکاران (Kesler et al., 2007) اشاره کرده‌اند. با توجه به اینکه اغلب سیالات در گیر در طیف رسوب‌های سدکس و MVT قرار می‌گیرند، در نظر گرفتن نقش سیالات گرمابی در کانی‌سازی واریسکیت در کانسار کوشک ضروری است (شکل ۲۰- B). تغییرات میزان شوری میان بارهای سیال نیز احتمال اختلاط سیالات با یکدیگر را نشان می‌دهد. در فرایند اختلاط سیالات، درجه شوری و دمای میان بارهای سیال کاهش می‌یابد (کمتر از ۲۰ درصد وزنی NaCl) که خود عاملی در ته‌نشست واریسکیت است. حضور اغلب میان بارها در محدوده سیالات سازنده کانسارهای نوع سدکس و نوع دره می‌سی‌سی‌پی، فرضیه بالا بودن نقش سیال گرمابی و شوابه‌های حوضه‌ای را در تشکیل کانی‌زایی محتمل‌تر می‌کند. برای مشخص کردن این موضوع که کانی‌زایی واریسکیت در کانسار کوشک در کدام گروه از کانسارهای دنیا رده‌بندی می‌شود، نمودار شوری میان بارهای سیال در مقابل دمای همگن شدن آنها رسم شد (شکل ۲۰- D). این نمودار با استفاده از داده‌های رودر (Roedder, 1984) و ویلکینسون (Wilkinson, 2001) ارائه شده است. با توجه به ویژگی‌هایی نظیر عمق کانه‌زایی بین ۷۰ تا ۵۰۰ متر و روندهای معمول میان بارهای سیال در میدان شوری-دما که ناشی از فرایندهای مختلف تحول سیال هستند (شکل ۲۰- C)، نشان می‌دهد که کانی‌زایی واریست در کانسار

کوشک در بازه دمای ۱۱۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی گراد (متوسط ۲۱۰ درجه سانتی گراد)، تحت تأثیر جوشش سیال و اختلاط آب‌های گرمابی و جوی تشکیل شده است.

بحث

وجود یک سنگ مادر غنی از آلومینیم و فسفر می‌تواند مقدمه کانی‌سازی واریسکیت باشد. در کانسار کوشک، آلومینیم در اثر هوازدگی شیل‌های سیاه و فسفات از شسته‌شدن فسفریت‌های رسوبی قدیمی یا هم‌عصر سنگ‌های کربناته سازند سلطانیه، نهشته‌های ادیاکارن یا واحدهای تبخیری و فسفردار پوسته‌ای در ایران مرکزی توسط سیالات ماگمایی و گرمابی ناشی از نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی شکل گرفته‌اند (Torab, 2008; Hosseini and Rajabzadeh, 2022). برهم کنش سیالات گرمابی غنی از آلومینیم و فسفات سبب کانی‌زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک شده است. این کانی‌زایی بیشترین گسترش در واحدهای شیلی سیاه و سیل‌های میکرودیوریتی در مقایسه با زون کانسنگ توده‌ای و لایه‌ای دارد. واریسکیت‌های کوشک به دو صورت ساده و تار عنکبوتی دیده می‌شود و واریسکیت‌های تار عنکبوتی و واریسکیت‌های مرتبط با زون سولفید توده‌ای بیشترین غنی‌شدگی در مقادیر SO_3 نشان می‌دهند. واریسکیت‌ها معمولاً طیف گسترده‌ای از رنگ‌های سبز از جمله سبز مایل به آبی، سبز زیتونی، سبز خزه‌ای، و آبی مایل به سفید را نشان می‌دهد. تغییرات رنگ وابسته به عمق نیست. تغییرات رنگ در واریسکیت‌ها از یک‌سو ناشی از درهم‌رشدی با فسفات‌ها (فسفوسیدریت، متاواریسکیت و کراندالیت) سلیکات‌ها (کائولینیت، هالوئیت) و سولفات‌ها (آلونیت، ژاروسیت) و وجود فازهای سولفیدی مانند میان بارهای اسفاریت و پیریت در ساختار واریسکیت است. این امر می‌تواند باعث ایجاد نوسان‌های گسترده در هر دو زمینه، یعنی رنگ‌مایه‌های سبز و محتوای به ظاهر کم Gr^{3+} شود.



شکل ۲۰. A: نمودار فشار و عمق در مقابل دمای همگن شدن در تعیین محیط کانی سازی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک، B: موقعیت داده های سیال کانه زرا در نمودار میزان شوری در مقابل دمای همگن شدگی (Yermacov, 1965)، C: نمودار دمای همگن شدن - شوری ضمن فرایندهای مختلف تکامل سیالات در گیر (Wilkinson, 2001) و D: موقعیت داده های میان بار سیال بر روی نمودار شوری در مقابل دمای همگن شدگی. نمودار اقتباس شده از ویلکینسون (Wilkinson, 2001)

Fig. 20. A: Pressure and depth versus homogenization temperature in determining the environment of iron mineralization in the koushk Zn-Pb deposit, B: Location of the ore-forming fluid data on the diagram of salinity versus homogenization temperature (after Yermacov, 1965), C: Location of the plotted data on the homogeneity temperature-salinity diagram during the evolution of the involved fluid inclusions (after Wilkinson, 2001), and D: Location of fluid inclusions data on the diagram of salinity versus homogenization temperature. the diagram adopted from Wilkinson (2001)

در موقعیت هشت وجهی (Cr^{3+}) به احتمال زیاد عامل ایجاد رنگ سبز واریسکیت است (Calas et al., 2005). بنابراین، رنگ سبز واریسکیت علاوه بر حضور ناخالصی های ترکیبی ساختاری (رنگ دانه)، با نقص های بلوری و نحوه آرایش ملکول های آب در ساختار واریسکیت ارتباط دارد که سبب ایجاد چندریخت های مختلف واریسکیت شده است. همچنین تغییرات رنگ به دلیل وجود فرایندهای جانشینی متاسوماتیک و ایجاد منطقه بندی در

از سوی دیگر، تغییرات رنگ در کانی ها به سازوکارهای مختلفی مانند گذارهای الکترونی (Nassau, 1978)، گذارهای میدان بلوری در عناصر رنگ زرا (Burns, 1993) نظیر Fe، Mn، Cr، Co، Ni، Cu و V، انتقال بار بین عناصر (Bill and Calas, 1978; Mattson and Rossman, 1987) و همچنین مراکز رنگی ناشی از نقص های ساختاری در شبکه بلوری ارتباط دارد (Krambrock et al., 2007). به عنوان مثال، کروم سه ظرفیتی

کانی‌های نهان‌بلور و متخلخل اولیه توسط پالس‌های متوالی سیالات تأخیری، رایج‌ترین حالت است (Díaz-Acha et al., 2022). برخی از واریسکیت کوشک تغییرات تدریجی رنگ از هسته خاکستری فسفوسیدریتی به یک واحد سبز کم‌رنگ (متشکل از مخلوط‌های با غالبیت فسفوسیدریت همراه با واریسکیت) و در نهایت به حاشیه‌های سبز تیره با غالبیت واریسکیت نشان می‌دهد. در نتیجه، رنگ در امتداد رگه‌ها و گره‌ها به صورت تدریجی تغییر می‌کند. تنوع بافت میکروسکوپی، بررسی‌های زمین‌شیمی کانسنگ و بررسی‌های ریزداماسنجی میان‌بارهای سیال بیانگر کانی‌سازی چندمرحله‌ای است و نشان‌دهنده فرایندهای انحلال و رسوب مجدد با توجه به شرایط فیزیکی-شیمیایی حاکم بر فرایند تشکیل است.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی بیانگر کانی‌زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک به صورت رگه-رگچه‌ای و انتشاری مرتبط با زون کانسنگ سولفیدی توده‌ای و لایه‌ای به صورت ناچیز و به صورت گسترده مرتبط با زون حاشیه‌ای و سیل‌های میکرودیوریتی است. واریسکیت‌های مورد بررسی به صورت درهم‌رشدی با استرنگیت و مقادیر جزئی از دیگر کانی‌های گروه‌های واریسکیت و متاواریسکیت هستند. رنگ این نمونه‌ها از آبی روشن تا سبز متغیر است. تغییرات رنگ در واریسکیت‌های کوشک ناشی از درهم‌رشدی با دیگر فسفات‌ها (فسفوسیدریت و کرائدالیت)، سولفات‌ها (آلوانیت و جاروسیت) یا سیلیکات‌ها (کائولینیت، هالوزیت، کوارتز و اسمکتیت)، گذارهای الکترونی، گذارهای میدان بلوری در عناصر رنگ‌زا و نقص ساختار بلوری است. این امر می‌تواند باعث ایجاد نوسان‌های گسترده در هر دو زمینه، یعنی رنگ‌مایه‌های سبز و محتوای به ظاهر کم Cr^{3+} شود. به نظر می‌رسد رنگ سبز واریسکیت با افزایش غلظت یون کروم سه‌ظرفیتی (Cr^{3+}) ارتباط دارد. در واریسکیت‌های کانسار روی و سرب کوشک، میزان Cr^{3+} در

مقایسه با دیگر کانی‌زایی‌های مشابه در دنیا پایین است. نمونه‌هایی که دارای مقدار بیشتری از Cr^{3+} هستند، دارای رنگ سبز شدیدتر و پررنگ‌تری هستند. بنابراین، برای آنکه واریسکیت کیفیت گوهرگونه داشته باشد، باید مقدار Cr^{3+} در آن بالا و سهم اختلاط با سایر کانی‌ها به ویژه کانی‌های زرد تا قهوه‌ای مایه بسیار کم باشد. مقادیر ناچیز آهن در واریسکیت‌ها احتمالاً به دلیل وجود مقادیر ناچیز کانی استرنگیت است. بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی نسل‌های مختلف واریسکیت نشان می‌دهد کانسنگ واریسکیت کوشک از دو گروه متمایز تشکیل شده است: گروه اول، واریسکیت سبز روشن تا سبز تیره مرتبط با شیل سیاه است. این نمونه‌ها دارای خلوص بالاتری هستند ($\text{SiO}_2 < 1.5\%$ ، Al_2O_3 28%، $\sim 43\%$ P_2O_5) و نسبت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ نزدیک به مقدار استوکیومتری واریسکیت (۰/۵۵ تا ۰/۶۵) است. محتوای SO_3 پایین (۱/۱ تا ۱/۶ درصد) نشانه کمترین درهم‌رشدگی با سولفات‌هاست. گروه دوم شامل واریسکیت‌های سبز تار عنکبوتی مرتبط با شیل سیاه و واریسیت‌های سبز روشن مرتبط با میکرودیوریتی است. این نمونه‌ها دارای SiO_2 بالاتر (۲/۵ تا ۷/۱ درصد)، Al_2O_3 پایین‌تر (۲۴ تا ۲۷ درصد) و SO_3 بالاتر (۲/۵ تا ۷/۲ درصد) هستند که نشانه درهم‌رشدگی گسترده با کانی‌های رسی (کائولینیت، هالوزیت) و سولفات‌های (آلوانیت، ژاروسیت) است. نسبت بالای $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ (۶۵/۷۲ تا ۰/۱۰) نشانه آلاش با کانی‌های آلومینوسیلیکاتی (رس، کائولینیت، هالوزیت) است، نتایج XRD تأییدکننده این مطلب است. بر اساس بررسی‌های طیف‌سنجی رامان، بیشترین شدت پیک مشاهده شده در واریسکیت‌های تار عنکبوتی در حدود ۱۰۳۳ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است و دو پیک با شدت کمتر در حدود ۴۳۴ و ۳۵۸۰ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد. در واریسکیت‌های سبز ساده و واریسکیت‌های صابونی (سبز-آبی کم‌رنگ تا سفید)، بیشترین شدت پیک در حدود ۱۰۲۲ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است و سه پیک با شدت کمتر در حدود ۴۲۲، ۵۴۴ و ۵۵۰ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد که همگی به دلیل

۳۰۰ درجه سانتی گراد) باشد. بررسی‌های ریزدامسنجی میان‌بارهای سیال تأییدکننده بازه دمایی یادشده است. شوری کم تا متوسط اغلب میان‌بارهای سیال، بازه دمایی ۱۱۰ تا ۳۴۰ درجه سانتی گراد و حضور میان‌بارهای دوفازی غنی از فاز مایع و عمق به دام‌افتادگی فاز سیال در ۵۰ تا ۵۰۰ زمین‌یابگر نقش فرایند اختلاط سیالات و کاهش درجه حرارت در کانی‌زایی است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

ارتعاش‌های کششی متقارن گروه فسفات (PO_4) در مواد معدنی گروه واریسکیت و متاواریسکیت هستند. طیف‌های رامان واریسکیت کانسار روی و سرب کوشک و تاجیکستان هم‌پوشانی قابل‌توجهی با پیک‌هایی در حدود ۲۲۳، ۴۳۴، ۱۰۳۳ و ۱۰۲۲ سانتی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهند. مقادیر $\sum REE$ در کانسنگ واریسکیت ناچیز است. الگوی $REE+Y$ ، غنی‌شدگی $LREEs$ ، و ناهنجاری منفی Ce تا شیب آب دریا نشان می‌دهد. چنین شواهدی ممکن است بیانگر سیالات گرمابی دما پایین (۲۰۰ تا

1. X-Ray Diffraction (XRD)
2. Barstow
3. Amatrice
4. Chlor-utahite
5. Utahite
6. Bariandite
7. Strengite: $FePO_4 \cdot 2H_2O$
8. Crandallite: $CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$
9. Bafq Mining district (BMD)
10. Proximal
11. Distal
12. Zipper basinal rift zones
13. Bafq-Saghand metallogenic province (BSMP)
14. Lower Cambrian volcano sedimentary sequence (LCVSS)
15. SEM
16. X-ray Probe Microanalysis (XPMa)
17. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)
18. Patch like
19. Spiderweb Variscite
20. chromophores
21. Polymorph
22. Messbach
23. Lucin
24. Polytype
25. oxidizing acid alteration
26. Bleached
27. Intergrowths
28. Nodules
29. Light Rare Earth Elements (LREE)
30. Neking down
31. Fluid inclusion assemblages (FIA)
32. Polycrystalline inclusions
33. SEDEX type
34. MVT type

References

- Acevedo, N., Weber, M., Proenza, J.A., Garcia-Casco, A. and Saenz-Samper, J., 2021. Provenance study of the variscite artifacts of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia and approach to routes of pre-Hispanic exchange. *Journal of Archaeological Science*, 136: 105511. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105511>
- Aftabi, A., Atapour, H., Mohseni, S. and Babaki, A., 2021. Geochemical discrimination among different types of banded iron formations (BIFs): A comparative review. *Ore Geology Review*, 136: 104244. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104244>
- Aftabi, A. and Mohseni, S., 2020. Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposits in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite by Mehdipour Ghazi et al (2019). (*Ore Geology Reviews* 105, 590-604). *Ore Geology Reviews*, 125: 103113. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103113>
- Al-bassam, K. and Magna, T., 2018. Distribution and significance of rare earth elements in Cenomanian-Turonian phosphate components and mudstone from the Bohemian Cretaceous basin, Czech Republic. *Bulletin of Geosciences*, 93(3): 347–368. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1687>
- Atapour, H. and Aftabi, A., 2020. Comment on “Two-tiered magmatic-hydrothermal and skarn origin of magnetite from Gol-e-Gohar iron ore deposit of SE Iran: In situ LA-ICP-MS analyses” by Mirzaei et al. (2018): (*Ore geology Reviews*, 102, 639–653). *Ore Geology Reviews*, 127: 102942. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102942>
- Bill, H. and Calas, G., 1978. Colour centers, associated rare-earth ions and the origin of colouration in natural fluorites. *Physics and Chemistry of Minerals*, 3: 117–131. <http://doi.org/10.1007/BF00308116>
- Boynton, W.V., 1985. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, In: P. Henderson (Editor), *Rare Earth Element Geochemistry*, Developments in Geochemistry, Elsevier, Amsterdam. pp. 114–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Burns, R.G., 1993. *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 480 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524899>
- Calas, G., Galois, L. and Kiratisin, A. 2005. The origin of the green color of variscite. *American Mineralogist*, 90(5–6): 984–990. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1668>
- Cassedanne, J.P. and Baptista, A., 1999. The Sapucaia pegmatite, Minas Gerais, Brazil. *The Mineralogical Record*, 30(5): 347–360. Retrieved July 12, 2026 from <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&u=anon~a32fd169&id=GALE%7CA56072255&v=2.1&it=r&sid=googleScholar&asid=87fa31c6>
- Díaz-Acha, Y., Campeny, M., Casas, L., Di Febo, R., Ibañez-Insa, J., Jawhari, T., Bosch, J., Borrell, F., Jorge-Villar, S.E., Greneche, J.-M. and Tauler, E., 2022. Colours of Gemmy Phosphates from the Gavà Neolithic Mines (Catalonia, Spain): Origin and Archaeological Significance. *Minerals*, 12(3): 368. <https://doi.org/10.3390/min12030368>
- Díaz-Acha, Y., Campeny, M., Melgarejo, J.C., Andreazini, A., Pastor, M., Pujol-Solá, N., Proenza, J.A., Bosch, J., Torrío, L., Villanova-de-Benavent, C., Castillo-Oliver, M. and Lehib, S., 2019. The Neolithic variscite mines of Gavà, Catalonia: criteria for mineral exploration and exploitation in the Prehistory. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(2): 296–319. <https://doi.org/10.18268/BSGM2019v71n2a5>
- Díaz-Acha, Y., Campeny, M., Tauler, E., Bosch, J., Melgarejo, J.C., Camprubí, A., Villanova-de-Benavent, C., Jorge-Villar, S., Díaz-Ontiveros, I., Fernández-Lluch, D., Proenza, J.A., Andreazini, A. and Pastor, M., 2020. Critical Elements in Supergene Phosphates: The Example of the Weathering Profile at the Gavà Neolithic. *Mines, Catalonia, Spain. Minerals*, 10(1): 3. <http://doi.org/10.3390/min10010003>
- Dill, H.G., 2001. The geology of aluminium phosphates and sulphates of the Alunite group minerals: a review. *Earth-Science Reviews*, 53(1–2): 35–93. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00035-0)
- Dominguez-Bella, S., 2004. Variscite, a prestige mineral in the Neolithic-Aeneolithic Europe. *Raw material sources and possible distribution routes. Slovak Geological Magazine*, 10(1–2): 151–158.

- Retrieved July 12, 2026 from <https://www.geology.sk/wp-content/uploads/documents/foto/MS/SGM/SGM%201-2-2004/Variscite,%20a%20prestige%20mineral%20in%20the%20Neolithic-Aeneolithic%20Europe.%20Raw%20material%20sources%20and%20possible%20distribution%20routes.pdf>
- Fan, H.R., Groves, D.I., Mikucki, E.J. and McNaughton, N.J., 2000. Contrasting fluid types at the Nevoria gold deposit in the Southern Cross greenstone belt, western Australia: Implications of auriferous fluids depositing ores within and Archean banded iron formation. *Economic Geology*, 95(7): 1527–1536. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.7.1527>
- Foster, M.D. and Schaller, W.T., 1966. Cause of colors in wavellite from Dug Hill Arkansas. *American Mineralogist*, 51(3–4): 422–428. Retrieved July 12, 2026 from https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/51/3-4_Part_1/422/540264/Cause-of-colors-in-wavellite-from-Dug-Hill?redirectedFrom=fulltext
- Fritsch, E., Rondeau, B., Lulzac, Y. and Mocquet, B., 2019. Gemmology of gem phosphates: A review with particular attention to variscite. In: G. Querré, S. Cassen and E. Vigier (Editors), *La Parure en Callaïs du Néolithique Européen*. Archaeopress Publishing Ltd, Oxford, UK, pp. 25–40. <https://doi.org/10.2307/jj.15136071.6>
- Fritsch, E. and Rossman, G.R., 1987. An update on color in gems. Part 1: Introduction and colors caused by dispersed metal ions. *Gems and Gemology*, 23(3): 126–139. Retrieved July 12, 2026 from <https://www.gia.edu/gems-gemology/fall-1987-color-gems-fritsch0>
- Frost, R.L., Weier, M.L., Erickson, K.L., Carmody, O. and Mills, S.J., 2004. Raman spectroscopy of phosphates of the variscite mineral group. *Journal of Raman Spectroscopy*, 35(12): 1047–1055. <http://dx.doi.org/10.1002/jrs.1251>
- García-Guinea, J., Correcher, V., Sánchez Muñoz, L., López-Arce, P., Townsend, P. and Hole, D., 2008. Radiation damage of variscite in historic crafts: Solarization, decolouration, structural changes and spectra from ionoluminescence. *Radiation Physical and Chemistry*, 77(1): 18–22. <http://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.06.008>
- Ghanei Ardakan, J., 2024. Gemological Evaluation and Lapidary Properties of Variscite from the Koushk Lead-Zinc Mine, Bafq. The 2nd National Scientific Symposium on Gemology and Industrial Minerals, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Gibbs, A., 1976. Geology and genesis of the Bafq lead-zinc deposit, Iran. *Institution of Mining and Metallurgy Transactions*, section B, London, Report 85, 15 pp.
- Hosseini, K. and Rajabzadeh, M.A., 2022. Origin of magnetite and apatite ores in the Esfordi magnetite-apatite ore deposit NE of Bafq, south Yazd: insights from mineralogy, geochemistry, microthermometry, O-H stable and U-Pb and Nd-Sm non-stable isotopes. *Journal of Economic Geology*, 14(4): 31–88. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2022.76456.1045>
- Hosseini, K., Yazdi, M. and Azizi, H., 2025. Ore Structures, geochemistry, O-isotopes and fluid inclusion of the Ediacaran Banded Iron Formation at the Koushk area, Northeast Bafq, Central Iran. *Journal of Economic Geology*, 17(4): 37–87. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2025.1163>
- Huckreide, R., Kursten, M. and Venzlaff, I.T., 1962. Zur Geology des Gebietes Zwischen Kerman Un Sagand (Iran). Hannover Bundesanstalt für Bodenforschung, Germany, Report 51, 197 pp.
- Kesler, S.E., Reich, M. and Jean, M., 2007. Geochemistry of fluid inclusion brines from earths oldest Mississippi Valley-type (MVT) deposits, Transvaal Supergroup, South Africa. *Chemical Geology*, 237(3–4): 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.11.001>
- Krambrock, K., Ribeiro, L., Pinheiro, M., Leal, A.S., Menezes, M.A. and Spaeth, J., 2007. Colour centers in topaz: Comparison between neutron and gamma irradiation. *Physics and Chemistry of Minerals*, 34: 437–444. <http://doi.org/10.1007/s00269-007-0160-z>
- Larsen, E.S., 1942. The mineralogy and paragenesis of the variscite nodules from Near Fairfield, Utah part 1. *American Mineralogist*, 27(4): 281–300. Retrieved June 18, 2026 from

- <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/27/4/281/538206/The-mineralogy-and-paragenesis-of-the-variscite?redirectedFrom=fulltext>
- Lawrence, M.G., Greig, A., Collerson, K.D. and Kamber, B.S., 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12: 39–72. <https://doi.org/10.1007/s10498-005-4471-8>
- Lindberg, M.L. and Pecora, W.T., 1958. Phosphate minerals from Sapucaia Pegmatite Mine. Minas Gerais. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 7(2): 5–14. Retrieved July 12, 2026 from http://boletim.siteoficial.ws/pdf/1958/7_2-1-14.pdf
- Litvinenko, A.K., Sorokina, E.S., Karampelas, S., Krivoschekov, N.N. and Serov, R., 2016. Variscite from central Tajikistan: Preliminary results. *Gems and Gemology*, 52(1): 60–65. <https://doi.org/10.5741/gems.52.1.60>
- Marchig, V., Gundlach, H., Moller, P. and Schley, F., 1982. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Marine Geology*, 50(3): 241–256. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90141-4)
- Marty, J., Howard, D.G. and Barwood, H., 1999. Minerals of the Utahlite Claim, Lucin, Box Elder County, Utah. Utah Geological Survey Miscellaneous Publication, Salt Lake City, UT, USA, 16 pp.
- Mattson, S.M. and Rossman, G.R., 1987. Identifying characteristics of charge transfer transitions in minerals. *Physics and Chemistry of Minerals*, 14: 94–99. <http://doi.org/10.1007/BF00311152>
- 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>
- Mehdipour Ghazi, J. and Moazzen, M., 2024. Cadomian iron ore bodies in the Bafq-Saghand metallogenic province, Iran: genetic constraints from field observations and laser ablation ICP-MS mineral studies. *International Geology Review*, 66(5): 1144–1164. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2238210>
- Mehdipour Ghazi, J., Moazzen, M., Rahgoshay, M. and Wilde, S.A., 2020. Zircon U–Pb–Hf isotopes and whole rock geochemistry of magmatic rocks from the Posht-e-Badam Block: A key to tectonomagmatic evolution of Central Iran. *Gondwana Research*, 87: 162–187. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.010>
- Melgarejo, J.C., Arqués, L., Villanova-de-Benavent, C., Jahwari, T., Torró, L., Bosch, J., Castillo-Oliver, M., Campeny, M., Amores, S., Andreazini, A., Lehib, S. and Camprubi, A., 2019. The use of Raman spectroscopy in the characterization of variscite provenance: The Gavà case. In: G. Querré, S. Cassen and E. Vigier (Editors), *La Parure en Callais du Néolithique Européen*, Archaeopress, Oxford, UK, pp. 241–251. <https://doi.org/10.2307/jj.15136071.14>
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2015. Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: the possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 71: 215–236. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.018>
- Nassau, K., 1978. The origins of colour in minerals. *American Mineralogist*, 63(3–4): 219–229. Retrieved June 18, 2026 from <https://scispace.com/pdf/the-origins-of-color-in-minerals-341khlgnog.pdf>
- Nayebi, N., Esmaeily, D., Chew, D.M., Lehmann, B. and Modabberi, S., 2021. Geochronological and geochemical evidence for multi-stage apatite in the Bafq iron metallogenic belt (central Iran), with implications for the Chadormalu iron-apatite deposit. *Ore Geology Reviews*, 132: 104054. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104054>
- NISCO (National Iranian Steel Company), 1980. Report on the results of research and evaluation of studies at magnetic anomalies in the Bafq iron ore district during 1976-1979, Unpublished Report, 260 pp.
- Nriagu, J.O. and Moore, P.B., 1984. *Phosphate Minerals*. Springer, Berlin, Germany, 442 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61736-2>
- Odriozola, C.P.Y. and Linares-Catela, J.A., 2012. Cuentas de variscita: producción, circulación y presencia en contextos funerarios del suroeste peninsular. *Revista del Museu de Gavà*, 5: 323–

332. Retrieved June 18, 2026 from <http://hdl.handle.net/11441/52726>
- Onac, B.P., Kearns, J., Breban, R. and Cîntă Pânzaru, S., 2004. Variscite (AlPO₄ 2H₂O) from Cioclovina Cave (Sureanu Mountains, Romania): a tale of a missing phosphate. *Studia UBB Geologia*, 49(1): 3–14. <https://doi.org/10.5038/1937-8602.49.1.1>
- Palache, C., Berman, H. and Frondel, C., 1951. Dana's system of mineralogy. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 74(2): 218–219. <https://doi.org/10.1080/11035895209453366>
- Querré, G., Calligaro, T., Cassen, S., Dabard, M.P. and Domínguez-Bella, S., 2019. Provenance des parures en variscite du Néolithique européen: Élaboration d'un modèle chimiométrique. In: G. Querré, S. Cassen and E. Vigier (Editors), *La Parure en Callaïs du Néolithique Européen*. Archaeopress Publishing Ltd.: Oxford, UK, pp. 105–128. <https://doi.org/10.2307/jj.15136071.11>
- Rahimzadeh, B., Raesizadeh, S. and Hadipanah, P., 2022. Gem-quality Variscite from Central Iran. *The Journal of Gemmology*, 38(4): 319–321. Retrieved July 12, 2026 from <https://www.proquest.com/docview/2755871097?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P. and Canet, C., 2012. Geology, ore facies and sulphur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam Block, Central Iran. *International Geology Review*, 54(14): 1635–1648. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659106>
- Roedder, E., 1984. Inclusion sample selection, preparation, petrography and photography. In: P.H. Ribbe (Editor), *Fluid Inclusions*. Mineralogical Society America., Washington, D.C, pp. 149–180. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781501508271_A35506584/preview-9781501508271_A35506584.pdf
- Rossmann, G.R., 2004. Mineral Spectroscopy Server. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA. Retrieved July 12, 2026 from <http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/Variscite/Index.html>
- Salvador, S.P. and Fayos, J., 1972. Some aspects of the structural relationship between “Messbach-type” and “Lucin-type” variscites. *American Mineralogist*, 57(1–2): 36–44. Retrieved July 12, 2026 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/57/1-2/36/542587/Some-aspects-of-the-structural-relationship?redirectedFrom=fulltext>
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39(1–2): 85–06. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8)
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie Press, London, 239 pp. Retrieved July 12, 2026 from https://books.google.com/books/about/A_Practical_Guide_to_Fluid_Inclusion_Stu.html?id=CVSGAAAAIAAJ
- Sherafat, S., Mohammady Nasab, E., Mackizadeh, M. and Khodami, M., 2007. Variscite occurrence in Koushk deposit, Bafq (Yazd Province). *Journal of Geotechnical Geology*, 3(4): 260–265. Retrieved July 12, 2026 from <https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/9912>
- Sheridan, A., 2000. Achnacreebeag and its French connections: Vive the ‘auld alliance’. In: J.C. Henderson (Editor), *The Prehistory and Early History of Atlantic Europe*, BAR International Series 861, Oxford, pp. 1–15. <https://doi.org/10.30861/9781841710624>
- Slansky, M., 1986. Geology of Sedimentary Phosphates. *Geological Magazine*, 124(3): 290–291. <https://doi.org/10.1017/S0016756800016496>
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publications (Oxford), London, 312 pp. Retrieved July 12, 2026 from <https://commons.library.stonybrook.edu/geo-articles/12/>
- Torab, F., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. Ph.D. Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences, Clausthal University of Technology, Germany, 144 pp.
- Vesali, Y., Sepidbar, F., Palin, R.M. and Chiaradia, M., 2021. Crustal architecture studies in the Iranian Cadomian arc: Insights into source, timing and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 136: 104280. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104280>

- Werner, F., Mueller, C.W., Thieme, J., Gianoncelli, A., Rivard, C., Höschen, C. and Prietzel, J., 2017. Micro-scale heterogeneity of soil phosphorus depends on soil substrate and depth. *Scientific Reports*, 7: 3203. <http://doi.org/10.1038/s41598-017-03537-8>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5)
- Williams-Jones, A.E., Schrijver, K., Doig, R. and Sangster, D.F., 1992. A model for epigenetic Ba-Pb-Zn mineralization in the Appalachian Thrust Belt Quebec: Evidence from fluid inclusions and isotopes. *Economic Geology*, 87(1): 154–174. <https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.87.1.154>
- Willing, M., Stöcklmayer, S. and Wells, M., 2008. Ornamental variscite: a new gemstone resource from Western Australia. *Journal of Gemmology*, 31(3–4): 111–124. Retrieved June 18, 2026 from <http://hdl.handle.net/102.100.100/121180?index=1>
- Yermacov, N.P. (translated by Sokoloff, V.P.), 1965. Research on the nature of mineral forming solutions with special reference to data from fluid inclusions. Permagon Press, Oxford, 743 pp.
- Zolala, F., Alipour-Asl, M., Sadeghian, M., Ghasemi, H., Zhai, M. and Amidi-Mehr, E., 2025. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of iron oxide-apatite ores in the Bafq mining district, Central Iran: Proposed a new tectonic setting for mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 275: 107785. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107785>



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1179



Geology, alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion microthermometry in the Kaviran prospect area, northwest of Dehsalm (center a Lut Block)

Mahmoud Pourkhosro ¹ , Mohammad Hassan Karimpour ^{2*} , Seyed Masoud Homam ³ , Fatemeh Sepidbar ⁴

¹ Ph.D. student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Professor, Department of Geology and Research Center for Ore Deposit of Eastern Iran, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; Department of Geological Sciences, University of Colorado, CB-399, Boulder, CO 80309, USA

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 08 June 2026
Revised: 19 August 2026
Accepted: 22 August 2026

Keywords

Gold Mineralization
High-Sulfidation System
Vuggy Silica
Pyrophyllite
Fluid Inclusions
Kaviran Prospect
Lut Block

ABSTRACT

The Lut Block in the eastern Iran hosts numerous magmatic-hydrothermal mineral systems and represents one of the most prospective metallogenic provinces of the Iranian Plateau. The Kaviran prospect area, located in the northwest of Dehsalm, and is characterized by widespread hydrothermal alteration, and structurally controlled gold mineralization. Despite several exploration campaigns in the region, the genetic characteristics and mineralizing processes of the Kaviran system have not been comprehensively investigated. Therefore, this study integrates geological mapping, petrography, alteration mineralogy, XRD Analysis, geochemical investigations, and fluid inclusion microthermometry to constrain the ore-forming processes and metallogenic setting of the deposit.

*Corresponding author

Mohammad Hassan Karimpour
✉ karimpur@um.ac.ir

How to cite this article

Pourkhosro, M., Karimpour, M.H., Homam, S.M. and Sepidbar, F., 2026. Geology, alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion microthermometry in the Kaviran prospect area, northwest of Dehsalm (center a Lut Block). Journal of Economic Geology, 18(2): 105–130. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1179>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Lut Block in the eastern Iran represents one of the most important metallogenic provinces of the Iranian Plateau and hosts numerous porphyry and epithermal mineral systems formed during extensive Eocene–Oligocene magmatic activity (Sillitoe, 2010; Richards, 2015). Hydrothermal gold mineralization in this region is commonly associated with volcanic–subvolcanic complexes and structurally controlled fluid pathways. The Kaviran prospect, located the northwest of Dehsalm in the central Lut Block, exhibits widespread hydrothermal alteration, silicification, pyritization, and gold-bearing quartz veins. Despite its exploration significance, the ore-forming processes and physicochemical evolution of the hydrothermal system have not been fully constrained.

The present study integrates field geology, petrography, alteration mineralogy, XRD Analysis, geochemical investigations, and fluid inclusion microthermometry to characterize the mineralization system and determine the genetic relationship among hydrothermal alteration, ore deposit, and magmatic activity.

Materials and Methods

Geological mapping and detailed field investigations were conducted throughout the prospect area. Representative samples were collected from mineralized veins, alteration zones, and host rocks for petrographic and mineralogical studies. X-ray diffraction (XRD) Analysis were carried out to identify alteration minerals, particularly within advanced argillic assemblages. Geochemical data were evaluated to investigate metal associations and element distribution patterns. In addition, microthermometric measurements were performed on primary fluid inclusions hosted by quartz and calcite to estimate the temperature, salinity, and evolution of ore-forming fluids following the procedures described by Bodnar et al., 2014.

Results

Hydrothermal alteration in the Kaviran prospect comprises silicic, advanced argillic, argillic, sericitic–carbonate, and propylitic assemblages. The alteration pattern is characterized by intensely silicified cores surrounded by progressively weaker alteration zones. Field observations revealed the

occurrence of vuggy silica, one of the most diagnostic features of high-sulfidation systems (Sillitoe and Hedenquist, 2003; Arribas, 1995). Furthermore, XRD Analysis confirmed the presence of pyrophyllite within the advanced argillic zone, indicating alteration under acidic hydrothermal conditions.

Mineralization occurs as veins, veinlets, stockworks, and disseminations. Pyrite is the dominant sulfide mineral and is accompanied by chalcopyrite and bornite. Secondary minerals include hematite, goethite, and covellite. Extensive pyritization and silicification are closely associated with gold-bearing structures and hydrothermal alteration zones.

Geochemical investigations indicate significant Au enrichment associated with Cu, Ag, Mo, Pb, Zn, and As anomalies. Positive correlations among Au, Cu, and Mo suggest a contribution from magmatic–hydrothermal fluids and imply a possible genetic link to a deeper porphyry system.

Microthermometric studies of 168 primary fluid inclusions revealed homogenization temperatures ranging from 112 to 320°C and salinities between 1.74 and 23.1 wt.% NaCl equivalent. Coexistence of liquid-rich inclusions (LV), vapor-rich inclusions (VL), and vapor-only inclusions (V) provides strong evidence for fluid boiling during ore formation. The distribution of temperature and salinity data suggests mixing between magmatic and meteoric fluids during hydrothermal evolution.

Discussion

Several geological and mineralogical features support the interpretation of the Kaviran hydrothermal system as a high-sulfidation deposit. These features include advanced argillic alteration, widespread silicification, the occurrence of vuggy silica, the presence of pyrophyllite, and extensive pyritization. Such features are widely recognized as characteristic indicators of high-sulfidation environments generated by acidic magmatic fluids above shallow intrusive centers (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe and Hedenquist, 2003; Simmons et al., 2005).

Fluid inclusion data indicate that ore mineralization occurred in a shallow hydrothermal environment at relatively low pressures. The coexistence of vapor-rich and liquid-rich inclusions demonstrates that boiling played a significant role in destabilizing metal complexes and triggering gold precipitation. Boiling is considered an effective mechanism for

precious-metal deposition in epithermal systems (Bodnar et al., 2014., Moncada et al., 2012).

Mixing between ascending magmatic fluids and cooler meteoric waters appears to have been another important factor controlling mineralization. Dilution of hydrothermal fluids likely caused changes in fluid chemistry, temperature, and sulfur activity, thereby enhancing metal deposition. Similar processes have been documented in numerous epithermal systems worldwide (Rottier et al., 2021; Yasami et al., 2025). The geochemical association of Au with Cu and Mo, together with the presence of dioritic to quartz monzodioritic porphyry intrusions, suggests that the Kaviran hydrothermal system may represent the upper expression of a larger magmatic-hydrothermal complex. High-sulfidation epithermal deposits commonly occur above porphyry systems and may constitute their shallow-level equivalents (Sillitoe, 2010; Richards, 2015). Therefore, the possibility of a concealed porphyry center beneath the prospect should be considered in future exploration programs.

Conclusions

Integrated geological, mineralogical, geochemical,

XRD, and fluid inclusion evidences indicates that the Kaviran prospect represents a high-sulfidation gold system developed in association with the Eocene magmatism in the central Lut Block. Advanced argillic alteration, vuggy silica, pyrophyllite-bearing assemblages, intense silicification, and widespread pyritization collectively support this interpretation. Fluid inclusion studies reveal that ore-forming fluid have temperatures of 112–320°C and salinities of 1.74–23.1 wt.% NaCl equivalent, indicating the involvement of low- to moderate-salinity hydrothermal fluids. Boiling has caused a drop in pressure and reduced solubility or instability of metal-bearing complexes such as gold, and fluid mixing can cause changes in fluid chemistry or changes in sulfur fugacity. The association of Au with Cu and Mo anomalies further suggests a probable genetic linkage between the high-sulfidation mineralization and a concealed porphyry system at depth. Consequently, the Kaviran prospect represents a promising exploration target for both high-sulfidation gold and porphyry-style mineralization within the central Lut Block.



زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در محدوده اکتشافی کویران، شمال غرب دهسلم (مرکز بلوک لوت)

محمود پور خسرو^۱، محمدحسن کریم‌پور^{۲*}، سیدمسعود همام^۳، فاطمه سپیدبر^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ گروه علوم زمین، دانشگاه کلرادو، CB-399، بولدر، Co-80309، امریکا

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
محدوده اکتشافی کویران در شمال غرب دهسلم و در بخش مرکزی بلوک لوت واقع شده است. سنگ‌های میزبان کانه‌زایی شامل واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن هستند که توسط توده‌های نیمه‌عمیق دیوریتی تا کوارتزموئودیوریتی پورفیری قطع شده‌اند. کانه‌زایی اغلب به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای، استوک‌ورکی و افشان رخ داده و شامل پیریت، کالکوپریت و بورنیت است. دگرسانی‌های گرمابی شامل سیلیسی، آرژیلیک پیشرفته، آرژیلیک، سریستی-کربناته و پروپلیتیک هستند. وجود واگی سیلیکا و شناسایی پیروفیلیت در نتایج XRD، شرایط اسیدی و توسعه دگرسانی آرژیلیک پیشرفته را در سامانه کانه‌ساز تأیید می‌کند. نتایج بررسی‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که دمای همگن شدگی میان‌بارهای اولیه بین ۱۱۲ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آنها بین ۱/۷۴ تا ۲۳/۱ درصد وزنی معادل NaCl متغیر است. حضور هم‌زمان میان‌بارهای غنی از مایع، غنی از بخار و تک‌فازی گازی بیانگر وقوع فرایند جوشش در هنگام کانه‌زایی است. پراکندگی داده‌های دما-شوری نیز نشان‌دهنده اختلاط سیالات ماگمایی و جوی در طی تکامل سامانه گرمابی است. همراهی ناهنجاری‌های طلا با مس و مولیبدن و همچنین حضور دگرسانی آرژیلیک پیشرفته، واگی سیلیکا و پیروفیلیت نشان می‌دهد که کانه‌زایی کویران در یک سامانه سولفیداسیون بالا تشکیل شده است و احتمالاً با یک سامانه پورفیری مدفون در عمق ارتباط ژنتیکی دارد.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱
	واژه‌های کلیدی طلا سولفیداسیون بالا پیروفیلیت واگی سیلیکا میان‌بارهای سیال کویران بلوک لوت
	نویسنده مسئول محمدحسن کریم‌پور karimpur@um.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

پور خسرو، محمود؛ کریم‌پور، محمدحسن؛ همام، سیدمسعود و سپیدبر، فاطمه، ۱۴۰۵. زمین‌شناسی، دگرسانی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی و ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال در محدوده اکتشافی کویران، شمال غرب دهسلم (مرکز بلوک لوت). زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱۰۵-۱۳۰. <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1179>

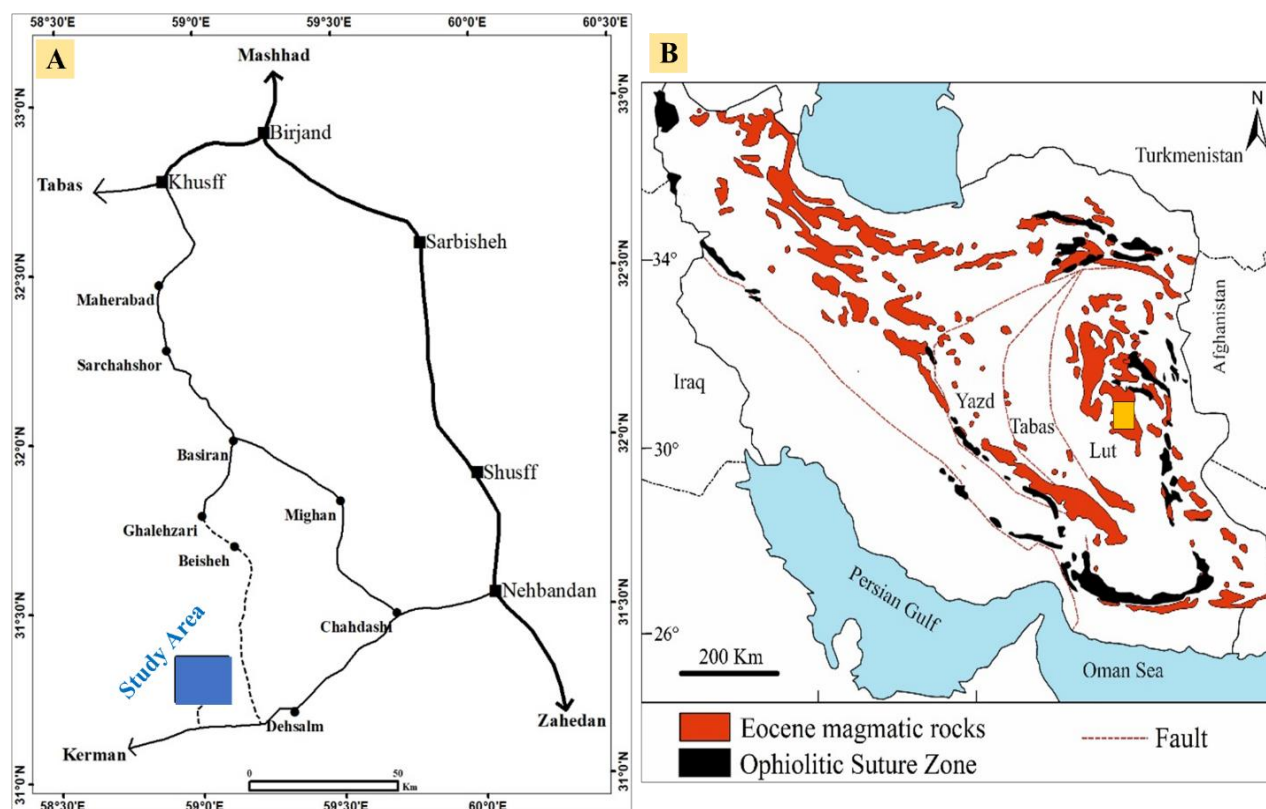
مقدمه

کانی‌سازی مس-طلا پورفیری، طلای سولفید بالا و پایین، اسکارن آهن، رگه‌های Sb-Zn-Pb و IOCG در بلوک لوت شناسایی شده‌اند (Karimpour et al., 2012).

بررسی‌هایی که در منطقه اکتشافی کویران انجام شده است، شامل تهیه نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دهمسلم (Akrami and Naderi Mighan, 1384) است؛ اما تاکنون در خصوص کانی‌سازی‌های طلا، بررسی دقیق علمی بر روی منطقه اکتشافی انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش، تفکیک واحدهای سنگی و بررسی‌های دگرسانی، کانی‌سازی، زمین‌شیمیایی و سیالات درگیر برای تعیین نوع کانی‌سازی در منطقه اکتشافی کویران است.

محدوده کویران به وسعت ۲۰ کیلومترمربع در شرق ایران، ۳۷۰ کیلومتری جنوب بیرجند، ۱۴۰ کیلومتری غرب شهر نهبندان واقع شده است (شکل ۱-A و B). محدوده مورد بررسی بین طول‌های جغرافیایی $58^{\circ} 58' 2/48''$ تا $59^{\circ} 2' 55/69''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $31^{\circ} 18' 34/78''$ تا $31^{\circ} 16' 46/42''$ شمالی قرار گرفته است.

محدوده اکتشافی مورد بررسی از لحاظ تقسیم‌های ساختاری در حاشیه لوت مرکزی واقع شده است بلوک لوت به دلیل وقوع فرورانش و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسیم، پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی‌سازی‌های مختلف دارد. انواع



شکل ۱. A: راه‌های دسترسی به محدوده اکتشافی کویران و B: موقعیت جغرافیایی محدوده اکتشافی کویران در ایران و نقشه پراکندگی سنگ‌های ماگمایی اتوسن و زون‌های افیولیتی ایران (خلاصه شده و با اندکی تغییر از شفایی مقدم و همکاران (Shafaii Moghadam et al., 2015))

Fig. 1. A: Ways to access the Kaviran prospect area, and B: Location map of the Kaviran prospect area in Iran and Simplified distribution map of Eocene magmatic rocks and ophiolitic suture zones in Iran (simplified and slightly modified after Shafaii Moghadam et al., 2015)

استفاده از نرم‌افزار تعبیه‌شده در سامانه اکسل H₂O- NaCl - HOKIEFLINCS (Steele-MacInnis et al., 2012;) و در نهایت نمودارهای مناسب در نرم‌افزار SPSS ترسیم شد.

زمین‌شناسی

واحد‌های سنگی محدوده شامل واحد‌های آذرآواری (توف ریولیتی، توف داسیتی و توف سنگی)، آتشفشانی (پروکسن آندزیت، هورنبلند پروکسن آندزیت)، توده‌های نیمه عمیق (دیوریت پورفیری، کوارتزیدیوریت پورفیری، مونزودیوریت پورفیری، کوارتزمونزودیوریت پورفیری) و توده‌های عمیق (گرانودیوریت) است. با توجه به سن سنجی انجام‌شده توسط نویسندگان، توده‌های عمیق و نیمه عمیق به سن ائوسن بالایی و واحد‌های آتشفشانی با توجه به مشاهدات صحرایی قدیمی‌تر از توده‌های نفوذی احتمالاً به سن ائوسن پایینی مشخص شده‌اند. واحد توف ریولیتی، داسیتی (E^L)، قدیمی‌ترین واحد سنگی در این منطقه بوده و در محدوده گسترش قابل توجهی از غرب تا جنوب‌شرق دارد (شکل ۲). این واحد به طور کامل دگرسان بوده و به رنگ سفید تا زرد بر روی زمین مشخص است و شامل واحد توف ریولیتی، توف داسیتی و توف سنگی است.

واحد هورنبلند پروکسن آندزیت خاکستری تا قرمز رنگ (E^{ra})، بیشترین رخمون محدوده را شامل می‌شود که از شمال غرب تا شرق و شمال شرق محدوده را در برمی‌گیرد (شکل ۲). این واحد بر روی واحد توف ریولیتی، داسیتی (E^L) قرار دارد. در نمونه دستی و صحرایی به رنگ خاکستری تا قرمز و به صورت دانه‌ریز است. این واحد در بررسی‌های میکروسکوپی دارای بافت پورفیری با خمیره غالب میکروولیتی بوده و درشت‌بلورها ۴۰ تا ۴۵ درصد از حجم سنگ را تشکیل داده‌اند که شامل کانی پلاژیوکلاز (۲۵ تا ۳۰ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۷ درصد)، پروکسن (۷ تا ۱۰ درصد) و کانی تیره (۲ تا ۵ درصد) است.

سامانه‌های ماگمایی- گرمابی از مهم‌ترین منابع تأمین فلزهای اقتصادی در پوسته قاره‌ای محسوب می‌شوند و بخش قابل توجهی از ذخایر جهانی طلا، مس و مولیبدن در ارتباط با سامانه‌های پورفیری و گرمابی کم‌عمق تشکیل شده‌اند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که میان سامانه‌های پورفیری و اپی‌ترمال از نظر منشأ سیالات، فرایندهای انتقال فلز و تکامل سامانه‌های گرمابی، ارتباط ژنتیکی نزدیکی وجود دارد و بسیاری از کانسارهای اپی‌ترمال در بخش‌های کم‌عمق سامانه‌های ماگمایی- گرمابی مرتبط با توده‌های پورفیری شکل گرفته‌اند (Sillitoe, 2010; Richards, 2015).

روش بررسی

پس از بررسی تصویرهای ماهواره‌ای در دو مرحله صحرایی (پی‌جویی و نمونه‌برداری از واحد‌های سنگی و کانه‌دار، مشخص کردن رگه‌های سیلیسی و زون‌های کانی‌سازی بر روی نقشه‌ها و بررسی ویژگی‌های بافتی و چگونگی ارتباط پدیده‌ها) انجام و سپس در مرحله آزمایشگاهی (تجزیه نمونه‌ها) به پایان رسید. در محدوده اکتشافی تعداد ۲۷۰ نمونه از واحد‌های سنگی و کانی‌سازی برداشت شد که تعداد ۸۵ نمونه مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و دگرسانی و ۴۱ نمونه مقطع صیقلی برای بررسی‌های کانه‌نگاری مطالعه شد. در نهایت، نقشه‌های زمین‌شناسی محدوده اکتشافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ در محدوده‌ای به وسعت ۱۸ کیلومتر مربع در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد.

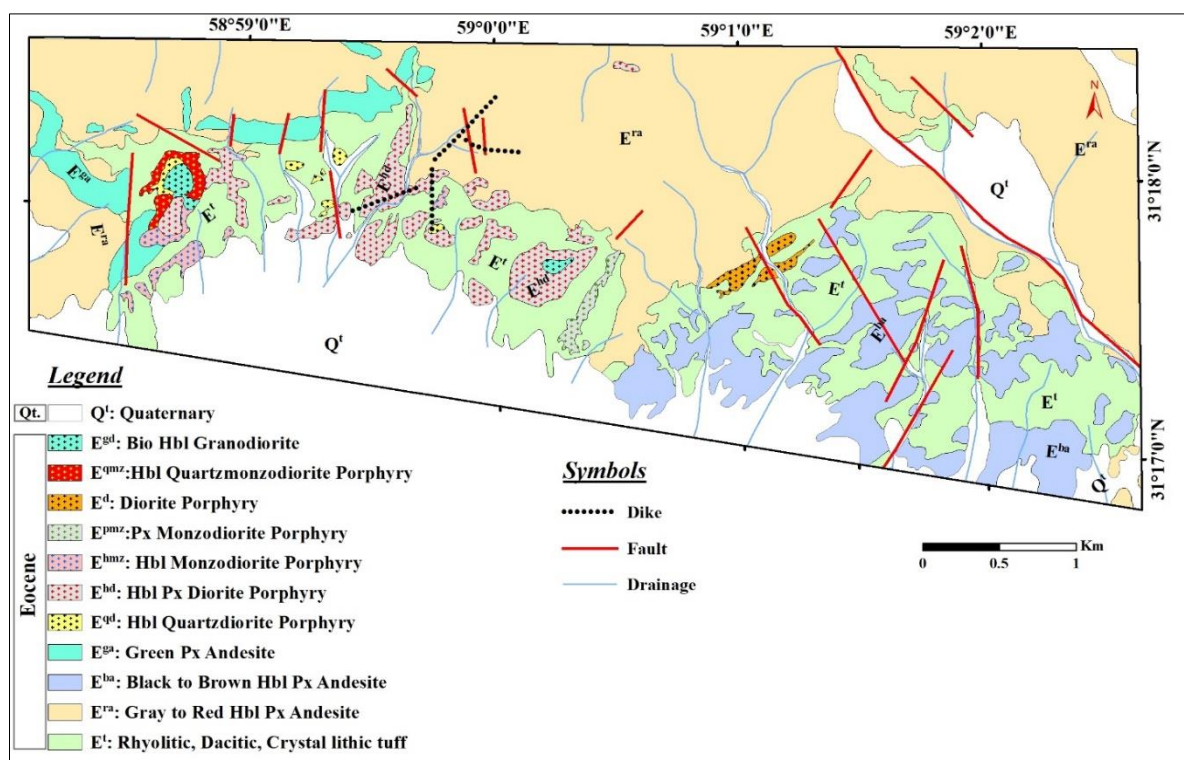
تعداد ۱۹ نمونه مقطع دوبر صیقل از رگه‌های سیلیسی و کلسیتی برای بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌دار تهیه و بررسی شده است که تعداد ۴ نمونه دما و شوری میان‌بارهای سیال در دانشگاه فردوسی مشهد با استفاده از صفحه گرمایش و سرمایش دستگاه لینکام مدل THM600 و ۱۵ نمونه در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. دقت کار دستگاه در مرحله سرد و گرم کردن ۱± تا ۶± و محدوده حرارتی دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. مقدار شوری در سامانه H₂O-NaCl با

سمت شمال است. این واحد سنگی در بررسی‌های میکروسکوپی دارای بافت غالب پورفیری با زمینه میکرولیتی بوده و دارای ۲۰ تا ۲۵ درصد درشت‌بلور که شامل ۸ تا ۱۰ درصد پلاژیوکلاز، ۱ تا ۲ درصد آلکالی فلدسپار، ۷ تا ۱۰ درصد پیروکسن و ۵ تا ۷ درصد کانی تیره است (شکل ۴-B).

واحد هورنبلند کوارتز دیوریت پورفیری (E^{qd}) در غرب محدوده (شکل ۲) به عنوان قدیمی‌ترین واحد نیمه عمیق به صورت استوک و گاهی کشیده دارای سولفید برون‌زد دارد. بافت غالب این واحد در بررسی‌های میکروسکوپی، پورفیری با زمینه دانه متوسط است و میزان درشت‌بلورها در حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد حجم کل سنگ است. خمیره هم اغلب از پلاژیوکلاز تشکیل شده است. در این واحد، درشت‌بلورها شامل ۲۵ تا ۳۰ درصد پلاژیوکلاز، ۳ تا ۵ درصد آلکالی فلدسپار، ۵ تا ۶ درصد هورنبلند، ۵ تا ۷ درصد کوارتز و ۱ تا ۳ درصد کانی تیره است.

واحد هورنبلند پیروکسن آندزیت سیاه تا قهوه‌ای رنگ (E^{ba})، بالاترین افق را در جنوب شرق محدوده (شکل ۲) به صورت شبه لایه تشکیل می‌دهد. این واحد در نمونه دستی و صحرایی به رنگ سیاه تا قهوه‌ای و دانه‌ریز بوده و بالای واحد هورنبلند پیروکسن آندزیت (E^{ra}) قرار دارد. این واحد در بررسی‌های میکروسکوپی دارای بافت پورفیری و حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد درشت‌بلور دارد که در این واحد کانی، پلاژیوکلاز (۲۰ تا ۲۵ درصد)، آلکالی فلدسپار (۵ تا ۶ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۷ درصد)، پیروکسن (۷ تا ۱۰ درصد) و کانی تیره (حدود ۱ درصد) وجود دارد.

واحد پیروکسن آندزیت سبز رنگ (E^{ga}) در غرب و شمال غرب محدوده (شکل ۲) به عنوان جوان‌ترین واحد آتشفشانی برون‌زد دارد. این واحد در نمونه دستی و صحرایی به رنگ سبز، دانه‌ریز و دارای کلریت فراوان بوده و بالای واحد هورنبلند پیروکسن آندزیت (E^{ra}) قرار دارد. در این واحد، شیب شبه‌لایه‌ها بیشتر به



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده اکتشافی کویران

Fig. 2. Geological map of the Kaviran prospect area

واحد هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری (E^{hd}) در غرب محدوده (شکل ۲) اغلب به صورت استوک‌های بزرگ و کشیده برون‌زد دارد. این واحد به صورت درشت‌دانه و به رنگ سبز در سطح زمین دیده می‌شود. در بررسی‌های میکروسکوپی بافت پورفیری با زمینه دانه متوسط اصلی‌ترین بافت موجود در این واحد است. درشت‌بلورهای پلاژیو کلاز، آلکالی فلدسپار، پیروکسن و کانی‌های تیره در یک زمینه دانه متوسط متشکل از پلاژیو کلاز قرار گرفته است که در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد حجم کل سنگ را در بر گرفته است. در این واحد، کانی پلاژیو کلاز (۳۵ تا ۴۰ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳ تا ۵ درصد)، هورنبلند (۵ تا ۷ درصد)، پیروکسن (۱۰ تا ۱۲ درصد) و کانی تیره (حدود ۱ درصد) وجود دارد (شکل ۴- C).

واحد هورنبلند مونزودیوریت پورفیری (E^{hmz}) به صورت استوک و کمی حلقوی در غرب محدوده (شکل ۲) رخمون دارد. این واحد به صورت آلتزه و کمی به رنگ سبز دیده می‌شود. در بررسی‌های میکروسکوپی بافت غالب این واحد پورفیری با زمینه دانه‌ریز تا متوسط است و میزان درشت‌بلورها در حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد حجم کل سنگ است. خمیره هم اغلب از پلاژیو کلاز و آلکالی فلدسپار تشکیل شده است. در این واحد، درشت‌بلورها شامل ۳۵ تا ۴۰ درصد پلاژیو کلاز، ۱۰ تا ۱۲ درصد آلکالی فلدسپار، ۵ تا ۷ درصد هورنبلند، ۳ تا ۵ درصد کوارتز و ۱ تا ۳ درصد کانی تیره است.

واحد پیروکسن مونزودیوریت پورفیری (E^{pmz}) در مرکز محدوده (شکل ۲) به رنگ سبز کم‌رنگ و دانه متوسط و دارای سولفید فراوان رخمون دارد. در بررسی‌های میکروسکوپی، بافت این واحد پورفیری بوده که خمیره متشکل از اغلب پلاژیو کلاز و همچنین آلکالی فلدسپار (کمتر از ۱۰ درصد) است. درشت‌بلورهای تشکیل دهنده نمونه در حدود ۵۰ تا ۵۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. کانی پلاژیو کلاز با فراوانی حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد حجم کل سنگ را تشکیل می‌دهد. پلاژیو کلازها اغلب از نوع لابرادوریت بوده که در برخی قسمت‌ها دارای ماکل

پلی‌سینتیک هستند. در این واحد، درشت‌بلورها شامل ۲۵ تا ۳۰ درصد پلاژیو کلاز، ۳ تا ۵ درصد آلکالی فلدسپار، ۵ تا ۷ درصد پیروکسن، ۳ تا ۵ درصد کوارتز و ۲ تا ۷ درصد کانی تیره است. واحد دیوریت پورفیری (E^d) در مرکز محدوده (شکل ۲) به رنگ سبز برون‌زد دارد. در بررسی‌های میکروسکوپی بافت اصلی این واحد پورفیری است. درشت‌بلورها حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد حجم کل نمونه را شامل می‌شوند. پلاژیو کلاز به عنوان اصلی‌ترین و مهم‌ترین درشت‌بلور سازنده نمونه، حجمی در حدود ۴۰ تا ۴۲ درصد را دربر می‌گیرد. آلکالی فلدسپار دیگر درشت‌بلور تشکیل‌دهنده نمونه دارای فراوانی ۳ تا ۵ درصد است. کوارتز به صورت بی‌شکل و پراکنده و خاموشی موجی ۱ تا ۳ درصد در این واحد حضور دارند.

واحد هورنبلند کوارتز مونزودیوریت پورفیری (E^{qzm}) به صورت درشت‌بلور سبز تا کمی سفیدرنگ در غرب محدوده (شکل ۲) به صورت حلقوی رخمون دارد. در بررسی‌های میکروسکوپی بافت غالب و اصلی پورفیری با زمینه دانه متوسط تا دانه‌ریز است. درشت‌بلورهای اولیه سازنده شامل پلاژیو کلاز، آلکالی فلدسپار، کوارتز، هورنبلند و کانی‌های کدر است. زمینه متشکل از کانی پلاژیو کلاز (۳۰ درصد) و آلکالی فلدسپار (۱۵ تا ۲۰ درصد) و کوارتز (۱۰ تا ۱۵ درصد) بوده و درشت‌بلورهای سازنده در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد حجم کل سنگ را شامل می‌شوند. پلاژیو کلاز اصلی‌ترین و مهم‌ترین درشت‌بلور تشکیل‌دهنده این واحد، دارای فراوانی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد حجم کل سنگ است. آلکالی فلدسپار نیز در این نمونه دارای فراوانی ۵ تا ۱۰ بوده که اغلب نیز بی‌شکل و از نوع سانیدین با ماکل کارلسباد بوده و کاملاً سالم و غیردگرسان شده هستند. پیروکسن و هورنبلند مهم‌ترین کانی‌های مافیک این واحد هستند. هورنبلند دیگر کانی مافیک سازنده این واحد، دارای فراوانی ۳ تا ۷ درصد و پیروکسن ۱ تا ۳ درصد در این نمونه حضور دارد. در زمینه سنگ در حدود ۱ تا ۲ درصد کانی کدر به صورت پراکنده مشاهده می‌شود.

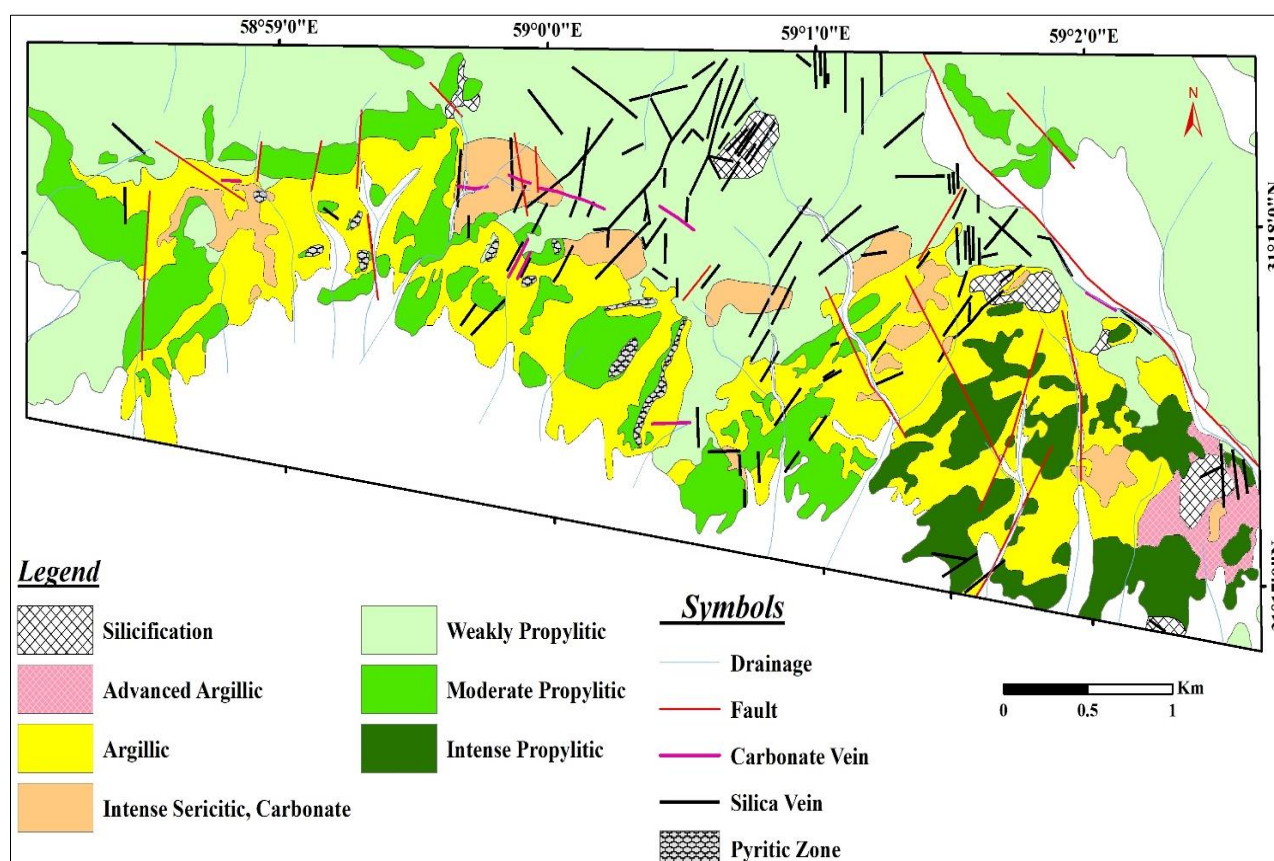
واحد بیوتیت هورنبلند گرانودیوریت (E^{gd}) در غرب و مرکز

(A-۴).

دگرسانی

بر اساس بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی مشخص شد که در این محدوده، واحدهای آتشفشانی و برخی از توده‌های نیمه عمیق و عمیق تحت تأثیر محلول‌های گرمایی قرار گرفته‌اند، به خصوص واحدهای توف ریولیتی، داسیتی و آندزیتی محدوده تحت تأثیر توده‌های نفوذی و نیمه نفوذی به شدت دگرسان شده‌اند. بر این اساس، ۷ زون دگرسانی اصلی در سطح شناسایی شده است که عبارتند از: ۱- سیلیسی ۲- آرژیلیک پیشرفته ۳- آرژیلیک ۴- سریسیت-کربنات شدید ۵- پروپلیتیک شدید ۶- پروپلیتیک متوسط ۷- پروپلیتیک ضعیف (شکل ۳).

محدوده، به صورت دانه درشت و دارای درشت‌بلور و زینولیت فراوان (شکل ۲) رخمون‌دارد. این واحد جدیدترین واحد نفوذی و در مرکز رینگ حلقوی قرار دارد در بررسی‌های میکروسکوپی بافت غالب گرانولار و بافت فرعی گرافیکی (رشد همراه آلکالی فلدسپار و کوارتز) است. کانی‌های پلاژیوکلاز دارای فراوانی ۴۵ تا ۵۰ درصد بوده و دارای ماکل پلی‌سنتیک از نوع الیگوکلاز هستند. کانی آلکالی فلدسپار به صورت بی‌شکل از نوع ارتوکلاز بوده که دارای فراوانی به مقدار ۱۵ تا ۲۰ درصد مشاهده شد. کانی کوارتز در این واحد دارای فراوانی ۱۵ تا ۱۸ درصد با خاموشی موجی دیده می‌شود. در این واحد، هورنبلند با فراوانی ۶ تا ۸ درصد و بیوتیت به میزان ۵ تا ۷ درصد در مقطع مشاهده می‌شود. کانی کدر به میزان کمتر از ۲ درصد نیز مشاهده می‌شود (شکل



شکل ۳. نقشه دگرسانی محدوده اکتشافی کویران

Fig. 3. Alteration map of the Kaviran prospect area

آرژلیک: این زون به دلیل شدت بسیار بالای دگرسانی، با تخریب بافتی همراه است و گستره وسیعی از شرق تا غرب محدوده را شامل می‌شود. کانی‌های رسی محصول دگرسانی در این زون هستند. از دیگر کانی‌های دگرسان در این زون می‌توان از مقادیر متوسط تا کم کربنات و سربیسیت نام برد. این دگرسانی بخش بزرگی از واحدهای سنگی محدوده را تحت‌تأثیر قراردادده است (شکل ۳). واحدهای توف ریولیتی و داسیتی منطقه، تحت‌تأثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند. این زون در صحرا به رنگ زرد تا سفید دیده می‌شود. در این زون غالب حجمی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز دگرسان‌شده هستند و بیش از ۹۰ درصد درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، بین ۵۰ تا ۸۰ درصد به کانی رسی و کربنات کلسیم و کمتر از ۱۰ تا ۱۵ درصد به سربیسیت تبدیل شده‌اند.

آرژلیک پیشرفته: این دگرسانی در شرق محدوده و دارای وسعت کمی در اطراف زون‌های سیلیسی است (شکل ۳). در این زون سولفات و نمک فراوانی دیده می‌شود. در این زون سولفیدها به سولفات و اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند.

سیلیسی: این دگرسانی به دو صورت رگه‌ای و کوارتز حفره‌ای در محدوده دیده می‌شود. در قسمت شرق منطقه (شکل ۳)، زون‌هایی دیده می‌شود که به شدت سیلیسی و حفره‌دار شده‌اند. در این بخش شدت دگرسانی بسیار بالاست و کانی‌های اولیه قابل تشخیص نیستند (شکل ۴-E). در بخش اعظم منطقه سیلیسی شدن به صورت رگه‌های سیلیسی همراه کربنات مشاهده می‌شود. این رگه‌های سیلیسی حاوی کانی‌سازی طلا هستند.

سربیسیتیک- کربنات شدید: این دگرسانی از غرب تا شرق محدوده (شکل ۳) در واحدهای آندزیتی و دیوریتی از کانی‌های سربیسیت و کربنات تشکیل شده است. در این دگرسانی، بخش زیادی از پلاژیوکلازها، حدود ۳۰ تا ۹۰ درصد به کربنات کلسیم تبدیل شده‌اند. در بخش‌هایی نیز تا حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد به سربیسیت دگرسان شده‌اند (شکل ۴-F). آلکالی فلدسپار نیز تا حدود ۵۰ درصد به کربنات کلسیم تجزیه شده‌اند.

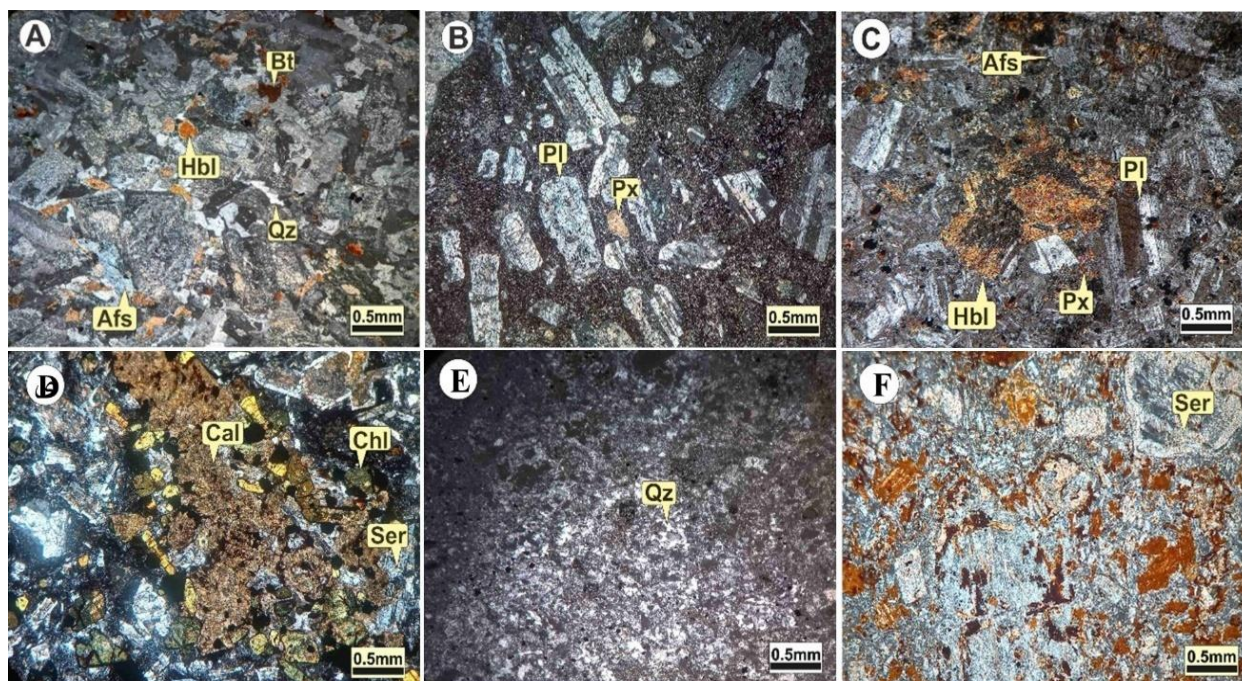
پروپلیتیک: این دگرسانی بیشترین گسترش را در محدوده داشته (شکل ۳) و اغلب واحدهای توفی، آندزیتی، دیوریتی و مونزودیوریتی را تحت‌تأثیر قراردادده است. این دگرسانی با شدت‌های ضعیف تا شدید در محدوده رخنمون دارد. در دگرسانی پروپلیتیک شدید در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد کل درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز به کربنات کلسیم و حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد به سربیسیت هم از حاشیه و هم مرکز بلور تجزیه شده‌اند. برخی از بلورهای هورنبلند و پیروکسن در بخش‌هایی دچار پدیده اپاسیتی‌شدن هستند و اکسید آهن آزاد کرده و به کانی کدر تبدیل شده‌اند و در بخش‌هایی تنها قالب شکلی آنها باقی‌مانده است. همچنین فضا‌های ایجاد شده توسط کربنات کلسیم در بر گرفته شده است. در بخش‌هایی این دو کانی نیز بین ۳۰ تا ۷۰ درصد به کلریت تجزیه شده‌اند (شکل ۴-D). دگرسانی پروپلیتیک متوسط و ضعیف بیشترین دگرسانی این منطقه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳).

کانی‌سازی

کانی‌سازی در محدوده کویران به صورت‌های رگه‌ای، رگچه‌ای و پراکنده مشاهده می‌شود. کانی‌سازی به شکل رگه‌ای (شکل ۵-A و B)، در اغلب بخش‌های محدوده مشاهده می‌شود. رخنمون رگه‌های سیلیسی در این محدوده در حدود ۰/۵ تا ۱/۵ متر متغیر است و در بعضی نقاط ضخامت آن به ۳ متر می‌رسد. طول رگه‌ها بر روی زمین متفاوت بوده و در بعضی نقاط به صورت ناپیوسته طول رگه به ۵۰۰ متر می‌رسد. روند رگه‌های سیلیسی شمال شرق - جنوب غرب و شیب آنها به قائم نزدیک است و در بعضی رگه‌ها این شیب به سمت شمال غرب و در برخی رگه‌ها به سمت جنوب شرق است. در رگه‌های سیلیسی محدوده، کانی‌سازی به صورت کانی‌های پیریت و به صورت خیلی کم کالکوپیریت است. کانی‌سازی افشان به صورت گسترده در غرب منطقه مشاهده می‌شود. کانه‌های اولیه شامل پیریت، بورنیت و کالکوپیریت است. کانه‌های ثانویه شامل کولیت، مالاکیت، اکسیدهای آهن (گوتیت و مگنتیت) است. کانی‌های سولفیدی مهمی که در سطح محدوده

واحدهای هورنبلند کوارتز دیوریت پورفیری (E^{qd})، پیروکسن مونوزودیوریت پورفیری (E^{pmz})، هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری (E^{hd})، توف ریولیتی، داسیتی و توف سنگی (E^t) مشاهده می‌شود.

کویران به صورت افشان دیده می‌شوند، اغلب شامل پیریت است. عمده این کانی‌ها به اکسیدهای آهن ثانویه نظیر هماتیت، گوتیت و ژاروسیت تبدیل شده‌اند (شکل ۵- C و D). بیشترین پراکندگی کانی‌سازی افشان در زون دگرسانی کوارتز-سریسیت-پیریت در



شکل ۴. تصویرهای میکروسکوپی از A: واحد بیوتیت هورنبلند گرانودیوریت (E^{gd})، B: واحد پیروکسن آندزیت (E^{ga})، C: واحد هورنبلند پیروکسن دیوریت پورفیری (E^{hd})، D: تصویر کانی‌های ثانویه کلریت، سریسیت و کربنات کلسیم. پروپلیتیک شدید، E: تصویر ذره‌های کوارتز و نمایی از زمینه سیلیسی و F: نمایی از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز دگرسان‌شده به سریسیت در محدوده اکتشافی کویران. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Px: پیروکسن، Cal: کلسیت، Qz: کوارتز، Ser: سریسیت، Afs: آلکالی فلدسپار، Chl: کلریت، Bt: بیوتیت).

Fig. 4. Photomicrographs of A: Biotite-Hornblende Granodiorite (E^{gd}) unit, B: Pyroxene-Andesite (E^{ga}) unit, C: Hornblende-Pyroxene-Diorite Porphyry (E^{hd}) unit, D: secondary minerals of chlorite, sericite and calcium carbonate. intense propylitic, E: quartz particles and view of silica matrix, and F: plagioclase macrocrystals altered to sericite, in the Kaviran prospect area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Pl: plagioclase, Hbl: hornblende, Px: Pyroxene, Cal: Calcite, Qz: Quartz, Ser: Sericite, Afs: Alkali feldspar, Chl: Chlorite; Bt: Biotite).

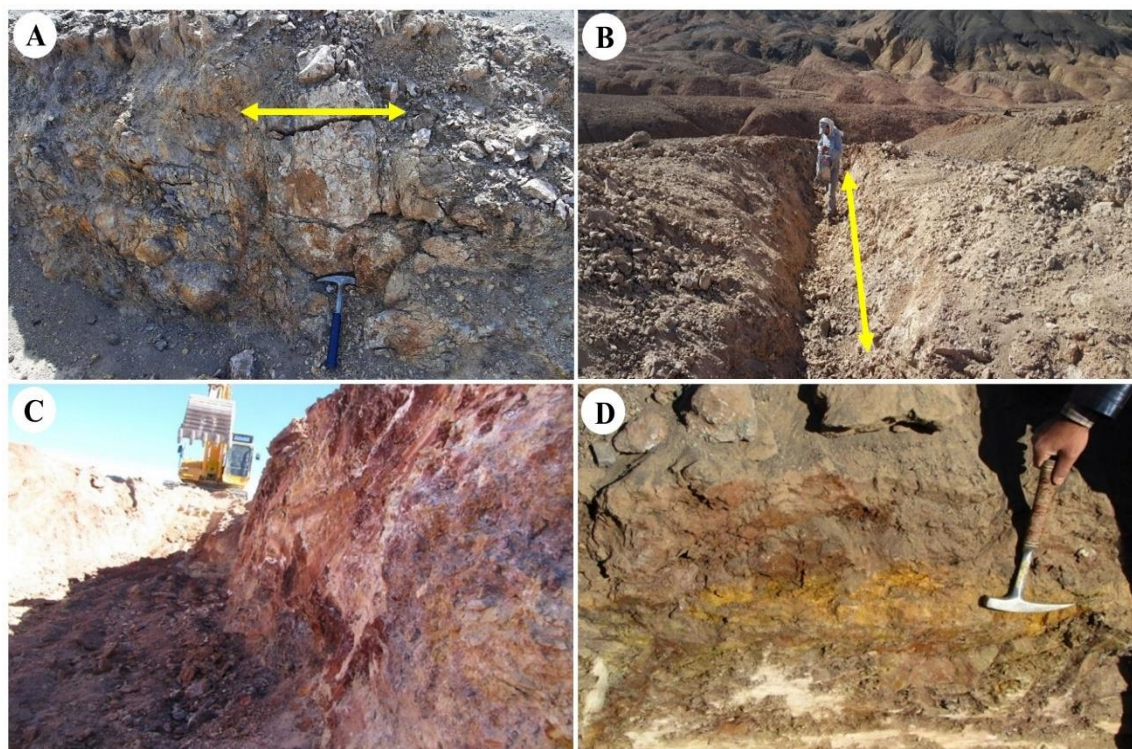
بخش‌های مدور آن نیز کمتر از ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر است. همچنین رگچه حاوی کانی پیریت با ضخامت ۵ میلی‌متر و طول ۱ سانتی‌متر درون رگه حضور دارد. به نظر می‌رسد که بخشی از پیریت‌های موجود گاهی تجزیه شده و به کانی گوتیت تبدیل شده‌اند. کانی

کانه‌نگاری در رگه‌های سیلیسی و توده‌های نیمه‌عمیق
در رگه‌های سیلیسی، بیشترین مقدار کانه مربوط به پیریت بوده که به صورت پراکنده و رگچه بین ۵ تا ۱۲ درصد فراوانی در سنگ را داراست. اندازه بلورهای پیریت خودشکل تا نیمه خودشکل در

است که به صورت پراکنده و گاهی رگچه‌ای بین ۵ تا ۱۵ درصد واحدهای نیمه عمیق را شامل می‌شود. اندازه بلورهای پیریت بی‌شکل تا اغلب نیمه خودشکل آن نیز کمتر از ۰/۵ میلی‌متر است. کانه بورنیت با فراوانی ۲ تا ۴ درصد از حجم سنگ است که در ابعاد کمتر از ۰/۵ تا حدود ۱/۵ میلی‌متر به صورت بی‌شکل دیده می‌شود (شکل ۶-۶C). در بخش‌هایی این کانی کمتر از ۵ درصد به گوتیت تجزیه شده است. کانی ثانویه گوتیت معمولاً با فراوانی در حدود ۲ تا ۱۰ درصد در سنگ‌ها به صورت گل‌کلمی دیده می‌شود. گوتیت‌های موجود اغلب در حاشیه کانی بورنیت و پیریت هستند و تجزیه شده‌اند (شکل ۶-۶D). همچنین کانی مگنتیت در بعضی از واحدها به صورت پراکنده بین ۱ تا ۳ درصد دیده می‌شود.

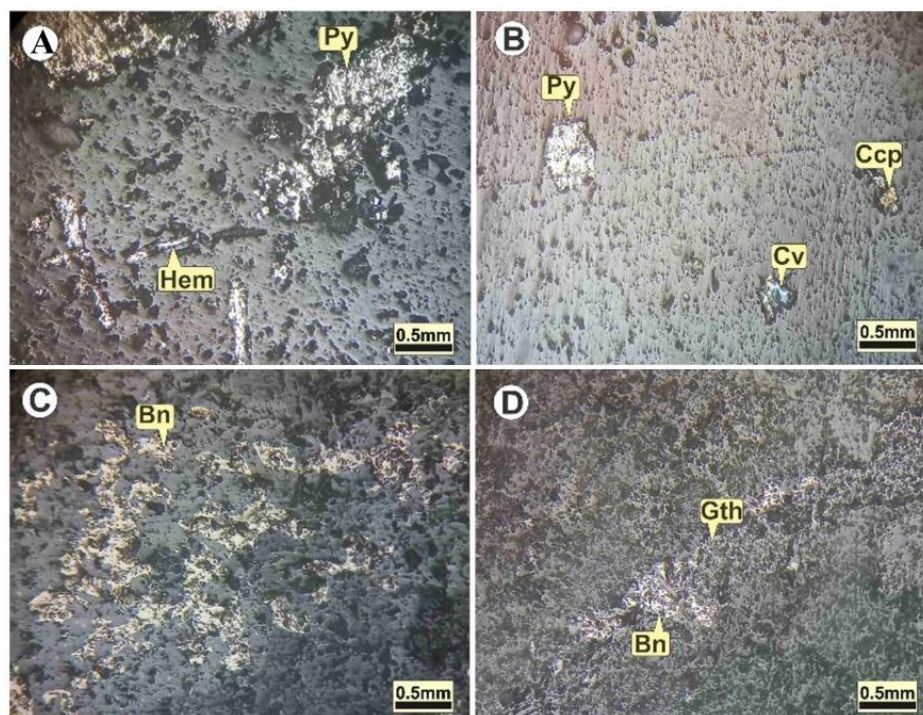
گوتیت بیانگر شرایط فوق اکسیدان در یک سامانه کانسارسازی است. کانی گوتیت به صورت یک کانی پراکنده و رگچه‌ای در رگه‌ها دیده می‌شود و فراوانی آن در حدود ۲ تا ۱۰ درصد است. گوتیت‌های موجود اغلب بافت گل‌کلمی داشته و ابعاد آنها بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر متغیر است. این کانی به صورت جانشینی از تجزیه هماتیت و همچنین پیریت تشکیل شده است (شکل ۶-۶A). همچنین کانی کالکوپیریت به مقدار کم در رگه‌ها مشاهده می‌شود. فراوانی این کانی به شدت ناچیز بوده و در ابعاد کمتر از ۰/۳ میلی‌متر در بخش‌هایی مشاهده می‌شود (شکل ۶-۶B). همچنین کانی کوولیت نیز در رگه دیده می‌شود که از تجزیه کالکوپیریت حاصل شده است (شکل ۶-۶B).

در توده‌های نیمه عمیق نیز بیشترین مقدار کانه مربوط به پیریت



شکل ۵. تصویرهای صحرایی از A: رگه سیلیسی کانه‌دار، B: پچ سیلیسی، C و D: اکسید آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) در محدوده اکتشافی کویران

Fig. 5. Field images of A: mineralized silica vein, B: silica patch, C and D: iron oxide (hematite, limonite, and goethite) in the Kaviran prospect area



شکل ۶. تصویرهای میکروسکوپی از A: تصویر بلور خودشکل پیریت همراه با بقایای کالکوپیریت در حال تجزیه به کوولیت، B: تصویر بلور بی‌شکل پیریت همراه با سوزن هماتیت، C: تصویر از بلورهای بی‌شکل و پراکنده بورنیت و D: نمایی از بلور بورنیت در حال تجزیه به گوئیت در محدوده اکتشافی کویران. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Bn: بورنیت، Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Cv: کوولیت، Hem: هماتیت، Gth: گوئیت).

Fig. 6. Photomicrographs of A: an automorphic pyrite crystal with remnants of chalcopyrite replacing into covellite, B: an amorphous pyrite crystal with hematite needles, C: an amorphous and disseminated bornite crystal, and D: a view of a bornite crystal decomposing into goethite, in the Kaviran prospect area. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Bn: bornite, Ccp: chalcopyrite, Py: pyrite, Cv: covellite, Hem: hematite, Gth: goethite).

زمین‌شیمی

در تن (در حد اقتصادی) هستند (شکل ۷). بیشترین مقادیر طلا مربوط به رگه‌های سیلیسی در شرق محدوده است که طول حدود ۳۰۰ متر و عرض حدود ۱/۵ تا ۲/۵ را شامل می‌شود. مقدار نقره بین ۰/۲ تا ۱۵۳ گرم در تن در نمونه‌ها متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده نقره، تعداد ۹۵ نمونه عیار کمتر از ۱ گرم در تن (در حد زمینه)، ۳۳ نمونه بین ۱ تا ۱۲ گرم در تن (در حد آنومالی)، ۶ نمونه بین ۱۲ تا ۴۰ گرم در تن (در حد کانساری) و ۴ نمونه بالای ۴۰ گرم در تن (در حد اقتصادی) هستند (جدول ۱). بیشترین مقدار نقره همراه با طلا، مس، سرب، روی، آرسنیک و مولیبدن مربوط به رگه‌های سیلیسی در شرق محدوده است.

بر اساس پی‌جویی و بررسی‌های میدانی از کل محدوده و محل کانی‌سازی‌ها، تعداد ۱۳۸ نمونه خرد شده سنگی برداشت و تجزیه و تحلیل شد (شکل ۷) که فقط نتایج تجزیه و تحلیل ۳۷ نمونه عیار بالای ۱۰۰ میلی‌گرم طلا در تن در جدول ۱ آورده شده است. مقدار عیارهای طلا بین ۲ تا ۸۱۰۰ میلی‌گرم در تن در نمونه‌ها متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده طلا، تعداد ۵۸ نمونه عیار کمتر از ۱۰ میلی‌گرم در تن (در حد زمینه)، ۴۴ نمونه بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در تن (در حد آنومالی)، ۱۶ نمونه بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در تن (در حد کانساری) و ۲۰ نمونه بالای ۵۰۰ میلی‌گرم

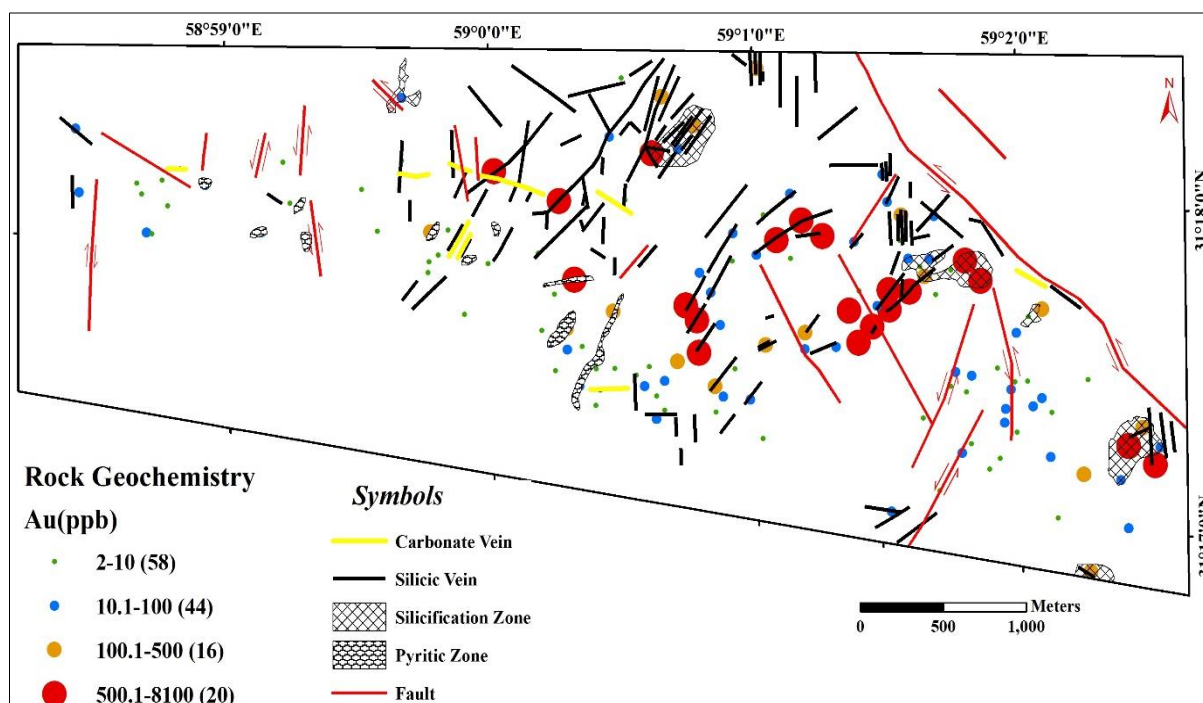
تحلیل شده متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده برای مولیبدن، تعداد ۱۲۶ نمونه عیار کمتر از ۶ گرم در تن (درحد زمینه) و ۱۲ نمونه بالای ۶ گرم در تن (در حد آنومالی) هستند (جدول ۱). معمولاً مقدار مولیبدن نیز بسیار محدود بوده و بیشتر در حد زمینه در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار مولیبدن مربوط به رگه‌های سیلیسی و توده‌های ساب‌ولکانیک در مرکز و شمال محدوده است.

مقدار سرب بین ۵ تا ۹۳۰ گرم در تن، در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده برای سرب، تعداد ۱۱۹ نمونه عیار کمتر از ۳۰ گرم در تن (درحد زمینه) و ۱۹ نمونه بالای ۳۰ گرم در تن (در حد آنومالی) هستند (جدول ۱). معمولاً مقدار سرب نیز بسیار محدود بوده و بیشتر در حد زمینه در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار سرب مربوط به رگه‌های سیلیسی و کمتر مربوط توده‌های ساب‌ولکانیک در کل محدوده است.

مقدار آرسنیک ۲ تا ۱۰۰۳ گرم در تن، در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده آرسنیک، تعداد ۳۵ نمونه عیار کمتر از ۱۰ گرم در تن (درحد زمینه) و ۱۰۳ نمونه بین ۱۰ تا ۱۰۰۳ گرم در تن (در حد آنومالی) هستند (جدول ۱). معمولاً آرسنیک در همه جای محدوده در حد آنومالی در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار آرسنیک مربوط به رگه‌های سیلیسی در شرق محدوده است.

مقدار مس بین ۵ تا ۲۲۶ گرم در تن، در نمونه‌ها تجزیه و تحلیل شده متغیر است از بین نمونه‌های تجزیه‌شده برای مس، تعداد ۱۳۴ نمونه عیار کمتر از ۷۰ گرم در تن (درحد زمینه) و ۴ نمونه بین ۷۰ تا ۲۲۶ گرم در تن (در حد آنومالی) هستند (جدول ۱). معمولاً مقدار مس بسیار محدود و بیشتر در حد زمینه در نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار مس مربوط به رگه‌های سیلیسی در مرکز و شرق محدوده است.

مقدار مولیبدن بین ۱ تا ۲۸۲ گرم در تن، در نمونه‌های تجزیه و



شکل ۷. نقشه کانی‌سازی و زمین‌شیمی طلا در نمونه‌های محدوده اکتشافی کویران

Fig. 7. Mineralization map and Au assay from samples of the Kaviran prospect area

جدول ۱. نتایج تجزیه و تحلیل طلا، نقره، آرسنیک، مس، مولیبدن، سرب، گوگرد و روی در نمونه‌های خرد سنگی محدوده اکتشافی کویران (طلا بر حسب میلی گرم در تن و بقیه عناصر بر حسب گرم بر تن)

Table 1. Results of Au, Ag, As, Cu, Mo, Pb, S and Zn from chip composite samples of the Kaviran prospect area (Au is ppb and other elements are ppm)

Sample	Au	Ag	As	Cu	Mo	Pb	S	Zn
B81	8100	14	95	73	7	142	8154	250
B119	4680	153	203	30	282	90	26732	532
B12	4070	51	123	211	27	298	19668	960
B97	3400	5	30	18	4	10	730	50
B72	3350	5	152	14	4	12	5200	49
B87	2810	8	175	4	6	17	12132	264
B89	2450	73	115	28	30	116	7663	275
B99	1810	1	350	22	2	111	8851	418
B84	1755	38	48	12	20	18	3488	176
B91	1660	33	397	226	20	930	35000	2852
B94	1620	1	32	16	2	6	1969	24
B68	980	8	17	20	6	6	1048	22
B80	954	0	12	6	1	8	1859	86
B47	817	2	21	8	3	58	2917	171
B100	780	7	63	16	4	44	12726	160
B78	625	0	34	5	1	22	1247	388
B85	610	1	43	2	1	7	21514	48
B106	535	2	159	20	2	26	20328	104
B88	515	3	310	4	3	13	8195	120
B93	512	1	16	16	2	8	3986	39
B43	476	1	22	6	2	11	3297	117
B1	425	1	532	18	2	76	35000	118
B79	398	1	33	18	1	64	5056	427
B92	368	5	179	19	3	68	26740	309
B107	319	13	477	12	7	66	35000	306
B77	274	1	103	11	2	19	11082	475
B3	270	13	253	8	7	26	16776	216
B121	240	2	51	10	2	62	16997	162
B109	237	4	15	5	3	5	5012	28
B102	220	3	273	19	3	34	15164	804
B15	220	45	1003	19	26	444	>40000	2329
B90	217	5	97	13	4	20	17246	237
B101	210	1	98	14	1	26	18370	138
B111	148	5	15	5	4	6	9760	21
B86	144	1	33	10	2	186	9196	621
B66	115	1	109	9	2	25	19642	46
B103	102	1	144	14	1	13	17120	65

مقدار روی بین ۲۰ تا ۲۸۵۲ گرم در تن، در نمونه‌ها متغیر است. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده روی، تعداد ۱۱۷ نمونه عیار کمتر از ۲۰۰ گرم در تن (درحد زمینه)، ۱۹ نمونه بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ گرم در تن (در حد آنومالی) و ۲ نمونه بالای ۲۰۰۰ گرم در تن (در حد کانساری) هستند (جدول ۱). بیشترین مقدار روی مربوط به رگه‌های سیلیسی در مرکز و شمال محدوده است.

مقدار گوگرد بین ۰/۰۵ تا بیشتر از ۴ درصد (در بیشتر نمونه‌ها بالای ۱ درصد) است. تمرکز بالای گوگرد در نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده مقدار بالای کانی‌های سولفیدی در نمونه‌های منطقه باشد. از بین نمونه‌های تجزیه‌شده روی، تعداد ۱۴ نمونه عیار کمتر از ۰/۰۵ درصد (در حد زمینه) و ۷۲ نمونه بین ۰/۰۵ تا ۱ درصد (در حد آنومالی) و ۵۲ نمونه بالای ۱ درصد (در حد کانساری) هستند (جدول ۱). بیشترین مقدار گوگرد مربوط به رگه‌های سیلیسی، توده‌های ساب‌ولکانیک، سنگ‌های ولکانیک و واحدهای آلتزه و در بخش اعظم محدوده است.

ضرایب همبستگی عناصر در کانسار کویران در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس طلا دارای همبستگی متوسط با عناصر نقره (۰/۵۶)، مولیبدن (۰/۴۴)، مس (۰/۴۱)، سرب (۰/۳۱) و همبستگی ضعیف با عناصر آرسنیک (۰/۱۳)، روی (۰/۲۴)، گوگرد (۰/۰۱) است. همچنین نقره دارای همبستگی بالا با عنصر

مولیبدن (۰/۹) و همبستگی متوسط با عناصر طلا (۰/۵۶)، روی (۰/۴۱)، سرب (۰/۳۹)، مس (۰/۳۳) و همبستگی ضعیف با عناصر آرسنیک (۰/۲۸) و گوگرد (۰/۱۷) است. آرسنیک دارای همبستگی متوسط با عناصر سرب (۰/۴۸)، روی (۰/۴۱) و همبستگی ضعیف با عناصر طلا (۰/۱۳)، نقره (۰/۲۸)، مس (۰/۲) و مولیبدن (۰/۱۵)، گوگرد (۰/۲۹) است. مس دارای همبستگی قوی با عنصر سرب (۰/۷۵) و همبستگی متوسط با عناصر روی (۰/۶۲)، مس (۰/۴۱)، نقره (۰/۳۳) و همبستگی ضعیف با عناصر مولیبدن (۰/۱۴)، آرسنیک (۰/۲) و گوگرد (۰/۱۳) است. مولیبدن دارای همبستگی بالا با عنصر نقره (۰/۹) و همبستگی متوسط با عنصر طلا (۰/۴۴) و همبستگی ضعیف با عناصر آرسنیک (۰/۱۵)، مس (۰/۱۴)، سرب (۰/۱۷)، روی (۰/۲۲)، گوگرد (۰/۱۴) است. سرب دارای همبستگی بالا با عناصر روی (۰/۹۳)، مس (۰/۷۵) و همبستگی متوسط با عناصر آرسنیک (۰/۴۸)، نقره (۰/۳۹)، طلا (۰/۳۱) و همبستگی ضعیف با عناصر مولیبدن (۰/۱۷) و گوگرد (۰/۲۵) است. روی دارای همبستگی بالا با عناصر سرب (۰/۹۳)، مس (۰/۶۲) و همبستگی متوسط با عناصر آرسنیک (۰/۵۵)، نقره (۰/۴۱) و همبستگی ضعیف با عناصر طلا (۰/۲۴)، مولیبدن (۰/۲۲) و گوگرد (۰/۲۷) است (جدول ۲).

جدول ۲. ضرایب همبستگی عناصر در نمونه‌های خرده سنگی محدوده اکتشافی کویران (ضرایب همبستگی بر اساس روش پیرسون و با استفاده از داده‌های غلظت عناصر محاسبه شده‌اند)

Table 2. Elemental correlation coefficient from chip composite samples of the Kaviran prospect area (Correlation coefficients were calculated using Pearson's correlation method based on elemental concentration data)

	Au	Ag	As	Cu	Mo	Pb	S	Zn
Au	1.00							
Ag	0.56	1.00						
As	0.13	0.28	1.00					
Cu	0.41	0.33	0.20	1.00				
Mo	0.44	0.90	0.15	0.14	1.00			
Pb	0.31	0.39	0.48	0.75	0.17	1.00		
S	0.01	0.17	0.29	0.13	0.14	0.25	1.00	
Zn	0.24	0.41	0.55	0.62	0.22	0.93	0.27	1.00

بررسی سیالات درگیر

رگه‌های کلسیتی بررسی شد (جدول ۳). میان‌بارهای سیال موجود در نمونه‌ها بیشتر به صورت پراکنده و تجمعی و از نوع اولیه هستند. این میان‌بارها بیشتر به شکل کروی، بیضوی و نامنظم بوده و اندازه آنها ۵ تا ۲۵ میکرون است.

در محدوده اکتشافی کویران بررسی میان‌بارهای سیال بر روی رگه‌های سیلیسی و رگه‌های کلسیتی انجام شد. کانی کوارتز مهم‌ترین کانی همراه با کانی‌سازی و مرتبط با سیال کانه‌ساز است. در این پژوهش، تعداد ۱۶ نمونه از رگه‌های کوارتز و ۳ نمونه از

جدول ۳. خلاصه نتایج بررسی‌های میان‌بارهای سیال اولیه (P) در کانی کوارتز و کلسیت همراه با کانی‌سازی در محدوده اکتشافی کویران

Table 3. Microthermometric data of primary fluid inclusions (P) of quartz and calcite mineral associated with mineralization in the Kaviran prospect area

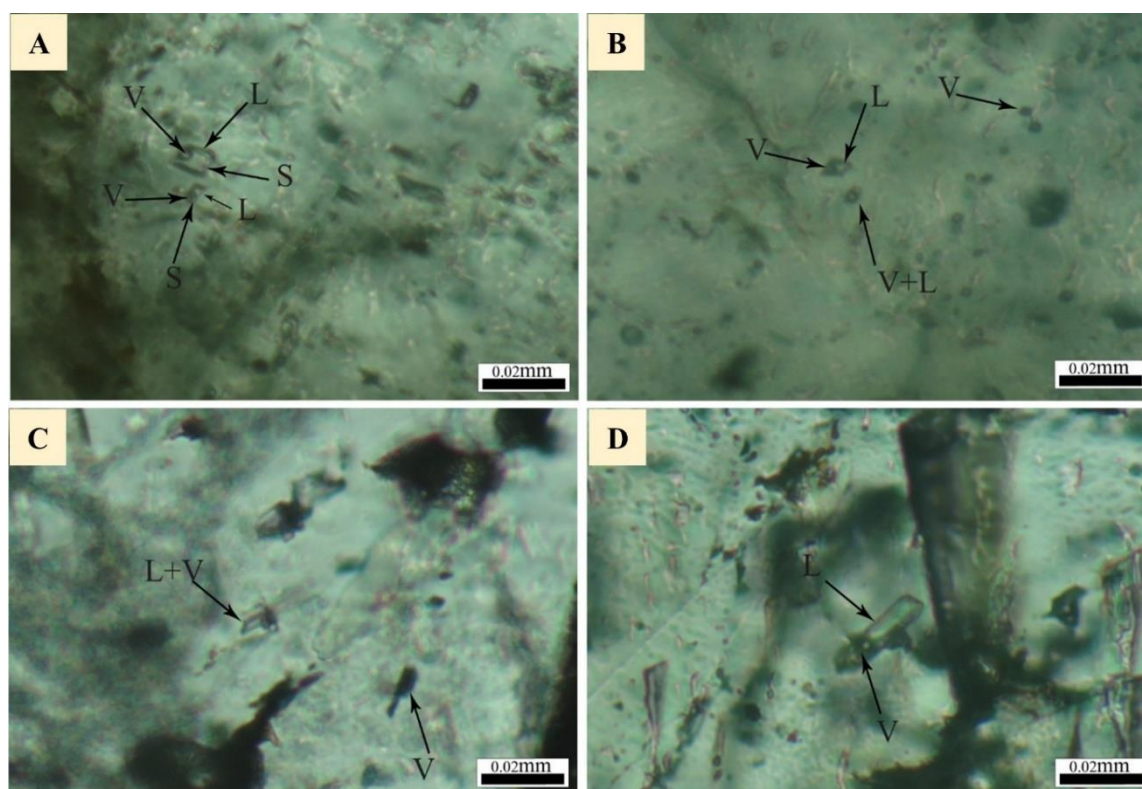
Sample No.	Fluid inclusion type	Number	Size (μm)	Tm (C°)	T _{im} (C°)	salinity (wt.%)
P-4-Qz	LV-LVS	13	5-15	169-287	-1 to -7	1.7-10.3
P-4/1-Qz	LV-VL	8	5-10	120-220	-1.5 to -5	2.1-7.8
P-8-Qz	LV	6	4-10	128-171	-1.3 to -3	2.2-4.9
P-13-Qz	LV	9	5-18	135-265	-1.6 to -8.2	2.7-11.6
P-21-Qz	LV-VL	6	5-15	117-284	-1.3 to -4.9	2.2-7.7
P-22-Qz	LV	7	4-10	114-195	-1 to -3.8	1.7-6.1
P-25-Qz	LV	9	5-10	124-174	-1.6 to -5.1	2.2-7.9
P-26-Qz	LV	8	5-15	117-250	-1 to -4.2	1.0-6.7
P-34-Qz	LV	5	5-10	115-164	-1.3 to -3.6	2.2-4.8
P-36-Qz	LV	14	5-10	121-291	-1.7 to -6.8	2.2-10.1
P-50-Qz	LV	6	5-25	193-320	-2.1 to -6.2	3.5-9.3
P-84-Qz	LV	4	5-15	112-155	-1.4 to -2.1	2.4-3.5
P-87-Qz	LV-LVS	4	5-10	123-198	-1.5 to -3.1	2.5-5.1
P-94-Qz	LV	5	5-15	135-215	-1.6 to -3.9	2.7-6.3
P-15-Qz	LV	10	5-15	210-230	-18 to -19	21-21.7
P-19-Qz	LV	9	5-15	212-230	-20 to -21.1	22.6-23.1
P-14-Cal	LV	14	5-10	214-242	-11.2 to -12.2	15.2-16.3
P-15-Cal	LV	15	5-15	214-252	-11.7 to -19.3	15.7-16.1
P-9-Cal	LV-VL	16	5-15	194-310	-4 to -11.2	6.4-14.4

مختلف ارائه شده است. اغلب این طبقه‌بندی‌ها بر اساس تعداد فازها در دمای اتاق انجام می‌شود. برای پذیرفتن این طبقه‌بندی‌ها باید در نظر داشت که یک تداوم و تسلسل ترکیبی برای سیالات زمین‌شناسی وجود دارد و به علت وجود تقسیم‌بندی‌های به نسبت دلخواه، در ۵۰ درصد آنها هم‌پوشانی‌هایی بین انواع سیالات درگیر مختلف وجود خواهد داشت (Shepherd, et

میان‌بارهای سیال می‌توانند از نظر ویژگی ظاهری مانند اندازه، شکل، رنگ، ضریب شکست و به خصوص، به وسیله فازهای موجود در آنها در دمای اتاق شرح داده شوند (Van den Kerkhof, and Hein, 2001). طبقه‌بندی‌های مختلفی بر اساس تعداد فازهای تشکیل شده در سیالات درگیر یا نسبت‌های مختلف جامدها، مایع‌ها و بخار موجود در آنها توسط افراد

جوشش در محیط است (شکل ۸-B و C). ب- میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع (LV): میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع از فراوانی بالایی در نمونه‌ها برخوردارند. حجم فاز بخار در این میان‌بار حدود ۵ تا ۳۰ درصد و حجم مایع ۶۵ تا ۸۰ درصد حجم میان‌بار است. این میان‌بار بیشتر با شکل‌های نامنظم و کشیده مشاهده شده‌اند (شکل ۸-C و D). ج- میان‌بارهای دوفازی غنی از گاز (VL): میان‌بارهای دوفازی غنی از گاز از فراوانی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برخوردارند. حجم فاز بخار در این میان‌بارها حدود ۷۵ تا ۹۰ درصد حجم میان‌بار است و د- میان‌بارهای سه فازی حاوی فاز جامد (LVS): تعداد این میان‌بارها کم بوده و کمتر از ۱۰ درصد است (شکل ۸-A).

(al., 1985). بررسی‌های سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال، شامل بررسی شکل، اندازه، درجه پرشدگی و تعیین اولیه یا ثانویه بودن میان‌بارها، پیش از انجام بررسی‌های ریزدماسنجی انجام شد (Roedder, 1984). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده ۴ نوع میان‌بار سیال شناسایی شده است (شکل ۸). الف- میان‌بارهای تک فازی گازی (V): تک فازی گازی در این نوع از سیالات درگیر حباب T تنها فاز تشکیل‌دهنده است؛ لذا از این نوع از سیالات نمی‌توان برای اندازه‌گیری میکروترمومتری استفاده کرد. این میان‌بارها فراوانی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد در نمونه‌ها دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی با رنگ تیره و کمتر به رنگ روشن دیده می‌شود. اندازه آنها از ۲ تا ۱۰ میکرون است. این میان‌بار به صورت همزیست با میان‌بارهای دوفازی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده



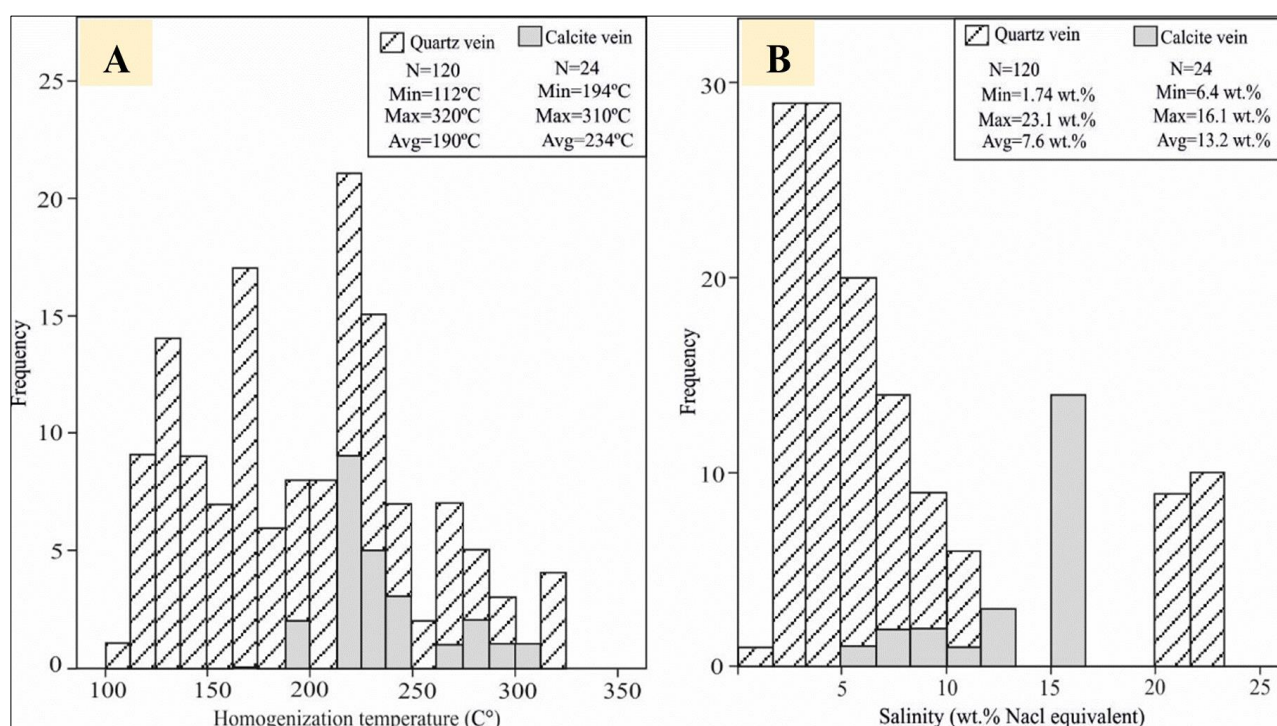
شکل ۸. تصویرهای میکروسکوپی از سیالات درگیر در محدوده اکتشافی کویران A: سه فازی (LVS) در کوارتز، B: دوفازی غنی از گاز (VL) در کلسیت، C: تک فازی گازی به همراه دوفازی غنی از مایع (LV, V) در کوارتز و D: دوفازی غنی از مایع (LV) در کوارتز

Fig. 8. the microscopic images in the Kaviran prospect area A: Three-phase (LVS) in quartz, B: two-phase vapor (VL) in calcite, C: single-phase vapor with liquid (LV, V) in quartz, and D: two-phase liquid (LV) in quartz

دمای همگن‌شدگی میان‌بارهای موجود در رگه‌های کوارتزی بین ۱۱۲ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و در رگه‌های کلسیتی بین ۱۹۴ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (شکل ۹-۱). میانگین دمای همگن‌شدگی در کلسیت (۲۳۴ درجه سانتی‌گراد) نسبت به کوارتز (۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) بیشتر است که می‌تواند بیانگر تشکیل کلسیت در مرحله‌ای گرم‌تر از سامانه گرمابی باشد. همچنین، شوری میان‌بارهای سیال در کوارتز بین ۱/۷۴ تا ۲۳/۱ درصد وزنی معادل NaCl و در کلسیت بین ۶/۴ تا ۱۶/۱ درصد وزنی معادل NaCl متغیر است (شکل ۹-۲). میانگین شوری بیشتر در کلسیت نسبت به کوارتز احتمال حضور سیالات اولیه با سهم ماگمایی بیشتر را مطرح می‌کند (Bodnar et al., 2014; Fulignati et al., 2023).

خلاصه نتایج دماسنجی بر روی سیالات در جدول ۳ آورده شده است. در این بررسی تعداد ۱۶۸ میان‌بار سیال اولیه شامل ۱۲۳ سیال در کوارتز و ۴۵ سیال در کلسیت مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس داده‌های به دست آمده، دمای اولیه ذوب یخ (T_{fm}) اندازه‌گیری‌شده در کوارتزها در محدوده ۱- تا ۲۱/۱- و در کربنات‌ها ۴- تا ۱۹- متغیر است. مقدار شوری سیالات درگیر در کوارتزهای منطقه بین ۱/۷۴ تا ۲۳/۱ درصد وزنی و در کربنات‌ها بین ۶/۴ تا ۱۶/۱ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است. بر این اساس دمای همگن‌شدن سیالات درگیر در کوارتزها بین ۱۱۲ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) و در کربنات‌ها ۱۹۴ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۳۴ درجه سانتی‌گراد) است.

بررسی نتایج میکروترمومتری میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که

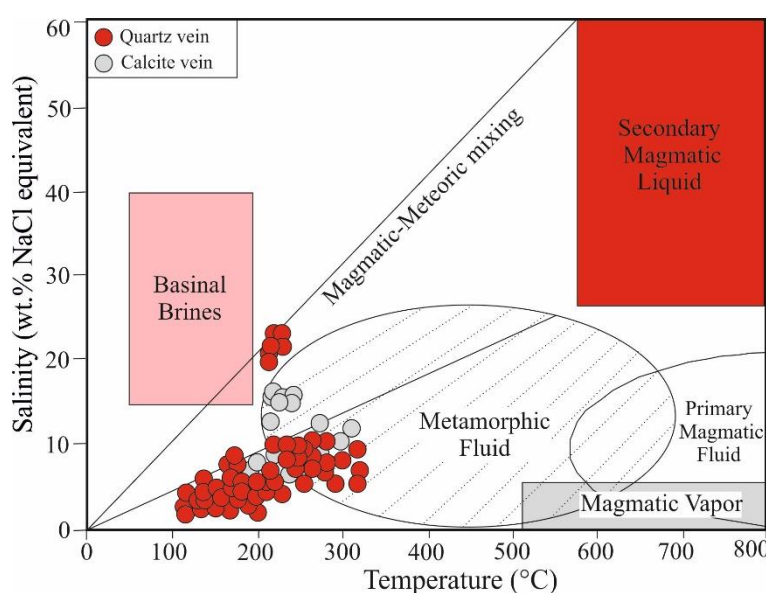


شکل ۹. نمودارهای A: دمای همگن‌شدن و B: شوری میان‌بارهای اولیه در محدوده اکتشافی کویران

Fig. 9. Histogram showing the A: homogenization temperature, and B: salinity (wt.% NaCl equivalent) data of primary fluid inclusions in veins from the Kaviran prospect area

پراکندگی داده‌های دما-شوری میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که بخش عمده داده‌ها در محدوده اختلاط سیالات ماگمایی-جوی قرار دارند (شکل ۱۰). این ویژگی نشان‌دهنده نقش مهم ورود آب‌های جوی در رقیق‌سازی سیالات اولیه و کاهش دما و شوری سامانه است. وجود نمونه‌هایی با شوری به نسبت بالا نیز می‌تواند بازتاب حضور یک مؤلفه اولیه ماگمایی باشد. چنین الگویی معمولاً در سامانه‌های کم‌عمق مشاهده می‌شود که در آن فرایندهای اختلاط سیالات و افت فشار به نهشت کانی‌های رگه‌ای منجر می‌شوند (Rottier et al., 2021; Yasami et al., 2025).

بر اساس داده‌های سیالات در گیر، شواهدی بر جوشش سیال کانه‌دار در تکامل سامانه کانه‌زایی کانسار کویران دیده می‌شود. یکی از شواهد اصلی جوشش در سیالات در گیر، حضور هم‌زمان سیالات در گیر دوفازی نوع LV و VL در یک مجموعه از سیالات در گیر است (Bodnar et al., 1985; White and Hedenquist, 1995; Moncada et al., 2012). همچنین، حضور میان‌بارهای سیال تک‌فازی بخار در کنار میان‌بارهای غنی از مایع و غنی از بخار، می‌تواند به عنوان یکی از شواهد فرایند جوشش و جدایش فازی سیال کانه‌ساز در نظر گرفته شود (Moncada et al., 2012).

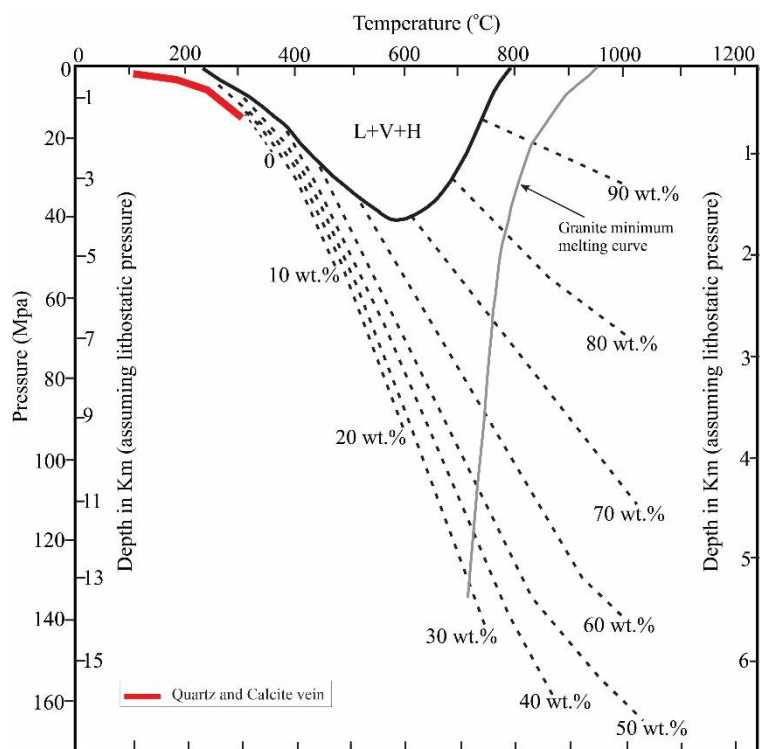


شکل ۱۰. نمودار دمای همگن شدن در برابر شوری سیالات در گیر در محدوده اکتشافی کویران. محدوده‌های مشخص شده بر اساس بین (Beane, 1983) ترسیم شده‌اند.

Fig. 10. Homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Kaviran prospect area (Defined areas are plotted according to Beane (1983)).

حرکت سیالات در امتداد شکستگی‌ها و رسوب‌گذاری در شرایط افت فشار و احتمالاً جوشش سیال است (Hedenquist et al., 2000; Bodnar et al., 2014).

بر اساس نمودار فشار-دما-عمق، تشکیل رگه‌های کوارتز-کلسیت در فشارهای پایین (کمتر از حدود ۱۵ MPa) و عمق کم (کمتر از حدود یک کیلومتر) رخ داده است (شکل ۱۱). این شرایط با یک سامانه گرمابی کم‌عمق سازگار بوده و بیانگر



شکل ۱۱. نمودار فشار-حرارت (برای نمونه‌های کویران) نشان‌دهنده رابطه فازی در سامانه $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ در فشار هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک (Fournier, 1999). L: مایع، V: بخار، H: نمک. خط‌چین‌ها خطوط هم‌ارزش ثابت درصد وزنی NaCl محلول در شورابه هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیت را مشخص می‌کند. خط ضخیم مشکی مرز سه فاز $L+V+H$ را برای سامانه $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ با Na/K در محلول ثابت‌شده به وسیله آل بیت و K-فلدسپار در درجه حرارت‌های مشخص نشان می‌دهد.

Fig. 11. Pressure-temperature diagram (for samples of the Kaviran prospect area) showing phase relationships in the $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ system at lithostatic and hydrostatic pressures (Fournier, 1999). L: liquid, V: vapor, H: halite. Thin dashed lines are contours of constant wt percent NaCl dissolved in brine. Filled gray line indicates granite minimum melting curve. Filled dark line shows the three-phase boundary, $L+V+H$, for the system $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ with Na/K in solution fixed by equilibration with albite and K-feldspar at the indicated temperatures.

احتمالاً تحت‌تأثیر فرایندهای اختلاط سیال و جوشش رخ داده است؛ شرایطی که با سامانه‌های کانه‌زایی گزارش شده در بلوک لوت همخوانی دارد (Javidi Moghaddam et al., 2018; Yasami et al., 2025).

نوع کانه‌زایی و مدل ژنتیکی

کانسارهای طلا در بخش‌های کم عمق پوسته (معمولاً کمتر از ۱/۵ کیلومتر) و در دماهای به نسبت پایین تا متوسط (حدود ۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) تشکیل می‌شوند و بر اساس ویژگی‌های

در مجموع، داده‌های میان‌بارهای سیال در منطقه کویران نشان‌دهنده تکامل یک سامانه گرمایی کم عمق با منشأ اولیه ماگمایی و تأثیر بعدی آب‌های جوی است. دما و شوری بیشتر میان‌بارهای کلسیتی نسبت به کوارتز ممکن است نشان‌دهنده تشکیل کلسیت در مراحل اولیه‌تر یا تحت‌تأثیر سیالات با سهم ماگمایی بیشتر باشد؛ در حالی که رگه‌های کوارتزی اغلب در مراحل متأخرتر و طی فرایند کاهش دما و رقیق شدن سیال تشکیل شده‌اند. روند اختلاط ماگمایی-جوی، همراه با شرایط فشار پایین و عمق کم، نشان می‌دهد که کانه‌زایی در یک محیط کم عمق و

کانی‌شناسی، نوع دگرسانی، ترکیب سیالات کانه‌ساز و وضعیت سولفیداسیون، به سه گروه اصلی شامل سولفیداسیون پایین (LS)، سولفیداسیون میانی (IS) و سولفیداسیون بالا (HS) تقسیم می‌شوند (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005; Yasami et al., 2025).

در سامانه‌های سولفیداسیون پایین، سیالات کانه‌ساز معمولاً pH نزدیک به خنثی، شوری کم تا متوسط و منشأ اغلب جوی با سهمی از سیالات ماگمایی دارند. کانی‌های باطله رایج شامل کوارتز، کلسیت، آدولاریا و سریسیت بوده و نهشت فلزهای اغلب در اثر جوشش سیال، افت فشار و گاهی اختلاط با آب‌های جوی رخ می‌دهد. این سامانه‌ها معمولاً دارای بافت‌های فضای باز، رگه‌های کوارتز-کربناته و دماهای همگن‌شدگی حدود ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005).

در مقابل، سامانه‌های سولفیداسیون بالا تحت تأثیر سیالات اسیدی و اکسیدان با منشأ اغلب ماگمایی شکل می‌گیرند و با دگرسانی آرژلیک پیشرفته، سیلیس حفره‌دار، کانی‌هایی نظیر آلونیت، دی‌کیت، پیروفیلیت و سولفیدهایی مانند انارژیت و لوزونیت مشخص می‌شوند. این نوع کانه‌زایی اغلب ارتباط نزدیکی با سامانه‌های پورفیری دارد (Sillitoe and Hedenquist, 2003).

نوع سوم، سولفیداسیون متوسط، از نظر ویژگی‌ها حد واسطه دو گروه پیشین بوده و معمولاً با مجموعه سولفیدی اسفالریت، گالن، کالکوپریت، تتراهدرایت-تنانتیت، همراه با کوارتز و کربنات‌ها شناخته می‌شود. این سامانه‌ها اغلب در ارتباط با سنگ‌های آندزیتی-داسیتی و سامانه‌های انتقالی پورفیری-ابی‌ترمال ایجاد می‌شوند و میان‌بارهای سیال آنها معمولاً دماهای ۱۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۰ تا ۲۳ درصد وزنی معادل NaCl را نشان می‌دهند (Wang et al., 2019; Yasami et al., 2025).

بررسی شواهد صحرایی، الگوی دگرسانی، پراکندگی کانه‌زایی، ویژگی‌های میان‌بارهای سیال و روابط زمین‌شیمیایی عناصر در منطقه کویران نشان می‌دهد که این منطقه به عنوان یک سامانه

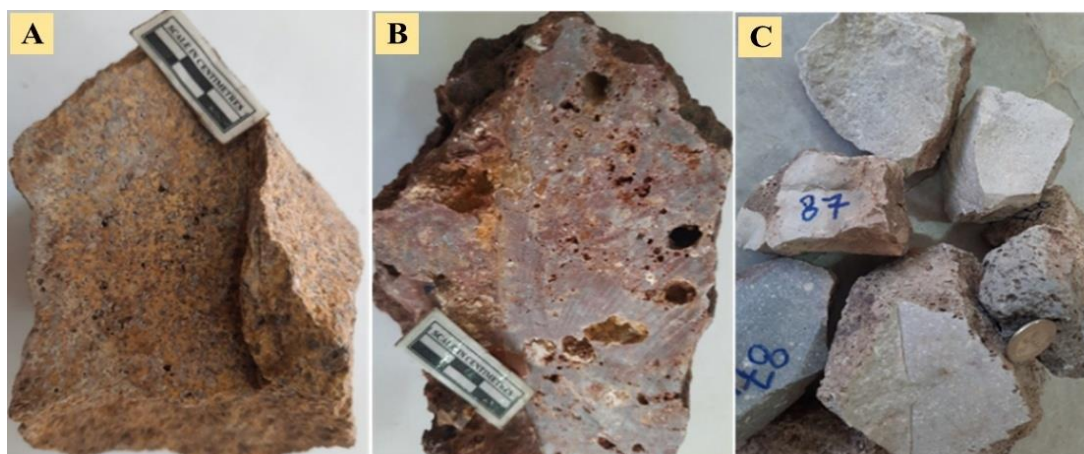
تمایل غالب به سولفیداسیون بالا و ویژگی‌های انتقالی به سولفیداسیون میانی تفسیر می‌شود. حضور گسترده زون‌های سیلیسی‌شدن، دگرسانی آرژلیک پیشرفته، کوارتزهای حفره‌دار (شکل ۱۲- A، B و C)، کانی پیروفیلیت و زون‌های پیریتی از مهم‌ترین شاخص‌های سامانه‌های سولفیداسیون بالا محسوب می‌شوند. سامانه‌هایی که معمولاً در اثر تأثیر سیالات اسیدی با منشأ اغلب ماگمایی و در بخش‌های کم‌عمق سامانه‌های ماگمایی-گرمابی تشکیل می‌شوند (Arribas, 1995; Sillitoe, 2010; Sillitoe and Hedenquist, 2003).

نقشه دگرسانی منطقه، زون‌بندی به نسبت مشخصی شامل هسته سیلیسی-آرژلیک پیشرفته و گسترش دگرسانی آرژلیک، سریسیتی-کربناته و پروپیلیتیک را نشان می‌دهد که با الگوی کلاسیک سامانه‌های HS مطابقت دارد. تمرکز آنومالی‌های بالای طلا در ارتباط مستقیم با زون‌های سیلیسی‌شده و پیریتی و همبستگی فضایی آنها با ساختارهای گسلی و رگه‌های سیلیسی، بیانگر نقش کنترل‌کننده ساختارها در صعود و تمرکز سیالات کانه‌ساز است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که شکستگی‌ها و سامانه‌های گسلی، مسیر اصلی انتقال سیالات گرمابی و تمرکز کانه‌زایی در منطقه بوده‌اند (Hedenquist et al., 2000; Simmons et al., 2005; Yasami et al., 2025).

بررسی‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که دماهای همگن‌شدگی در رگه‌های کوارتزی و کلسیتی اغلب در بازه ۱۱۲ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارند و شوری سیالات از کم تا متوسط متغیر است. پراکندگی داده‌ها در امتداد روند اختلاط ماگمایی-جوی، همراه با فشار پایین و عمق کم تشکیل رگه‌ها، بیانگر تکامل یک سامانه گرمابی کم‌عمق است که طی آن سیالات اولیه ماگمایی در اثر ورود آب‌های جوی رقیق شده‌اند. این فرایند، همراه با افت فشار و احتمال وقوع جوشش موضعی از مهم‌ترین سازوکارهای نهشت طلا و سولفیدها در سامانه‌های کم‌عمق به شمار می‌رود (Bodnar et al., 2014; Rottier et al., 2021; Yasami et al., 2025).

بسیاری از سامانه‌های سولفیداسیون بالا مشاهده می‌شود که طی تکامل سامانه، یک مرحله انتقالی به سولفیداسیون میانی یا کانه‌زایی فلزهای پایه بر سامانه اولیه غالب می‌شود (Sillitoe, 2010; Wang et al., 2019).

نتایج همبستگی عناصر نیز بیانگر چندمرحله‌ای بودن کانه‌زایی است. همبستگی مثبت طلا با Ag، Cu و Mo احتمال وجود یک مؤلفه ماگمایی و ارتباط با سامانه‌های پورفیری زیرین را تقویت می‌کند؛ در حالی که همبستگی قوی Pb-Zn-Cu می‌تواند بیانگر یک مرحله متأخرتر کانه‌زایی فلزهای پایه باشد. چنین الگویی در



شکل ۱۲. تصاویرهای نشان‌دهنده بافت کوارتزهای حفره‌دار در محدوده اکتشافی کویران. A، B و C: تصاویرهای صحرایی از بافت‌های متخلخل و حفره‌دار کوارتز مرتبط با زون‌های سیلیسی شدن

Fig. 12. Representative photographs of vuggy quartz textures in the Kaviran prospect area. A, B and C: Field photographs showing porous and cavity-rich quartz textures associated with silicification zones

جوشش سیالات گرمایی سبب تشکیل رگه‌های کوارتز-کلسیت و تمرکز طلا در امتداد ساختارهای گسلی شده‌اند. حضور میان‌بارهای غنی از مایع، غنی از گاز و تک‌فازی گازی، شواهدی از وقوع جوشش در سامانه کانه‌ساز را ارائه می‌دهد. گسترش زون‌های سیلیسی، واگی کوارتز، آرژلیک پیشرفته و زون‌های پیریتی نشان‌دهنده تأثیر سیالات اسیدی با منشأ اغلب ماگمایی است. از سوی دیگر، وجود رگه‌های کوارتز-کلسیت، شوری به نسبت پایین تا متوسط و شواهد اختلاط سیالات، بیانگر نقش مؤثر آب‌های جوی در مراحل تکاملی سامانه است.

بر این اساس، کانه‌زایی کویران حاصل فعالیت یک سامانه سولفیداسیون بالا کم عمق با ویژگی‌های غالب سولفیداسیون بالا و ارتباط احتمالی با یک سامانه پورفیری در عمق است که در آن

فعالیت ماگمایی ائوسن و نفوذ توده‌های دیوریتی تا کوارتز مونزودیوریتی پورفیری، منبع اصلی حرارت و سیالات کانه‌ساز در محدوده کویران بوده است. صعود سیالات ماگمایی از طریق سامانه‌های گسلی و شکستگی‌های منطقه‌ای سبب توسعه دگرسانی‌های گسترده پروپلیتیک، سریسیتی-کربناته، آرژلیک و آرژلیک پیشرفته شده است. در مراحل اولیه، در بخش‌های عمیق‌تر سامانه، کانه‌زایی به صورت پراکنده همراه با پیریت، کالکوپیریت و بورنیت در ارتباط با توده‌های پورفیری شکل گرفته است.

با ادامه صعود سیالات به سمت بخش‌های کم عمق‌تر، کاهش فشار، افت دما و ورود آب‌های جوی موجب اختلاط سیالات و ناپایداری کمپلکس‌های فلزی شده است. این فرایندها همراه با

فرایندهای جوشش، اختلاط سیالات و افت فشار مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده نهشت طلا محسوب می‌شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، دگرسانی، کانه‌نگاری، زمین‌شیمی، XRD و میان‌بارهای سیال در محدوده اکتشافی کویران نشان می‌دهد که کانه‌زایی طلا در ارتباط با فعالیت یک سامانه ماگمایی - گرمابی وابسته به ماگماتیسیم ائوسن در بخش مرکزی بلوک لوت شکل گرفته است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارتند از:

۱) سنگ‌های میزبان کانه‌زایی شامل واحدهای آتشفشانی و آذرآواری ائوسن و توده‌های نیمه‌عمیق دیوریتی تا کوارتز مونزودیوریتی پورفیری هستند و کانه‌زایی اغلب به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای، استوک‌ورکی و افشان رخ داده است.

۲) دگرسانی‌های سیلیسی، آرژلیک پیشرفته، آرژلیک، سریسیتی - کریناو و پروپلیتیک در منطقه گسترش دارند. وجود زون‌های واگی سیلیکا و شناسایی پیروفیلیت در نتایج XRD، همراه با سیلیسی‌شدگی شدید و پیریتی‌شدن گسترده از مهم‌ترین شواهد دگرسانی اسیدی و سامانه‌های سولفیداسیون بالا به شمار می‌روند.

۳) بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که طلا با ناهنجاری‌های مس، مولیدن، نقره و آرسنیک همراه است. این ویژگی بیانگر نقش مهم سیالات ماگمایی در انتقال و تمرکز فلزها و ارتباط احتمالی کانه‌زایی با یک سامانه پورفیری در عمق است.

۴) نتایج بررسی‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که سیال کانه‌ساز دارای دمای همگن‌شدگی ۱۱۲ تا ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۷۴/۱ تا ۱/۲۳ درصد وزنی معادل NaCl بوده است. حضور هم‌زمان میان‌بارهای غنی از مایع، غنی از بخار و تک‌فازی گازی بیانگر وقوع جوشش سیال در هنگام کانه‌زایی است.

۵) روند تغییرات دما و شوری میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که اختلاط سیالات ماگمایی و جوی نقش مهمی در تکامل سامانه گرمابی داشته است. افت فشار، جوشش و اختلاط سیالات مهم‌ترین عوامل مؤثر در نهشت طلا و تشکیل رگه‌های کانه‌دار بوده‌اند.

۶) مجموعه شواهد حاصل از دگرسانی آرژلیک پیشرفته، حضور پیروفیلیت و واگی سیلیکا، کانه‌زایی طلا همراه با پیریت، داده‌های میان‌بارهای سیال و همراهی ناهنجاری‌های Cu-Mo نشان می‌دهد که محدوده کویران یک سامانه سولفیداسیون بالا (HS) است که احتمالاً با یک سامانه پورفیری مدفون در عمق ارتباط ژنتیکی دارد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این طرح پژوهشی مربوط به طرح شماره ۵۷۶۳۸/۳ مصوب ۱۴۰۱/۳/۲۱ معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد است.

1. V-type inclusions
2. Low-Sulfidation
3. boiling
4. High-Sulfidation
5. vuggy silica
6. Intermediate-Sulfidation
7. disseminate

References

- Akrami, M.A. and Naderi Mighan, N., 1384. Geological map of Dehsalm, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Arribas, A., 1995. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits, and their relation to magmatic fluids. In: J.F.H. Thompson (Editor), *Magmas, Fluids, and Ore Deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 23: 419–454.
- Beane, R.E., 1983. The Magmatic–Meteoritic Transition. Geothermal Resources Council, Special Report No. 13, pp. 245–253. Retrieved August 19, 2026 from <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1005457.pdf>
- Bodnar, R.J., Burnham, C.W. and Sterner, S.M., 1985. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H₂O–NaCl to 1000 °C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(9): 1861–1873. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90081-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90081-X)
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M., 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian, (Editors), *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Oxford, 13: 119–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1212. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1193>
- Fulignati, P., Mulas, M., Villalta Echeverria, M.D.P., Fornasaro, S., Larreta, E., Mendoza Arteaga, P.L., Menoscal Menoscal, M.A., Romero-Crespo, P. and Gioncada, A., 2023. The propylitic alteration in the Ponce Enriquez Gold Mining district, Azuay province, Ecuador: genetic constraints from a mineral chemistry and fluid inclusions study. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1255712. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1255712>
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. In: S.G. Hagemann and P.E. Brown (Editors), *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*, V. 13. Society of Economic Geologists, pp. 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- Javidi Moghaddam, M., Karimpour, M.H., Ebrahimi Nasrabadi, K., Haidarian Shahri, M.R. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2018. Mineralogy, Geochemistry, Fluid Inclusion and Oxygen Isotope Investigations of Epithermal Cu ± Ag Veins of the Khur Area, Lut Block, Eastern Iran. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(3): 1139–1156. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13596>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Stern, C.R. and Farmer, L., 2012. Petrogenesis of Granitoids, U–Pb zircon geochronology, Sr–Nd isotopic characteristic and important occurrence of Tertiary mineralization within the Lut Block, Eastern Iran. *Journal of Economic Geology*, 4(1): 1–27. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v4i1.13391>
- Lecumberri-Sanchez, P., Steel-MacInnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92: 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044>
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T.J., Rimstidt, J.D. and Bodnar, R.J., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 114: 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.001>
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2)
- Richards, J.P., 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. *Ore Geology Reviews*, 70: 323–345. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.009>
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. In: P.E. Ribbe (Editor), *Reviews in Mineralogy 12*. Mineralogy Society of America, Washington, D.C., 644 pp. <http://www.minsocam.org/msa/rim/rim12.html>
- Rottier, B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Bouvier, A.-S., Baumgartner, L.P., Wälle, M. and Fontboté,

- L., 2021. Tracking fluid mixing in epithermal deposits – Insights from in-situ $\delta^{18}\text{O}$ and trace element composition of hydrothermal quartz from the giant Cerro de Pasco polymetallic deposit, Peru. *Chemical Geology*, 576: 120277. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120277>
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.-H., Ling, X.-X., Santos, J.F., Stern, R.J., Li, Q.L. and Ghorbani, G., 2015. Eocene Kashmar granitoids (NE Iran): Petrogenetic constraints from U–Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. *Lithos*, 216–217, 118–135. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.12.012>
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie, Glasgow and London, 239 pp. Retrieved August 12, 2026 from https://books.google.com/books/about/A_Practical_Guide_to_Fluid_Inclusion_Stu.html?id=CVSGAAAAIAAJ
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sillitoe, R.H. and Hedenquist, J.W., 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. In: S.F. Simmons and I. Graham (Editors), *Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth*, V. 10. Society of Economic Geologists Special Publication, pp. 315–343. <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Simmons, S.F., White, N.C., and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, pp. 485–522. <https://doi.org/10.5382/AV100.16>
- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H₂O-NACL: a Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H₂O-NaCl. *Computers & Geosciences*, 49: 334–337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022>
- Wang, L., Qin, K.-Z., Song, G.-X. and Li, G.-M., 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 107: 434–456. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.023>
- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletters*, (23): 1–13. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yasami, N., Mousavi Motlagh, S.H. and Ghaderi, M., 2025. Stable isotope, fluid inclusion, and petrological-mineralogical features of epithermal deposits in the structural zones of Iran: A review. *Ore Geology Reviews*, 186: 106851. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106851>



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1169



Supergene mineralization related to fault planes and fractures at the Kushk Zn-Pb ore deposit, central Iran

Gholamreza Mirzababaei ^{1 *}, Mohammad Yazdi ², Mohammad Gohari Anaraki ³, Mina Malek Mohammadi ⁴

¹ Ph.D. Department of Mineral and Ground water Resources, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Mineral and Ground water Resources, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

³ M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Esfahan, Esfahan, Iran

⁴ Ph.D. Student, Department of Mineral and Ground water Resources, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 17 February 2026
Revised: 13 September 2026
Accepted: 14 September 2026

Keywords

Post-mineralization fault
supergene mineral phases
Kushk ore deposit
central Iran

*Corresponding author

Gholamreza Mirzababaei
✉ G_mirzababaei@sbu.ac.ir

ABSTRACT

The Kushk Zn-Pb ore deposit is located in the Posht e Badam block of the central Iranian tectono-magmatic zone, and 160 Km east of Yazd city. In this research, the role of structural factors specially faults on post-sulfide mineralization at the Kushk ore deposit is investigated. The dominant basement rocks of the Kushk volcano-sedimentary basin include the Tashk formation, volcanic units, shales and sandstones of the Rizu series and the Aqda limestone. The important structural factors in this research include post-mineralization fault systems. The pre-mineralization structures are thought to be related to a compressional structural regime coincide with the Pan African orogeny. Syn-mineralization structures, following the Pan African orogeny, and coinciding with an extensional tectonic regime, resulted in Zn-Pb sulfide mineralization. The post mineralization faults, following the formation of the Kushk ore deposit, resulted in fracturing the sulfide ore into three stages including: 1) a folding related faulting resulting in appearing the Kushk fault, 2) a dextral movement characterized by the new activation of the Kushk fault and also appearing the Zardu and Pahnu fault systems, and 3) a final sinistral movement evidenced by Konj fault system. The formation of some supergene minerals, including carbonates, sulfates, phosphates, clays, oxides, and silica, occurred along fault surfaces related to the reactivation of post-sulfide structural features.

How to cite this article

Mirzababaei, G., Yazdi, M., Gohari Anaraki, M. and Malek Mohammadi, M., 2026. Supergene mineralization related to fault planes and fractures at the Kushk Zn-Pb ore deposit, central Iran. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 131–172. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1169>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In this research, the role some post sulfide ore structural systems on the formation and development of some secondary ore formation features at the Kushk ore deposit is investigated. The relationships between structural factors and mineralization have been the subject of debate in the past (Kutina, 1983; Mirzababaei, 2011; Mirzababaei et al., 2016; Karimpour and Sadeghi, 2018; Karimpour et al., 2019). The Kushk Zn-Pb ore deposit, located in central Iranian tectono-magmatic zone, 160 Km east of Yazd city, is one of the world class base metals ore systems. There is a general consensus concerning the typology of the ore system generation, with the exception of some differences. With this framework, however, the structural framework of the Kushk ore deposit is still open to investigate. This research makes a case for re-examining the structural reactivations and importance of post mineralization structural factors in generation of some supergene mineral phases at the Kushk ore system in the context of regional tectonics through post-mineralization deformation history to formation of post mineralization secondary mineral phases.

Materials and methods

The geological report of the Rio Tinto company (RTZ, 1972) was the basic structural report of the Kushk area which is limited to the ore bodies. Since 2020, the stratigraphical and structural investigations were operated at the department of geology of the Kushk mine. The investigations discussed carried out on structural elements of the area as dip and strike measurements, continuity of fault systems, intersecting with stratigraphical units. The data interpretation was carried out in Arc GIS and Leapfrog software. Following the structural interpretations, selected samples from the newly formed mineralogical phases on fault surfaces were taken to laboratories. 19 Representative samples were taken to analyze by XRD at the Kansaran Binaloud research group. XRD methodology was carried out and the instrument was equipped with a voltage of 40 kv and a nickel filament. Similarly, 5 representative samples were selected to take SEM photomicrographs at the geological survey of Iran. SEM was performed using ZEISS system equipped with an accelerating voltage of 25 kv. Moreover, we

also used some thin polished sections formerly prepared for investigation of the ore bodies occurrences in both layered and massive parts of the Kushk ore system.

Results and discussion

Structural analysis of the field-based investigation provides a method of assessing the structural significance in metallogeny. Structural features (all groups of pre-, syn-, and post-mineralization faults), in the Kushk Zn-Pb ore deposit in central Iran, have not been systematically investigated and the role of post-sulfide structural reactivation remains poorly understood. The main aims of this paper are to: 1) drawing a structural framework for the Kushk ore deposit; 2) investigate the role of post-sulfide structural factors in remobilization of elements from the hypogene ore to the structure bound supergene environment and 3) characterize the mineralogical features of the structurally controlled supergene mineral phases. In general, structural factors of the Kushk Zn-Pb ore deposit can be classified into three main categories: 1) faults formed prior to the development of the mineralization basin, 2) deep-rooted syn-mineralization fault systems, and 3) post sulfide mineralization fault systems. Except for a few cases (and just in theoretical models), almost all the structural factors debated in that Kushk Zn-Pb ore deposit, fall into the post mineralization category. The first structural groups are those coincided with the Pan African compressive tectonic regime. This orogeny was one of the most important tectonic processes affected the central Iranian litho-tectonic zone in the upper Neoproterozoic. On theoretical map of paleo-tectonics of Iran, Nadimi (2007), offers a tentative explanation of the large-scale geological processes responsible for the development of compressional environments. We believe, based on this research, that the pre-mineralization faults are connected to paleo-structural zones formed during the Pan African orogeny that lately, by contrast, ruptured and formed syn-mineralization faulted environment in younger tensional environments. The second group of faults, formed presumably, a fertile metallogenic environment for Zn-Pb sulfide mineralization in the Kushk ore deposit. Sulfide ore minerals in the Kushk ore deposit, volumetrically, include pyrite, sphalerite and galena. Theoretical modelling of these structures is given in Rajabi et al (2020). The third group of The third group comprises

fault systems and faulted zones which are characterized by structural discontinuities within the layered to massive sulfide ore bodies in the mine blocks, structural displacement along the stratigraphic units hosting the ore bodies and in the overlying horizons, and the development of post-sulfide mineral phases, including carbonates, sulfates, phosphates, clays, oxides, and silica. The formation of these minerals is enhanced with CO₂ effervescence and degassing along the fault zones. Rarely, post-ore sulfide mineralization is also observed, represented by the formation of sphalerite hosted by phosphate minerals.

Conclusion

The mechanisms involved in appearing and formation of the post-mineralization faults in the

Kushk ore deposit are investigated in the context of the regional structural geology of the study area. These structures mainly comprise fault systems that formed following the reactivation of stratigraphic blocks during the main post-mineralization phase of folding in the area. These structural forms resulted in remobilization of the former mineral mass along fault planes and the subsequent precipitation of newly formed post-sulfide mineral phases including carbonates, sulfates, phosphates, clays, oxides, silica and locally, post-ore sulfide mineralization, within low-pressure zones as veins, veinlets and open space fillings. The structural assessment and mineral chemistry of the newly formed minerals indicate that CO₂ effervescence and degassing within low-pressure zones along faults played a critical role in the formation of post-sulfide mineral phases.



کانی‌زایی برون‌زاد مرتبط با پهنه‌های گسلی و شکستگی‌ها در کانسار روی و سرب کوشک، ایران مرکزی

غلامرضا میرزابابائی^{۱*}، محمد یزدی^۲، محمد گوهری انارکی^۳، مینا ملک محمدی^۴

^۱ دکتری، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

کانسار روی و سرب کوشک در بلوک پشت‌بادام از زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی و در ۱۶۰ کیلومتری شرق یزد قرار دارد. در این پژوهش به بررسی نقش عوامل ساختاری به ویژه گسل‌ها بر کانه‌زایی پسا‌سولفیدی در کانسار کوشک، پرداخته می‌شود. سنگ بستر غالب حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک شامل سازند تاشک، واحدهای آتشفشانی، شیل و ماسه‌سنگ‌های سری ریزو و آهک عقدا است. عوامل ساختاری مهم در این پژوهش شامل سامانه‌های گسلی پسا‌کانه‌زایی هستند. ساختارهای پیشاکانه‌زایی مرتبط با یک رژیم ساختاری فشاری منطبق بر کوه‌زایی پان‌آفریکن در نظر گرفته می‌شوند. ساختارهای گسلی هم‌زمان با کانه‌زایی، پس از کوه‌زاد پان‌آفریکن و منطبق بر یک رژیم زمین‌ساختی کششی، به کانه‌زایی سولفیدی روی و سرب منجر شده‌اند. سامانه‌های گسلی پسا‌کانه‌زایی پس از تشکیل کانسار، به ایجاد شکستگی در کانسنگ سولفیدی در سه مرحله منجر شده است. حرکت گسلی اول در ارتباط با چین‌خوردگی حوضه کوشک بوده و به تشکیل گسل کوشک منجر شده است. حرکت گسلی دوم راست‌گرد بوده و با عملکرد مجدد گسل کوشک و سامانه‌های گسلی زردو و پهنو مشخص می‌شود. حرکت ساختاری نهایی نیز چپ‌گرد بوده و با فعالیت گسلی کنج، محرز است. تشکیل برخی از کانی‌های برون‌زاد از جمله کربنات‌ها، سولفات‌ها، رس‌ها، اکسیدها و سیلیس در سطوح ساختارهای گسلی مرتبط با تجدید فعالیت‌های ساختاری پسا‌سولفیدزایی صورت گرفته است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

واژه‌های کلیدی

گسل پسا‌کانه‌زایی
فازهای کانه‌زایی برون‌زاد
کانسار کوشک
ایران مرکزی

نویسنده مسئول

غلامرضا میرزابابائی

G_mirzababaei@sbu.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

میرزابابائی، غلامرضا؛ یزدی، محمد؛ گوهری انارکی، محمد و ملک محمدی، مینا، ۱۴۰۵. کانی‌زایی برون‌زاد مرتبط با پهنه‌های گسلی و شکستگی‌ها در کانسار روی و سرب کوشک، ایران مرکزی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱۳۱-۱۷۲. <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1169>

مقدمه

ارتباط زمین‌ساخت و ساختارهای زمین‌شناسی با کانه‌زایی از دیرباز از جمله موضوع‌های قابل توجه در زمین‌شناسی اقتصادی است (Kutina, 1983; Mirzababaei., 2011; Mirzababaei and Shahabpour, 2012; Mirzababaei et al., 2016; Karimpour and Sadeghi., 2018; Karimpour et al., 2019). با این حال، نظر به پویایی پوسته زمین، دستیابی به بقایایی از ساختارهای اولیه به عنوان عوامل اساسی و زمینه‌ساز تشکیل کانسارها، اغلب با مشکل مواجه است. این موضوع به ویژه زمانی پررنگ‌تر می‌شود که منطقه مورد بررسی، چندین فاز کوه‌زایی را پشت سر گذاشته باشد که در آن صورت، هر فاز تأثیر خود را متناسب با سازوکارهای ویژه خود، بر محیط زمین‌شناسی، اعمال کرده است. در این صورت، برای تعیین نقش هر کدام از فازهای کوه‌زایی، زمین‌زایی و یا ریف‌زایی، نیاز به بازسازی و یا تفسیر دیرینه زمین‌ساخت ناحیه‌ای است. در این پژوهش، منطقه مورد بررسی شامل کانسار روی و سرب کوشک و نواحی مجاور آن است. کانسار کوشک در زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی و در بلوک پشت‌بادام، در ۱۶۰ کیلومتری شرق یزد و ۴۵ کیلومتری شمال شرق شهر بافق قرار دارد. بررسی زمین‌ساخت ناحیه بافق تا کنون موضوع پژوهش‌های بسیاری بوده است (Stöcklin, 1968; Berberian and King, 1981; Samani, 1988; Ramezani and Tucker, 2003; Nadimi, 2007; Rajabi et al., 2015; Nouri et al., 2021). ساختارهای زمین‌شناسی اولیه در محیط تشکیل، از عوامل تأمین و تسهیل‌کننده مسیرهای ورود سیالات کانه‌زا و حتی مسیر انتقال ماگماهای مولد کانسارهای ماگمایی و همچنین از جمله عوامل مهم و اولیه در تشکیل کانسارها هستند. همان‌گونه که پدیده‌های زمین‌شناختی پویا (با سرعت‌های اثر متفاوت) ایجاب می‌کنند، پس از تشکیل کانسارهای مزبور، فرایندهای زمین‌شیمیایی ثانویه در بستر ناپایداری‌های ساختاری به تکامل کانسارهای از پیش موجود منجر می‌شوند که ممکن است نقش مثبت (حفظ‌شدگی کانسار یا غنای بیشتر آن مانند تشکیل زون برون‌زاد در کانسارهای پورفیری) و یا

نقش منفی (مانند قرار دادن کانسارهای تشکیل‌شده با غنای بالا در معرض فرسایش) داشته باشند. در این پژوهش، ترکیبی از فنون تفسیر ساختاری و سیمای‌های کانه‌زایی و همچنین اطلاعات زمین‌شناسی برای تشخیص شکل‌های ساختاری محلی (گسل‌ها و چین‌ها) در کانسار روی و سرب کوشک در ایران مرکزی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش قرار گرفته است. در این بین تقدم و پسا کانه‌زایی و سیمای‌های زمین‌شناختی و به ویژه سیمای‌های کانه‌زایی مشاهده شده، مورد پژوهش قرار گرفته است. در این بین تقدم و تأخر در حرکت‌های گسلی و ارتباط آنها با پدیده‌های دیگر از جمله چین‌خوردگی ناحیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و یک ارتباط قوی بین عوامل ساختاری و تشکیل و توزیع برخی از گونه‌های کانایبی پساسولفیدی، تشخیص داده شده است. کانسار روی و سرب کوشک از انواع کانسارهای برون‌دمی - رسوبی با کانسنگ سولفید توده‌ای و سنگ میزبان غالب شیلی موسوم به نوع سدکس است که از منابع اصلی روی و سرب به شمار می‌روند و به طور معمول شامل کانسنگ‌های سولفیدی چینه‌سان تا چینه‌کران در سنگ میزبان شیل سیاه تا سیلت‌سنگ هستند (Carne and Cathro, 1982; Goodfellow et al., 1993; Rajabi et al., 2020). شاخصه اقتصادی کانسارهای روی و سرب نوع سدکس، شامل عیارهای بالای روی و برخی از عناصر کالکوفیل (مانند کادمیم، نقره و ایندیم) به صورت محصول جانبی هستند. در این بین، فازهای جدید گسترده‌ای از کانه‌زایی در این کانسار در نتیجه برهم‌کنش برخی از عوامل ساختاری و سنگ میزبان کانسنگ، تشکیل شده‌اند. تغییرات در ویژگی‌های کانی‌شناختی و زمین‌شیمیایی سامانه‌های کانایبی درون‌زاد و تشکیل فازهای کانی‌شناختی جدید هم از نظر زمین‌شناختی و هم از نظر فراوری مواد معدنی، از موارد مهمی هستند که در این کانسار مشاهده می‌شوند. زمین‌شناسی واحدهای سنگی موجود و همچنین زمین‌شناسی و کانی‌شناسی توده کانسنگ درون‌زاد در کانسار کوشک مورد بحث قرار گرفته و به انتشار چندین رساله دانشگاهی و مقاله علمی منجر شده است (Förster and Jafarzadeh, 2026).

برداشت‌های صحرایی، حوضه آتشفشانی- رسوبی کوشک (به همراه معدن روی و سرب کوشک)، مورد بررسی ساختاری قرار گرفت. برای بازبینی دقیق بررسی‌های مزبور، یک بازه زمانی طولانی مدت از ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۴ خورشیدی اختصاص داده شد. برای انجام این بررسی‌ها، ابتدا منابع قدیمی زمین‌شناسی موجود در دفتر زمین‌شناسی معدن کوشک مورد بررسی قرار گرفت و سپس برای انجام بررسی‌های ساختاری، برداشت سامانه‌های گسلی موجود در دستور کار قرار گرفت. برداشت ساختارهای گسلی از رخنمون‌های موجود در محل انقطاع گسل با آبراهه‌ها، برون‌زد صفحه‌های گسلی، انقطاع با واحدهای زمین‌شناسی و همچنین در محل پله‌های معدن روباز و تونل‌های زیرزمینی صورت گرفت. برداشت داده‌های یادشده از طریق دوربین مدل Leica TS06 در محیط معدن زیرزمینی و پله‌های معدن روباز کوشک و در فضای باز مجاور کانسار در **سامانه موقعیت‌یاب جهانی** ثبت شد. برداشت‌های بیان‌شده در محیط نرم‌افزارهای Arc GIS (10.8) و Leapfrog مورد پردازش قرار گرفت. از سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تطبیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف از جمله چینه‌شناسی، ساختاری و آبراهه‌های محدوده مورد بررسی، استفاده شد. همچنین سه بعدی‌سازی لایه ساختاری به همراه لایه توپوگرافی در محیط نرم‌افزار Leapfrog، صورت گرفت. مقاطع نازک- صیقلی به تعداد ۱۰ نمونه برای بررسی بخش‌هایی از زون‌های کانسنگ توده‌ای و لایه‌ای از کانسار سولفیدی تهیه شد و در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی مورد بررسی قرار گرفتند. نظر به تشکیل فازهای کانی‌شناسی پس‌اسولفیدی در زون‌های گسلی و شکستگی‌ها و همچنین محدودیت یا تراکم خاص برخی از فازهای کانی‌شناسی با زون‌های گسلی مشخص، تعدادی از کانی‌های تشکیل‌شده در این زون‌ها با **پراش پرتو ایکس** بارزسازی شدند. برای این منظور، تعداد ۱۹ کانی شاخص منتخب به آزمایشگاه XRD شرکت کانساران بینالود ارسال شد.

1994; Rajabi et al., 2020; Aftabi et al., 2021; Dehghani Tafti et al., 2023; Nematollahi et al., 2023). در مورد رخداد کانی‌های پس‌اسولفیدی نیز چندین بررسی انجام شده است (Asadi and Zolfaghari, 2021). کانسنگ در این کانسار به شکل لایه‌ای، مجموعه رگه‌ای- رگچه‌ای و زون تغذیه تشکیل شده است (Rajabi et al., 2020). یکی از سیماهای کانی‌شناختی در کانسار کوشک آن است که هر دو بخش لایه‌ای و توده‌ای کانسنگ با پوشش‌هایی در سطح یا رگچه‌هایی در فضاهای خالی از برخی از کانی‌های ثانویه مشخص می‌شوند. این کانی‌های برون‌زاد جدید دارای ترکیب‌های مختلف از کربنات‌ها، سولفات‌ها، فسفات‌ها، رس‌ها، اکسیدها، سیلیکات‌ها و سیلیس هستند. کانی‌های یادشده در طول شکاف‌ها، سطوح شکستگی‌ها و گسل‌های با مقیاس محلی مشخص می‌شوند که هم از نظر کانی‌شناختی و فرایندهای درگیر در کانی‌شناسی آنها و هم از نظر فراوری، با اهمیت است. با این توصیف، اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- ترسیم یک چهارچوب ساختاری پساکانه‌زایی کلی برای کانسار روی و سرب کوشک و بررسی وضعیت ساختاری محیط تشکیل کانسار؛ ۲- بررسی نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری پس‌اسولفیدزایی در انتقال مجدد عناصر در توده کانسنگ اولیه و ته‌نشینی مجدد این عناصر در کانسنگ برون‌زاد محدود به ساختار؛ ۳- بررسی کانی‌شناختی فازهای ثانویه تشکیل شده محدود بر ساختار. گذشته از موارد یادشده، قابلیت استفاده از زون‌های اکسیدان سطحی در دستیابی به ذخایر سولفیدی پنهان در منطقه مورد بررسی و مناطق مجاور با زمین‌شناسی مشابه، از جنبه‌های اکتشافی ارزشمند و کارآمد به شمار می‌رود؛ زیرا کانسارهای سدکس، خاص تشکیل در محیط‌های دریایی با میزبان شیل هستند که در بسیاری از موارد بدون برون‌زدهای قابل توجه هستند.

روش مطالعه

روش بررسی شامل چهار مرحله برداشت‌های صحرایی، پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده در محیط نرم‌افزار، تهیه مقاطع نازک- صیقلی و تجزیه و تحلیل فازهای کانی‌شناسی بوده است. در مرحله

همچنین با توجه به نیاز به بررسی حضور سیماهای کانایی مختلف و کاربرد تشخیص آنها در بررسی‌های فراوری مواد معدنی و نیز تبدیل فازهای کانی‌شناسی در موارد متعدد، تعداد ۵ نمونه شاخص از کانی‌های ثانویه تشکیل شده در زون‌های گسلی، برای تهیه تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف پراش انرژی پرتو ایکس آنها، به آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی سازمان زمین‌شناسی کشور ارسال شدند. اساس ریزکاونده الکترونی روبشی به این صورت است که پس از برخورد الکترون به سطح نمونه، تعدادی از این الکترون‌های اولیه از سطح نمونه برگشت خورده است (الکترون‌های پس تابشی) که شدت برگشت آنها متناسب با عدد اتمی و جرم اتمی است و در تشخیص توپوگرافی و عدد اتمی عناصر موجود در نمونه، کاربرد دارند.

زمین‌شناسی کانسار کوشک

کانسار روی و سرب کوشک در بلوک پشت‌بادام در زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی قرار گرفته است. این زون، میزبان قدیمی‌ترین بخش‌های پی‌سنگ ایران موسوم به پی‌سنگ پرکامبرین است. این پی‌سنگ در ناحیه کوشک شامل سازند تاشک است که متشکل از سنگ‌های با درجه دگرگونی کم تا متوسط از جمله ماسه‌سنگ کوارتزی، گری‌واک و فیلیت است (Haghipour, 1977). این سنگ‌ها در بخش‌هایی مانند حوضه کوشک، با توالی آتشفشانی- رسوبی نوپروتروزوئیک پسین (وندین)- کامبرین زیرین با نام سری ریزو پوشانده شده است. پایانه این توالی شامل واحدی از شیل‌های نادگرگون است که دارای ضخامتی متغیر از ۴۰ تا ۱۴۰ متر است. این واحد شیلی، همان سنگ میزبان اصلی کانسار کوشک است که بر اساس گزارش زمین‌شناسان شرکت ریوتینو انگلستان (RTZ, 1972) به سن وندین دانسته شده است. از دیدگاه چینه‌شناختی، واحدهای تشکیل شده بر روی سازند تاشک، تقریباً معادل واحدهای سازند سلطانیه (شیل زیرین، دولومیت میانی و دولومیت -در اینجا آهک- بالایی) است که همان سری ریزو و سازند عقدا است. با

این حال، وفور واحدهای آتشفشانی، از جنبه‌های تشخیص این توالی سنگی از سازند سلطانیه است. به عبارت دیگر، حضور ضخامت‌های قابل توجهی از ریولیت و توف ریولیتی در بالا و پایین دولومیت میانی، از شواهد اختلاف در محیط تشکیل و در نتیجه ماهیت زمین‌شناختی دو توالی مزبور در ایران مرکزی و منطقه البرز- آذربایجان است. در این حوضه، بخش بالایی شیل زیرین (که به سمت بالای لایه به سیلت‌سنگ تبدیل می‌شود) با یک توالی ضخیم توفی با یک میان عضو ریولیتی (با ۲۰ تا ۴۰ متر ضخامت) پوشانده شده است که این توالی پیوسته بوده و در اغلب برونزدهای موجود دیده می‌شود. بر روی این واحد توفی، دولومیت معادل دولومیت میانی سازند سلطانیه قرار گرفته است. بر روی دولومیت میانی، واحد آهک دولومیتی با ضخامت‌های متغیر و اغلب بین ۲۰ تا ۵۰ متر حضور دارد. در ستون چینه‌شناسی منطقه، این واحد، معادل همان سازند عقداست و از آهک تیره‌رنگ با زون‌های واکنشی از دولومیت تشکیل شده است. واحدهای سنگی جدیدتر دارای رخنمون شامل شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک، رسوب‌های نوژن و رسوب‌های کواترنری درون آبراهه‌ای است. در مورد سن تشکیل کانسار، باید اشاره کرد که علاوه بر داده‌های سن‌سنجی از واحدهای بالایی کانسنگ (Farjandi et al., 2022)، بیوزون‌ها نیز از شاخصه‌های مفید برای تعیین سن در موارد مشابه هستند که در کانسار کوشک نیز این مورد به عنوان یکی از عوامل مهم به شمار می‌رود (Vaziri and Laflamme., 2018). در این بین افق ادیاکاریای نوپروتروزوئیک پسین که بر روی شیل میزبان کانسنگ (به همراه بخشی از خود شیل میزبان کانسنگ) در کانسار کوشک قرار گرفته است، به عنوان شاخص چینه‌شناختی ارزشمند در تعیین سن کانسار به شمار می‌رود. حضور زیست رخساره ادیاکاریا در نشریه‌های علمی متعددی گزارش شده و به عنوان یک شاخص قدرتمند برای بررسی‌های زمین‌شناختی و منشأ سامانه‌های کانه‌زایی شامل کانسارهای اکسید آهن در منطقه معدنی بافق استفاده شده است (Aftabi et al., 2021). بر اساس پژوهش‌های پیشین (Vickers-rich et al., 2018; Aftabi et

(شکل ۲-۲) که بیشتر حجم کانسنگ را تشکیل می‌دهد و به سمت کمربالای ماده معدنی گسترش می‌یابد، مشهود است. در مورد کانه‌زایی در کانسار کوشک، چندین پژوهش انجام شده است (RTZ, 1972). به طور کلی، کانسار کوشک با لایه‌های سولفیدی آن شناخته شده که شامل شیل‌های پیریت‌دار است و در افق‌های مختلف کانسنگ دارای مقادیر متغیری از اسفالریت و گالن است. با این حال، در بخش اعظم کانسنگ (از نظر حجم) که به عنوان کانسنگ پرپیریت شناخته شده است، حالت لایه‌ای کمتر مشهود است و کانسنگ بیشتر سیمای توده‌ای (و یا لایه‌ای نامتوازن و متراکم؛ اما غیردگرگون) دارد و به طور غالب از پیریت در سنگ زمینه شیل کربناتی تا دولومیت تشکیل شده است. تغییرهای کانی‌شناختی جدید (موضوع این پژوهش) مشتق از نقش ساختارهای زمین‌شناسی در محدوده مورد بررسی هستند که هم از نظر زمین‌شناختی و هم از نظر فراوری مواد معدنی دارای نقش غیر قابل انکار هستند. برای بررسی موضوع به بررسی وضعیت ساختاری محدوده معدنی کوشک با تأکید بر معدن فعال کوشک پرداخته می‌شود و در ادامه تغییرات کانسنگ در این مورد بحث قرار می‌گیرد.

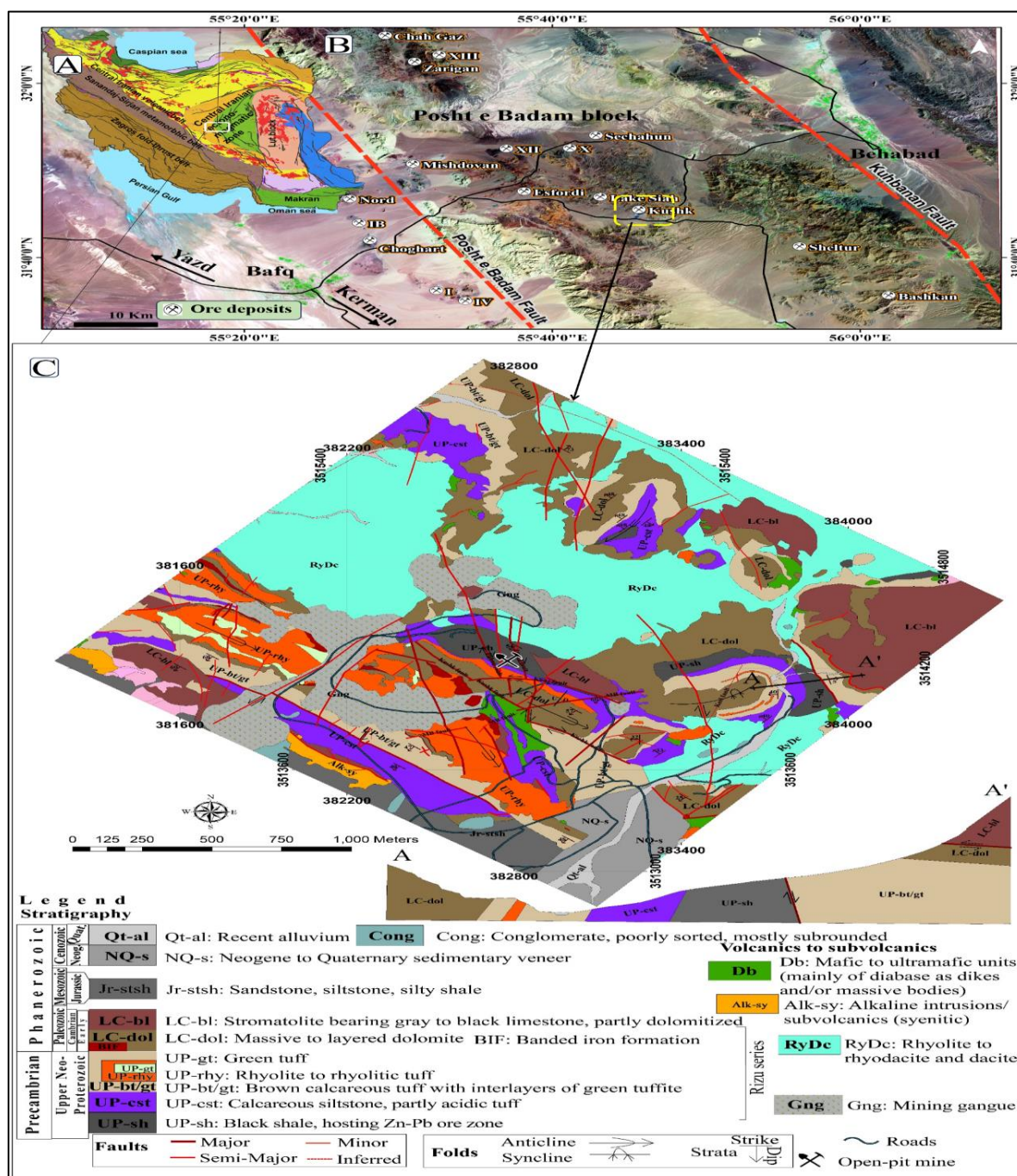
زمین‌شناسی ساختاری حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک

نخستین گزارش ساختاری حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک توسط اسمیت (Smith, 1967) انجام شده است که در آن، حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک به عنوان بخشی از یک شبه‌ناودیس با مرکزیت چینه‌های ژوراسیک و رسوب‌های ترشیاری تا کواترنری دانسته شده است. بررسی وضعیت ساختاری حوضه رسوبی کوشک توسط واحد زمین‌شناسی معدن کوشک از ۱۹۷۲ تا کنون به شناسایی ساختارهای گسلی مؤثر چه بر کانه‌زایی سولفیدی در حوضه معدنی و چه بر کانی‌شناسی پساسولفیدی کانسنگ منجر شده است.

al., 2021; Farjandi et al., 2022; Etemad-Saeed et al., 2024; Etemad-Saeed et al., 2025) و همچنین بررسی‌های جدید صحرایی که در محدوده معدنی و مناطق مجاور انجام شده است (این پژوهش)، فسیل‌های ادیاکاریا از جمله بارزترین آثار حیات ابتدایی در نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین پیشین به ویژه در حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک هستند. اولین نقشه زمین‌شناسی توسط شرکت ریوتینو انگلستان از کانسار کوشک تهیه شده است. با این حال، در سال‌های اخیر نقشه زمین‌شناسی دقیق‌تری از محوطه معدنی کوشک تهیه شده است (Mirzababaei, 2026) که این نقشه، سیمای بارزتری از چینه‌شناسی معدن که اغلب متعلق به واحدهای نئوپروتروزوئیک پسین-کامبرین زیرین است، در اختیار گذاشته است (شکل ۱). بدون تردید، اهمیت اکتشافی ناحیه معدنی کوشک وابسته به نوع کانه‌زایی آن است که در موقعیتی مشخص از ستون چینه‌شناسی (RTZ, 1972) و به حالت چینه‌سان (Rajabi et al., 2020) تشکیل شده است.

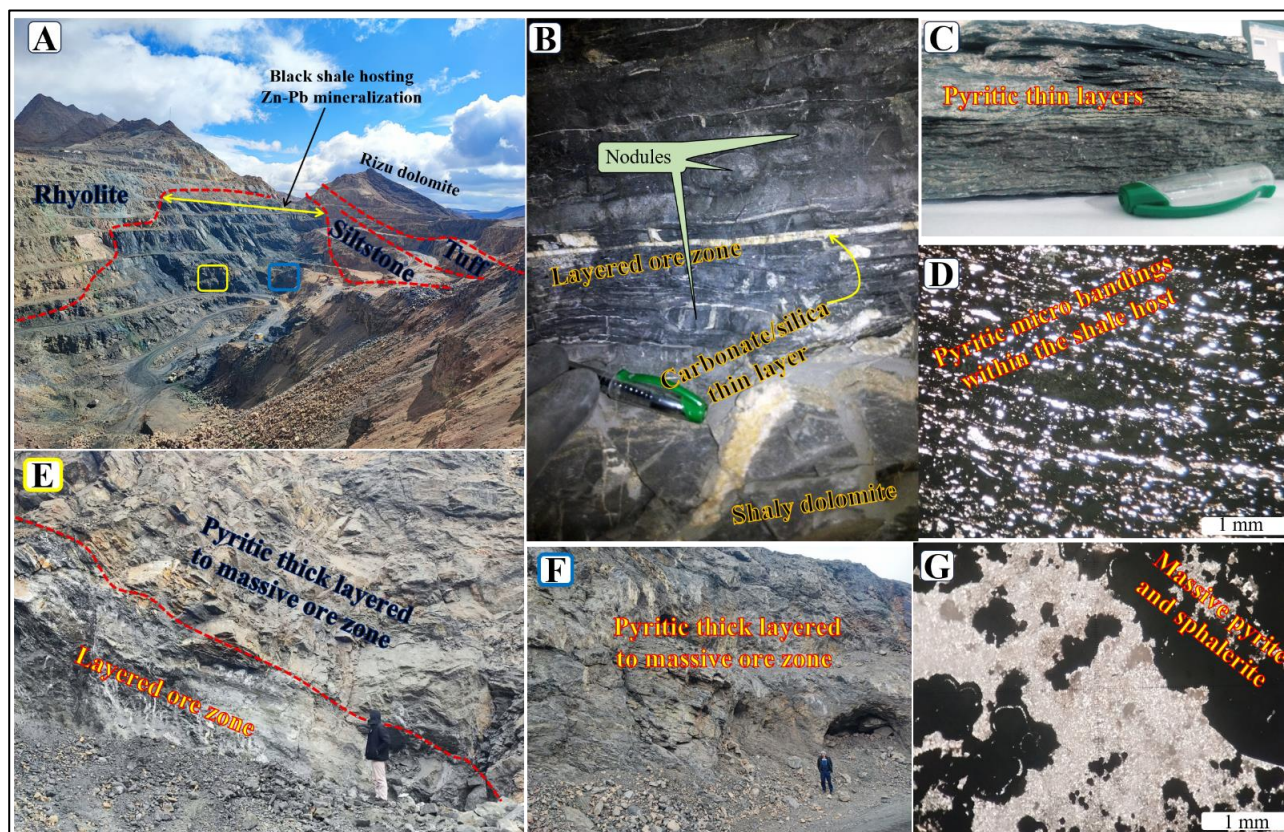
کانی‌شناسی و سیمای عمومی کانسنگ روی و سرب در کانسار کوشک

کانی‌شناسی غالب کانسار روی و سرب کوشک شامل کانی‌های سولفیدی روی (اسفالریت) و سرب (گالن) در یک زمینه غنی از پیریت است. کانی‌شناسی کانسنگ توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (Azaraieen, 2003; Rajabi et al., 2020). علاوه بر کانی‌شناسی ساده، ساخت کانسنگ نیز در کانسار کوشک (شکل ۲-۲) ساده است. کانسنگ در این ساختار با ساخت لایه‌ای هم‌زمان با رسوب‌گذاری (شکل ۲-۲) در قاعده کانسار با لایه‌بندی مشخص پیریت و شیل (شکل ۲-۲) با ریزبلندهای سولفیدی در مقاطع میکروسکوپی (شکل ۲-۲) شروع شده است. به سمت کمربالای کانسنگ، ساخت توده‌ای (شکل ۲-۲) در زون پرپیریت (دولومیت پرپیریت) (شکل ۲-۲) با آرایش کانیایی نامنظم کانی‌های سولفیدی در مقاطع میکروسکوپی



شکل ۱. A: موقعیت بلوک پشته‌بادام در نقشه واحدهای ساختمانی ایران (Aghanabati, 2004)، B: موقعیت کانسار کوشک در بلوک پشته‌بادام از زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی (Mirzababaei et al., 2021)، C: نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار کوشک (Mirzababaei, 2026) و D: مقطع زمین‌شناسی بخش کیل تا قاعده کوه بزرگ در مجاور کانسار کوشک (Mirzababaei, 2026)

Fig. 1. A: Location of the Posht e Badam block on the structural map on Iran (Aghanabati, 2004), B: Location of the Kushk Zn-Pb ore deposit on the Posht e Badam block of the Central Iranian tectonomagmatic zone (Mirzababaei et al., 2021), C: geological map of the area of the Kushk ore deposit (Mirzababaei, 2026), and D: the geological cross section of the Keel-Kuh e Bozorg adjacent to the Kushk ore deposit (Mirzababaei, 2026)



شکل ۲. نمای کلی از زمین‌شناسی و سیماهای کانه‌زایی درون‌زاد کانسار کوشک (پهنو و شمال زردو) شامل واحدهای آتشفشانی-رسوبی و کانه‌زایی سولفیدی لایه‌ای تا توده‌ای (دید به جنوب شرق)؛ A: چینه‌شناسی کانسار کوشک متشکل از شیل میزبان کانسنگ، سیلت‌سنگ، توف اسیدی و دولومیت سری ریزو، B: کانسنگ لایه‌ای در تونل‌های معدن زیرزمینی کوشک، C: باندهای پیریت و شیل از کانسنگ لایه‌ای، D: تصویر میکروسکوپی از ریزباند‌های سولفیدی در زمینه شیل کربناتی، E: سیمای عمومی کانسنگ توده‌ای بر روی کانسنگ لایه‌ای در رخنمون‌های معدن روباز کوشک (دید به شرق)، F: حضور کانسنگ پیریت و توده‌ای در رخنمون‌های معدن روباز (دید به شرق) و G: تصویر میکروسکوپی از رخداد نامنظم کانی‌های سولفیدی شامل پیریت و اسفالریت در زمینه شیلی تا کربناتی

Fig. 2. A general view of the geology and hypogene mineralogical aspects of the Kushk ore deposit (Pahnu and north of Zardu) including the volcano-sedimentary rock units and layered to massive sulfide mineralization (view to the southeast); A: stratigraphy of the Kushk ore deposit including the host shale, siltstone, acidic tuff and the Rizu series dolomite, B: Layered ore in underground mine tunnels, C: Pyrite bands of the layered ore, D: microscopic image of sulfide thin layers in a calcareous shale host, E: general view of the massive ore overlaying the layered ore in open pit outcroppings (view to the east), F: occurrence of pyritic and massive ore in open pit outcroppings (view to the east), and G: microscopic image of irregular occurrences of sulfide minerals including pyrite and sphalerite in a shaly to calcareous host

زمان- ساختار و ارتباط عوامل ساختاری با کانه‌زایی در کانسار کوشک

به طور کلی و از نظر تقدم و تأخر در ارتباط بین ساختارها و کانه‌زایی در کانسار کوشک، ساختارها به سه دسته کلی تقسیم

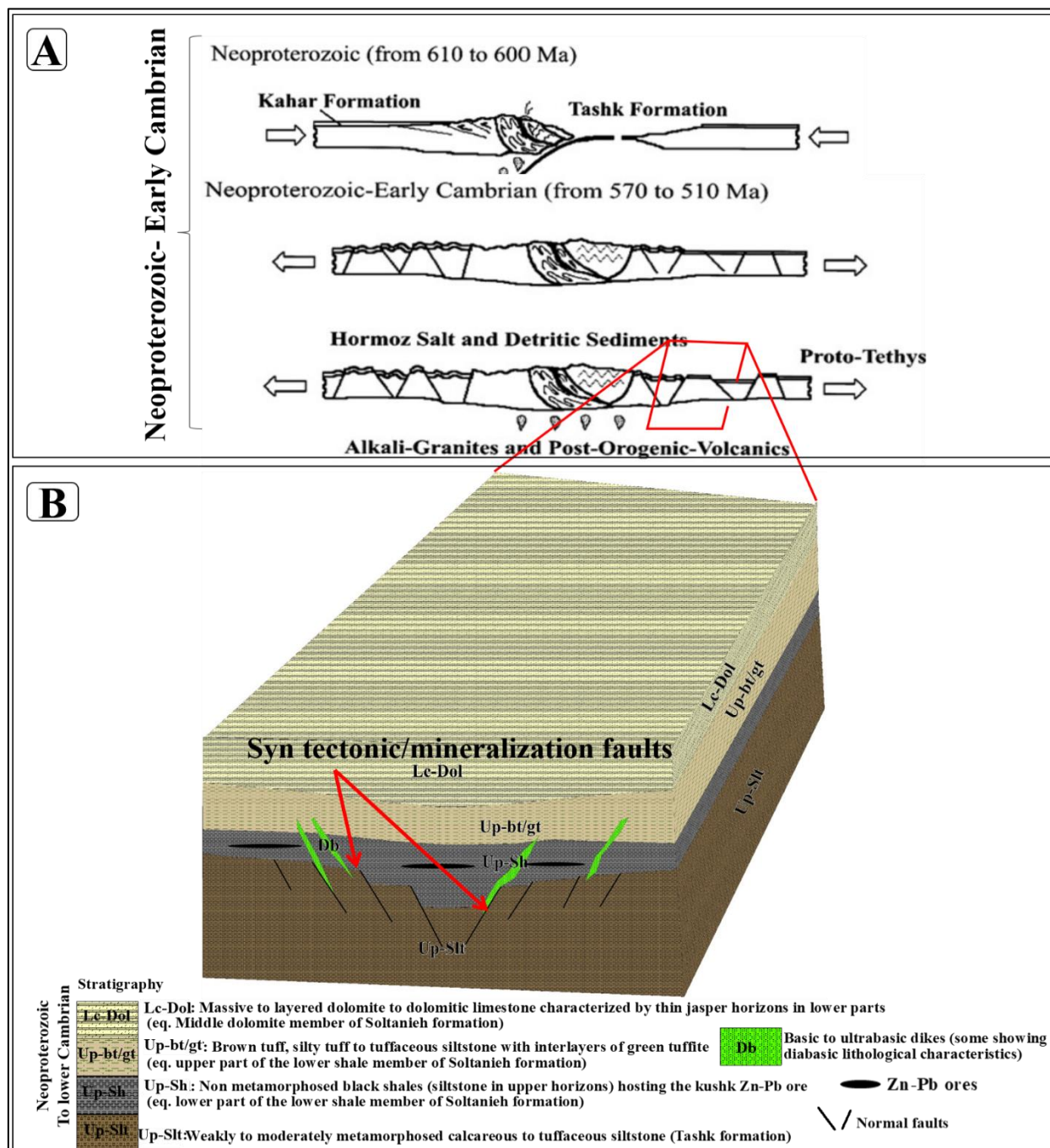
می‌شوند: ۱- ساختارهای پیشاکانه‌زایی که در ارتباط با محیط قدیمی پیش از تشکیل ریفت اولیه در حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک هستند؛ ۲- ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی روی و سرب در حوضه رسوبی در حال تکامل و در محیط ریفتی تشکیل شده و

۳- ساختارهای با فعالیت پساکانه‌زایی که به تغییر کانه‌زایی سولفیدی اولیه به فازهای کربناتی، فسفاتی، سولفاتی، سیلیسی و اکسیدی در پهنه‌های گسلی و شکستگی‌ها منجر شده است.

ساختارهای زمین‌شناسی قبل از کانه‌زایی و هم‌زمان با کانه‌زایی سولفیدی

حضور این ساختارها در چهارچوب وضعیت زمین‌شناختی حوضه آتشفشانی- رسوبی کوشک در مقیاس پوسته‌ای مطرح هستند (شکل ۳- A). این شکستگی‌های ناحیه‌ای حاصل فرایندهای ناملموس در پوسته بالایی بوده است که حضور آنها با توجه به رخداد شرایط فشاری ضعیف حاکم بر پوسته که از روی شدت کم دگرگونی در سازند تاشک قابل دریافت است، می‌تواند فقط به صورت نظری قابل بررسی باشد. پوسته قاره‌ای ایران طی پرمکامترین پسی و توسط کوه‌زایی پان‌آفریکن، متحمل دگرگونی، گرانیتی‌شدن، چین‌خوردگی و گسلش شده است (Nadimi, 2007). ساختارهای جدیدتر یا ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی، نقشی بنیادین در ایجاد بسترهای مناسب و نواحی کم‌فشار برای تمرکز و انتقال محلول‌های گرمابی کانه‌دار ایفا کرده‌اند. این ساختارها ارتباطی مستقیم با فرایند کافتش قاره‌ای و سرانجام ریف‌ت اصلی شکل گرفته در حوضه آتشفشانی- رسوبی کوشک داشته‌اند و به عنوان کنترل‌کننده‌های اولیه (راه‌روهای اولیه) مسیر حرکت سیالات معدنی محسوب می‌شوند. این ساختارها انعکاسی از وضعیت حوضه رسوبی و رژیم زمین‌ساختی حاکم بر حوضه کوشک هستند که در آن و بر اساس شواهد چینه‌شناختی موجود، محیط تشکیل کانسار کوشک در ارتباط با حوضه‌های کششی (RTZ, 1972; Rajabi et al., 2020) بوده است که به تشکیل کانسنگ در یک حوضه به نسبت عمیق و با غلبه تشکیل شیل منجر شده است. آنچه از بررسی وضعیت ساختاری زمین‌شناسی کانسار کوشک بر می‌آید، آن است که بخش با غنای بالای کانسنگ که در واقع بخش پریپریت ماده معدنی و حجیم آن را تشکیل می‌دهد (در حدود ۱۰ میلیون تن کانسنگ در بخش زردو

با عیار متوسط ۵ درصد روی)، منطبق بر بخش عمیق یک حوضه رسوبی است که عمق مزبور از روی ضخامت بالای شیل نسبت به سیت‌سنگ، ضخامت بالای دولومیت خاکستری (دولومیت زردو) و غلبه کانه‌زایی سولفیدی بر اکسیدی در حوضه کوشک، قابل استنباط است. تشکیل و تکامل حوضه‌های رسوبی مختلف نه تنها در وابستگی به کنش‌های زمین‌ساختی سنگ کره است؛ بلکه وابسته به تداوم فرایندهای زمین‌شناختی زیر سنگ کره نیز است (Ju et al., 2020). حوضه‌های رسوبی شامل بخش‌های فرونشینی یا در حال فرونشینی در بخش بالایی سنگ کره زمین یا در سطح زمین هستند که به واسطه تغییر در هندسه ناحیه، تحت تأثیر فرایندهای فرسایش و پرشدگی قرار می‌گیرند. حوضه مزبور در این بین منطبق بر حوضه زیرگان- چاهمیر (Rajabi et al., 2015) در نظر گرفته می‌شود. در مورد نحوه تشکیل این نوع از حوضه‌های رسوبی تا کنون نظریه‌های متعددی ارائه شده است. یک ارتباط ژنتیکی نزدیک بین تکامل زمانی و توزیع زمانی انواع حوضه‌ها وجود دارد. در حاکمیت یک رژیم زمین‌ساختی ثابت، یک حوضه کششی با یک حوضه دارای هندسه موجی یا حوضه‌های تشکیل شده در محیط‌های با حرکت‌های ساختاری شیب- امتدادلغز، ایجاد می‌شوند. رخداد ریف‌ت‌زایی در پی سنگ منطقه (سازند تاشک) صورت گرفته است. این سازند همان‌گونه که قبل از این اشاره شد، شامل یک واحد اغلب رسوبی دگرگون شده است که درجه دگرگونی آن زیاد نیست و بر اساس مشاهدات صحرایی، در بسیاری از رخنمون‌ها درجه دگرگونی از سریست شایست فراتر نمی‌رود. کشش در پوسته قاره‌ای پوشانده شده در سازند تاشک در مرز ریف‌تن- وندین به ایجاد زون‌های ضعف در پوسته بالایی منجر شده که به طور منطقی، با افزایش عمق حوضه و ایجاد شرایط برای شروع فرایندهای کانه‌زایی دنبال شده است. کانه‌زایی مزبور در سنگ میزبان شیل تشکیل شده در افق‌های بالاتر از سازند تاشک صورت گرفته است (شکل ۳- B).



شکل ۳. A. چهارچوب زمین‌ساختی با مقیاس پوسته‌ای زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی در بازه زمانی ۶۱۰ تا ۵۱۰ میلیون سال پیش (Nadimi, 2007) و B. تشکیل و گسترش ساختار ریف و توسعه چینه‌شناسی پرکامبرین پسین-کامبرین زیرین در حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک و شکل‌گیری گسل‌های نرمال به عنوان عوامل ساختاری اولیه تشکیل حوضه میزبان کانه‌زایی

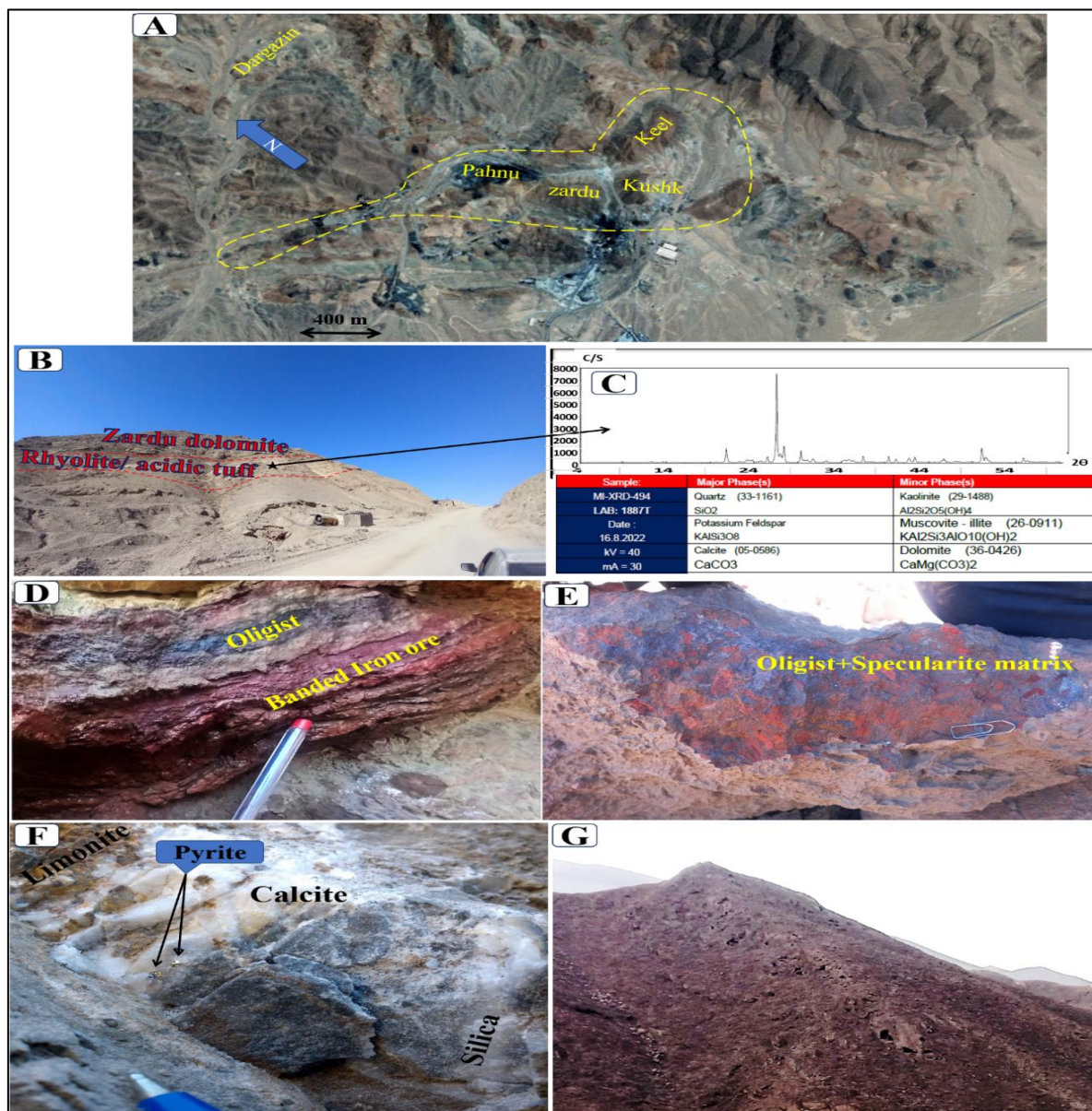
Fig. 3. A. Crustal scale geological framework of central Iranian tectono-magmatic zone from 610 Ma to 510 Ma (Nadimi, 2007), and B: Formation and development of the rift structure and development of the late Precambrian-Cambrian stratigraphy in the Kushk volcano-sedimentary basin and formation of the normal faults as the primary structural factors in the host mineralization basin

ساختارهای گسلی هم‌زمان با کانه‌زایی به دلیل حاکمیت رژیم‌های دمایی بالا در زمان تشکیل و همچنین قرار گرفتن در معرض فازهای کوه‌زایی و تنش‌های ناشی از آنها در طول زمان زمین‌شناسی، اغلب به صورت مستقیم و آشکار قابل شناسایی و اندازه‌گیری نیستند. از این‌رو، حضور و تأثیر آنها اغلب بر اساس شواهد زمین‌شناسی موجود در محدوده کانه‌زایی و کانسار قابل تأیید و استنباط است. حضور ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی در این کانسار، از روی گسترش رخساره‌های کانایی خاص مانند حضور پیریت‌های دانه‌شکری ثانویه و زون‌بندی خطی آنها در امتدادهای مشخص به همراه انطباق این زون‌ها با مناطق عمیق حوضه رسوبی و به ویژه گسترش رخساره‌های کربناتی غنی از سولفید در بخش‌هایی از میزبان کانسنگ و همچنین افزایش موضعی و خطی کانی‌های گالن و پیریت تشخیص داده شده است. در مقیاس ناحیه‌ای، تشخیص بخش‌های عمیق حوضه ریفتی از طریق بررسی ارتباط چینه‌شناسی و ریخت‌شناسی ناحیه میزبان کانسار کوشک امکان‌پذیر است. گسترش واحدهای شیلی، سیلتی و کربناتی در گستره‌های وسیعی مشهود است؛ اما ضخامت واحدهای مزبور و رخساره خاص این واحدها در بخش میانی حوضه که به نظر می‌رسد منطبق بر بخش عمیق حوضه باشد، با نقاط دیگر متفاوت است. حضور دو نوع دولومیت (دو نوع رخساره) که در گذشته به عنوان یکی از کلیدهای اکتشافی معرفی شده است (Dehghani Tafti et al., 2023) بیانگر این مسئله است که بر اساس آن، دولومیت‌های خاکستری در بخش میانی حوضه ریفتی و دولومیت‌های زرد نخودی در حواشی حوضه ریفتی تشکیل شده‌اند. انطباق واحدهای چینه‌شناسی یادشده با ریخت‌شناسی حوضه مشهود است به گونه‌ای که رخداد ضخامت بالای شیل میزبان کانسنگ روی و سرب، ضخامت سیلت‌سنگ پوشاننده شیل میزبان کانسنگ و همچنین رخداد دولومیت‌های خاکستری، قابل تفکیک از سایر واحدهای چینه‌شناسی منطقه و در برگرفته‌شده در یک محدوده مشخص هستند که به نظر می‌رسد منطبق بر بخش عمیق حوضه ریفتی باشد (شکل ۴-ا). همچنین از

دیگر شواهد زمین‌شناسی منطبق بر محیط‌های گسلی کشتی حاکم بر بخش‌هایی از حوضه با روندهای محلی خطی می‌توان به دگرسانی شدید توف ریولیتی و تبدیل آنها به کانی‌های رسی در افق‌های ریولیتی بالای کانسنگ در رخنمون‌های موجود و تغییر رنگ توف‌های سبز به توف سبز کم‌رنگ تا کرمی (شکل ۴-ب) و دگرسان (شکل ۴-ج)، رخداد کانه‌زایی آهن نواری (شکل ۴-د) و کانه‌زایی آهن گرمابی در افق‌های کربناتی (شکل ۴-ه) در قاعده دولومیت ریزو و حضور دانه‌ها، رگه‌ها و رگچه‌های پیریتی (شکل ۴-ف) و همچنین شدت بالای کارستی شدن در بخشی از دولومیت ریزو در افق‌های بالایی ستون چینه‌شناسی (با فاصله بسیار از افق کانسنگ) (شکل ۴-گ) اشاره کرد (Mirzababaei and Hayatolgheyb, 2025). حضور این شواهد همچنین حاکی از تداوم فعالیت‌های گرمابی پس از تشکیل کانسنگ سولفیدی در سنگ میزبان شیل تا زمان‌های متأخر است.

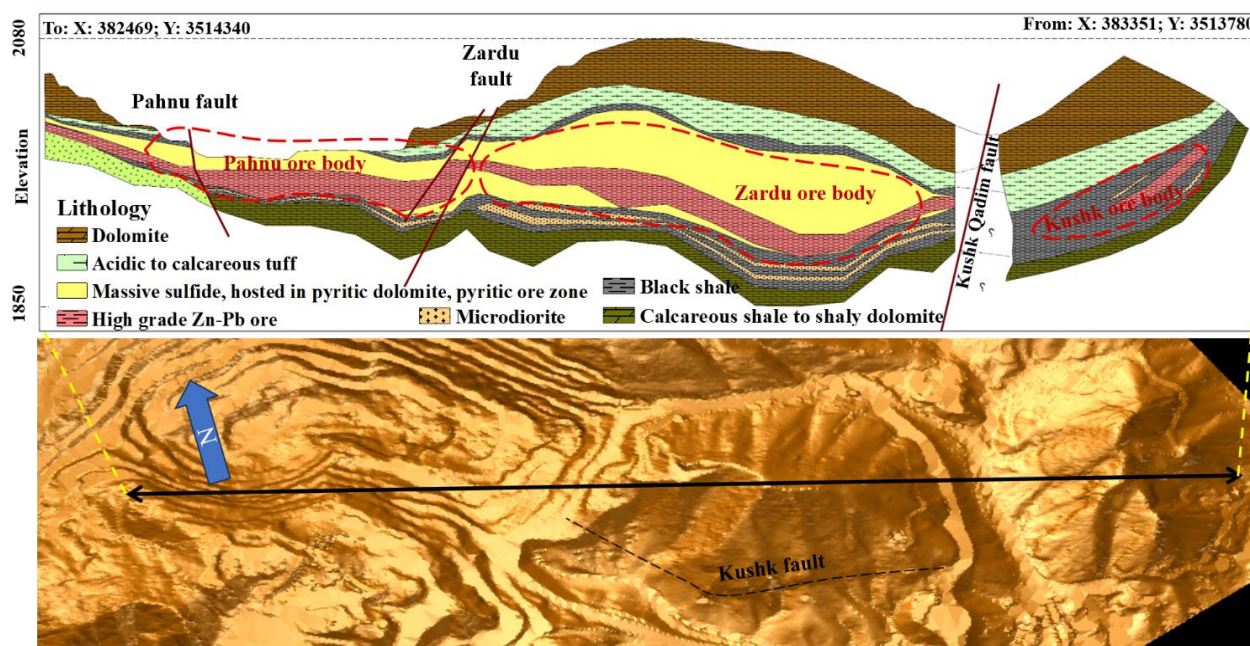
کانه‌زایی اولیه در نتیجه کنترل‌کننده‌های ساختاری در حوضه رسوبی میزبان کانسار کوشک

در مورد کانه‌زایی سولفیدهای اولیه در کانسار کوشک تا کنون پژوهش‌های زیادی انجام شده است (RTZ, 1972; Rajabi et al., 2020). این کانه‌زایی بیشتر شامل لایه‌های پیوسته پیریت در سنگ میزبان شیل سیاه و شیل کربناتی با ضخامت‌های متغیر از کمتر از ۱ سانتی‌متر تا بیش از ۱ متر است که به ویژه در کمربین ماده معدنی دیده می‌شود و به سمت کمربالا، با دولومیت‌های پرپیریت جانشین می‌شود. اسفالریت، فاز اصلی کانه‌زایی اقتصادی در کانسار کوشک است که به ویژه در کمربین ماده معدنی به صورت نوارهای پیوسته با ضخامت کمتر از ۱ سانتی‌متر تا گاهی بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. این کانی در کمربالای ماده معدنی اغلب به صورت افشان در زمینه کانسنگ پیریتی تشکیل شده است (شکل ۵). کانه‌زایی سرب به صورت گالن نیز هم به شکل لایه‌ای و هم به صورت توده‌ای به ویژه در کمربین ماده معدنی مشاهده می‌شود.



شکل ۴. A: موقعیت محدوده میزبان کانسنگ روی و سرب به عنوان بخشی از حوضه آتشفشانی- رسوبی کوشک با رخساره‌های چینه‌شناسی تا حدی متفاوت از نواحی مجاور، **B:** دگرسانی شدید توف ریولیتی و تبدیل آنها به کانی‌های رسی در افق‌های ریولیتی بالای کانسنگ روی و سرب در سنگ میزبان شیل (دید به شمال غرب)، **C:** نتیجه XRD از توف ریولیتی دگرسان در قسمت B، **D:** رخداد آهن نواری در قاعده دولومیت ریزو، **E:** رخداد آهن گرمایی در قاعده دولومیت ریزو، **F:** دانه‌ها، رگه‌ها و رگچه‌های پیریتی در دولومیت ریزو و **G:** کارستی شدن شدید در افق‌های بالایی دولومیت ریزو (دید به جنوب شرق)

Fig. 4. A: Location of the area hosting Zn-Pb ore as a part of the Kushk volcano-sedimentary basin characterized by different stratigraphical facies, with respect to surrounding localities, B. Intense alteration of rhyolitic tuff converting to clay minerals in rhyolitic horizons overlay the shale hosted Zn-Pb ore (view to the northwest), C: XRD pattern of the altered rhyolitic tuff in B, D: banded iron formation at the base of the Rizu dolomite, E: hydrothermal iron occurrence at the base of the Rizu dolomite, F: pyrite grains, veins and veinlets within the Rizu dolomite, and G: intense karstification in upper horizons of the Rizu dolomite (view to the southeast)



شکل ۵. مقطع شمال غربی - جنوب شرقی از چینه‌شناسی عمومی کانسنگ روی و سرب کوشک به همراه بخش‌های مختلف کانسار (تلفیق اطلاعات حاصل از بررسی‌های چینه‌شناختی صحرایی، برداشت‌های تونلی و گمانه‌های اکتشافی موجود)

Fig. 5. NW-SE section of the generalized stratigraphy of the Kushk Zn-Pb ore, as well as different parts of the ore deposit (compiled from combination of stratigraphical field investigation, tunnel survey and exploratory boreholes)

است. به نظر می‌رسد که نقش ساختارهای درون حوضه‌ای در کوشک بیشتر متمایل به نقش تغذیه‌ای این ساختارها باشد و نقش تشکیل حوضه عمیق در وابستگی غیرمستقیم به این ساختارها و با اتکای به منابع ماگمایی و نفوذی با منشأ عمیق پوسته‌ای تا گوشته بالایی بوده است.

ساختارهای پساکانه‌زایی

این ساختارها در مقیاس وسیع، اغلب با چین خوردگی‌ها و یا گسل‌ها مشخص می‌شوند. چین خوردگی، سیمای ساختاری برجسته و نمایان حوضه آتشفشانی - رسوبی در کانسار کوشک است که در آن لایه‌های سنگی موجود از حالت افقی خارج شده و به شکل گیری برخی از گسل‌های پساکانه‌زایی در این حوضه منجر شده است. تمام گسل‌های بیان شده به طور مستقیم وابسته به

بر اساس مشاهدات صحرایی در تونل‌های زیرزمین و همچنین بر اساس داده‌های موجود در مقاطع زمین‌شناسی و اطلاعات حاصل از حفاری‌های صورت گرفته، بخش کوشک قدیم دارای بیشترین نسبت $(Sp+Gn)/Py$ در کانسار کوشک است که به نظر می‌رسد این مسئله در ارتباط با حضور مناطق تغذیه‌ای و تراکم بالای این ساختارها در زیر بخش کوشک قدیم نسبت به بخش‌های دیگر معدن باشد. بر اساس مشاهدات صحرایی و حضور روابط هم‌یافتی پیریت، اسفالریت و گالن در کمرباین ماده معدنی که رخداد آن به صورت لایه‌ای کاملاً مشهود است و همچنین تغییر رخساره آرام کانسنگ از لایه‌ای در کمرباین به توده‌ای در کمربالا و کاهش نسبت $(Sp+Gn)/Py$ به طرف کمربالای ماده معدنی، استنتاج یک فرایند کان‌زایی پیوسته از کمرباین به کمربالای کانسنگ، منطقی است و تغییر رخساره از یک محیط دارای شیل غالب (عمیق) به یک محیط دارای کربنات غالب (کم‌عمق) اتفاق افتاده

چین خوردگی نیستند و متأثر از درجه‌های متفاوت از برهم کنش فرایندهای متنوع زمین‌شناختی هستند. این گسل‌ها هم در فضای باز معدن کوشک و هم در معدن زیرزمینی قابل مشاهده و بررسی هستند (شکل ۶).

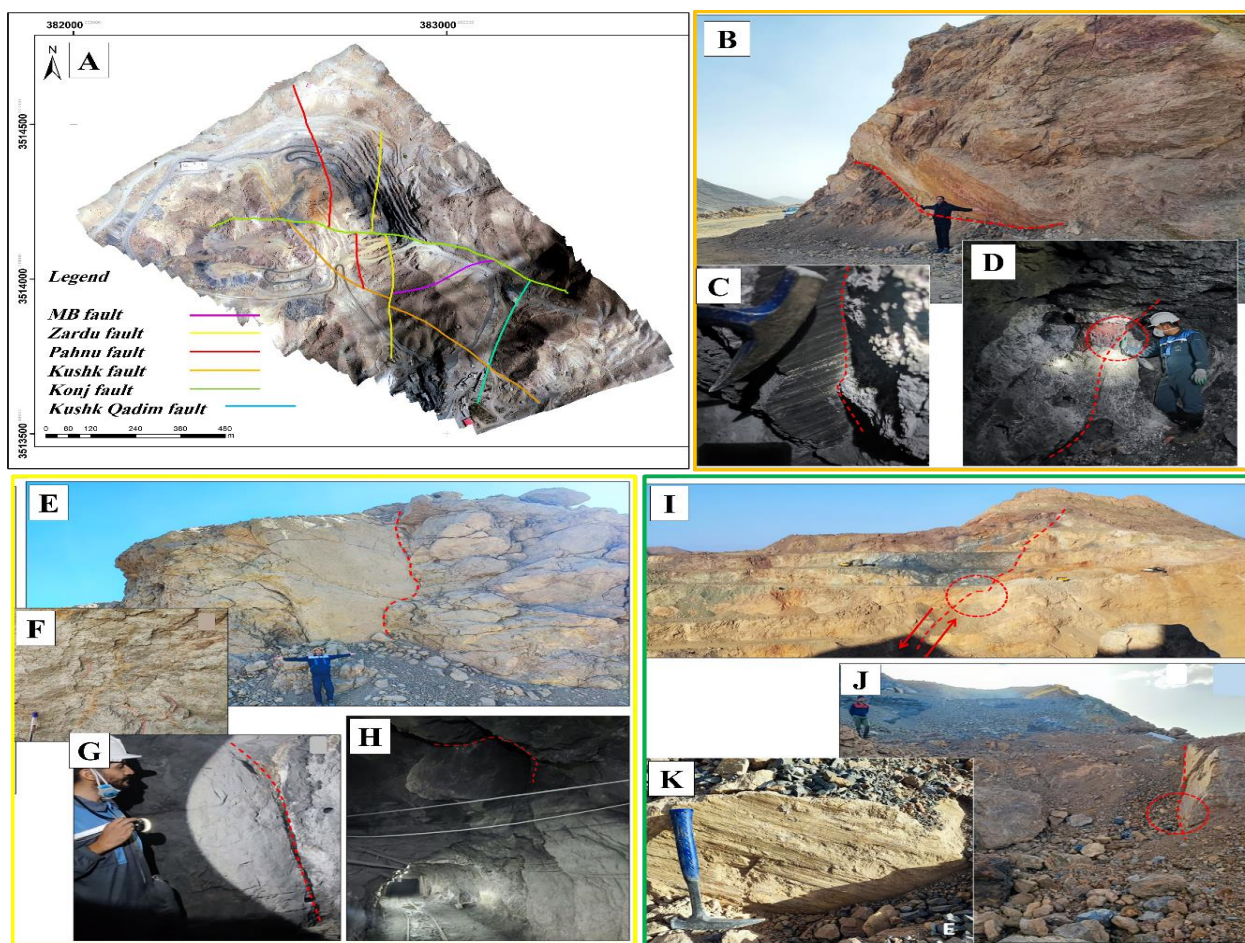
گسل کوشک: یکی از گسل‌های شاخص و اصلی محدوده، با امتداد تقریبی شمالی-جنوبی و با شیبی نزدیک به قائم به سمت غرب در بخش غربی زون معدنی واقع شده است و به عنوان مرز غربی ماده معدنی عمل می‌کند (شکل ۶-A) و تا بخش پهنوی کانسار (شکل ۶-B) و با خش‌لغزهای مشخص (شکل ۶-C)، تداوم دارد. آثار این گسل در افق ۸۹۰ معدن زیرزمینی به خوبی مشهود است (شکل ۶-D). شواهد زمین‌ساختی نشان می‌دهد که این گسل در امتداد گسل‌های وابسته به فرایند چین خوردگی ناحیه‌ای شکل گرفته است. در بخش جنوبی، ساختار گسلی کوشک توسط گسل زردو قطع شده و حدود ۵۰ متر جابه‌جایی راست‌گرد در امتداد آن ایجاد شده است. در اعماق بیشتر، این گسل به واسطه تأثیرپذیری از حرکت‌های زمین‌ساختی و تنش‌های پسین، دچار آشفتگی قابل توجهی در امتداد و شیب شده است. این تغییرات بیانگر بازتوزیع نیروهای زمین‌ساختی و پیچیدگی‌های ناشی از تحولات دیرینه زمین‌ساختی در ساختار منطقه است.

گسل زردو (شکل ۶-E): در محدوده مورد بررسی، گسلی از نوع مورب‌لغز با سازوکار غالب راست‌گرد و همراه با مؤلفه فرعی معکوس شناسایی شده است. امتداد این گسل به طور تقریبی شمالی-جنوبی و شیب آن حدود ۶۰ درجه با خش‌لغزهای مشخص (شکل ۶-F) به سوی غرب است؛ با این تفاوت که در اعماق بیشتر، شیب کاهش یافته و فرم قاشقی‌شکل به خود می‌گیرد. این گسل ذخیره اصلی ماده معدنی را دستخوش جابه‌جایی و تغییر کرده است. طی این تغییر بخش معدنی زردو از پهنو در بخش شمالی کانسار جدا شده است؛ به گونه‌ای که در فرودپواره، به علت حرکت راست‌گرد و جهت شیب لایه‌ها، واحدهای زمین‌شناسی در ارتفاعی بالاتر نسبت به ناحیه فرادپواره قرار گرفته‌اند. این ویژگی در بررسی مقطع عرضی، گسل را به

ظاهر مشابه یک گسل نرمال نشان می‌دهد و می‌تواند موجب برداشت نادرست یا خطای ناظر شود. در شکل ۶-G، نمایی از گسل زردو در تونل افق ۸۴۵ معدن زیرزمینی ارائه شده است. این گسل، به دلیل سن بیشتر نسبت به گسل کنج، در بخش شرقی خود متحمل جابه‌جایی چپ‌گردی در حدود ۴۵ متر شده است. از سوی دیگر، با توجه به جوان‌تر بودن نسبت به گسل کوشک، توانسته است آن را قطع کرده و جابه‌جایی راست‌گردی در حدود ۵۰ متر در آن ایجاد کند. نمای دیگری از گسل زردو در ورودی استخراج ۲۵ زیرزمینی در شکل ۶-H، ارائه شده است.

گسل پهنو (شکل ۶-A): گسلی با ویژگی‌هایی کاملاً مشابه گسل زردو و تقریباً موازی با آن شناسایی شده است که تنها تفاوت هندسی آن، شیب به سوی شرق است. سازوکار این گسل نیز همانند گسل زردو بوده و بر اساس شواهد حاصل از جابه‌جایی در کانسار و لایه‌های شاخص سنی، هر دو گسل هم‌زمان شکل گرفته و محصول یک رژیم تنش زمین‌ساختی واحد هستند. گسل‌های زردو و پهنو هر یک جابه‌جایی تقریبی در حدود ۳۵ تا ۵۰ متر را نشان می‌دهند که با توجه به شیب لایه‌ها در امتداد جابه‌جایی، موجب تغییرات ارتفاعی و عرضی در کانسار شده‌اند (شکل ۶). همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، این دو گسل طی تکوین زمین‌شناسی محدوده، به وسیله گسل کنج بریده شده و در ادامه تحت تأثیر حرکت چپ‌گرد آن دچار جابه‌جایی شده‌اند.

گسل کنج (شکل ۶-I): این گسل، یکی از شاخص‌ترین و بزرگ‌ترین گسل‌های محدوده مورد بررسی محسوب می‌شود که با حرکت چپ‌گرد خود، سبب جابه‌جایی قابل توجه واحدهای زمین‌ساختی قدیمی‌تر (در برخی نقاط تا حدود ۵۰ متر) شده است. این گسل با سازوکار امتدادلغز و جهت‌گیری غالب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و شیب تقریبی ۵۰ تا ۷۰ درجه به سمت جنوب‌غرب، پهنه معدنی را با صفحه گسلی مشخص (شکل ۶-J و K) در امتداد شمال‌غربی-جنوب‌شرقی قطع کرده و به عنوان یکی از عناصر کلیدی در سازمان‌دهی و تحول ساختاری منطقه نقش آفرینی کرده است.



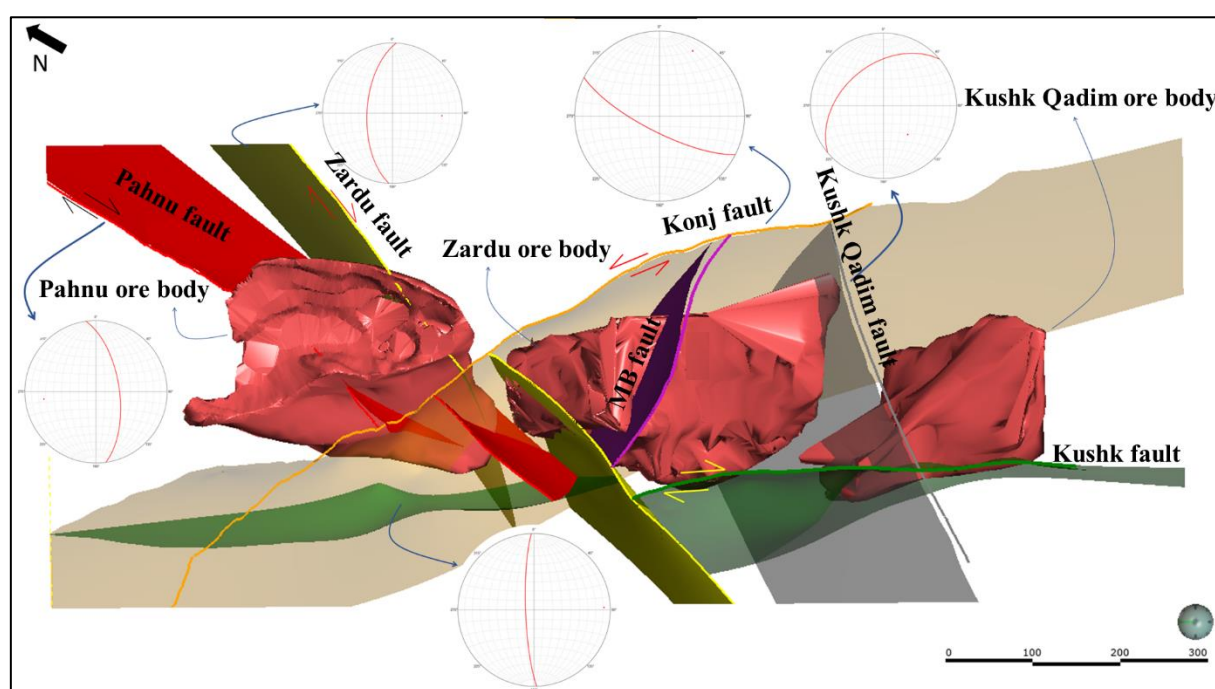
شکل ۶. وضعیت عمومی ساختارهای گسلی پساکانه‌زایی در کانسار کوشک؛ A: موقعیت گسل‌های اصلی کانسار کوشک؛ B: برون‌زد شاخه شمالی گسل کوشک در پیت روباز، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی (دید به جنوب)، C: خش لغزهای گسل کوشک در تونل‌های زیرزمینی، افق UP-sh در نقشه زمین‌شناسی، D: آثار عملکرد گسل کوشک در تونل ۸۹۰ متری زیرزمینی، افق UP-sh در نقشه زمین‌شناسی، E: صفحه گسلی زردو در بین زردو و پهنو، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی (دید به جنوب شرق)، F: خش لغزهای ریبلی موجود در صفحه گسلی زردو، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی، G: نمایی از گسل زردو در تونل ۸۴۵ زیرزمینی، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی، H: نمای دیگری از گسل زردو در ورودی استخراج ۲۵ زیرزمینی، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی، I: آثار عملکرد گسل کنج در دامنه قله مشرف بر پهنو، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی (دید به غرب)، J: برون‌زد بخشی از گسل کنج در معدن روباز کوشک، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی و K: خش لغزهای گسل کنج در معدن روباز، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی

Fig. 6. The general appearance of the post-mineralization fault structures in the Kushk ore deposit; A: the location of the main faults of the Kushk ore deposit, B: northern sector of the Kushk fault in the open pit, LC-dol horizon on the geology map (view to the south), C: Kushk fault riddles in underground tunnels, UP-sh horizon on the geology map, D: Kushk fault traces in underground tunnel 890 m, UP-sh horizon on the geology map, E: Zardu fault plane between Zardu and Pahnu, LC-dol horizon on the geology map (view to the southeast), F: ripple type riddles on the Zardu fault plane, LC-dol horizon on the geology map, G: a view of the Zardu fault in tunnel 845 level, UP-sh horizon on the geology map, H: another view of the Zardu fault in the extraction 25 entrance, UP-sh horizon on the geology map, I: the Konj fault on the Pahnu peak, LC-dol horizon on the geology map (view to the west), J: outcroppings of some parts of the Konj fault in the Kushk open pit, LC-dol horizon on the geology map, and K: Konj fault riddles in the open pit mine, LC-dol horizon on the geology map

ساختاری منطقه شناخته می‌شود.

گسل MB: این گسل در کانسار کوشک، گسلی نسبتاً بزرگ با امتداد غالب شرقی-غربی و شیب تقریبی ۷۰ درجه به سوی شمال است که حضور آن هم در سطح زمین و هم در عمق حدود ۱۱۰ متر قابل مشاهده است (شکل ۶-۱). این گسل در زمره جوان‌ترین ساختارهای زمین‌ساختی شکل گرفته در منطقه، محسوب می‌شود و با توجه به شدت تنش‌های مؤثر در پیدایش آن، در میان گسل‌های کنج و کوشک محدود شده و به عنوان یکی از عناصر شاخص در تحول ساختاری محدوده، ایفای نقش کرده است. در شکل ۷، وضعیت هندسی و فضایی ساختارهای گسلی پساکانه‌زایی به همراه نقش آنها در جابه‌جایی زون‌های کان‌زایی شده و توده‌های معدنی، ارائه شده است.

گسل کوشک قدیم: این گسل نیز در زمره گسل‌های نسبتاً بزرگ محدوده قرار می‌گیرد که در شمال شرق با گسل کنج محدود شده و در سمت جنوب غرب، با توجه به جوان‌تر بودن (استنباط احتیاطی)، احتمالاً گسل کوشک را قطع کرده است. امتداد این گسل به طور غالب شمال شرقی-جنوب غربی با شیب تقریبی ۴۰ تا ۴۵ درجه به سوی شمال غربی بوده و در جنوب شرقی‌ترین بخش محدوده معدنی واقع شده است (شکل ۶-۲). بر اساس تأثیری که این گسل بر جابه‌جایی ماده معدنی داشته و بخش معدنی زردو را از کوشک شمالی در قسمت جنوبی کانسار جدا کرده است، می‌توان سازوکار آن را یک گسل معکوس در نظر گرفت. شواهد صحرایی و زمین‌ساختی نشان می‌دهد که آثار این گسل هم در سطح زمین و هم در عمق حدود ۱۷۰ متر قابل مشاهده است و به این ترتیب به عنوان یکی از عناصر شاخص در سازماندهی

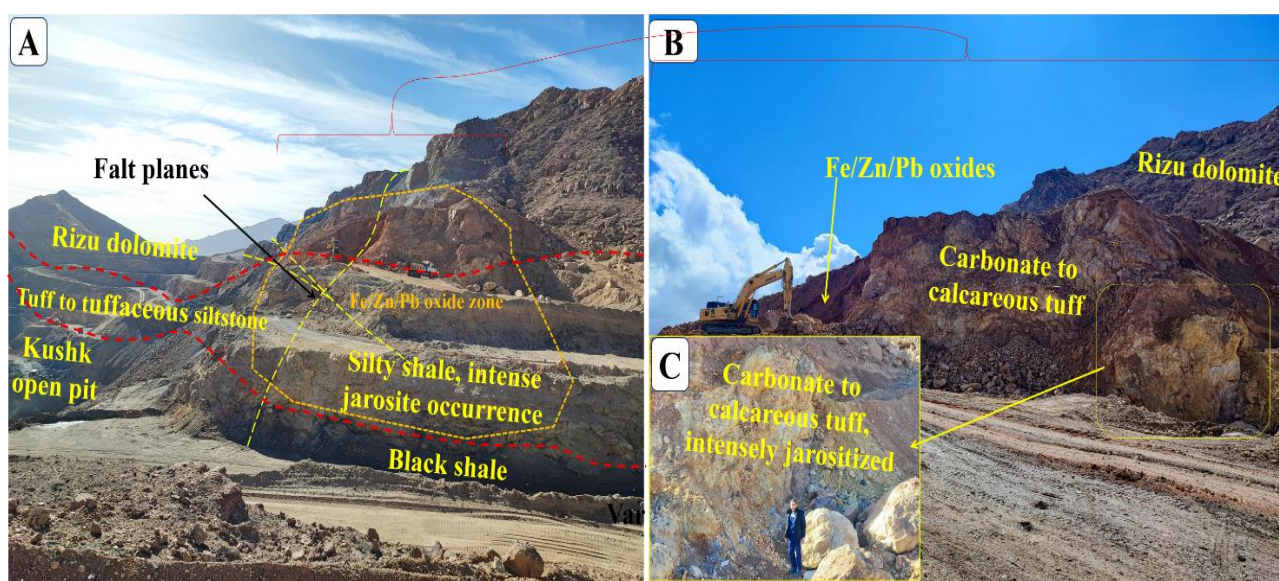


شکل ۷. وضعیت هندسی و فضایی گسل‌های پساکانه‌زایی به همراه نتایج حاصل از عملکرد این ساختارها در توده‌های ماده معدنی در کانسار کوشک (موقعیت توده‌های معدنی مزبور با توجه به چینه‌شناسی کانسار به دست آمده از گمانه‌های حفاری و برداشت‌های تونلی در مقطع شکل ۵ ارائه شده است)

Fig. 7. The geometrical and spatial occurrences of the post-mineralization faults as well as the results of the faults movements in ore bodies in the Kushk ore deposit (locations of the ore bodies mentioned, obtained from stratigraphy of the ore deposit using drilled holes and tunnel survey, are given on the section of Fig. 5)

با حضور رخدادهای قابل تشخیصی از کانی‌های سولفات‌ها از جمله زاروسیت همراهی می‌شود (شکل ۸-۸). زون گسلی بیان‌شده در این بین به موازات گسل پهنو و در واقعیت امر حد شمالی گسل کوشک است. سنگ میزبان کانه‌زایی اکسیدی در این زون گسلی شامل سیلت سنگ بالایی (افق بالای شیل میزبان کانسنگ سولفیدی)، توف و همچنین دولومیت‌های سری ریزو هستند.

بر اساس مشاهدات میدانی حد شمالی ماده معدنی در معدن روباز کوشک، به طور کامل منتهی به زون‌های اکسیدان (شکل ۸-۸) می‌شود که دارای مقادیر اقتصادی از کانی‌های اکسیدی روی تا ۵ درصد متوسط عیار بار استخراجی است (شکل ۸-۸). به طور معمول اکسید اصلی در این نقاط شامل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و اکسیدهای روی و سرب است و در برخی از برونزدها نیز



شکل ۸. A: برونزدهای زون‌های اکسیدان در دیواره غربی پیت روباز معدن کوشک با رخداد کانه‌زایی محدود بر ساختار (حد شمالی گسل کوشک) (دید به جنوب)، B: نمایی نزدیک‌تری از زون اکسیدان در مجاورت سامانه‌های گسلی که در سنگ میزبان کربناتی توسعه یافته است و C: نمای نزدیک‌تری از رخداد زاروسیت

Fig. 8. A: Outcroppings of the structure bound oxide zones in the western wall of the open pit of the Kushk mine (the northern limit of the Kushk fault) (view to the south), B: a closer view of the oxidized zone adjacent to fault systems developing in carbonate host rock, AND C: a closer view of jarosite occurrence

به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

کربنات‌ها: به طور معمول دولومیت و کلسیت فراوان‌ترین کانی‌های کربناتی موجود در کانسار کوشک هستند. رخداد این کانی‌ها اغلب اولیه بوده و متأثر از فرایندهای وابسته به ساختارهای پسا کانه‌زایی نیست و بخشی از همان سنگ میزبان کانسار هستند. از مهم‌ترین کربنات‌های پسا کانه‌زایی سولفیدی موجود در این

سیمای‌های کانه‌زایی برونزاد و کنترل ساختاری بر این نوع کانه‌زایی در کانسار کوشک

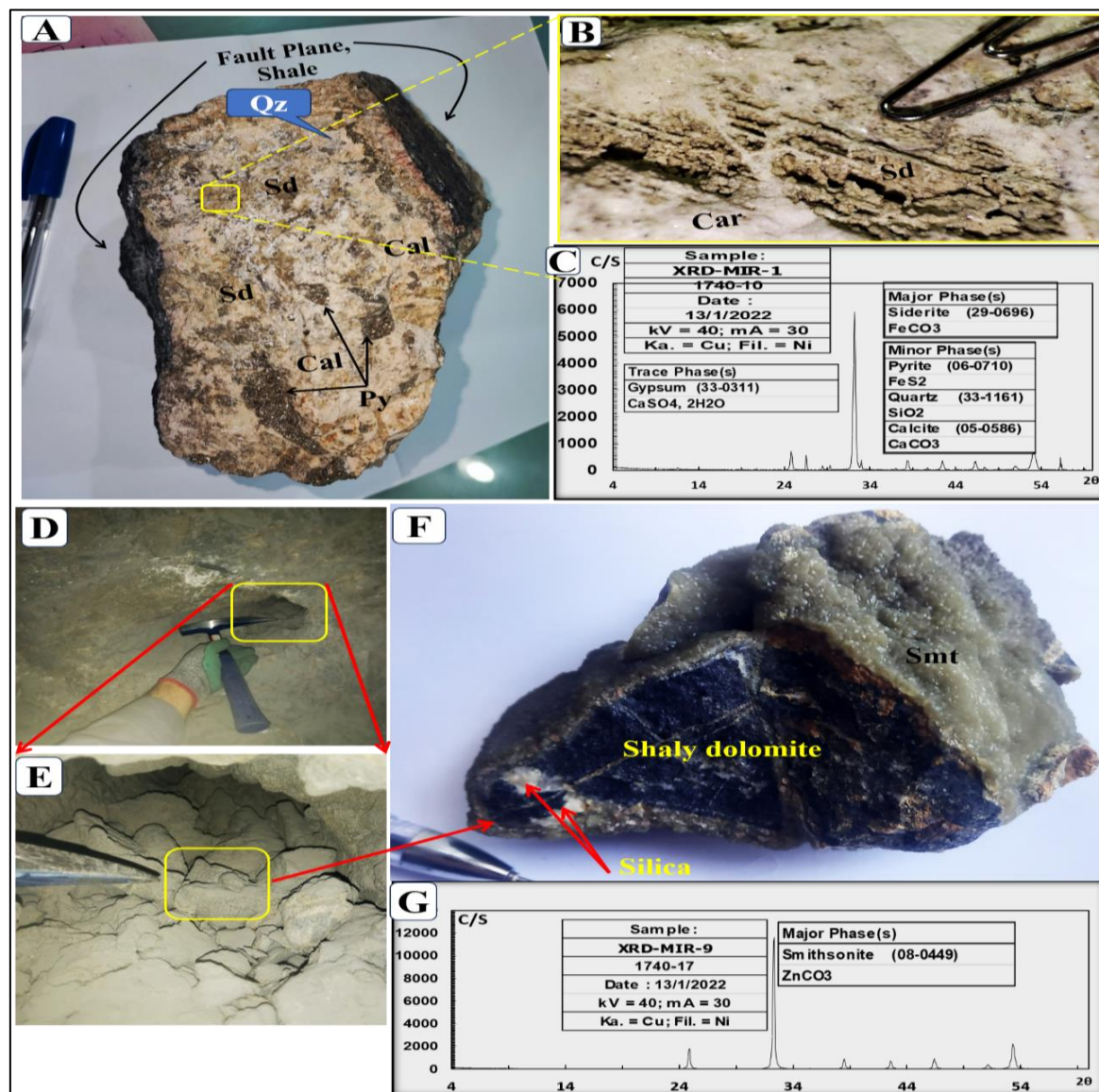
کانی‌های برونزاد در کانسار کوشک که در ارتباط با ساختارهای گسلی پسا کانه‌زایی و یا درزه‌ای تشکیل شده‌اند؛ به طور کلی شامل کربنات‌ها، سولفات‌ها، آلومینات‌ها، فسفات‌ها، اکسیدها و سیلیکات‌ها و سیلیس هستند که عوامل مؤثر بر رخداد آنها در ادامه

کانسار می‌توان به سیدریت، اسمیت‌زونیت و سروزیت اشاره کرد. در این کانسار، سیدریت به رنگ شیری تا سبز لجنی کم‌رنگ دیده می‌شود (شکل ۹-۱۰A). از ویژگی‌های برجسته کانی‌سازی سیدریت می‌توان به وابستگی قطعی رخداد آن به گسل‌های موجود و به ویژه گسل زردو اشاره کرد که در امتداد آن و به شکل ساختارهای شبکه داربستی - تیغه‌ای تشکیل شده است (شکل ۹-۱۰B). پهنای تیغه‌ها در این نوع رخداد از ۱ تا ۲۰ سانتی‌متر متغیر است و به طور عمومی ارتباط مثبتی بین فضای خالی حاصل از بازشدگی سامانه‌های گسلی و پهنای تیغه‌ها وجود دارد. از نمونه‌های موجود برای آنالیز XRD استفاده شد (شکل ۹-۱۰C) که در آن سیدریت به عنوان فاز اصلی و پیریت، کلسیت و کوارتز، کانی‌های فرعی هستند. از ویژگی‌های بارز همراه با این نوع کربنات، حضور دانه‌های پیریت دود کائدرال در زون گسلی است که حاکمیت یک محیط احيایی را در زمان تشکیل دو کانی مزبور، مسجل می‌سازد. اسمیت‌زونیت هم به صورت پوسته‌های کربناتی بر روی صفحه‌های گسلی و هم به صورت رورشدی در حفره‌های غیر مرتبط با محیط‌های گسلی و شکستگی‌های مرتبط با درزه‌ها دیده می‌شود (شکل ۹-۱۰D و E). اسمیت‌زونیت‌های موجود در صفحه‌ها و زون‌های گسلی، دانه‌ریزتر بوده و سیمای غالب گل‌کلمی دارد (شکل ۹-۱۰F)؛ اما انواع موجود در فضاهای خالی مرتبط با درزه‌ها، فرم بلوری کامل داشته و اغلب دانه درشت‌تر است؛ اگرچه این موضوع، یک قاعده عمومی نیست. از این کانی‌ها برای انجام تجزیه و تحلیل XRD استفاده شد (شکل ۹-۱۰G). این حفره‌ها اغلب در افق‌های زیرین کانسنگ که متأثر از سامانه‌های گسلی با تغذیه غیر مرتبط از سطح زمین بوده‌اند، در معدن زیرزمینی کوشک مشاهده می‌شوند.

بدون شک، حاکمیت شرایط عمومی اکسیدان‌تر پسا‌کانه‌زایی سولفیدی، نقطه عطف در تشکیل اسمیت‌زونیت و تکامل پوسته‌های کربناتی در مجاورت توده‌ها و لایه‌های سنگی سولفیدی مرتبط با سامانه‌های گسلی و درزه‌هاست (شکل ۱۰-۱۰A و B). از ویژگی‌های قابل مشاهده در زمینه اختلاف بین اسمیت‌زونیت‌های

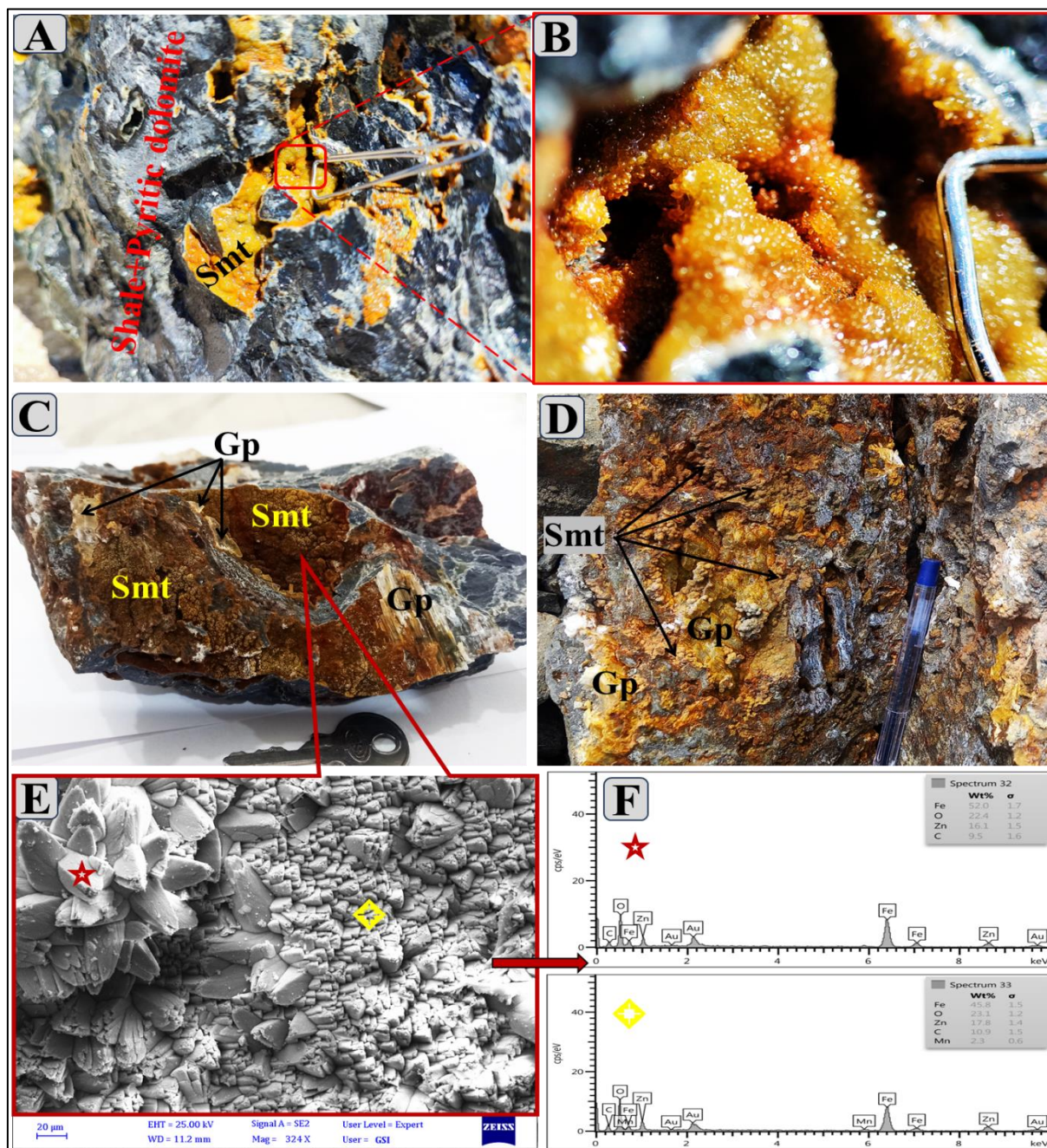
تشکیل‌شده در دو محیط باید گفت که اسمیت‌زونیت‌های تشکیل‌شده در محیط گسلی، میزبان رگه‌ها و رگچه‌هایی از اکسیدهای روی هستند؛ در صورتی که اسمیت‌زونیت تشکیل‌شده در درزه‌ها و حفره‌ها، بدون چنین آثاری است. از ویژگی‌های کانی‌شناختی قابل توجه، همراهی اسمیت‌زونیت و ژپس است (شکل ۱۰-۱۰C) که تقریباً در تمام نقاط مورد بررسی میزبان کانه‌زایی اسمیت‌زونیت در سامانه‌های گسلی، به خوبی مشهود است. در مورد منشأ روی و کربنات، باید اشاره کرد که روی به احتمال زیاد از همان سنگ میزبان منشأ گرفته است؛ زیرا ارتباط مستقیمی بین حجم زون اکسیدان و نبود کانسنگ سولفیدی در زون گسلی وجود دارد. همچنین حضور زون‌های متخلخل در محیط مجاور کانه‌زایی اسمیت‌زونیت (شکل ۱۰-۱۰D) بیانگر انتقال با فاصله کم گروه‌های کربناته به محل تشکیل اسمیت‌زونیت است که حداقل غنای سیال از بخشی از کربنات، از همان سنگ دولومیتی میزبان سولفید تأمین شده است. بنابراین، نقطه عطف در تشکیل اسمیت‌زونیت در میزبان سولفیدی در کانسار کوشک، تغییر شرایط سیال از حالت احيایی به حالت اکسیدان بوده است. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی (شکل ۱۰-۱۰E)، کربنات‌های روی در برخی از رخدادها، در یک طیف ترکیبی از کربنات‌های روی، آهن و منگنز هستند. اندازه بلورهای کربنات‌های روی و آهن با افزایش میزان منگنز، روند کاهشی نشان می‌دهد. طیف پراش انرژی پرتو ایکس این فازهای کانی‌شناختی در شکل ۱۰-۱۰F ارائه شده است.

سروزیت: سروزیت نسبت به دو کانی کربناتی قبلی (سیدریت و اسمیت‌زونیت) در کانسار کوشک، دارای فراوانی کمتری است و در زون‌های اکسیدان تشکیل شده است. این کانی در بررسی‌های صحرایی، نمود چندانی ندارد و در رخدادهای موجود به صورت رشته‌هایی با گسترش کم بر روی سطوح اکسیده و کربناتی به صورت محدود قابل شناسایی است. در بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، رخداد آن با ژپس، قابل تشخیص است (شکل ۱۱).



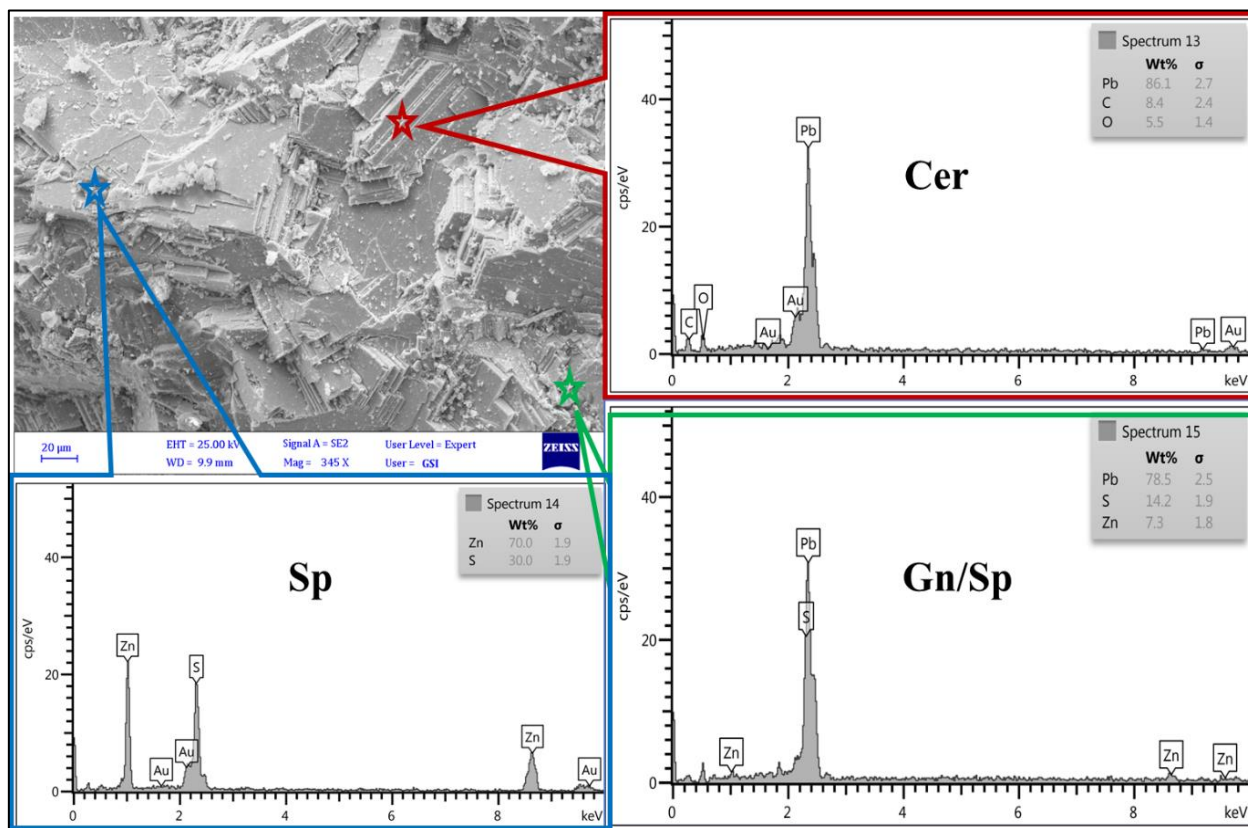
شکل ۹. A: رخداد سیدریت در رگه‌های وابسته به گسل زردو در کانسار کوشک، B: فرم تیغه‌ای کانی سیدریت در نمای نزدیک‌تر، C: نتیجه تجزیه و تحلیل XRD از کانی سیدریت نمونه منتخب، D: حفره‌های خالی در زون‌های گسلی در بخش‌هایی از معدن زیرزمینی کوشک، E: اسمیت‌زونیت در حفره‌های مرتبط با درزه‌ها و گسل‌ها که به صورت رورشدی بر روی قطعه‌های مجزا از هم و به عنوان سیمان، قطعه‌ها را به هم پیوند داده است، F: نمای نزدیک‌تر از اسمیت‌زونیت تشکیل شده بر روی قطعه‌های از پیش موجود و G: نتیجه تجزیه و تحلیل XRD از کانی اسمیت‌زونیت منتخب مورد تجزیه. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sd: سیدریت، Cal: کلسیت، Car: کربنات، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Smt: اسمیت‌زونیت).

Fig. 9. A. Iron carbonate in the form of siderite in veins related to Zardu fault in the Kushk ore deposit, B: Bladed form siderite in a closer view, C: XRD pattern of siderite of the representative crystal analyzed, D: Open spaces in fault zones in the Kushk underground mine, E: A closer view of smitsonite formation on preexisting rock fragments, F: Overgrowth of smitsonite on separated fragments as cement connecting fragments in joints and fault related open spaces, and G: XRD pattern of smithsonite of the representative crystal analyzed. Abbreviation after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Sd: siderite, Cal: calcite, Car: carbonate, Py: pyrite, Qz: quartz, Smt: smithsonite).



شکل ۱۰. A: رخداد اسمیت‌زونیت در سنگ میزبان شیل و دولومیت پیریتی در کانسار کوشک، B: نمای نزدیک‌تری از کانه‌زایی اسمیت‌زونیت، C: هم‌یافتی اسمیت‌زونیت و ژپس، D: کاهش تخلخل مشهود در بخش میزبان کانه‌زایی اسمیت‌زونیت، E: تصویر BSE از رخداد کربنات‌های روی، آهن و منگنز و F: طیف EDS از کانی‌های کربناتی مورد بررسی. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Smt: اسمیت‌زونیت، Gp: ژپس).

Fig. 10. A: Smithsonite occurrence in the shale and pyritic dolomite host in the Kushk ore deposit, B: a closer view of smithsonite mineralization, C: association of smithsonite and gypsum, D: evident porosity reduction in the smithsonite mineralization host, E: BSE image of Zn, Fe, and Mn carbonates mineralization, and F: EDS of carbonate minerals investigated. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Smt: smithsonite; Gp: gypsum).



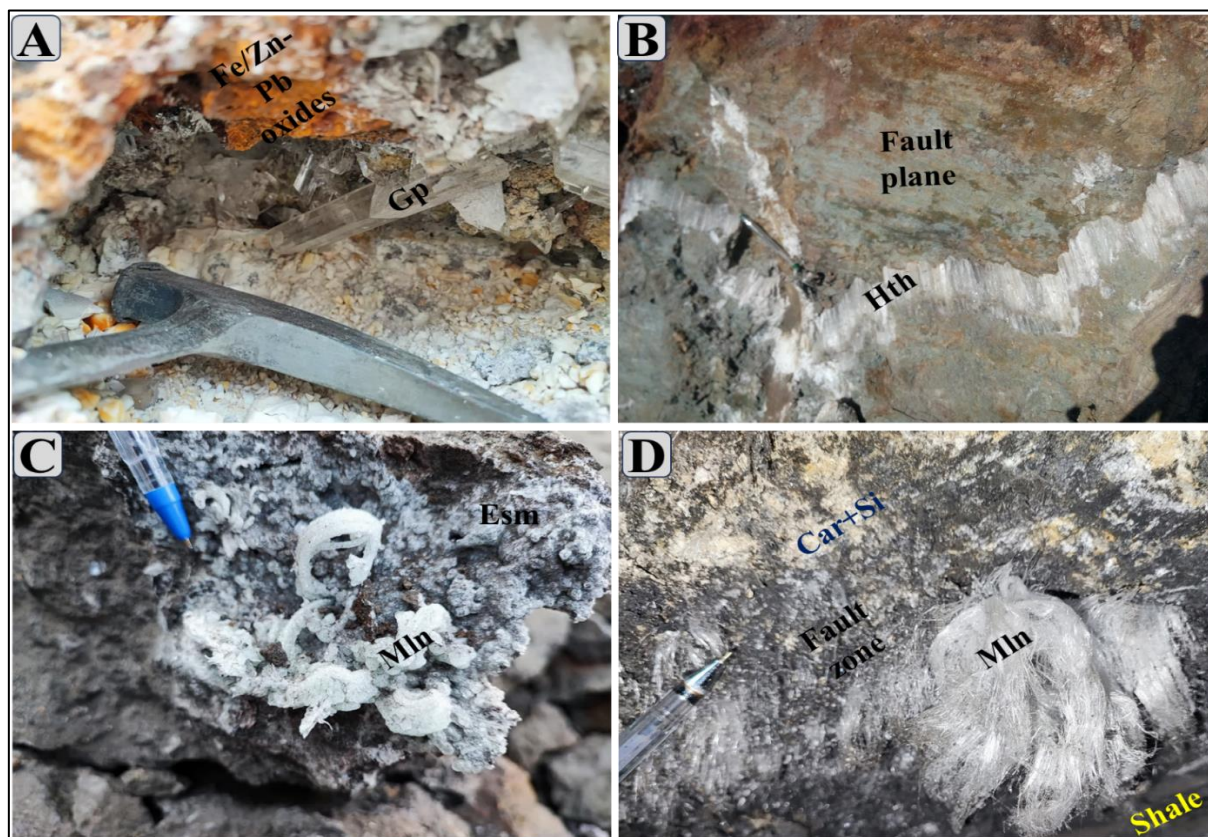
شکل ۱۱. تصویر BSE از رخدادهای سروزیت در زون اکسیدان با بقایایی از اسفالریت و گالن در کانسار کوشک. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cer: سروزیت، Sp: اسفالریت، Gn: گالن).

Fig. 11. BSE image of cerussite occurrences in oxidized zone as well as sphalerite and galena remnants in the Kushk ore deposit. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Cer: cerussite, Sp: sphalerite, Gp: galena).

با تونل‌های مزبور در معدن کوشک، تشکیل شده‌اند. سرعت بالای رشد رشته‌های ملانتریت در حالت اخیر و در محل انقطاع زون گسلی با دیواره تونل‌های زیرزمینی بیانگر رخداد این نوع کانی‌زایی پس از معدن‌کاری است. رشته‌های سوزنی متشکل از کانی‌های سولفاتی علاوه بر محل تقاطع گسل‌ها در داخل تونل‌های معدنی، در داخل حفره‌های موجود در درزه‌ها و زون‌های گسلی تشکیل شده‌اند.

سولفات‌های دیگر شامل ژاروسیت $(KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6)$ (شکل ۱۳- A و B) و آلونیت $(KAl_3(SO_4)_2(OH)_6)$ (شکل ۱۳- C و D) هستند که مورد اخیر اغلب به صورت ناتروآلونیت $(NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6)$ حضور دارد.

سولفات‌ها: حضور سولفات‌ها در کانسار سولفیدی کوشک، موضوعی قابل درک از نظر زایشی است. سولفات‌ها در این کانسار اغلب به صورت ژیس (و کمتر آپسومیت) در همراهی با سایر کانی‌های حاصل از فرایندهای اپی‌ژنتیک (شکل ۱۲- A)، هالوتریشیت $(FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O)$ به صورت لایه‌ای-رشته‌ای در زون‌های گسلی منقطع با شیل سیاه (شکل ۱۲- B) و همچنین سولفات‌های آمورف یا نیمه بلورین از جمله ملانتریت (شکل ۱۲- C و D) هستند. ملانتریت $(Fe^{2+}(H_2O)_6SO_4 \cdot H_2O)$ معمول‌ترین سولفات آهن در معادن دارای پیریت است که به صورت رخدادهای استالاکتیتی در تونل‌های معدنی و همچنین به صورت سوزن‌های بسیار نازک و رشته‌ای در محل انقطاع گسل‌ها

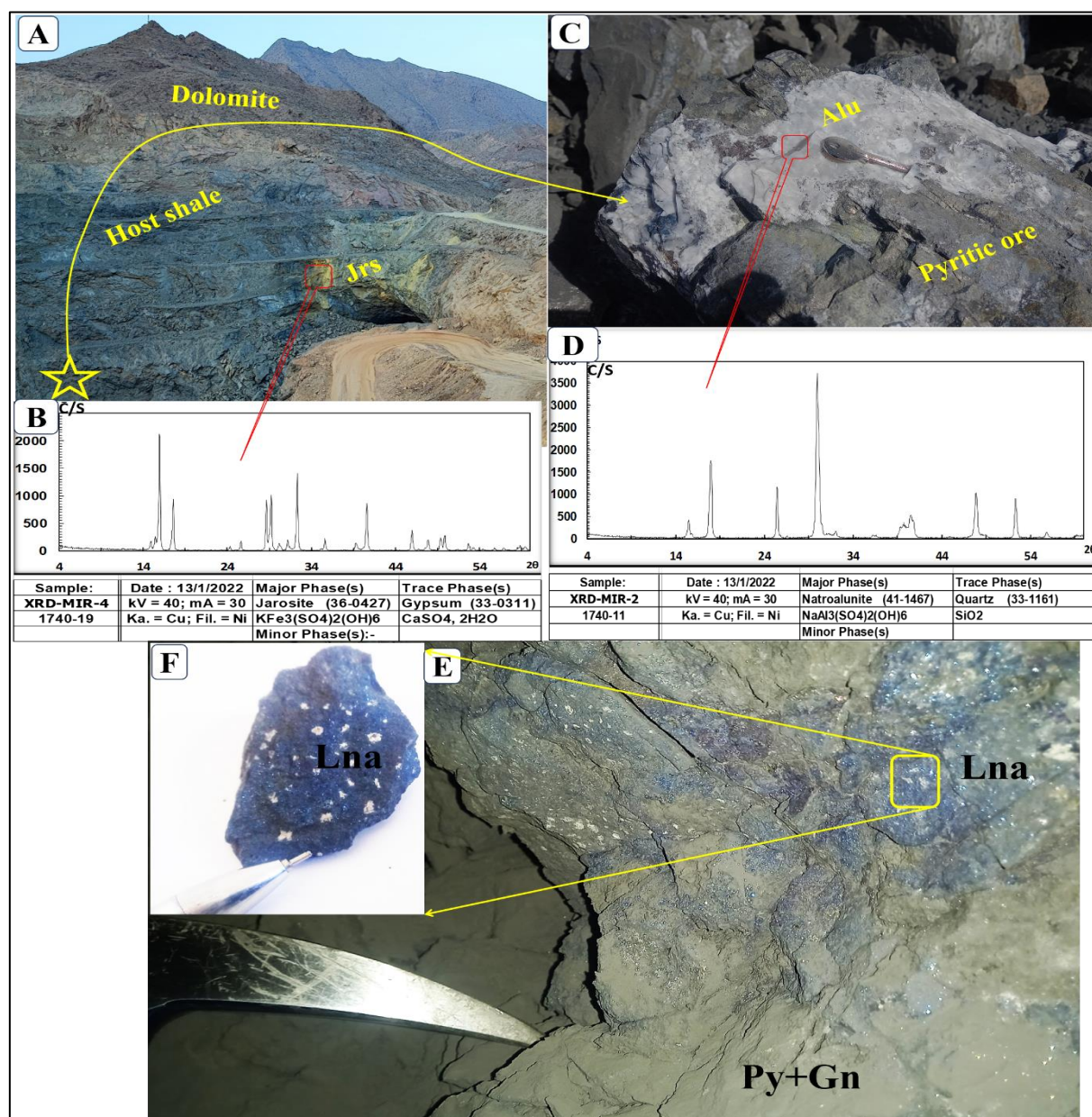


شکل ۱۲. A: رخداد سولفات‌ها (ژپس) و اکسیدهای آهن و روی-سرب در زون‌های شکستگی و سطح گسلی در کانسار کوشک، B: رخداد سولفات هالوتریشت در زون گسلی، C: رخداد ملانتریت در شکستگی و زون‌های گسلی و D: رخداد ملانتریت در یک زون گسلی که پیشتر با سیلیس و کربنات پر شده است. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gp: ژپس، Mln: ملانتریت، Esm: اپسومیت، Hth: هالوتریشت، Car: کربنات، Si: سیلیس).

Fig. 12. A: sulfates (gypsum), Fe and Zn-Pb oxide occurrences at fractured zones and fault planes in the Kushk ore deposit, B: occurrence of sulfate halotrichite at fault zone, C: melanterite occurrence at fractures and fault planes, and D: melanterite occurrence at a fault zone formerly filled with silica and carbonate. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Gp: gypsum, Mln: melanterite, Esm: epsomite, Hth: halotrichite, Car: carbonate, Si: silica).

است. بر اساس مشاهدات میدانی، ژاروسیت تنها کانی سولفات تشکیل‌شده در محیط‌های به شدت اکسیدان است و با کاهش پتانسیل اکسایش-احیای محیط، تشکیل ژپس و ناتروآلونیت و همچنین کانی‌های سوزنی نیمه بلورین سولفات، مجال تشکیل می‌یابند. لینارایت (سولفات آبدار مس و سرب)، معمول‌ترین کانی سولفاتی تشکیل‌شده در محل سامانه‌های گسلی در کانسنگ روی با عیار بالای سرب است (شکل ۱۳-E و F).

وابستگی تشکیل ژاروسیت به محیط میزبان شیل به ویژه در زون‌های گسلی محرز است. با این حال، تمایل به تشکیل در محیط‌های اکسیدان سطحی دارد؛ در صورتی که محل رخداد آلونیت در محیط‌های با حاکمیت شرایط اکسیدان و در محیط‌های عمیق‌تر است. در برخی از نقاط، این دو کانی با هم مشاهده می‌شوند و از نظر تقدم و تأخر، به نظر می‌رسد، ژاروسیت در بازه زمانی طولانی‌تری تشکیل می‌شود. بدون شک، شیل به عنوان سنگ منشأ سولفات برای رخداد این دو کانی اکسیدان مطرح



شکل ۱۳. A: رخداد ژاروسیت در زون‌های اکسیده محدود به ساختار در کانسار کوشک، B: نتیجه تجزیه و تحلیل XRD از کانی ژاروسیت نمونه منتخب، C: رخداد آلونیت در کانسنگ پیریتی متأثر از گسلش، D: نتیجه تجزیه و تحلیل XRD از کانی آلونیت نمونه منتخب، E: رخداد لینارایت بر روی سطوح غنی از گالن در محل شکستگی‌ها در نقاط نزدیک سامانه‌های گسلی کوچک و F: نمای نزدیک‌تری از لینارایت. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Jrs: ژاروسیت، Alu: آلونیت، Lna: لینارایت، Py: پیریت، Gn: گالن).

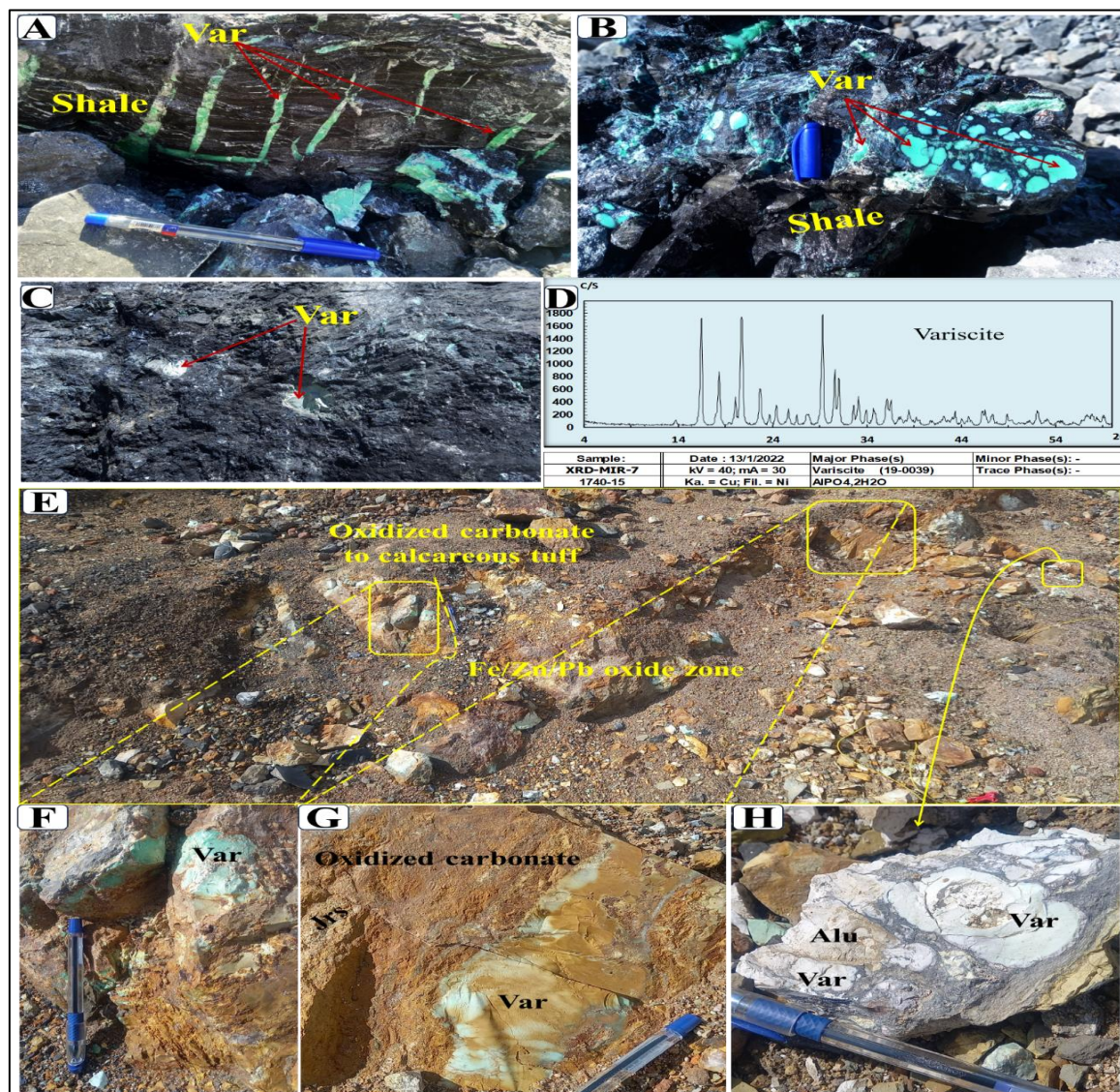
Fig. 13. A: jarosite occurrence at structure bound oxidized zones in the Kushk ore deposit, B: XRD pattern of jarosite in the representative sample analyzed, C: alunitic occurrence in pyritic ore affected by faulting, D: XRD pattern of alunitic ore in the representative sample analyzed, E: Linarite occurrence on surfaces enriched in galena in fractures close to fault systems, and F: a closer view of linarite. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Jrs: jarosite, Alu: alunitic, Lna: linarite, Py: pyrite, Gn: galena).

فسفات‌ها: دو کانی فسفاتی شاخص و منحصر به فرد در کانسار روی و سرب کوشک شامل واریسکیت و فسفوفیلیت هستند. واریسکیت در اثر برخورد آب‌ها یا سیالات دارای محتوای بالای گروه‌های فسفاتی با سنگ‌های با میزان بالای آلومینیم تشکیل می‌شود. این کانی با رنگ زیبایی آبی فیروزه‌ای متمایل به سبز تیره در رخنمون‌های موجود به صورت رگه‌ای (شکل ۱۴-A) و یا با سیمای لکه‌ای (شکل ۱۴-B) خودنمایی می‌کند؛ اگرچه به نظر می‌رسد که حالت اخیر معمولاً به دلیل پرشدگی فضاهای واکنش‌پذیر با سیال غنی از گروه‌های فسفاتی به وجود آمده است. واریسکیت از نظر ساختار کانی‌شناسی و ضعف در نگهداشت آب موجود در آن، کم‌کم به رنگ زرد و در نهایت به رنگ سفید می‌گراید (شکل ۱۴-C). در شکل ۱۴-D، طیف XRD کانی واریسکیت ارائه شده است. صورت عمومی رخداد واریسکیت در سنگ میزبان شیل است؛ اما در کانسار کوشک، این رخداد در سنگ میزبان کربنات اکسیده و همچنین کربنات‌های با سازنده‌های محدود توفی (شکل ۱۴-E و F) در سطوح صاف گسلی و شکستگی‌ها (شکل ۱۴-G) با همراهانی از آلونیت (شکل ۱۴-H)، مشاهده می‌شود. سیمای رخداد واریسکیت حتی در بررسی‌های SEM نیز ممکن است به صورت صدفی دیده شود (شکل ۱۵-A)؛ اما در بررسی‌های مزبور با بزرگ‌نمایی بیشتر، سامانه بلورین ارتوروامیک با سیمای رخداد سوزنی‌شکل واریسکیت به وضوح قابل تشخیص است. بر اساس نتایج به دست آمده در بررسی‌های SEM و تصویرهای BSE، کانی‌های واریسکیت دارای طیف ترکیبی از دو کانی واریسکیت ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و استرنگیت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) وابسته به گروه واریسکیت (شکل ۱۵-B) هستند. کانی واریسکیت می‌تواند به دیگر کانی‌های فسفات‌ها تجزیه‌شود. از معمول‌ترین کانی‌های حاصل از فروپاشی آن می‌توان به کانی کراندالیت (فسفات آبدار آلومینیم و کلسیم) اشاره کرد (شکل ۱۵-C).

یکی از ویژگی‌های قابل توجه در معدن کوشک، همراهی بخش میزبان کانه‌زایی واریسکیت با ساختارهای گسلی است. ساختارهای

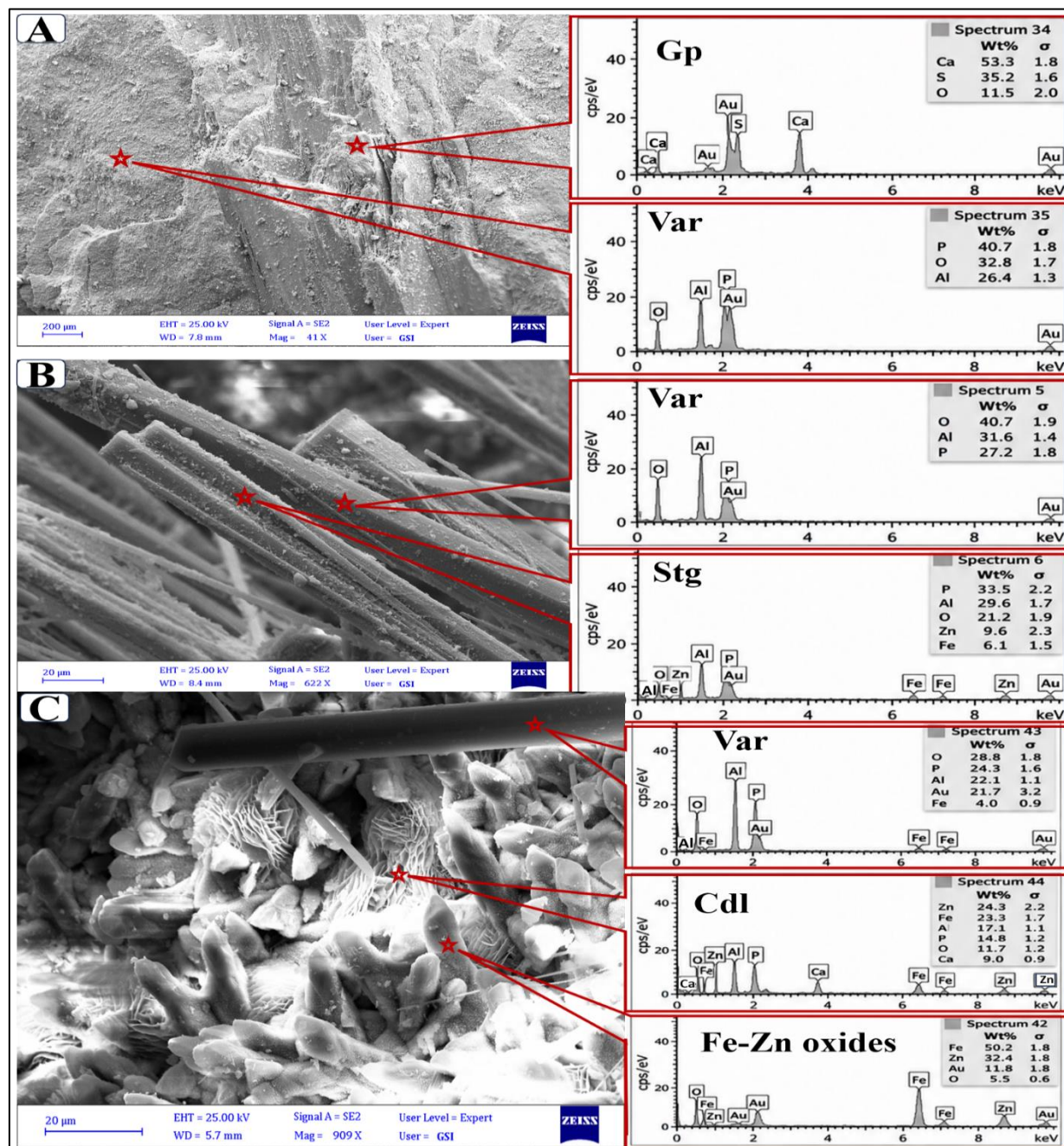
زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها نقشی بی‌بدیل به عنوان راهروهای انتقال‌دهنده سیالات ایفا می‌کنند و در صورت وجود عوامل زمین‌شیمیایی مورد نیاز برای انحلال و انتقال عناصر، به کانه‌زایی منجر می‌شوند. گسل‌ها به طور عام هم می‌توانند به عنوان راهروهایی برای انتقال سیال، نقش بازی کنند و هم اینکه با راهیابی به مناطق کم فشار، به گاززدایی از سیال حامل منجر شده و در محل خروج و راهیابی به محیط باز و روی سطح زمین، در ته‌نشست کانی‌ها موثر باشند. گسل اصلی میزبان کانه‌زایی در واقع همان گسل پهنو است که کانه‌زایی هم در شاخه اصلی آن و هم در شاخه‌های فرعی وابسته به آن (تا حد شمالی گسل کوشک) صورت گرفته است. سنگ میزبان کانه‌زایی نیز اغلب شیل است و به علت حجم زیاد سیال عامل کانی‌زایی و با تأمین آلومینیم مورد نیاز در منابع شیلی در فواصل زیاد، در سنگ‌های میکرودیوریتی و همچنین در واحدهای کربناتی و توفی نیز کانی‌زایی صورت گرفته است. مشاهدات صحرایی، رخنمون واریسکیت در بخش روباز معدن کوشک را به شکل گره‌ک توده‌ای بی‌شکل، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی نشان می‌دهد. جنبه دیگر اهمیت واریسکیت از نظر زمین‌شناسی در این کانسار، میزبانی آخرین فاز اسفالریت‌زایی است که به وضوح به صورت رگه‌های اسفالریت در زمینه واریسکیت، رخداد نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، پس از تشکیل واریسکیت، آلونیت، اسمیت‌زونیت و سیلیس، رخداد یک فاز سولفیدی تأخیری که به تشکیل اسفالریت در کانسار کوشک منجر شده است، مشهود است.

فسفوفیلیت: این کانی به رنگ آبی شفاف بسیار زیبا در محل‌های برونزد ساختارهای گسلی و شکستگی‌هایی که در متن کانسنگ روی حضور دارند، تشکیل شده است. این کانی یک فسفات آبدار روی است که با فرمول $\text{Zn}_2(\text{Fe, Mn})(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ در سامانه بلورین منوکلینیک متبلور می‌شود. این کانی بسیار نادر بوده و در مناطقی از جمله در بولیوی، آلمان و ایران (معدن کوشک) یافت شده است.



شکل ۱۴. A: کانی‌سازی واریسکیت نوع رگه‌ای در زون گسلی پهنو در کانسار کوشک، B: کانی‌سازی واریسکیت نوع پرکننده فضای خالی در زون گسلی پهنو در معدن کوشک، C: رنگ‌باختگی واریسکیت به عنوان سیمای غالب در مناطقی که به دلیل قرار گرفتن در معرض هوای آزاد و از دست‌دادن آب مولکولی رخ داده است، D: الگوی XRD کانی واریسکیت از کانسار کوشک، E: کانی‌سازی واریسکیت در سنگ میزبان کربنات اکسیده، F: نمای نزدیک‌تری از واریسکیت، G: رخداد واریسکیت با سطوح صاف در ریز گسل‌های موجود در میزبان کربناتی و H: رخداد واریسکیت آبگیری شده و آلونیت در زون اکسیدان. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Jrs: ژاروسیت، Alu: آلونیت، Var: واریسکیت).

Fig. 14. A: vein type variscite mineralization at the Pahnu fault zone in the Kushk ore deposit, B: open space filling type variscite mineralization at the Pahnu fault zone in the Kushk mine, C: variscite loss of color as the common aspect of variscite in localities where the loss of molecular water occurred due to exposing to water, D: XRD pattern of variscite mineral at the Kushk ore deposit, E: Variscite mineralization in the oxidized carbonate host, F: a closer view of variscite, G: variscite occurrence with slicken surface in minor fault zones in the carbonate host, and H: occurrence of dehydrated variscite and alunitic in the oxidized zone. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Jrs: jarosite, Alu: alunitic, Var: variscite).



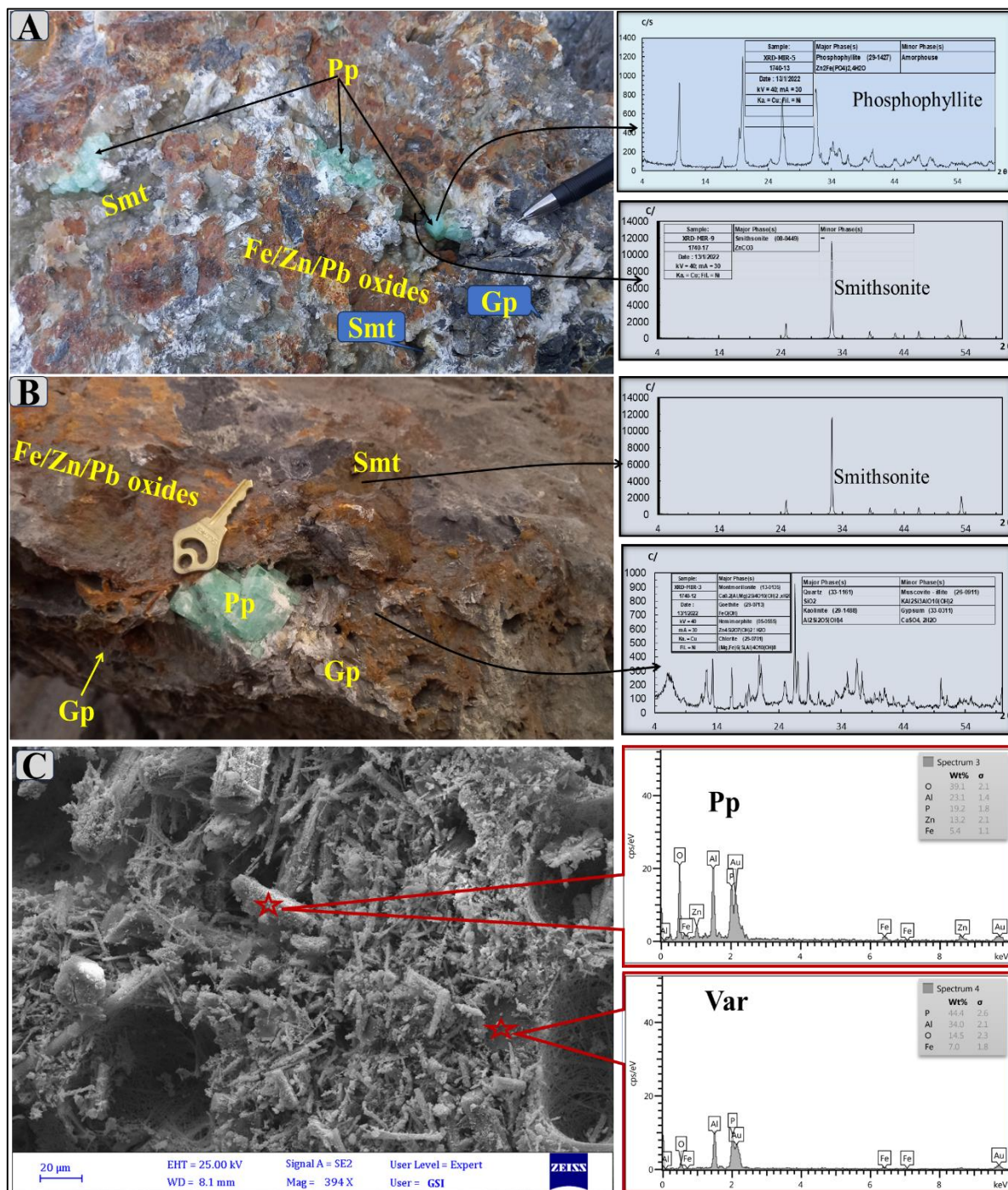
شکل ۱۵. A: تصاویر BSE از رخداد واریسکیت با سیمای صدفی هم‌یافت با ژپس در کانسار کوشک، B: تصاویر BSE از بلورهای ارتورومبیک واریسکیت و استرینگیت و C: بلور واریسکیت، بلورهای نازک کراندالیت با ساختار تیغه‌ای نازک و اکسیدهای بی‌شکل آهن و روی. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gp: ژپس، Var: واریسکیت، Stg: واریسکیت، استرینگیت، Cdl: کراندالیت).

Fig. 15. A: BSE photomicrographs of Variscite occurrence showing conchoidal fracture associated with gypsum in the Kushk ore deposit, B: BSE images of Variscite and strengite orthorhombic crystals, and C: Variscite crystal, thin tabular crandallite crystals and amorphous Fe-Zn oxides. Abbreviations after Warr (2021) and Whitney and Evans (2010) (Gp: Gypsum, Var: Variscite, Stg: Strengite, Cdl: Crandallite).

رخداد این کانی، وابستگی بسیار شدیدی به زمین‌شیمی چینه‌های مجاور و کنترل ساختاری دارد؛ به صورتی که برای تشکیل این کانی هم به گروه‌های فسفاتی و هم به سنگ‌های غنی از روی نیاز است. بر اساس بررسی‌های چینه‌شناسی و ساختاری، منشأ فسفات، همان افق ادیاکاریای متعلق به نئوپروتروزوئیک بالایی است که خود را از طریق سامانه‌های گسلی به کانسنگ روی (مخزن و منبع غنی از روی) رسانده و به تشکیل فسفوفیلیت در شکستگی‌های ساختاری منجر شده است (شکل ۱۶-A)؛ اگرچه منشأ اولیه خود این فسفات‌ها نیز ممکن است با منابع ماگمایی قدیمی‌تر ارتباط داشته باشد. به نظر می‌رسد که تنش‌نی سیالی که به تشکیل فسفوفیلیت منجر شده است، وابستگی شدیدی به تغییرات Eh و pH داشته است؛ زیرا این کانی اغلب در محل‌هایی تراکم بالا نشان می‌دهد که کانی‌های با بنیان کربناتی (از جمله اسمیت‌زونیت) نیز دارای رخداد قابل توجهی است. همچنین این کانی با ژپس، هم‌یافت بوده (شکل ۱۶-B) و به نظر می‌رسد که سیال عامل تشکیل فسفوفیلیت در ابتدا اسیدی بوده که با برخورد با محیط کربناتی از پیش موجود (اسمیت‌زونیت)، محتوای فسفاتی خود را آزاد کرده و این گروه‌های فسفاتی با روی موجود در سنگ که ابتدا اسفالریت بوده و در نهایت تبدیل به اسمیت‌زونیت شده، واکنش داده و فسفوفیلیت را به وجود آورده است. ممکن است این روابط زمانی بسیار فشرده‌تر نیز بوده باشد، یا اینکه سیال مزبور که غنی از بنیان فسفات بوده است، فقط کانسنگ سولفیدی اولیه را هدف قرار داده باشد و نتیجه برخورد آن سیال با کانسنگ غنی از اسفالریت، تشکیل کانی‌های برونزاد از جمله اسمیت‌زونیت، فسفوفیلیت و ژپس باشد؛ زیرا فسفوفیلیت با اسمیت‌زونیت نیز به وضوح هم‌یافت است. این شرایط بسیار به ندرت پیش می‌آید و همین عوامل پیچیده زمین‌شیمیایی و ساختاری در کنار هم و نیز محدودیت در تأمین منبع فسفات در بستر زمان، عامل تشکیل بسیار نادر این کانی در پوسته زمین است. هم‌یافتی واریسکیت و فسفوفیلیت از رخداد‌های قابل توجه در برخی از سامانه‌های گسلی در کانسار کوشک است. در شکل ۱۶-C، تصویر BSE از رخداد

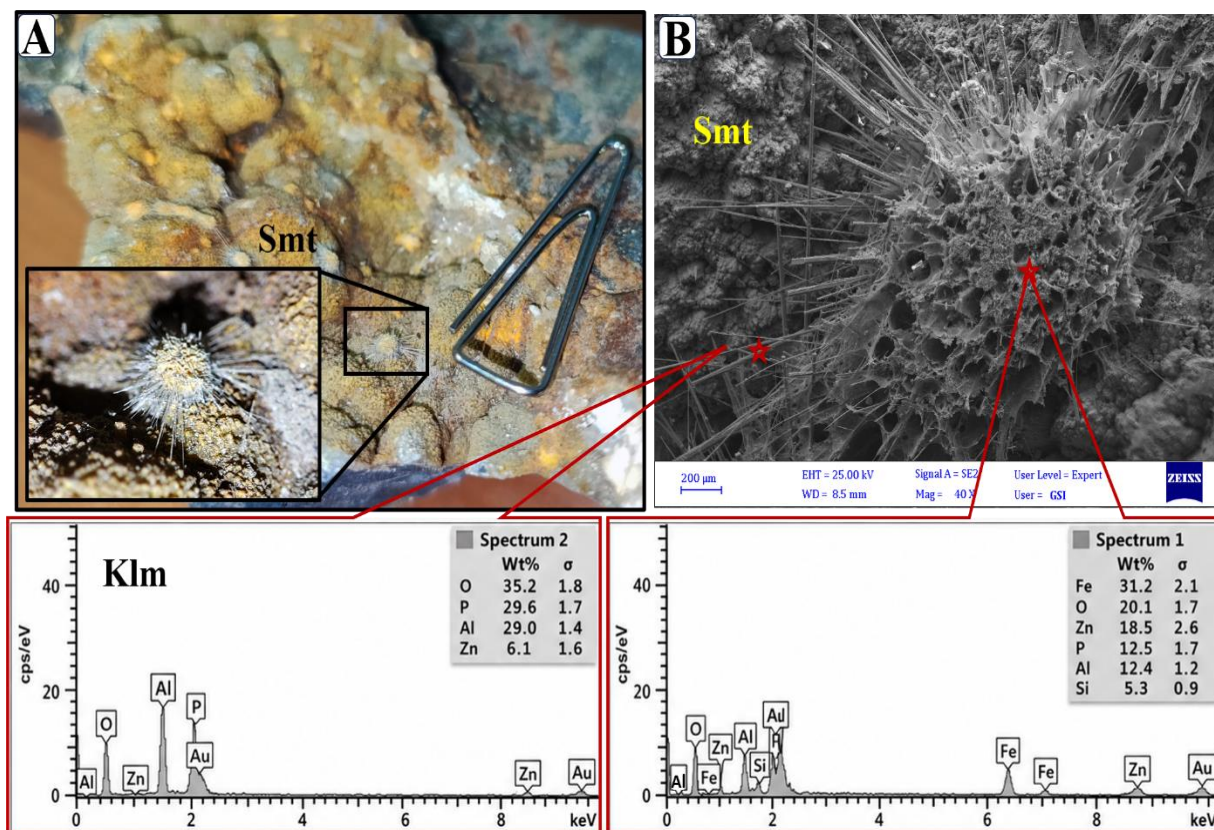
کانی‌های واریسکیت و فسفوفیلیت ارائه شده است. **کلیمانیت:** کلیمانیت یا هیدروفسفات آبدار آلومینیم و روی از جمله کانی‌های قابل توجه در مقادیر قابل مشاهده در سطوح اکسیده کانسنگ سولفیدی در کانسار کوشک است که ویژگی اصلی رخداد آن، سیمای سوزنی-شعاعی آن است که مرکز سامانه شعاعی را اکسیدهای روی و آهن با مقادیر متغیری آلومینات نیمه متبلور تشکیل می‌دهد (شکل ۱۷).

سیلیکات‌ها و سیلیس: تشکیل کانسار کوشک در یک حوضه کششی از مسائلی است که ارتباط نزدیکی با زایش ریزلایه‌ها، رگه‌ها و رگچه‌های سیلیسی در سنگ میزبان کانسار دارد. در افق‌های کم‌پایین کوشک، حضور ریزلایه‌های سیلیسی (Zand et al., 2021) مشهود است و تشکیل این ریزلایه‌ها که سیمای چرتی نیز دارند و همچنین رگه‌های سیلیسی (شکل ۱۸-A)، در ارتباط با محیط کششی کانسار (نوع سدکس) تعبیر می‌شود. از ویژگی‌های این رگه‌های سیلیکاتی در کانسار کوشک، میزبانی آخرین فازهای کانسنگ سولفیدی از جمله اسفالریت و گالن است (شکل ۱۸-B). آثار ثانویه دیگری از رخداد سیلیس و سیلیکات‌ها در فازهای کانه‌زایی وابسته به ساختار در کانسار کوشک مشاهده می‌شود که در ارتباط با مراحل پسا‌کانه‌زایی سولفیدی در این کانسار هستند. با این حال، سیمای اصلی تشکیل سیلیکات‌ها در کانسار کوشک را می‌توان تشکیل همی‌مورفیت در نظر گرفت که البته رخداد ضعیفی داشته و به صورت پچ‌های بلورین با مقاطع ارتورومبیک و منشعب از نقاط واحد، بر روی زمینه اسمیت‌زونیت تشکیل شده‌اند (شکل ۱۸-C و D). به نظر می‌رسد که منشأ سیلیس، آزادسازی سیلیس به صورت اسید سیلیسیک (H_4SiO_4) حاصل از افزایش pH در محیط بوده باشد؛ زیرا رخداد سیلیکات در این بین چندان زیاد نیست و به طور قابل تشخیصی، تشکیل سیلیکات روی در زمینه اسمیت‌زونیت در مقادیر بسیار کم می‌تواند مقدار کافی اسید سیلیسیک در اختیار بگذارد.



شکل ۱۶. A: رخداد فسفوفیلیت در شکستگی‌ها و صفحه‌های گسلی موجود در کانسنگ پریار روی در معدن کوشک، B: تشکیل فسفوفیلیت در شکستگی‌هایی که دارای ژیس، کربنات‌ها و اکسیدهای روی و کمتر اکسید آهن هستند و C: هم‌یافتی کانی‌های واریسکیت و فسفوفیلیت. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) (Pp: فسفوفیلیت، Var: واریسکیت، Smt: اسمیت‌زونیت، Gp: ژیس).

Fig. 16. A: Phosphophyllite in fractures and fault plains hosted in high grade ore in the Kushk mine, B: phosphophyllite formation in fractures having gypsum, Zn carbonates and oxides and less Fe oxides, and C: association of variscite and phosphophyllite. Abbreviations after Warr (2021) (Pp: phosphophyllite, Var: Variscite, Smt: smithsonite, Gp: gypsum).



شکل ۱۷. A: تجمع کانی‌های سوزنی شعاعی در زمینه کربنات روی در کانسار کوشک و B: تصویر BSE از کانی سوزنی-شعاعی کلیمانیت با مرکزیت اکسیدهای روی و آهن. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Smt: اسمیت‌زونیت، Klm: کلیمانیت).

Fig. 17. A: accumulations of radial needle shaped minerals within the Zn carbonate host in the Kushk ore deposit, and B: BSE photographs of kleemanite needle-radial mineral centered by Zn and Fe oxides. Abbreviations after Warr (2021) (Smt: smithsonite, Klm: kleemanite).

کربناتی به آب‌های اکسیده (سولفات) است (شکل ۱۹-C).

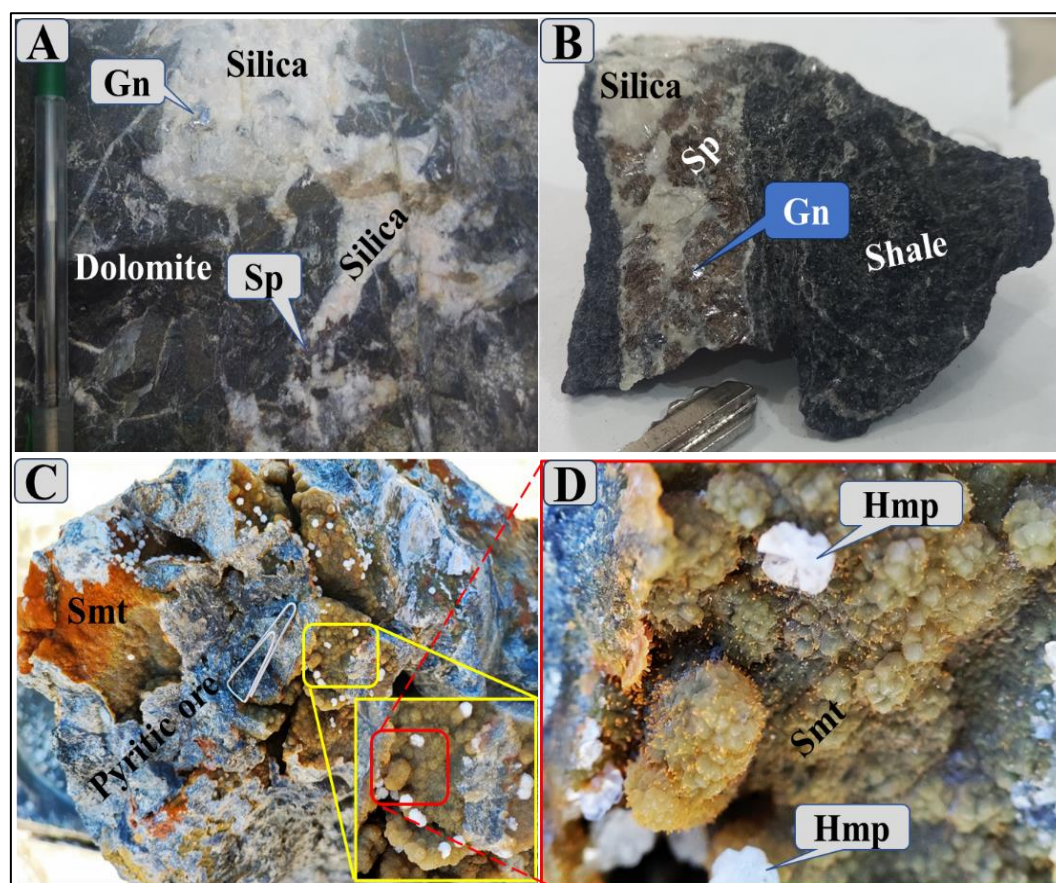
بحث

کانسار کوشک از جمله کانسارهای نوع سدکس در رده جهانی است و به عنوان کانساری با محتوای کانسننگ سولفیدی شناخته شده است. این کانسار در منطقه‌ای از ایران مرکزی قرار دارد که میزبان رخنمون قدیمی‌ترین واحدهای شناخته شده در پوسته ایران است. این پی‌سنگ متشکل از واحدهای آتشفشانی-رسوبی نیمه‌دگرگون تا دگرگون با درجه‌هایی تا شیت سبز است. کانسار کوشک در بخشی از زون تکتونوماگمایی ایران مرکزی

اکسیدها: اکسایش فازهای کانی‌شناسی پیشین، از جمله ویژگی‌های محرز در کانسار کوشک است که به ویژه در زون‌های گسلی و همچنین محل برونزد توده‌های کانسننگ دیده می‌شوند. اکسیدهای آهن، روی، سرب و منگنز از جمله کانی‌های اکسیدی مهم در این کانسار هستند. پوشش‌های اکسیدی به ویژه در معدن روباز و نیز در خارج از محوطه فعال معدن در ناحیه درگزين (شمال معدن فعال)، دارای رخنمون‌های متعددی هستند. تبدیل کربنات عناصر پایه (شکل ۱۹-A) به اکسید (شکل ۱۹-B) از جمله پدیده‌های رایج در زون‌های کربناته است که شدت گسترش آن وابسته به دسترسی سامانه‌های گسلی فعال در مسیر کانسننگ

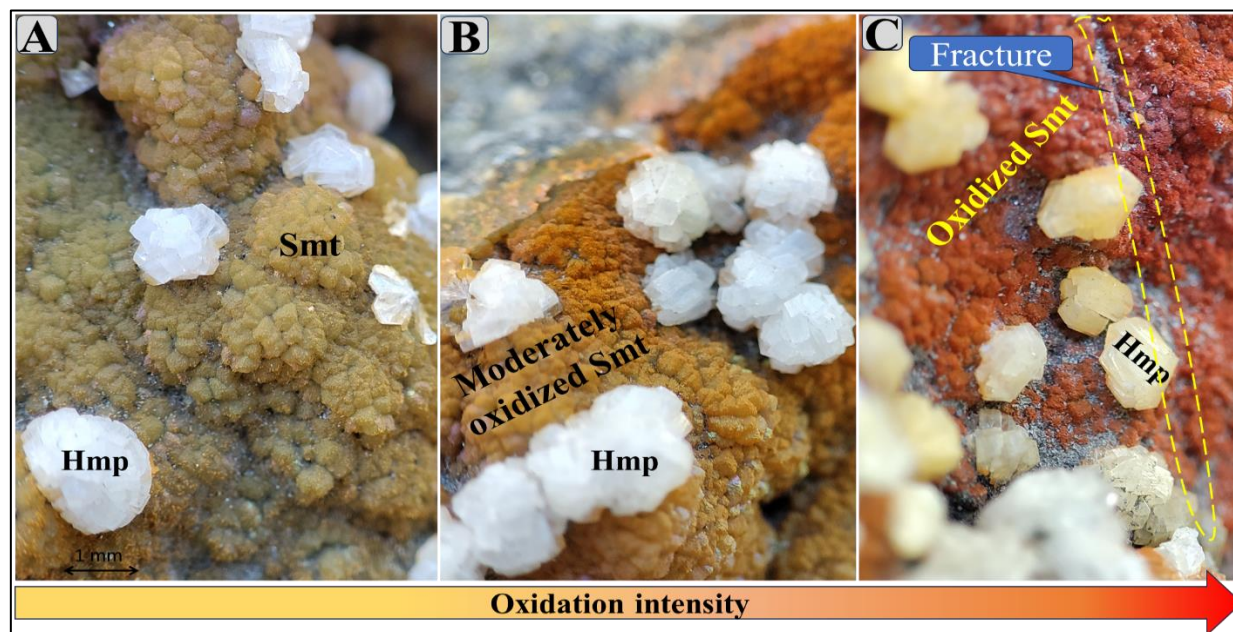
بخش‌های وسیعی از ابرقاره گندوانا، متحمل چین‌خوردگی و دگرگونی ناحیه‌ای شده است. گسل‌های مرتبط با محیط ریفت، شامل دومین فاز از گسلش اصلی منطقه هستند. این فاز به کانه‌زایی روی و سرب در سنگ میزبان شیل منجر شده است. فرایندهای غالب درگیر در رخداد کانه‌زایی عناصر پایه در این کانسار اغلب یکسان بوده و در این زمینه چندین پژوهش انجام شده است (Rajabi et al., 2020).

قرار گرفته است که میزبان یک محیط دیرینه ریفتی طی پروتروزوئیک پسین - کامبرین پیشین بوده است. بنابراین، زمین‌شیمی اولیه محیط تشکیل کانسار وابسته به فرایندهای زمین‌شیمیایی در محیط‌های ریفتی هستند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، تا کنون سه فاز ساختاری عمده را می‌توان برای محیط زمین‌شناختی تشکیل کانسار کوشک در نظر گرفت. گروهی از ساختارها که موسوم به ساختارهای کهن پیشاریفتی هستند، مربوط به قبل از کوه‌زایی پان‌آفریکن می‌شوند که طی آن،



شکل ۱۸. A: رگه‌های سیلیسی در سنگ میزبان دولومیت در کانسار کوشک، B: کانه‌زایی اسفالریت و گالن در میزبان رگه سیلیسی که در سنگ میزبان شیل تزریق شده است، C و D: تشکیل همی مورفیت بر بسترهای اسمیت زونیت. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Hmp: همی مورفیت، Smt: اسمیت زونیت، Sp: اسفالریت، Gp: گالن).

Fig. 18. A: Silicic veins within the dolomite host rock in the Kushk ore deposit, B: mineralization of sphalerite and galena within the silicic vein injected to the shale host, C and D: hemimorphite formed on the smithsonite host. Abbreviations after Warr (2021) (Hmp: hemimorphite, Smt: smithsonite, Sp: sphalerite, Gp: galena).



شکل ۱۹. A: اسمیت‌زونیت تشکیل شده در فضاهای خالی در سامانه‌های گسلی در کانسار کوشک، B: اکسایش با شدت متوسط اسمیت‌زونیت به اکسیدهای روی و C: تشدید اکسایش روی در مجاورت شکستگی‌های وابسته به سامانه‌های گسلی. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) اقتباس شده است (Smt: اسمیت‌زونیت، Hmp: همی‌مورفیت).

Fig. 19. A: Smithsonite formed in open spaces on fault systems in the Kushk ore deposit, B: smithsonite moderately oxidized to Zn oxides, and C: intensity of Zn oxidation close to fractures related to fault systems. Abbreviations after Warr (2021) (Smt: smitsonite, Hmp: hemimorphite).

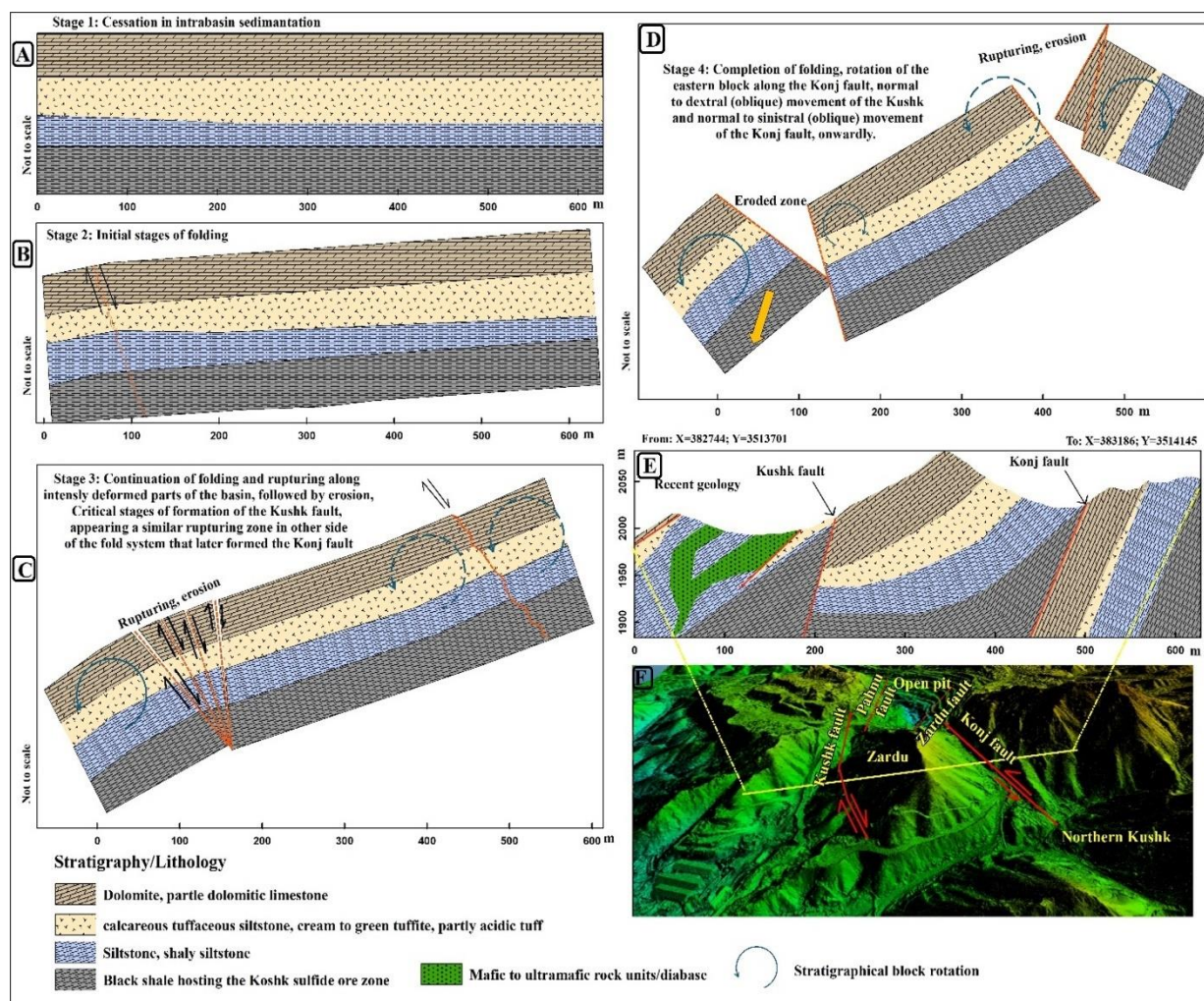
تشکیل فازهای سولفیدی اولیه از جمله پیریت، اسفالریت و گالن حاکم است. تا کنون چندین پژوهش پایه برای بررسی کانه‌زایی و زمین‌شناسی کانسار کوشک، انجام شده است (RTZ, 1972; Rajabi et al., 2020). از مهم‌ترین عوامل تغییر در پایایی شرایط تشکیل کانسارها می‌توان به عملکرد سامانه‌های گسلی اشاره کرد که به پویایی مجدد محیط‌های تشکیل کانسنگ در نتیجه فراهم کردن عوامل جدید از جمله ایجاد راهروهای دسترسی سیالات اکسیدان در سامانه‌های سدکس، حفره‌های محل خروج گازهای اسیدی و در نتیجه کاهش شرایط اسیدی حاکم بر محیط و همچنین ایجاد فضاهای جدید برای تشکیل کانی‌های پس‌سولفیدی منجر می‌شود. پویایی زمین‌ساخت در حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک از جمله کنش‌های زمین‌شناختی

تکوین ساختاری-زمین‌شیمیایی در کانسار کوشک از تشکیل کانسنگ سولفیدی تا پیدایش فازهای محدود بر ساختار

در مورد ارتباط مستقیم ساختار-زمین‌شیمی در سامانه‌های گسلی فاز اول، اطلاعات چندانی در دست نیست و فقط می‌تواند به نقش تکامل زمین‌شیمیایی سامانه‌های گسلی عمیق بر ماگماهای جای گیر شده در اعماق پوسته قاره‌ای محدود شود که ممکن است در دوره‌های متأخر نقش منشأ فلزهای پایه را بازی کرده باشند. گسل‌های فاز دوم ارتباط مستقیمی با فاز ریفتی دارند که در این فاز، کانه‌زایی روی و سرب در سنگ میزبان شیلی تشکیل شده است. در مورد شرایط تشکیل کانسنگ سولفیدی در کانسار کوشک، شرایط زمین‌شیمیایی خاصی می‌توان در نظر گرفت، از جمله حاکمیت شرایط احیایی و اسیدی که به طور معمول برای

محسوس در بازه‌های زمانی طولانی پس از تشکیل کانسار کوشک است که به ایجاد پیچیدگی‌های چینه‌شناختی و ساختاری در محیط میزبان کانسار مزبور و شکل‌گیری سیمای زمین‌شناسی کنونی آن منجر شده است. همان‌گونه که قبل از این اشاره شد، انطباق ساختارهای گسلی با چین‌خوردگی مشهود در ناحیه مورد بررسی، از موارد قابل توجه از نظر زمین‌شناسی ساختاری است. به عنوان مثال، شکل‌گیری گسل کوشک در ارتباط با پویایی حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک است که تکوین چین‌خوردگی در این ناحیه به گسلش در واحدهای چینه‌شناختی و گسیختگی در حوضه مزبور منجر شده است که میزبان کانه‌زایی اصلی روی و سرب در سنگ میزبان شیل است. همچنین در پیروی از بسیاری از ساختارهای گسلی پسا کانه‌زایی، مسیرهای آبراه‌ای طی زمان شکل گرفته‌اند. شکل‌گیری این مسیرها اغلب وابسته به فرسایش و تخلیه جرمی سازنده‌های سنگی موجود در محیط‌های گسیخته در زون‌های گسلی هستند. بر اساس مدل **شکل ۲۰**، رسوب‌گذاری در حوضه کوشک از شیل میزبان کانسنگ تا دولومیت متعلق به سری ریزو صورت گرفته است (**شکل ۲۰-A**). حرکت‌های نخستین منجر به گسلش، به دنبال حرکت‌های اولیه چین‌خوردگی ضعیف در توالی آتشفشانی-رسوبی در یال غربی **شکل ۲۰-B** آغاز شده است. چرخش بلوکی و تداوم چین‌خوردگی مزبور در موقعیت مورد نظر به تشکیل نخستین آثار گسل کوشک و گسیختگی کل توالی چینه‌شناسی در این ناحیه منجر شده است. این پدیده با یک چرخش بلوکی جدید در سمت راست **شکل ۲۰-C**، یعنی نخستین حرکت‌های منجر به شکل‌گیری گسل کنج، دنبال شده است. تکامل چین‌خوردگی و گسلش همراه با آن در **شکل ۲۰-D** و فرسایش متناظر با آن، به پیدایی نخستین شکل زمین‌ریخت‌شناسی دو ناحیه متأثر از گسلش‌های یادشده یعنی دره مجاور گسل کوشک و دره مجاور گسل کنج منجر شده است. به دنبال این پدیده و با شروع دوره ثبات ساختاری، رخداد یک چرخش راست‌گرد بلوکی ناقص در سمت چپ بلوک میانی و حرکت ضعیف بلوکی رو به پایین و عقب رونده بلوک غربی در **شکل**

۲۰-D، به رخداد حرکتی شیب‌لغز ضعیف در صفحه گسلی کوشک و به دنبال آن شروع حرکت‌های راست‌گرد منجر می‌شود که تا شکل‌گیری گسل پهنو در آن سوی کانسار (و با یک چرخش به سمت شمال‌شرق) تداوم می‌یابد. به عبارت دیگر، شکل‌گیری گسل کوشک در ابتدا با حرکت‌های شیب‌لغز شروع شده و در نهایت با حرکت‌های راست‌گرد (در نتیجه حرکت‌های مورب)، تداوم یافته است. در نهایت، چهارچوب ساختاری امروزی کانسار کوشک به صورتی که در **شکل ۲۰-E** مشاهده می‌شود، تکوین می‌یابد. در **شکل ۲۰-F** نیز نمای زمین‌ریخت‌شناسی کانسار کوشک ارائه شده است. گسل‌های پسا کانه‌زایی به طور کلی تحت تأثیر سه فاز متمایز شکل گرفته‌اند که تقدم و تأخر آنها به وضوح قابل تشخیص است. فاز قدیمی‌تر به تشکیل گسل کوشک (با سازوکار شیب‌لغز معکوس به واسطه مدل چرخش بلوکی در **شکل ۲۰** و شواهد چینه‌شناسی روی زمین) منجر شده است که به عنوان گسل قطع‌کننده و حد نهایی ماده معدنی (بر اساس داده‌های موجود تا کنون) در این محدوده شناخته می‌شود. در پی آن (و پس از یک مرحله فعالیت ضعیف شیب‌لغز نرمال)، فاز بعدی سبب ایجاد حرکت‌های امتدادلغز راست‌گرد در گسل کوشک (که در فاز قبل تشکیل شده بود) و شکل‌گیری متأخر گسل‌های زردو و پهنو شده است که هر دو ماهیتی راست‌گرد دارند و طی فعالیت آنها، توده معدنی دچار انفصال و دستخوش جابه‌جایی شده است (حد نهایی گسل کوشک به سمت شمال معدن روباز، به موازات گسل پهنو قرار می‌گیرد). در نهایت، در فاز پایانی تنش‌ها، گسل کنج به عنوان اصلی‌ترین ساختار این مرحله به صورت یک گسل چپ‌گرد شکل گرفته است که در اثر فعالیت آن، گسل‌های زردو و پهنو نیز دستخوش جابه‌جایی شده‌اند (**شکل ۷**). حرکت‌های شیب‌لغز گسلی کنج مطابق الگوی **شکل ۲۰** هم‌زمان با (یا با فاصله‌ای اندک از) گسل کوشک صورت گرفته است؛ اما حرکت چپ‌لغز آن به وضوح پس از عملکرد راست‌گرد گسل‌های کوشک، زردو و پهنو، صورت گرفته است.



شکل ۲۰. تکوین ساختاری و ارتباط بین چین‌خوردگی و گسلش پسا‌کانه‌زایی در حوضه آتشفشانی - رسوبی کوشک؛ A: رسوب گذاری اولیه در حوضه آتشفشانی - رسوبی کوشک از شیل میزبان کانسنگ تا افق دولومیتی متعلق به سری ریزو، B: حرکت‌های ساختاری اولیه (چین‌خوردگی ضعیف) منجر به گسلش در یال غربی توالی یادشده، C: تداوم چین‌خوردگی و گسلش معکوس در محدوده میزبان گسل کوشک که با گسیختگی همراه بوده و با فرسایش دنبال شده است. همچنین چین‌خوردگی ضعیف به گسلش در یال شرقی توالی یادشده و در نهایت شکل‌گیری گسل کنج در دوره‌های متأخر منجر شده است، D: اتمام چین‌خوردگی و فرسایش در زون گسیخته، تداوم گسلش و نخستین حرکت‌های محدود (و ضعیف) شیب‌لغز نرمال گسل کوشک (پیکان نارنجی) که با حرکت‌های راست‌گرد دنبال شده است و همچنین اتمام گسیختگی ناحیه شکل‌گیری گسل کنج، تشکیل سیمای امروزی گسل کنج و سرانجام شروع حرکت‌های چپ‌گرد آن، E: زمین‌شناسی امروزی حوضه کوشک و F: زمین‌ریخت‌شناسی امروزی کانسار کوشک به همراه محل مقطع انتخاب شده

Fig. 20. Structural development and the relationship between folding and post-mineralization faulting in the Kushk volcano-sedimentary basin. A: initial sedimentation in the Kushk volcano-sedimentary basin from the host shale to the dolomite horizon of the Rizu series, B: initial structural movements (weak folding) resulting in faulting in the western limb of the sequence mentioned, C: continuation in folding and reverse faulting in area hosting the Kushk fault associated with rupturing and followed by erosion, and moreover, the weak folding resulted in faulting in the eastern limb of the sequence mentioned and finally appearing the Konj fault, onwardly, D: cessation of folding, erosion within the ruptured zone, continuation in faulting and the initial limited (and weak) normal dip slip movements of the Kushk fault (orange arrow) followed by dextral movements and also cessation of rupturing in the area hosting the Konj fault, the recent appearance of the Konj fault and finally initiation of its sinistral movements, E: the recent geology of the Kushk basin, and F: the recent morphology of the Kushk ore deposit marked by the direction of the section selected

در مورد شرایط تشکیل کانسنگ سولفیدی در محیط رسوبی کانسار کوشک، رجبی و همکاران (Rajabi et al., 2020)، به بررسی محیط زمین‌شناسی تشکیل، زمین‌شیمی و فازهای سولفیدی حاصل از حاکمیت شرایط اولیه کانسنگ پرداخته‌اند. با این حال و نظر به تغییرات پساکانه‌زایی سولفیدی و در پیروی از تغییرات زمین‌ساختی و ساختاری و در نتیجه قرارگیری کانسنگ سولفیدی در برابر عوامل دیگر (و جدید)، از جمله سیالات متحرک در سامانه‌های گسلی، هوای آزاد و همچنین تغییرات رژیم کششی به محیط‌های ترافشاری یا حتی تراکششی، تغییرات پساکانه‌زایی به صورت تشکیل کانی‌های کربناتی، فسفاتی، سولفاتی و اکسیدی، بروز کرده است. کانه‌زایی پسا سولفیدی در ارتباط با گسلش فاز سوم رخ داده است که شامل یک مرحله گسلش شیب‌لغز همراه با چین‌خوردگی، یک مرحله راست‌گرد اولیه (حرکت‌های گسل‌های کوشک، زردو و پهنو) و یک مرحله گسلش چپ‌گرد نهایی (گسل کنج) است. کربنات‌ها از مهم‌ترین فازهای کانی‌شناختی پسا سولفیدی محدود بر ساختار در کانسار کوشک هستند که با سیمای غالب سنگ میزبان متخلخل با رویه‌های اسمیت‌زونیتی مشخص می‌شوند. به نظر می‌رسد که تخلخل موجود در این سنگ حاصل گاززدایی از سیال موجود در زون گسلی باشد. به این صورت که خروج گاز CO_2 از سیال موجود در زون گسلی به افزایش pH و در نتیجه ته‌نشینی کربنات روی به صورت اسمیت‌زونیت منجر می‌شود. حضور سنگ میزبان دولومیتی (شیل کربناتی تا دولومیت پریپریت)، از عوامل تأمین کربنات در سیال موجود در زون گسلی دانسته می‌شود. بین شدت تخلخل و مقدار حجمی کانه‌زایی اسمیت‌زونیت، ارتباطی واضح و مستقیم وجود دارد. افزایش تخلخل (شکل ۱۰) به واسطه خروج CO_2 از سنگ و کاهش محلی جرم است. کربنات روی در برخی از موارد در مراحل متأخر، متحمل اکسایش شده و با گونه‌های کانیایی اکسید روی، پوشانده شده است. فسفات‌ها از دیگر گروه‌های کانیایی تشکیل شده در زون‌های گسلی هستند. رخداد در امتداد یک زون گسلی واحد، کنترل ساختاری محرز، زون‌بندی مرتبط با هم و نیز

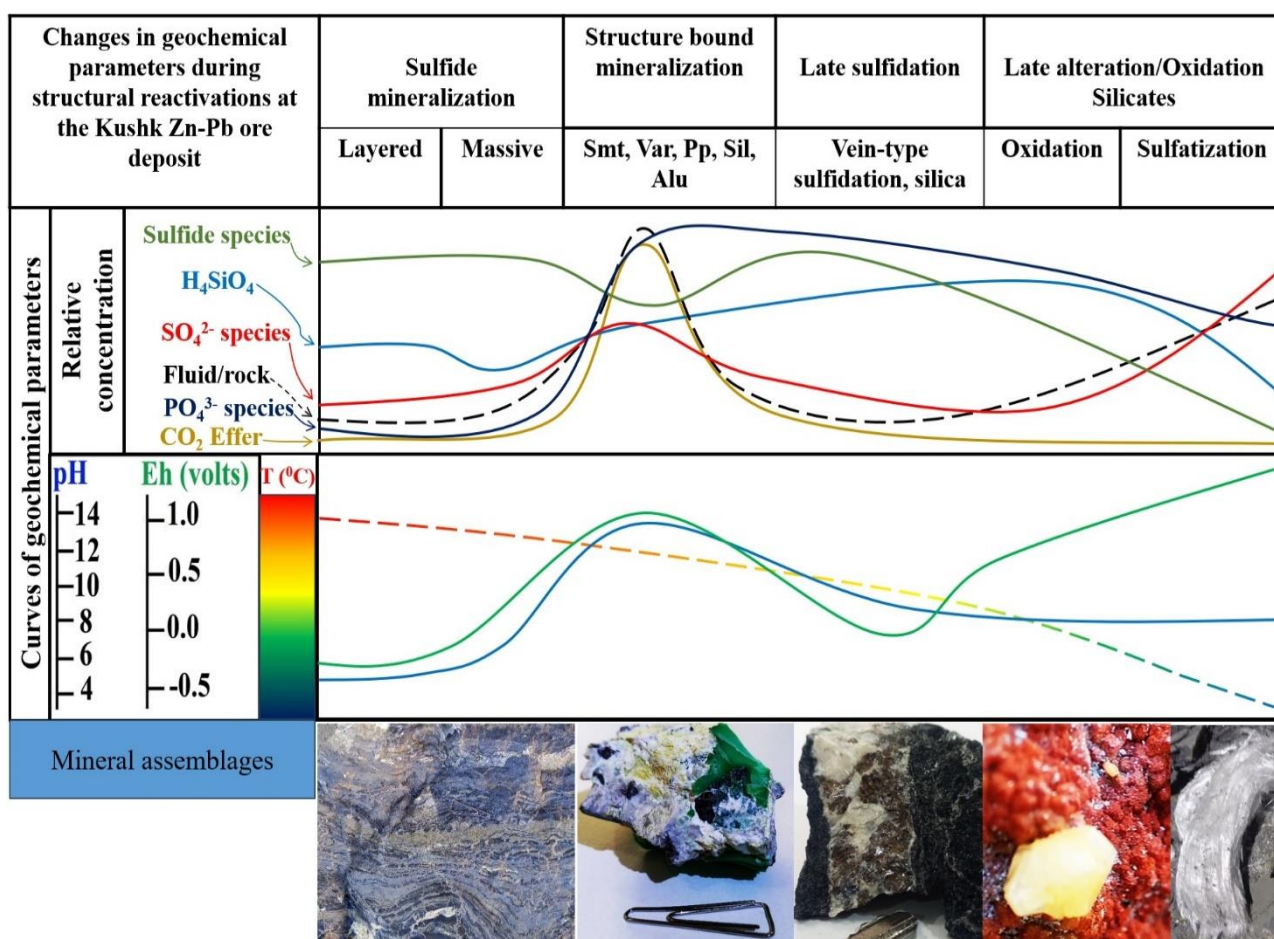
تشکیل نوع کانی با بنیان فسفاتی (واریسکیت، فسفوفیلیت کراندالیت یا کلیمانیت) در وابستگی به جنس سنگ میزبان بیانگر آن است که سیال عامل تشکیل واریسکیت، همان سیال عامل تشکیل فسفوفیلیت است. سیال فسفات‌دار مزبور در برخورد با شیل‌های کم‌عیار یا توف (به عنوان منابع غنی از آلومینیم) کانی واریسکیت و در برخورد با کانسنگ روی (منبع روی)، کانی فسفوفیلیت را تشکیل داده است. سولفات‌ها نیز از دیگر کانی‌های پسا سولفیدی در کانسار کوشک هستند که تنوع رخدادی بالایی نشان می‌دهند. این گروه از کانی‌ها در صفحه‌های گسلی شاخص، زون‌های گسلی خرد شده و تونل‌های معدنی به عنوان محل رخداد جوان‌ترین فاز سولفات‌زایی به صورت قندیل‌های آویزان ملانتریت در تونل‌های معدن زیرزمینی مشاهده می‌شوند. کانسار کوشک به عنوان یک کانسار تقریباً تمام نمای سولفید توده‌ای (لایه‌ای و توده‌ای) در زمین‌شناسی اقتصادی ایران مطرح است؛ اما کانه‌زایی نامعمول فسفات‌ها در این کانسار نیز از جمله موارد قابل بررسی است که به شکل دو کانی غالب واریسکیت و فسفوفیلیت، نمود دارد. نامعمول بودن رخداد این کانی‌ها یا هر کانه فسفاتی دیگری به مسئله منشأ فسفر در این کانسار بر می‌گردد. پژوهش‌های ارزشمندی در این منطقه بر روی منشأ فسفر در کانسارهای مختلف (مگنتیت-آپاتیت و روی و سرب نوع سدکس) انجام شده است. به طور کلی، چند منشأ برای فسفر در کار پژوهشگران مختلف مشاهده می‌شود. یکی منشأ ماگمایی که در آن فسفر از ماگمای مادر منشأ کانسارهای مگنتیت-آپاتیت منطقه تأمین شده است (Mokhtari et al., 2013). بر اساس محسنی و آفتابی (Mohseni and Aftabi, 2012) و آفتابی و همکاران (Aftabi et al., 2009)، منشأ فسفر در منطقه آهن‌خیز بافق، از دولومیت‌های سازند سلطانیه به سن پرکامبرین پسین است. با این حال، عضوهای دولومیتی هم‌ارز این سازند تقریباً بدون میزان فسفر قابل توجه در حوضه رسوبی کوشک هستند؛ اما واحد شیلی میزبان کانسنگ و سیلت‌سنگ روی آن، که درست زیر دولومیت میانی سازند سلطانیه قرار گرفته است، به عنوان منبع اصلی فسفر در

حوضه رسوبی کوشک در نظر گرفته می‌شود. محتوای فسفر بالایی که در این لایه رسوبی به صورت هم‌زاد ته‌نشین شده است، بدون هیچ‌گونه ابهامی، در ارتباط با فعالیت زیستی منحصر به فرد آن یعنی گونه‌های فسیلی ادیاکاریا دانسته می‌شود؛ اگرچه منشأ اولیه فسفر در این محیط‌ها نیز به همان فعالیت‌های برون‌دیمی قدیمی وابسته است. به طور کلی، عیار فسفر در این لایه بیشترین مقدار را در بین سایر واحدهای رسوبی در حوضه رسوبی کوشک دارد و در بالا و به ویژه پایین لایه سیلت‌سنگ در مجاورت گسل‌ها و سامانه‌های شکستگی که از یک سو به لایه سیلت‌سنگ مزبور ارتباط دارند، به طور کاملاً واضح و با شدت زیاد نسبت به محیط اطراف بیشتر است. از نظر کانی‌شناسی نیز با حضور کانی‌های واریسکیت و فسفوفیلیت در شیل زیرین (میزبان کانسنگ) به آسانی قابل دریافت است و فسیل‌های ادیاکاریا در رخنمون‌های مختلف افق بالایی لایه شیلی میزبان کانسنگ و سیلت‌سنگ به وضوح قابل مشاهده هستند و به عنوان مرز پرکامبرین - کامبرین در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب می‌توان اظهار داشت که منشأ اصلی فسفر در این کانسار همان واحدهای شیلی و سیلتی میزبان ادیاکاریا تا افق‌های زیرین دولومیت میانی سازند سلطانیه در قسمت بالایی شیل میزبان کانسنگ هستند. بر اساس تجزیه‌های زمین‌شیمیایی انجام‌شده، تمرکز فسفر از ۳۸۷ تا ۳۸۴۹ (میانگین ۱۵۲۱) گرم بر تن در واحد سیلتی میزبان ادیاکاریا در ستون چینه‌شناسی معدن کوشک، متغیر است. مقدار فسفر در شیل میزبان کانسنگ (۳۷۹۴ گرم بر تن در کانسنگ روی و سرب در معدن کوشک) بیشتر از میانگین مقدار آن در سیلت‌سنگ میزبان افق ادیاکاریاست (۱۵۲۱ گرم بر تن) که درست در بالای کانسنگ قرار گرفته است. هرچند فسفر در لایه‌های هم‌ارز کانسنگ کم عیارتر بیرون از معدن کوشک در تقادیس و ج نیز میانگین ۵۸۷ گرم بر تن را دارد که هم از مقدار آن در شیل میزبان کانسنگ و هم از مقدار آن در سیلت‌سنگ میزبان افق ادیاکاریای بالای کانسنگ کمتر است. میانگین فسفر در واحدهای دولومیتی نیز بر اساس داده‌های موجود ۱۴۵ گرم بر تن است (Dehghani Tafti

et al., 2023). عیار بالای فسفر در معدن فعال کوشک، بیشتر در جاهایی نمود بارز دارد که حضور ساختارهای گسلی و تراکم شکستگی‌ها نیز به وضوح مشهود است و این ساختارهای گسلی در داخل شیل میزبان کانسنگ بوده و به وضوح با افق سیلت‌سنگ در بالای کانسنگ، ارتباط دارند. از طرف دیگر، کانی‌شناسی بسیار نادر برخی از کانی‌های فسفات در شیل میزبان کانسنگ و در ارتباط با شکستگی‌ها، توضیح قابل توجهی از رفتار زمین‌شیمیایی فسفر و نیز منشأ قابل قبول آن در این کانسار ارائه می‌کنند. هم‌یافتی و توالی فازهای پساسولفیدی بیانگر تداوم محیط با حاکمیت اکسایشی در دوره‌های طولانی است؛ با این حال، تشکیل رگچه‌های اسفالریت و پیریت پسین در داخل کانی واریسکیت بیانگر حاکمیت مجدد شرایط احیایی هرچند به مدت غیر طولانی بر بخشی از کانسنگ است. بررسی‌های جدید نشان‌داد که آخرین فاز تشکیل کانی‌های موجود، مربوط به تشکیل سولفات‌ها و رگه‌ها و رگچه‌هایی از اکسیدهاست که به ویژه سولفات‌ها در نقاط معدن‌کاری و تونل‌های زیرزمینی به صورت افشانه‌هایی از ملانتریت دیده می‌شوند. سولفات‌ها (ملانتریت و انواع آمورف) و اکسیدها (اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، منگنز، روی و سرب)، آخرین فازهای تشکیل‌شده در محیط‌های اکسیدان در کانسار روی و سرب کوشک تا زمان‌های کنونی هستند. رخداد کانی‌های جدید متأثر از ساختارهای گسلی فعال و همچنین، شرایط معدن‌کاری، نمونه بارز تغییرات کانی‌شناختی در دوره‌های متأخر پس از تشکیل کانسنگ اولیه، متأثر از فرایندهای زمین‌ساختی جدید (آخرین فازهای گسلش محلی) و همچنین دخالت امروزی بشر (حفاری تونل‌های استخراجی) در محیط‌های کانه‌زایی قدیمی هستند. با این حال آنچه در بررسی میدانی کانسار کوشک دریافت می‌شود، حضور رویه‌های اکسیدی در محل برون‌زد آثار گسلی در سطح زمین و همچنین کانه‌زایی‌های کربناتی و نیز فازهای اکسیدی و سولفاتی در مجاورت سامانه‌های گسلی است که در این پژوهش به آنها اشاره شده است.

گسلی، تنوع کانی‌شناسی بسیار کم است و اغلب محدود به فازهای کربناتی (اسمیت‌زونیت) می‌شود؛ در حالی که به سمت گسل، علاوه بر کانی‌های کربناتی، کانی‌های فسفاتی (واریسکیت، فسفوفیلیت کراندالیت و کلیمانیت)، سولفات‌ها (ژپس) و اکسیدها (زینسیت) تشکیل شده‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که تغییر در عوامل وابسته به محیط‌های گسلی، از عوامل اساسی در شکل‌گیری فازهای پس‌سولفیدی هستند. در شکل ۲۱، نمودار تغییرات زمین‌شیمیایی از تشکیل کانسنگ سولفیدی روی و سرب تا فازهای پس‌سولفیدی وابسته به سامانه‌های گسلی یا روبه‌های اکسیدی در کانسار کوشک ارائه شده است.

بدون شک، نقطه عطف در پیدایش فازهای پس‌سولفیدی، حاکمیت شرایط تشکیل اکسیدان‌تر و کمتر اسیدی در محیط‌های وابسته به عملکرد عوامل ساختاری بوده است. چنان‌که اشاره شد، پیریت، اسفالریت و گالن از نخستین و مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی در کانسار کوشک هستند. با افزایش میزان اکسیژن در محیط و در نتیجه افزایش Eh، تشکیل کانی‌های کربناتی، سولفاتی، فسفاتی و اکسیدی اتفاق افتاده است. نقش گسل‌ها بی‌نظیر در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا بین تنوع فازهای پس‌سولفیدی و افزایش فاصله از سامانه‌های گسلی، یک ارتباط عکس و قابل تشخیص دریافت می‌شود؛ به گونه‌ای که با فاصله از سامانه‌های



شکل ۲۱. نمودار تغییرات زمین‌شیمیایی از تشکیل کانسنگ سولفیدی روی و سرب تا فازهای پس‌سولفیدی وابسته به ساختار در کانسار کوشک

Fig. 21. Diagram of geochemical changes from the sulfide ore formation stage to the structure bound post sulfide phases at the Kushk ore deposit

نتیجه‌گیری

ساختارهای گسلی در کانسار کوشک به سه نوع ساختارهای گسلی پیشاکانه‌زایی، ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی سولفیدی و ساختارهای پساکانه‌زایی تقسیم می‌شوند. ساختارهای اولیه پیشاکانه‌زایی شامل آن دسته از ساختارهای گسلی هستند که در ارتباط با فرایندهای پوسته‌ای قبل از تشکیل حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک هستند. ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی شامل آن دسته از ساختارهای گسلی می‌شوند که در ارتباط با فرایندهای پوسته‌ای هم‌زمان با تشکیل حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک هستند و در یک رژیم زمین‌ساختی کششی منطبق بر فرایندهای ریف‌زایی فعال شده‌اند. ساختارهای گسلی پساکانه‌زایی بر اثر عملکرد رژیم‌های زمین‌ساختی محلی و هم‌زمان با چین‌خوردگی عمومی ناحیه، در ابتدا یک فاز شیب‌لغز (شکل‌گیری گسل کوشک)، راست‌گرد (فاز بعدی گسل کوشک و گسل‌های زردو و پهنو) و در انتها یک فاز چپ‌گرد (گسلش کنج) را بر کانسار کوشک تحمیل کرده است. فازهای کانی‌شناختی برون‌زاد مرتبط با ساختارهای گسلی پساکانه‌زایی هستند. این ساختارها به ایجاد شکستگی و جابه‌جایی توده‌های کانسنگ و ایجاد محیط‌های

ثانویه برای تشکیل فازهای کانه‌زایی پساسولفیدی به صورت فازهای کربناتی، فسفاتی، سولفاتی و اکسیدی منجر شده است. بر اساس بررسی‌های صحرایی در کانسار کوشک، فرایند اصلی در تشکیل کانی‌های کربناته فلزی، افزایش pH به واسطه خروج گاز CO₂ از زون گسلی، عامل اصلی تشکیل کانی‌های فسفاته، واکنش سیال غنی از فسفر با سنگ‌های آلومیناته و عامل اصلی تشکیل سولفات‌ها و اکسیدها، قراگیری کانی‌های پیشین در محیط‌های با Eh بالا بوده است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویسندگان این مقاله سپاس خود را از عوامل محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد و داوران گرامی که با نظرها و پیشنهادهای دقیق و راه‌گشا ارتقای این متن را فراهم آوردند، ابراز می‌دارند.

1. Epirogeny
2. Global Positioning System (GPS)
3. X-ray Diffraction (XRD)
4. Scanning electron microscope (SEM)
5. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)
6. Rio Tinto-Zinc Corporation Ltd (RTZ)

References

- Aftabi, A., Atapour, H., Mohseni, S. and Babaki, A., 2021. Geochemical discrimination among different types of banded iron formations (BIFs): A comparative review. *Ore Geology Reviews*, 136: 104244. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104244>
- Aftabi, A., Mohseni, S., Babeki, A. and Azaraien, H., 2009. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, central Iran—a discussion. *Economic Geology*, 104(1): 137–139. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.1.137>
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological survey of Iran, Tehran, 586 pp.
- Asadi, S. and Zolfaghari, A., 2021. “Kutnohorite”: Mineralogy database and alteration types in the Koushk deposit (Bafq, Central Iran). *Advanced Applied Geology*, 11(3): 405–420. <https://doi.org/10.22055/AAG.2020.34493.2145>
- Azaraien, H., 2003. A model of sedimentary-exhalative Pb-Zn Fe mineralization at Kushk and Bafq mining district, Bafq, Yazd. Unpublished M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 293 pp. (in Persian)
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Carne, R.C. and Cathro, R.J., 1982. Sedimentary exhalative (sedex) zinc-lead-silver deposits, northern Canadian Cordillera. *CIM Bulletin*, 75(840): 66–78.
- Dehghani Tafti, M.H., Yazdi, M. and Mirzababaei, G., 2023. Relationship between alteration factors in upper carbonate units and Pb-Zn mineralization in shale units of the Kushk deposit, central Iran. M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 112 pp. (in Persian with English abstract)
- Etemad-Saeed, N., Anderson, R.P., Tosca, N.J., Bergmann, K.D. and Knoll, A.H., 2024. Stratigraphy and taphonomy of tubular macrofossils in Terreneuvian rocks of the Soltanieh Formation, Soltanieh Mountains, Northern Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 639: 112084. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112084>
- Etemad-Saeed, N., Xiao, S., Wang, S.C., Bergmann, K.D. and Knoll, A.H., 2025. Carbonaceous macrofossils from the Ediacaran–Cambrian lower shale member of the Soltanieh formation, Northwestern Iran. *Precambrian Research*, 419: 107722. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2025.107722>
- Farjandi, F., Vickers-Rich, P., Linnemann, U., Raveggi, M., Hofmann, M., Hall, M. and Rich, T.H., 2022. Detrital zircon and apatite U-Pb geochronology of Ediacaran fossil-bearing strata spanning the late Ediacaran–Cambrian boundary in central Iran. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 46(1): 21–32. <https://doi.org/10.1080/03115518.2022.2044075>
- Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in Central Iran: a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89(8): 1697–1721. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1697>
- Goodfellow, W.D., Lydon, J.W. and Turner, R.J.W., 1993. Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. In: R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe and J.M. Duke (Editors), *Mineral deposit modeling*, pp. 201–251.
- Haghipour, A., 1977. *Geological Map of the Posht-e-Badam Area*. Geological Survey of Iran, scale 1:100,000, Tehran.
- Ju, Y., Wang, G., Li, S., Sun, Y., Suo, Y., Somerville, I., Li, W., He, B., Zheng, M. and Yu, K., 2020. Geodynamic mechanism and classification of basins in the Earth system. *Gondwana Research*, 102: 200–228. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.08.017>
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Alaminia, A., Esmaeili Sevieri, A. and Stern, C.R., 2019. New hypothesis on time and thermal gradient of subducted slab with emphasis on dolomitic and shale host rocks in formation of Pb-Zn deposits of Irankuh Ahangaran belt. *Journal of Economic Geology* 10(2): 677–706. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.v10i2.76528>
- Karimpour, M.H. and Sadeghi, M., 2018. Dehydration of hot oceanic slab at depth 30–50km: KEY to formation of Irankuh-Emarat PbZn MVT belt, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 194: 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.016>
- Kutina, J., 1983. Global tectonics and metallogeny; Deep roots of some ore-concentrating fracture

- zones. A possible relation to small-scale convective cells at the base of lithosphere? *Advances in Space Research*, 3(2): 201–214. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(83\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0273-1177(83)90122-9)
- Mirzababaei, G., 2011. Relationship between the structural and tectonic factors and mineralization in Dehaj-Sarduieh copper belt; Kerman, SE Iran. M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, 128 pp. (in Persian with English abstract)
- Mirzababaei, G., 2026. Geology map of the Kushk ore deposit, Bafq Mining Company (BMC), unpublished.
- Mirzababaei, G. and Hayatolgheyb, S.M., 2025. Field indicators of preliminary geological exploration for base metals in the Kushk volcanic-sedimentary basin, central Iran. 1th international and 28th national symposium of the geological society of Iran, university of Zanjan, Zanjan, Iran. Retrieved January 10, 2026 from <https://geoconf28.znu.ac.ir/fa>
- Mirzababaei, G. and Shahabpour, J., 2012. Ring structures and copper mineralization in Kerman porphyry copper belt, SE Iran. *Journal of Economic Geology*, 2(4): 303–317. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/ECONG.V4I2.16498>
- Mirzababaei, G., Shahabpour, J., Zarasvandi, A. and Hayatolgheyb, S.M., 2016. Structural Controls on Cu Metallogenesis in the Dehaj Area, Kerman Porphyry Copper Belt, Iran: A Remote Sensing Perspective. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 27(3): 253–267.
- Mirzababaei, G., Yazdi, M., Behzadi, M. and Rezvanianzadeh, M.R., 2021. REE-Th mineralization in the Se-chahun magnetite-apatite ore deposit, central Iran: interplay of magmatic and metasomatic processes. *Ore Geology Reviews*, 139(part A): 104426. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104426>
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2012. Comment on “Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Sehchahun iron oxide-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry” by Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S., Ghazban, F [Chem. Geol. 281, 253–269]. *Chemical Geology*, 334: 378–381. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.041>
- Mokhtari, M.A., Hossein Zadeh, G. and Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. *Journal of Earth System Science*, 122(3): 795–807. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0313-z>
- Nadimi, A., 2007. Evolution of the Central Iranian basement. *Gondwana Research*, 12(3): 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.012>
- Nematollahi, P., Yazdi, M. and Mirzababaei, G., 2023. Mineralogy and geochemistry of Fe-mineralization in the Koushk area, central Iran. M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 137 pp. (in Persian with English abstract)
- Nouri, F., Davoudian, A.R., Allen, M.B., Azizi, H., Asahara, Y., Anma, R., Shabanian, N., Tsuboi, M. and Khodami, M., 2021. Early Cambrian highly fractionated granite, Central Iran: Evidence for drifting of northern Gondwana and the evolution of the Proto-Tethys Ocean. *Precambrian Research* 362, 10629. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106291>
- Rajabi, A., Alfonso, P., Canet, C., Rastad, E., Niroomand, S., Modabberi, S. and Mahmoodi, P., 2020. The world-class Koushk Zn-Pb deposit, Central Iran: A genetic model for vent-proximal shale-hosted massive sulfide (SHMS) deposits – Based on paragenesis and stable isotope geochemistry. *Ore Geology Reviews* 124: 103654. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103654>
- Rajabi, A., Canet, C., Rastad, E. and Alfonso, P., 2015. Basin evolution and stratigraphic correlation of sedimentary-exhalative Zn–Pb deposits of the Early Cambrian Zarigan–Chahmir Basin, Central Iran. *Ore Geology Reviews* 64: 328–353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.013>
- Ramezani, J. and Tucker, R., 2003. The Saghand region, Central Iran: U–Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7): 622–665. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Rio Tinto-Zinc finance and exploration limited (RTZ)., 1972. Geological investigation at Kouchke mine, Iran, Report part 1, 24 pp.
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39(1–2): 85–106. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](http://dx.doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8)
- Smith, A.W., 1967. Exploration at Kouchke and grater Bafq area. Internal memorandum of Riofinex, RTZ, Tehran, Iran, 9 pp.

- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A Review. AAPG Bulletin, 52(7): 1229–1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Vaziri, S.H. and Laflamme, M., 2018. Lithostratigraphy and sedimentary environment of the Precambrian Kushk Series of Central Iran. Canadian Journal of Earth Sciences, 55(11). <https://dx.doi.org/10.1139/cjes-2017-0234>
- Vickers-rich, P., Soleimani, S., Farjandi, F., Zand, M., Linnemann, U., Hofmann, M., Wilson, S.A., Cas, R. and Rich, T. H., 2018. New discoveries in the Neoproterozoic of Iran. International Conference on Ediacaran and Cambrian Sciences, Abstracts, 2 pp. Xi'an, China. Retrieved September 4, 2026 from https://www.monash.edu/__data/assets/pdf_file/0009/2050794/POSTER-Iran-2018.pdf
- Warr, L.N., 2021. IMA-CNMNC Approved Mineral Symbols. Mineralogical Magazine, 85(3): 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zand, M.M., Mirzababaei, G. and Lotfi, M., 2021. Fluid mixing and Zn-Pb mineralization in the Kushk ore deposit, central Iran, evidence from fluid inclusions. Iranian journal of geology, 15(59): 105–123. (in Persian with English abstract). Retrieved September 4, 2026 from <http://geology.saminattech.ir/en/Article/31676>



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2026.1182



Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence

Mina Shahin¹ , Zahra Alaminia^{2*} , Zohre Hoseinzade³ , Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh⁴ , Pouria Mahmoodi⁵

¹ Ph.D. Candidate, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

⁴ Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

⁵ Ph.D. Iran Mineral Production and Supply Company (IMPASCO), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 28 July 2026
Revised: 13 September 2026
Accepted: 14 September 2026

Keywords

Gold
factor analysis
geochemistry of stream sediments
Sanandaj–Sirjan Zone
mineralization potential

*Corresponding author

Zahra Alaminia
✉ alaminia@um.ac.ir

ABSTRACT

Assessment of gold mineralization potential in metamorphic terrains requires the application of effective analytical approaches because geochemical patterns are simultaneously influenced by lithological variability, hydrothermal alteration, and structural complexity. In this study, the gold mineralization potential along the Khonsar–Aligudarz belt was evaluated by integrating factor analysis with geological evidence. For this purpose, stream-sediment data from the Golpayegan and Aligudarz 1:100000 geochemical sheets were processed, and inter-element relationships were investigated. The results indicate that factor analysis successfully separated the component related to gold mineralization from the regional lithological background and delineated areas with the highest mineralization potential. Validation of the results through field investigations, petrographic studies, and mineralogical examinations in the Darreh Sari area confirmed the presence of NW–SE trending quartz–hematite–bearing vein–veinlets containing pyrite, pyrrhotite, arsenopyrite, marcasite, chalcopyrite, sphalerite, and galena, as well as iron-, manganese-, and copper-oxide minerals, including hematite, goethite, and, less commonly, magnetite, pyrolusite, and malachite, within Triassic–Jurassic schists and metapelites. The close correspondence between the geochemical anomalies and shear zones and quartz veins indicates that these structures played a major role in channeling mineralizing fluids and concentrating gold. The results of this study indicate that integrating factor analysis with geological information provides an effective approach for reducing uncertainty in regional exploration and prioritizing gold exploration targets in the central Sanandaj–Sirjan Zone and other comparable metamorphic environments.

How to cite this article

Shahin, M., Alaminia, Z., Hoseinzade, Z., Tabatabaei Manesh, S.M. and Mahmoodi, P., 2026. Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence. *Journal of Economic Geology*, 18(2): 173–197. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1182>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Gold, as one of the most important strategic and economic metals, forms within a wide range of hydrothermal and orogenic systems, and delineating prospective zones for its occurrence remains a central objective of mineral exploration. In the central Sanandaj–Sirjan Zone, between Khonsar and Aligudarz, several gold occurrences (e.g., Darreh Sari, Hasan Abad, Reza Abad, Hossein Abad, Koucheri, and Sefidsang) have been documented within Triassic–Jurassic schists and metapelites, typically as quartz vein-veinlets with iron and base-metal sulfides and associated silicification, chloritization, carbonatization, and oxidation. Structural control by brittle–ductile shear zones, combined with hydrothermal fluid–rock interaction, has played a fundamental role in concentrating gold and base metals in this belt. Despite reasonable knowledge of these occurrences' geology and mineralogy, regional evaluation of geochemical dispersion patterns remains challenging, since differential element behavior during weathering and transport produces complex, overlapping anomalies that single-element interpretation cannot reliably resolve.

Stream sediment geochemistry is among the most effective, economical regional exploration methods for detecting concealed mineralization, though its performance depends heavily on data processing. Conventional univariate threshold methods generally fail to reveal complex inter-element relationships or separate signals from different mineralizing systems, whereas multivariate statistics, particularly factor analysis, overcome this limitation by extracting independent geochemical factors and hidden correlations, distinguishing gold-related components from lithological background or polymetallic systems and improving the accuracy of potential maps. Within this framework, the Darreh Sari area, southwest of Golpayegan and southeast of Aligudarz, was delineated as a gold anomaly from stream sediment data; subsequent field work confirmed quartz–hematite veins- veinlets within Triassic–Jurassic schists accompanied by iron and base-metal sulfides, indicating a gold-bearing hydrothermal system. This study integrates stream sediment geochemistry, factor analysis, and field, petrographic, and mineragraphic evidence to

evaluate gold potential along the Khonsar–Aligudarz axis, providing a practical framework for targeted exploration in comparable metamorphic terrains.

Geological setting

The study area lies in the central Sanandaj–Sirjan metamorphic-structural zone, one of Iran's principal metamorphic-magmatic and metallogenic belts, whose evolution is generally attributed to Paleo-Tethys closure and prolonged Neo-Tethyan subduction beneath Central Iran from the Late Triassic to the Cenozoic, accompanied by magmatism, regional metamorphism, and polyphase deformation; an alternative model instead links part of the Mesozoic magmatism to intracontinental rifting. The belt mainly comprises Mesozoic sedimentary–volcanic sequences metamorphosed under greenschist- to amphibolite-facies conditions, producing slate, phyllite, quartzite, schist, amphibolite, and gneiss. In the central sector, Triassic–Jurassic phyllite–schist sequences are cut by numerous shear zones and faults that, with hydrothermal circulation and quartz veining, principally control mineralization.

Materials and methods

Geochemical data from 947 stream sediment samples covering ~1,419 km² across the Golpayegan and Aligudarz 1:100000 sheets (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992; Soheili et al., 1992), previously analyzed by inductively coupled plasma spectrometry and archived by the Geological Survey and Mineral Exploration Organization of Iran, were used. Concentrations of Cu, Pb, Zn, Ba, B, Co, Cr, Mn, Ni, Sc, Sr, V, and Y were evaluated via descriptive statistics, frequency and box plots, and factor analysis with varimax rotation on standardized data to extract mineralization-related factors and construct factor-score maps. The previously undocumented Darreh Sari anomaly was investigated over two field campaigns documenting mineralized outcrops, and alteration zones, sampled for petrographic and mineragraphic study; five rock-chip samples from two gold-bearing veins were analyzed for gold grade by Fire Assay.

Results

Stream Sediment Geochemistry Results

Stream sediment concentrations show wide ranges reflecting catchment-scale geochemical

heterogeneity. Co and Ni display the most uniform distributions, consistent with lithological control, whereas B (CV = 73.4%) and Mn (CV = 94.1%) show the greatest dispersion, reflecting hydrothermal alteration or oxide concentration; Pb shows the highest variability among base metals (CV = 59.3%), suggesting local sulfide enrichment. Factor analysis extracted six factors: lithological (Sc–Y–V), mafic (Ni–Cr–Co), mineralization (Pb–Zn–Mn), alteration (B–Ba), carbonate (Sr), and magmatic-hydrothermal (Cu). The mineralization factor-score map shows pronounced anomalies at the Reza Abad, Hasan Abad, and Takht-e Khosrow occurrences, plus a distinct NW–SE-trending anomaly at Darreh Sari matching the vein orientation; all anomalies are confined to the Triassic–Jurassic greenschist unit, confirming its role in mineralization.

At Darreh Sari, local geology comprises Precambrian mica schists with metarhyolite intercalations, Triassic–Jurassic units (marble, black shale, slate, phyllite, schist), granodioritic intrusions, and Quaternary deposits. The intensely fractured, thrust-bounded metamorphic units favored quartz-vein emplacement, while carbonaceous black shales likely supplied sulfur and gold. Gold occurs mainly as two NW–SE-trending silicic veins (~990 m long, ~2 m wide) parallel to host-rock schistosity, locally cut by younger veinlets indicating post-mineralization reactivation. Fire Assay of five samples yielded gold grades of 87, 1051, 2591, and 5256 mg/t east to west along the main vein and 557 mg/t in a subsidiary vein, with the highest grades in the west matching the strongest anomaly and confirming economic mineralization. Mineragraphic study shows abundant multi-generation pyrite and pyrrhotite, accessory arsenopyrite, marcasite, chalcopyrite, sphalerite, and galena as intergrowths and cavity fillings, subordinate early-stage magnetite, and colloform marcasite, consistent with a hydrothermal quartz-vein system corroborating the geochemical model.

Discussion

Gold mineralization at Darreh Sari developed within a Sanandaj–Sirjan segment shaped by Neo-Tethyan convergence, regional metamorphism, and crustal-scale shear zones. Factor analysis effectively separated lithological background (Factors 1, 2) from mineralization-related components (Factors 3, 6), which form discrete anomalies independent of

lithological boundaries and spatially linked to alteration, confirming the superiority of multivariate over single-element interpretation in structurally complex terrains. The close correspondence between anomalies, shear zones, and quartz veins indicates that brittle–ductile structures were the primary conduits for mineralizing fluids, consistent with structural controls documented for the Muteh gold belt and other orogenic systems of the zone. The paragenetic sequence, pyrite and pyrrhotite followed by base-metal sulfides, reflects progressive evolution of a multistage hydrothermal system consistent with orogenic gold models. Carbon-rich host rocks likely contributed sulfur, CO₂, and metals through devolatilization, consistent with models in which organic matter scavenges, transports, and helps precipitate gold via fluid reduction. Surface hematitic staining likely reflects supergene oxidation, yet the coherent anomalies indicate the primary hydrothermal signal survived weathering. These results confirm that multivariate analysis of stream sediment data reveals hydrothermal signals in complex terrains, and that integrating it with structural and remote-sensing data effectively reduces exploration uncertainty and prioritizes drilling targets.

Conclusion

This study demonstrates that factor analysis of stream sediment geochemical data, integrated with geological and mineragraphic evidence, effectively identifies gold-related anomalies in the Darreh Sari area and along the Khonsar–Aligudarz belt. Separating lithological components from hydrothermal signals enabled recognition of genuine mineralization-related anomalies, whose strong correspondence with NW–SE-trending shear zones, quartz veins, and Triassic–Jurassic metamorphic units confirm the key role of structural controls in channeling fluids and concentrating gold. Consistency between geochemical and field/mineragraphic observations validates a structurally controlled hydrothermal model, offering an efficient framework for prioritizing exploration targets and reducing uncertainty in early-stage gold exploration across comparable settings of the Sanandaj–Sirjan Zone.



ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تأکید بر منطقه دره‌ساری، با استفاده از تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی

مینا شاهین^۱، زهرا اعلمی‌نیا^{۲*}، زهره حسین‌زاده^۳، سیدمحسن طباطبایی‌منش^۴، پوریا محمودی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

^۴ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۵ دکتری، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران (ایمپاسکو)، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در مناطق دگرگونی به دلیل تأثیر هم‌زمان تنوع سنگ‌شناسی، دگرسانی‌های گرمایی و پیچیدگی‌های ساختاری بر الگوهای زمین‌شیمیایی، نیازمند به کارگیری روش‌های تحلیلی کارآمد است. در این پژوهش، پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تلفیق تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، داده‌های رسوب آبراهه‌ای مربوط به برگه‌های زمین‌شیمیایی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلاپایگان و الیگودرز پردازش شده و روابط بین عناصر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تحلیل عاملی توانسته است مؤلفه مرتبط با کانه‌زایی طلا را از زمینه‌ی سنگ‌شناسی منطقه به خوبی تفکیک کرده و پهنه‌های دارای بیشترین پتانسیل کانه‌زایی را مشخص کند. اعتبارسنجی نتایج از طریق بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی در محدوده دره‌ساری، وجود رگه- رگچه‌های کوارتز- همتایت‌دار با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، حاوی کانی‌های پیریت، پروتیت، آرسنوپیریت، مارکازیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن و همچنین کانی‌های اکسیدی آهن، منگنز و مس شامل همتایت، گوتیت و به ندرت مگنتیت، پیرولولزیت و مالاکیت را در شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک تأیید می‌کند. انطباق مناسب بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با پهنه‌های برشی و رگه‌های کوارتزی نشان می‌دهد که این ساختارها نقش اصلی را در هدایت سیالات کانه‌زا و تمرکز طلا ایفا کرده‌اند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که تلفیق تحلیل عاملی با اطلاعات زمین‌شناسی، رویکردی مؤثر برای کاهش عدم قطعیت در اکتشاف ناحیه‌ای و اولویت‌بندی اهداف اکتشافی طلا در بخش میانی پهنه‌ی سنندج- سیرجان و سایر محیط‌های دگرگونی مشابه را فراهم می‌آورد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

واژه‌های کلیدی

طلا

تحلیل عاملی

زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه

پهنه سنندج- سیرجان

پتانسیل کانه‌زایی

نویسنده مسئول

زهرا اعلمی‌نیا

alaminia@um.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

شاهین، مینا؛ اعلمی‌نیا، زهرا؛ حسین‌زاده، زهره؛ طباطبایی‌منش، سیدمحسن و محمودی، پوریا، ۱۴۰۵. ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز با تأکید بر منطقه دره‌ساری، با استفاده از تحلیل عاملی و شواهد زمین‌شناسی. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۱۷۳-۱۹۷.

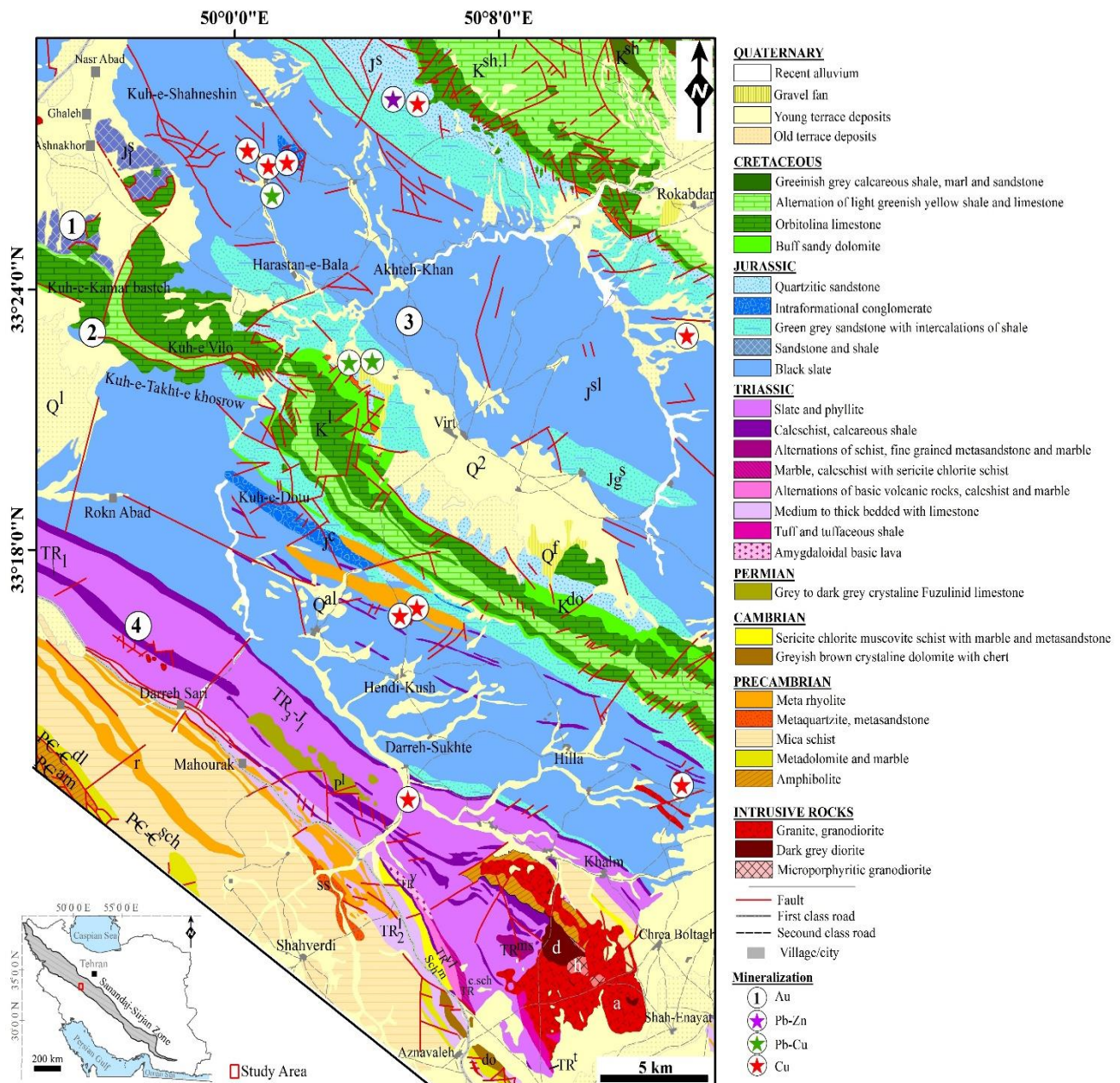
<https://doi.org/10.22067/econg.2026.1182>

مقدمه

طلا به عنوان یکی از مهم‌ترین فلزهای راهبردی و اقتصادی است که در طیف گسترده‌ای از سامانه‌های گرمایی و کوه‌زایی تشکیل می‌شود و شناسایی پهنه‌های مستعد آن همواره یکی از اهداف اصلی اکتشاف‌های معدنی به شمار می‌رود. در بخش میانی پهنه سنج- سیرجان، حذافصل خوانسار- الیگودرز، رخداد‌های متعدد طلا (مانند کانسارهای دره‌ساری، حسن آباد، رضاآباد، حسین آباد، کوچری و سنگ‌سفید) در ارتباط با شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک گزارش شده است (شکل ۱) (Moritz et al., 2006; Fazeli Oladi and Zamanian, 2024). این کانه‌زایی اغلب به صورت رگه- رگچه‌های کوارتزی توسعه یافته است و با مجموعه‌ای از سولفیدهای آهن و فلزهای پایه، همراه با دگرسانی‌هایی نظیر سیلیسی شدن، کلریتی شدن، کربناتی شدن و اکسایش، ارتباط نزدیکی دارند. در این منطقه، کنترل ساختاری ناشی از پهنه‌های برشی شکل‌پذیر- شکننده و برهم‌کنش سیالات گرمایی با سنگ‌های دگرگونی، نقش اساسی در تمرکز طلا و فلزهای پایه ایفا کرده است (Goldfarb and Groves, 2015; Sakhdari et al., 2021). با وجود شناخت مناسب از ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانی‌شناسی این رخداد‌ها، ارزیابی الگوهای پراکندگی زمین‌شیمیایی طلا و عناصر همراه در مقیاس ناحیه‌ای همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو است؛ زیرا رفتار متفاوت عناصر طی هوازدگی، فرسایش، انتقال و تمرکز در رسوب‌های آبراهه، موجب ایجاد الگوهای پیچیده و هم‌پوشان بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی می‌شود که تفسیر آنها تنها بر پایه غلظت تک‌عنصری، قابلیت اطمینان محدودی دارد (Hale and Plant, 1994; Fletcher, 1997; Helba et al., 2021).

زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه‌ای، یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های اکتشاف ناحیه‌ای برای شناسایی کانه‌زایی‌های پنهان محسوب می‌شود؛ اما کارایی آن به نحوه پردازش و تفسیر داده‌های زمین‌شیمیایی وابسته است (Rose et al., 1979; Yilmaz, 2007). اگرچه روش‌های تک‌متغیره متداول برای تعیین آستانه‌های بی‌هنجاری کاربرد گسترده‌ای

دارند، این روش‌ها معمولاً قادر به آشکارسازی روابط پیچیده میان عناصر و تفکیک نشانه‌های ناشی از سامانه‌های مختلف کانه‌زایی نیستند (Tukey, 1997; Schwertman and Silva, 2007). در مقابل، تحلیل‌های آماری چندمتغیره، به ویژه تحلیل عاملی، با استخراج عوامل زمین‌شیمیایی مستقل و شناسایی همبستگی‌های پنهان میان عناصر، امکان تفکیک مؤلفه‌های مرتبط با کانه‌زایی طلا از زمینه‌های زمین‌شیمیایی و یا سامانه‌های پلی‌متال را فراهم می‌کند و دقت نقشه‌های پتانسیل کانه‌زایی را به طور محسوسی افزایش می‌دهند (Carranza, 2008; Sadeghi et al., 2015; Behera and Panigrahi, 2021; Ouchchen et al., 2022). در چهارچوب این مقاله، منطقه دره‌ساری در جنوب‌غربی گلپایگان و جنوب‌شرقی الیگودرز، پس از انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای، به عنوان یکی از بی‌هنجاری‌های طلا بارزسازی شده است. بررسی‌های صحرایی پی در پی، وجود رگه- رگچه‌های کوارتز- هماتیت‌دار درون شیست‌ها و متاپلیت‌های تریاس- ژوراسیک را همراه با مجموعه‌ای از سولفیدهای آهن و فلزهای پایه تأیید می‌کند که بیانگر یک سامانه گرمایی طلا در منطقه است. این منطقه فرصت مناسبی را فراهم می‌کند تا کارایی داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه و تحلیل عاملی در شناسایی بی‌هنجاری‌های طلا و تعیین ارتباط آنها با ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی مورد ارزیابی قرارگیرد. از این رو، این پژوهش با تلفیق بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی رگه‌های کانه‌دار، داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه و تحلیل عاملی، به ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا در محور خوانسار- الیگودرز پرداخته است. اهداف اصلی این بررسی شامل شناسایی روابط زمین‌شیمیایی عناصر شاخص، تعیین عوامل کنترل‌کننده توزیع طلا و فلزهای پایه و تهیه نقشه پتانسیل کانه‌زایی بر پایه امتیازهای عاملی و شاخص‌های زمین‌شیمیایی است. نتایج این پژوهش، علاوه بر ارائه درک بهتر از کنترل‌های زمین‌شناسی و زمین‌شیمیایی کانه‌زایی طلا در شیست‌های تریاس- ژوراسیک، می‌تواند چهارچوبی کاربردی برای اکتشاف هدفمند ذخایر طلا در محیط‌های پلی‌متال مشابه ارائه کند.



شکل ۱. پراکندگی رخدادهای معدنی در محدوده سنگ‌های دگرگونی (شیست‌های تریاس- ژوراسیک)، با اقتباس از برگه‌های زمین‌شناسی یکصد هزار گلیپایگان (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992) و الیگودرز (Soheili et al., 1992) در محور خوانسار- الیگودرز. موقعیت چهار رخداد شاخص طلا در این شکل با شماره مشخص شده است: ۱- رضاآباد، ۲- تخت خسرو، ۳- حسن آباد و ۴- دره ساری. مناطق حسین آباد (مس+ طلا) و سنگ سفید با فاصله بیشتر در بخش شرقی و خارج این نقشه قرار دارند.

Fig. 1. Distribution of mineral occurrences within the metamorphic rocks (Triassic-Jurassic schists), adapted from the 1:100,000 Geological map sheets of Golpayegan (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992) and Aligudarz (Soheili et al., 1992) in the Khonsar-Aligudarz belt. The locations of four significant gold occurrences are indicated in this figure with the following numbers: 1- Reza Abad, 2- Takht-e Khosrow, 3- Hasanabad and 4- Darreh Sari. The areas of Hossein Abad (Cu+Au) and Sang-Sefid are located farther to the east, outside the extent of this map.

زمین‌شناسی

منطقه مورد بررسی در بخش میانی پهنه دگرگونی- ساختاری سنندج- سیرجان، یکی از مهم‌ترین کمربندهای دگرگونی- ماگمایی و فلززایی ایران، واقع شده است (شکل ۱). تکامل زمین‌شناسی این پهنه اغلب به بسته‌شدن اقیانوس پالئوتیس، گشایش اقیانوس نئوتیس و فرورانش طولانی مدت لیتوسفر اقیانوسی نئوتیس در زیر حاشیه جنوبی ایران مرکزی از اواخر تریاس تا سنوزوئیک نسبت داده می‌شود (Stampfli et al., 1991; Alavi, 1996; Horton et al., 2008; Bagheri and Stampfli, 2008; Alirezaei and Hassanzadeh, 2012; Zanchetta et al., 2013; Madanipour et al., 2018). این فرایند با ماگماتیسم، دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی‌های چندمرحله‌ای همراه بوده و به تشکیل کمان ماگمایی مزوزوئیک پهنه سنندج- سیرجان، توسعه زون‌های برشی و تمرکز سامانه‌های گرمایی منجر شده است. با این حال، در سال‌های اخیر، دیدگاه جایگزینی نیز ارائه شده است که بخشی از ماگماتیسم مزوزوئیک این پهنه را حاصل کشش درون‌قاره‌ای و ریف‌ت قاره‌ای می‌داند و سنگ‌های آتشفشانی ژوراسیک- کرتاسه را نیز به فعالیت‌های ریف‌تی نسبت می‌دهد (Azizi and Stern, 2019; Stern et al., 2021). با وجود این، شواهد زمین‌شناسی، دگرگونی و ساختاری موجود، همچنان مدل فرورانش اقیانوس نئوتیس را به عنوان تبیین غالب برای تکامل زمین‌ساختی و فلززایی پهنه سنندج- سیرجان تأیید می‌کنند. سنگ‌های پهنه سنندج- سیرجان اغلب از توالی‌های رسوبی و آتشفشانی مزوزوئیک تشکیل شده‌اند که طی رویدادهای

کوه‌زایی آلپی تحت دگرگونی ناحیه‌ای با شدت‌های متفاوت، اغلب در رخساره شایسته سبز تا آمفیبولیت، قرار گرفته‌اند (Mohajjel and Fergusson, 2000; Shakerardakani et al., 2015; Derikvand, 2022). حاصل این دگرگونی، گسترش مجموعه‌ای از اسلیت، فیلیت، کوارتزیت، میکاشیست و گارنت شایسته، آمفیبولیت، گنیس و سنگ‌های آذرین دگرگون‌شده است که بخش عمده رخنمون‌های پهنه را تشکیل می‌دهند. در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان، توالی‌های تریاس- ژوراسیک شامل فیلیت، شایسته، ماسه‌سنگ‌های دگرگون و میان‌لایه‌های آتشفشانی به وسیله زون‌های برشی و گسل‌های متعدد قطع شده‌اند (شکل ۱). این ساختارها همراه با گردش سیالات گرمایی، دگرسانی و تشکیل رگه‌های کوارتزی و اکسیدهای آهن، نقش اساسی در تمرکز کانه‌زایی طلا و سولفیدهای فلزهای پایه داشته‌اند و از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی در این بخش از کمر بند سنندج- سیرجان به شمار می‌روند.

روش مطالعه

در این پژوهش، از داده‌های زمین‌شیمی ۹۴۷ نمونه رسوب آبراهه، برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شیمیایی از پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور که پیش‌تر در قالب برنامه‌های اکتشافی از سوی سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف‌های معدنی کشور به روش طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده القایی تجزیه شده بودند (جدول ۱)، استفاده شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌های آماری توصیفی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز. مقادیر عناصر بر حسب گرم در تن گزارش شده است.

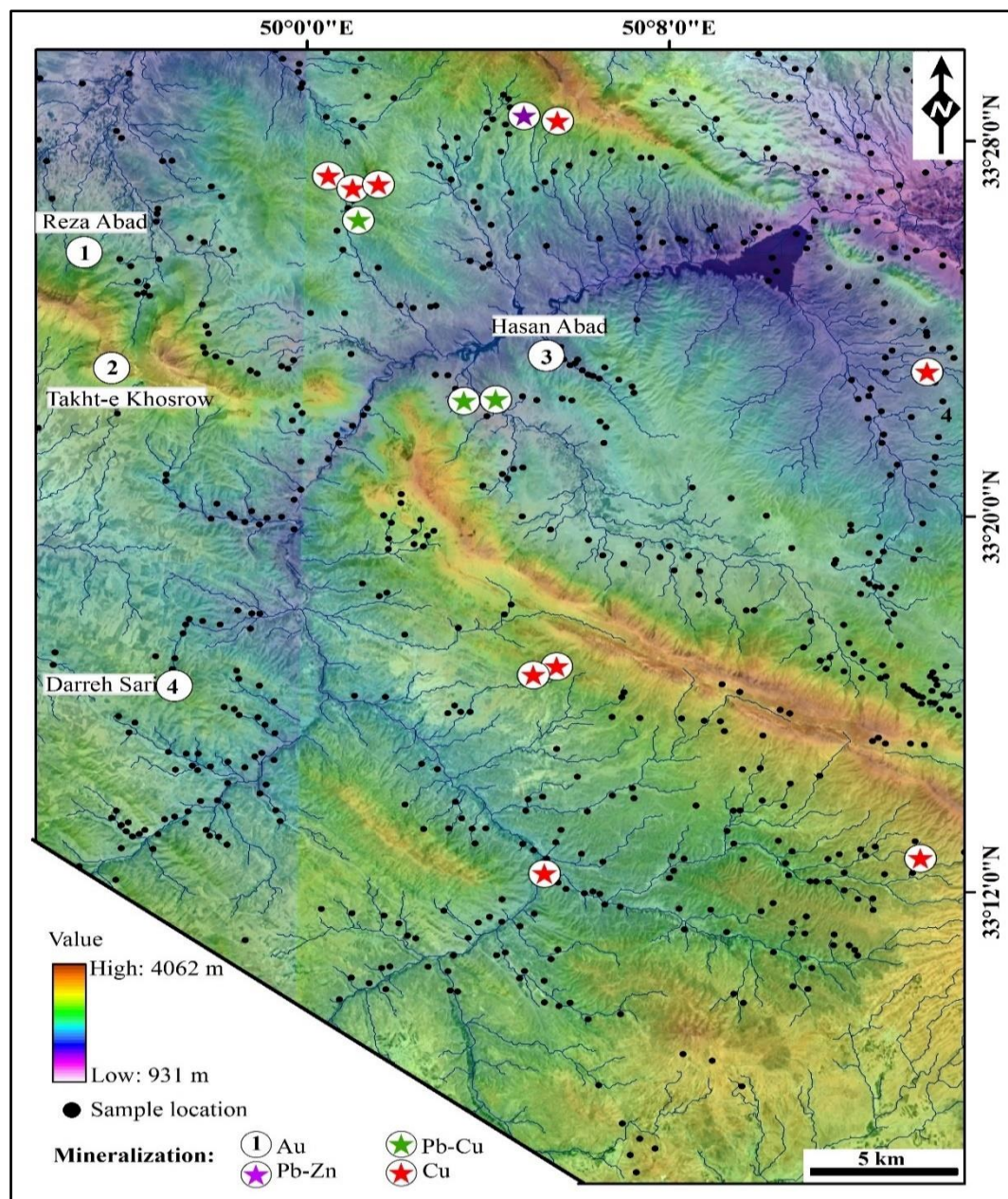
Table 1. Descriptive statistical parameters of stream sediment geochemical data in the Khonsar-Aligudarz belt. Element concentrations are reported in ppm.

Variable	Ba	B	Co	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni	Sc	Sr	V	Y
Minimum	30.0	8.0	9.0	22.0	20.0	0.0	11.0	42.0	26.0	2.0	16.0	19.5	2.5
Maximum	1000.0	1000.0	52.0	540.0	186.0	1690.0	417.0	721.0	209.0	90.0	1000.0	620.0	124.0
Mean	333.4	76.3	23.9	184.1	38.9	403.6	35.2	89.6	74.2	21.1	161.2	136.7	36.2
Std. deviation	123.8	56.0	4.7	78.5	13.1	380.0	20.9	41.2	21.9	10.4	75.9	53.1	16.4
CV %	37.1	73.4	19.5	42.6	33.7	94.1	59.3	46.0	29.6	49.1	47.1	38.8	45.2

CV- Coefficient of Variation values

الیگودرز (Soheili et al., 1992) انتخاب شده‌اند. موقعیت مکانی نمونه‌های رسوب آبراهه بر روی **مدل رقومی ارتفاع** در **شکل ۲** ارائه شده است.

این نمونه‌ها از محدوده‌ای به وسعت حدود ۱۴۱۹ کیلومتر مربع در بخش غربی برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان (Mohajjel and Eftekhar Nezhad, 1992) و بخش شرقی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰



شکل ۲. پراکندگی نقاط نمونه‌برداری رسوب‌های آبراهه‌ای و موقعیت رخدادهای معدنی همراه با سنگ‌های دگرگونی (شیست، اسلیت و فلیت‌ها) بر روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی در محور خوانسار- الیگودرز

Fig. 2. Distribution of stream sediment sampling locations and mineral occurrences, along with the extent of metamorphic rocks (schist, slate and phylites), overlaid on the Digital Elevation Model in the Khonsar-Aligudarz belt

نتایج به دست آمده از بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی برای ارزیابی میزان انطباق نواحی بی‌هنجاری شناسایی شده با شواهد واقعی کانه‌زایی و تأیید قابلیت تحلیل عاملی در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از دو رگه طلا دار، تعداد ۵ نمونه به روش خرده‌سنگی برداشت و برای تعیین عیار طلا به روش Fire Assay به آزمایشگاه کانساران پینالود ارسال شد (جدول ۴).

نتایج زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه آمار توصیفی و توزیع فراوانی عناصر

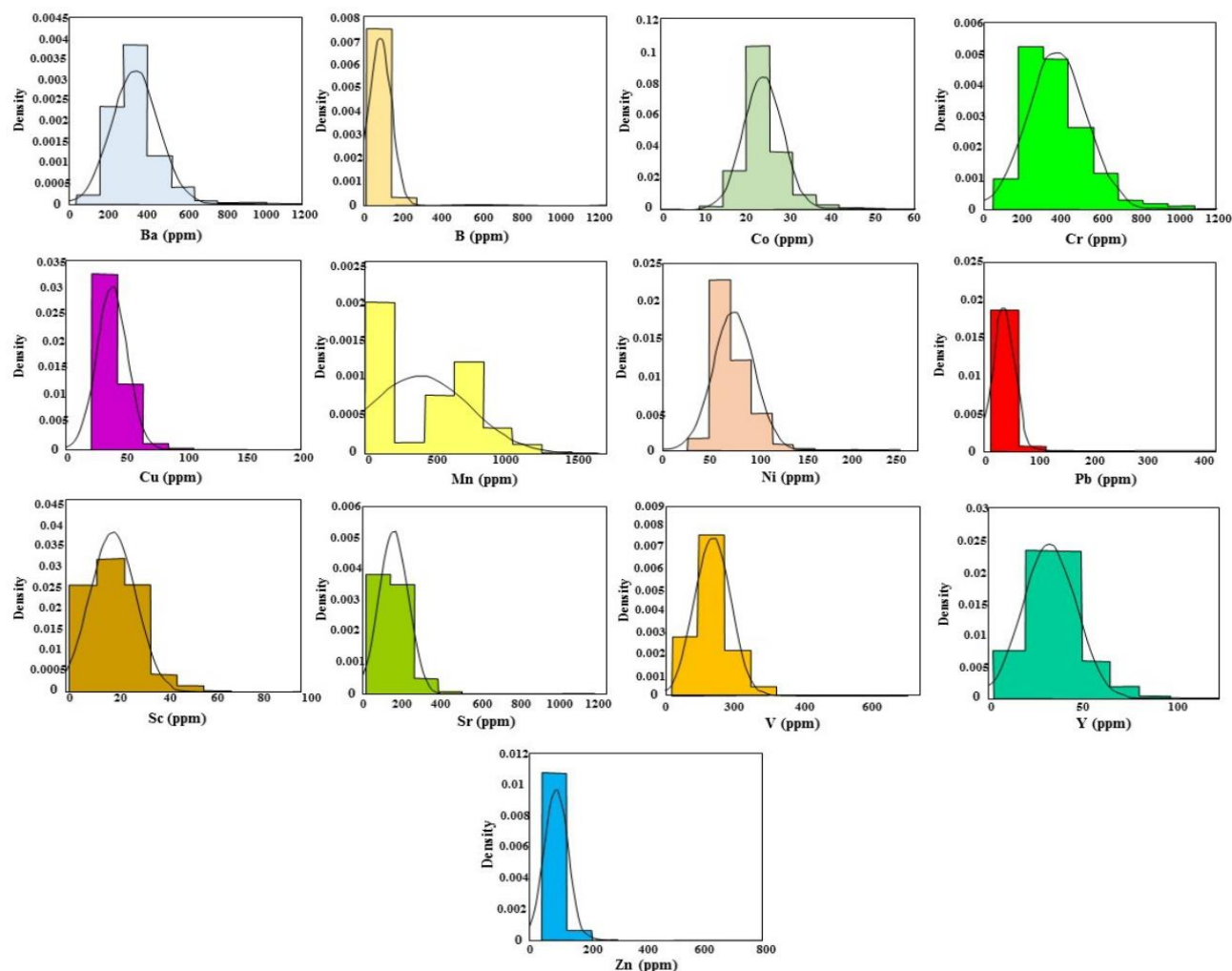
نتایج آمار توصیفی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در جدول ۱ ارائه شده است. غلظت عناصر مورد بررسی، دامنه تغییرات متفاوتی را نشان می‌دهد که بیانگر ناهمگونی زمین‌شیمیایی در حوضه‌های آبریز منطقه است. این ناهمگونی می‌تواند حاصل تفاوت در ترکیب سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی واحدهای منشأ، شدت هوازدگی و فرسایش، فرایندهای انتقال و تمرکز رسوب‌ها و در مقیاس محلی، تأثیر دگرسانی و کانه‌زایی باشد. با توجه به اینکه حوضه‌های آبریز منطقه اغلب از واحدهای دگرگونی تریاس-ژوراسیک، شامل شیست، فیلیت و اسلیت، واحدهای کربناته مرزوثیک و توده‌های نفوذی تغذیه می‌شوند، ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای را می‌توان حاصل برهم‌کنش سهم این واحدهای سنگی و فرایندهای ثانویه مؤثر بر آنها در نظر گرفت.

بررسی نمودارهای فراوانی و جعبه‌ای نشان می‌دهند که بخش عمده عناصر دارای توزیع نامتقارن و چولگی مثبت هستند؛ به گونه‌ای که قسمت اصلی نمونه‌ها در محدوده غلظتی پایین تا متوسط متمرکز شده و تعداد محدودی از نمونه‌ها دارای مقادیر بسیار بالاتری هستند (شکل‌های ۳ و ۴). این ویژگی در عناصر باریم، بور، استرانسیم، وانادیوم و به ویژه روی آشکارتر است (شکل ۴). در چنین توزیع‌هایی، مقادیر بالا در دنباله توزیع می‌توانند میانگین را به سمت مقادیر بیشتر سوق دهند.

در این بررسی، غلظت عناصر مس، سرب، روی، باریم، بور، کبالت، کروم، منگنز، نیکل، اسکاندیوم، استرانسیم، وانادیوم و ایتریوم برای ارزیابی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد استفاده قرار گرفته است. در نخستین گام، مؤلفه‌های آمار توصیفی شامل کمینه، بیشینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای تمامی عناصر محاسبه شد تا ویژگی‌های آماری داده‌ها و میزان پراکندگی آنها ارزیابی شود. سپس، برای بررسی شکل توزیع، چولگی و کشیدگی دنباله توزیع، نمودارهای فراوانی ترسیم شدند. همچنین، از نمودارهای جعبه‌ای برای مقایسه میان، دامنه بین چارکی، پراکندگی و شناسایی داده‌های پرت استفاده شد. در نهایت، برای شناسایی همبستگی میان عناصر و استخراج مجموعه‌های زمین‌شیمیایی مرتبط با فرایندهای کانه‌زایی، تحلیل عاملی بر روی داده‌های استاندارد شده انجام شده است. پس از استخراج عوامل اصلی و چرخش آنها به روش واریماکس، عوامل بر اساس بارهای عاملی تفسیر شده‌اند و عامل یا عوامل مرتبط با کانه‌زایی طلا شناسایی شده است. سپس با استفاده از امتیازهای عاملی، نقشه پراکنش عامل کانه‌زا تهیه و نواحی دارای بیشترین پتانسیل کانه‌زایی طلا مشخص شده است (شکل ۵).

برای اعتبارسنجی و ارزیابی درستی نتایج حاصل از تحلیل عاملی و ارزیابی عملکرد آن در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی، منطقه اکتشافی دره‌ساری که در نقشه امتیازهای عاملی دارای روند مشخصی از بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی است، به عنوان منطقه هدف انتخاب شد.

این محدوده طی دو مرحله بازدید صحرایی مورد بررسی قرار گرفته است و رخنمون‌های کانی‌سازی، زون‌های دگرسانی و شواهد ساختاری مرتبط با کانه‌زایی برداشت و مستندسازی شده‌اند. از رخنمون‌های شاخص و نیز از دو رگه طلا دار، نمونه‌های سنگی برداشت شد. بخشی از این نمونه‌ها برای تهیه مقاطع نازک و نازک- صیقلی انتخاب شدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری دو منظوره، بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری بر روی آنها انجام شد.



شکل ۳. نمودار توزیع فراوانی غلظت عناصر در رسوب‌های آبراه‌های در محور خوانسار- الیگودرز. منحنی پیوسته نشان‌دهنده توزیع چگالی داده‌هاست.

Fig. 3. Histograms showing frequency distribution diagrams of element concentrations in stream sediments in the Khonsar-Aligudarz belt. The continuous curve represents the density distribution of the data.

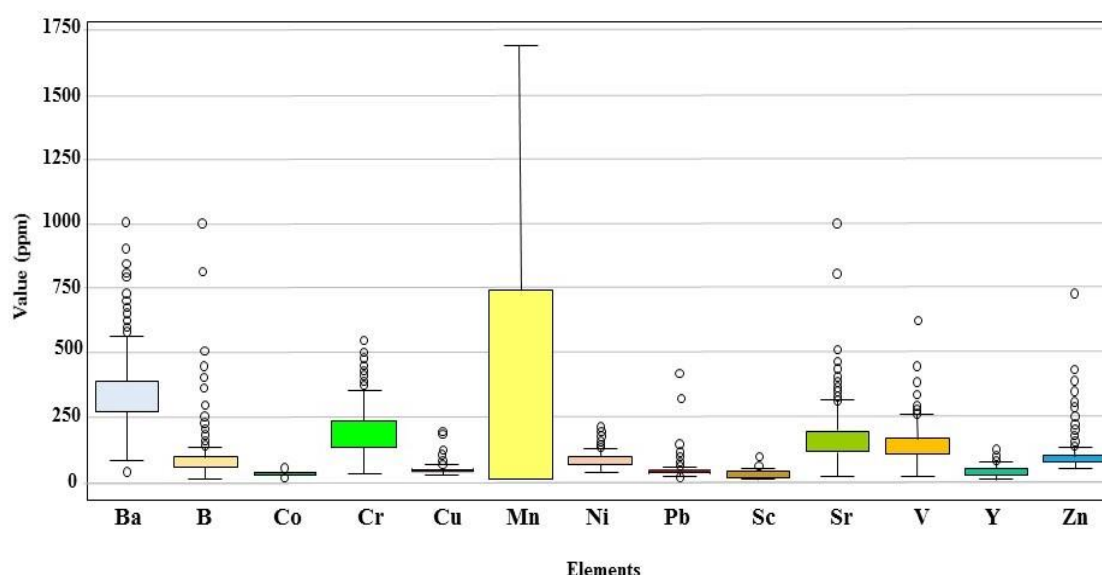
کانی‌های باریمدار و یا تمرکز موضعی داریم باشند و برای تعیین منشأ آنها باید با موقعیت مکانی نمونه‌ها و سایر عناصر همراه مقایسه شوند. عنصر بور دارای بیشترین دامنه تغییرات ۸ تا ۱۰۰۰ گرم در تن و ضریب تغییرات بسیار بالا (۷۳/۴ درصد) است که بیانگر رفتار بسیار ناهمگن این عنصر در حوضه آبریز بوده و احتمالاً با فرایندهای دگرسانی گرمابی، حضور کانی‌های رسی یا تمرکز موضعی در امتداد ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط است.

عنصر باریم با میانگین ۳۳۳ گرم در تن و دامنه تغییرات ۳۰ تا ۱۰۰۰ گرم در تن، پراکندگی نسبتاً زیادی ($CV = ۳۷\%$) را نشان می‌دهد (شکل ۳). در نمودار جعبه‌ای، بخش عمده داده‌ها در محدوده نسبتاً فشرده‌ای قرار گرفته است؛ اما تعداد قابل توجهی مقدار پرت در بالای چارک سوم مشاهده می‌شود که دامنه بالایی توزیع را گسترش داده است (شکل ۴). این الگو نشان‌دهنده وجود تعداد محدودی نمونه با غلظت Ba بالاتر از جمعیت اصلی است. چنین مقادیری می‌توانند ناشی از تغییرات سنگ مادر، حضور

منابع کانه‌دار محلی را تقویت می‌کند. با وجود دامنه نسبتاً محدودتر، نمودار جعبه‌ای عناصر Cu و Pb چندین مقدار پرت در بخش بالایی توزیع نشان می‌دهند که وجود نمونه‌های دارای غلظت بالاتر از جمعیت اصلی را آشکار می‌کنند (شکل ۴). نمودار فراوانی Zn یک چولگی مثبت مشخص و دنباله‌ای طولانی به سمت غلظت‌های بالا نشان می‌دهد؛ در حالی که نمودار جعبه‌ای روی نیز تعداد زیادی مقدار پرت بالاتر از چارک سوم را آشکار می‌کند (شکل‌های ۳ و ۴). این ویژگی نشان می‌دهد که بخش عمده نمونه‌ها دارای غلظت‌های نسبتاً پایین تا متوسط Zn هستند؛ در حالی که تعداد محدودی نمونه از غنی‌شدگی قابل توجه برخوردارند. چنین الگویی از نظر اکتشافی اهمیت دارد؛ زیرا می‌تواند نشان‌دهنده حضور منابع موضعی Zn یا کنترل‌های زمین‌شناسی و کانی‌شناسی متفاوت در برخی حوضه‌ها باشد. با این حال، این مقادیر بالا تنها در صورت تطابق با شواهد زمین‌شناسی، روابط عنصری و الگوی مکانی می‌توانند به عنوان بی‌هنجاری زمین‌شیمیایی مرتبط با کانه‌زایی تفسیر شوند.

عناصر سازگار کروم، نیکل و کبالت به ترتیب دارای میانگین‌های ۱۸۴، ۷۴ و ۲۴ گرم در تن هستند. مقدار نسبتاً بالای کروم و نیکل نسبت به میانگین پوسته قاره‌ای نشان می‌دهد که بخشی از رسوب‌ها از سنگ‌های غنی از کانی‌های فرومنیزین یا واحدهای دگرگون‌شده منشأ گرفته‌اند؛ در حالی که ضریب تغییرات پایین‌تر کبالت (۱۹/۵ درصد) بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت این عنصر در سطح منطقه است. در مقابل، کروم با ضریب تغییرات ۴۲/۶ درصد تغییرات محسوسی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از تغییر سهم واحدهای سنگی مختلف در حوضه‌های آبریز باشد (جدول ۱).

عناصر مس، سرب و روی که از عناصر شاخص در بررسی‌های اکتشافی محسوب می‌شوند، به ترتیب دارای میانگین‌های ۳۸/۹، ۳۵/۲ و ۸۹/۶ گرم در تن هستند. ضریب تغییرات متوسط تا نسبتاً زیاد این عناصر (۳۳/۷ تا ۵۹/۳ درصد) نشان می‌دهد که علاوه بر کنترل سنگ‌شناسی، تمرکز موضعی ناشی از کانه‌زایی یا دگرسانی نیز در توزیع آنها مؤثر بوده است. به ویژه سرب با ضریب تغییرات ۵۹/۳ درصد و بیشترین غلظت ۴۱۷ گرم در تن، از رفتار ناهمگن‌تری نسبت به مس و روی برخوردار است و احتمال وجود



شکل ۴. نمودارهای جعبه‌ای غلظت ۱۳ عنصر در رسوب‌های آبراه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز (همه اعداد بر حسب قسمت در میلیون است).

Fig. 4. Box and whisker plots of the concentration of 13 elements in stream sediments in the Khonsar–Aligudarz belt (all numbers are in ppm).

بی‌هنجاری و تعیین اهداف اکتشافی در منطقه مورد بررسی مورد استفاده قرار گیرند.

تحلیل عاملی

تحلیل عاملی یکی از روش‌های آماری چندمتغیره است که به منظور بررسی ساختار واریانس و همبستگی بین مجموعه‌ای از متغیرهای وابسته و تبیین آنها بر اساس تعداد محدودی عامل پنهان به کار می‌رود. به بیان دیگر، این روش تلاش می‌کند داده‌های پیچیده و چندبعدی را از طریق کاهش ابعاد و بیان آنها در قالب چند عامل بنیادی، ساده‌سازی و ساختاردهی کند. در این بررسی، برای شناسایی روابط پنهان و الگوهای مشترک بین عناصر زمین‌شیمیایی، بررسی عوامل کنترل‌کننده توزیع عناصر و تفکیک اثرات سنگ‌شناسی از فرایندهای کانه‌زایی، تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه انجام شده است که از بین آنها، شش عامل اصلی استخراج شد و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. این عوامل بیانگر منشأهای متفاوت عناصر و نقش واحدهای سنگی مختلف در ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های هستند.

منگنز بیشترین میزان پراکندگی را در میان عناصر مورد بررسی نشان می‌دهد (۹۴/۱ درصد)؛ به طوری که غلظت آن از مقادیر بسیار پایین تا ۱۶۹۰ گرم در تن متغیر است. شکل نامتقارن نمودار جعبه‌ای منگنز، همراه با دنباله بلند مقادیر بالا، نشان‌دهنده ناهمگنی شدید این عنصر است (شکل ۴). این رفتار بیانگر تأثیر شدید شرایط اکسایش- کاهش، تمرکز در اکسیدهای آهن و منگنز و یا حضور زون‌های دگرسانی موضعی است. از این رو، مقادیر بالای منگنز را نمی‌توان به طور مستقیم به کانه‌زایی نسبت داد. همچنین عناصر اسکاندیم، استرانسیوم، وانادیوم و ایتیم دارای ضرایب تغییرات بین ۴۵ تا ۴۹ درصد هستند که نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه منشأ سنگی و ترکیب کانی‌شناسی در حوضه‌های مختلف است.

به طور کلی، مقادیر ضریب تغییرات نشان می‌دهد که کبالت و نیکل اغلب تحت کنترل سنگ‌شناسی منطقه قرار دارند؛ در حالی که بور، منگنز و سرب از رفتار بسیار ناهمگن برخوردار بوده و احتمالاً علاوه بر منشأ سنگی، تحت تأثیر فرایندهای گرمایی، دگرسانی و تمرکز کانه‌زایی قرار گرفته‌اند. بنابراین، این عناصر می‌توانند به عنوان شاخص‌های مناسب برای شناسایی نواحی

جدول ۲. ماتریس تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز

Table 2. Factor loading matrix applied to stream sediment geochemical data in the Khonsar-Aligudarz belt

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Ba	0.575	0.034	0.233	0.400	0.279	0.060
B	0.138	-0.056	0.119	0.687	0.016	0.061
Co	0.094	0.653	0.068	-0.136	-0.073	0.365
Cr	0.437	0.694	-0.144	0.239	0.208	-0.086
Cu	0.031	0.206	0.115	0.085	-0.013	0.649
Mn	0.082	-0.171	0.460	0.210	-0.195	-0.013
Ni	0.153	0.852	-0.054	-0.086	-0.131	0.165
Pb	-0.071	-0.020	0.759	0.018	0.125	-0.010
Sc	0.904	0.239	0.016	-0.115	0.068	0.027
Sr	0.196	-0.067	-0.061	0.034	0.657	-0.029
V	0.733	0.302	0.035	0.307	0.152	0.141
Y	0.909	0.049	0.019	0.140	0.069	-0.017
Zn	0.139	0.104	0.688	0.050	-0.119	0.295

سامانه‌های گرمابی محسوب می‌شود و حضور منگنز نیز می‌تواند ناشی از همراهی با اکسیدهای آهن و منگنز یا فرایندهای برون‌زاد باشد. بنابراین این عامل احتمالاً بیانگر عامل کانه‌زایی بوده و می‌تواند به حضور رگه‌های سولفیدی، پهنه‌های دگرسانی یا تمرکز ثانویه عناصر فلزی در منطقه ارتباط داشته باشد.

عامل چهارم با بارهای نسبتاً زیاد بور ($0/687$)، باریم ($0/400$) و وانادیوم ($0/307$) مشخص می‌شود (جدول ۲، عامل D4). غنی‌شدگی عنصر بور معمولاً با سنگ‌های دگرگونی غنی از مواد آلی، سیالات گرمابی و دگرسانی مرتبط است. با توجه به وجود شلیست‌ها، اسلیت‌ها و شیل‌های کربن‌دار در منطقه، احتمالاً این عامل منعکس‌کننده تأثیر سنگ‌های دگرگونی غنی از مواد آلی و آزادشدن بور در طی فرایندهای دگرگونی و یا گردش سیالات است. حضور باریم نیز می‌تواند بیانگر تمرکز باریت یا جذب این عنصر در کانی‌های رسی باشد. بنابراین این عامل را می‌توان به عنوان عامل دگرسانی- رسوبی تفسیر کرد.

عامل پنجم اغلب تحت تأثیر استرانسیم ($0/657$) قرار دارد (جدول ۲، عامل D5). استرانسیم به طور عمده در کانی‌های کربناته، جانشین کلسیم می‌شود. بنابراین این عامل به وضوح منشأ کربناته داشته و بیانگر تأثیر سنگ‌آهک‌های مزوزوئیک در ترکیب رسوب‌های آبراهه است. بارهای پایین سایر عناصر در این عامل نشان می‌دهد که استرانسیم به طور مستقل از سایر فرایندهای زمین‌شیمیایی رفتار کرده و شاخص مناسبی برای سهم واحدهای کربناته در منطقه است.

عامل ششم با بار غالب مس ($0/649$) و بارهای نسبتاً مثبت کبالت ($0/365$) و روی ($0/295$) مشخص می‌شود (جدول ۲، عامل D6). جدایش مس از مجموعه سرب- روی نشان می‌دهد که این عنصر احتمالاً منشأ متفاوتی نسبت به عامل سوم دارد. با توجه به حضور توده‌های نفوذی جوان در منطقه، این عامل می‌تواند بازتاب‌دهنده تأثیر سامانه‌های ماگمایی- گرمابی و یا کانه‌زایی مس مرتبط با توده‌های نفوذی باشد. در صورتی که در بررسی‌های صحرایی آثار دگرسانی، رگه‌های کوارتزی یا کانه‌سازی سولفیدی همراه با

عامل اول دارای بارهای عاملی مثبت و بسیار قوی برای اسکاندیم ($0/904$)، ایتریم ($0/909$) و وانادیوم ($0/733$) و همچنین بارهای نسبتاً قوی برای باریم ($0/575$) و کروم ($0/437$) است (جدول ۲، عامل D1). فقدان همبستگی قابل توجه این عامل با عناصر شاخص کانه‌زایی نظیر سرب و روی، در کنار انطباق فضایی نقشه پراکندگی بار عامل با رخنمون واحدهای سنگی حوضه آبریز، نشان می‌دهد که این تجمع عنصری بیش از آنکه بازتاب فرایندهای کانه‌زایی باشد، متأثر از تغییرات سنگ‌شناختی و کانی‌شناختی منطقه است. اسکاندیم، ایتریم و وانادیوم از عناصر نسبتاً کم‌تحرک به شمار می‌روند که در طی فرایندهای هوازدگی و حمل‌ونقل رسوبی، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ منشأ خود را اغلب حفظ می‌کنند؛ از این رو، تمرکز آنها در کانی‌های مقاوم و فرومیزین می‌تواند نشان‌دهنده سهم سنگ‌های دگرگونی و تا حدی توده‌های نفوذی موجود در حوضه آبریز باشد (Madden and Tripp, 1987; Esmaeiloghli et al., 2021). بر این اساس، عامل D1 را می‌توان به عنوان یک عامل سنگ‌شناسی تفسیر کرد که در درجه اول بیانگر تغییرات ترکیب سنگ مادر در سطح حوضه است.

عامل دوم با بارهای بسیار بالای نیکل ($0/852$)، کروم ($0/694$) و کبالت ($0/653$) مشخص می‌شود. این سه عنصر از عناصر سازگار هستند و معمولاً در کانی‌های فرومیزین و سنگ‌های مافیک تا اولترامافیک (آمفیولیت و متابازیت) غنی می‌شوند (جدول ۲، عامل D2). با وجود اینکه رخنمون‌های اصلی منطقه شامل شلیست، اسلیت، فلیت، سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ و توده‌های نفوذی است، مقادیر بالای این عناصر احتمالاً ناشی از حضور افق‌های غنی از کانی‌های فرومیزین در سنگ‌های دگرگونی، تأثیر توده‌های نفوذی و یا تمرکز مکانیکی کانی‌های سنگین در رسوب‌های آبراهه است. از این رو، این عامل نیز اغلب یک عامل سنگ‌شناسی- کانی‌شناسی محسوب می‌شود.

عامل سوم دارای بارهای غالب سرب ($0/759$)، روی ($0/688$) و منگنز ($0/460$) است (جدول ۲، عامل D3). همبستگی سرب و روی معمولاً یکی از شناخته‌شده‌ترین اثرهای زمین‌شیمیایی

معدنی شناخته شده ناحیه مقایسه شده است (جدول ۱ و شکل ۵). این مقایسه نشان می‌دهد که از میان شش بی‌هنجاری اصلی شناسایی شده، چهار مورد آنها با رخدادهای معدنی پیشین (رضاآباد، حسن آباد، تخت خسرو و دره‌ساری) هم‌پوشانی مکانی دارند (شکل ۵ و جدول ۳)، که به عنوان نخستین لایه اعتبارسنجی مستقل (بر پایه داده‌های پیشین، نه بازدید جدید) برای کارایی روش تحلیل عاملی در محور خوانسار- الیگودرز عمل می‌کند. در گام بعدی، از میان بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده، منطقه دره‌ساری که بدون سابقه اکتشافی مدون بود، برای اعتبارسنجی تفصیلی (بازدید صحرائی و کانه‌نگاری) انتخاب شد تا توان این روش در شناسایی اهداف کاملاً جدید نیز محک‌زده شود.

بی‌هنجاری ۴ (منطقه دره‌ساری)

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

منطقه دره‌ساری، به عنوان یکی از رخدادهای طلای تازه شناسایی شده در بخش میانی پهنه سهندج- سیرجان، درون توالی‌های دگرگونی مزوزوئیک و در امتداد ساختارهای برشی اصلی این کمربند زمین‌ساختی قرار گرفته است (شکل ۶-۸). این موقعیت ساختاری سبب شده است تا منطقه ویژگی‌های زمین‌شناسی پهنه سهندج- سیرجان از جمله دگرگونی ناحیه‌ای، دگرشکلی چندمرحله‌ای و گردش سیالات گرمایی را به خوبی حفظ کند. در مقیاس محلی، دره‌ساری از مجموعه‌ای از واحدهای دگرگونی، نفوذی و آبرفتی تشکیل شده است که به ترتیب از قدیم به جدید شامل دگرگونه‌های پرکامبرین، دگرگونه‌های تریاس- ژوراسیک، توده‌های نفوذی گرانودیوریتی به سن پالئوسن (با اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ الیگودرز) و رسوب‌های کواترنری هستند (Mohajjel and Eftekhari Nezhad, 1992; Soheili et al., 1992; Hemmati et al., 2018). حضور واحدهای دگرگونی پرکامبرین در میان توالی‌های مزوزوئیک، بیانگر نقش مؤثر گسل‌های پی‌سنگی در جابه‌جایی و برون‌زد سنگ‌های قدیمی‌تر بوده و شواهدی از فعالیت ساختاری دیرپای این گسل‌ها را در منطقه ارائه می‌دهد (شکل ۱).

توده‌های نفوذی مشاهده شده باشد، این عامل می‌تواند به عنوان عامل ماگمایی- گرمایی تفسیر شود.

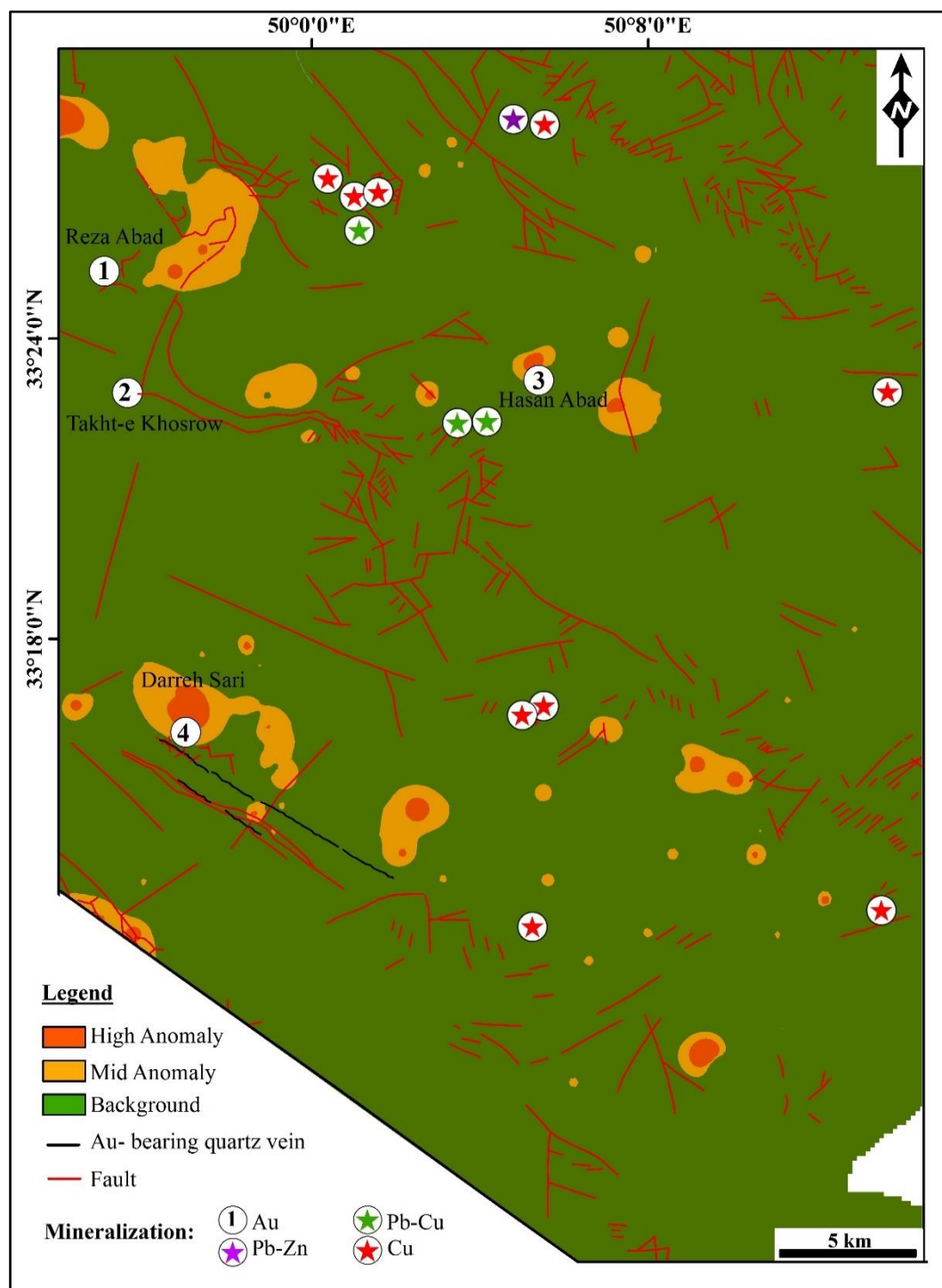
نتایج تحلیل عاملی نشان می‌دهد که در میان شش عامل استخراج شده، عوامل D3 و D6 بیشترین ویژگی‌های مرتبط با کانه‌زایی را نشان می‌دهند. عامل D3 دارای نمرات عاملی نسبتاً بالایی برای سرب، روی و منگنز است؛ در حالی که عامل D6 با بار غالب مس مشخص می‌شود.

هیچ‌یک از این دو عامل ارتباط معناداری با عوامل سنگ‌شناسی D1 و D2، که اغلب تحت تأثیر عناصر اسکاندیم، ایتیریم، و انادیوم، کروم و نیکل قرار دارند و همچنین با عامل مرتبط با سنگ‌های کربناته (D5) نشان نمی‌دهند.

نقشه توزیع نمرات عاملی مربوط به عامل کانه‌زایی در شکل ۵ ارائه شده است. رخدادهای معدنی طلا، سرب- روی، سرب- مس و مس، در محدوده نیمه غربی برکه گلپایگان و نیمه شرقی برکه الیگودرز واقع شده‌اند (شکل ۵). بر اساس این نقشه، بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با تمرکز معناداری در مجاورت رخدادهای طلای رضاآباد، حسن آباد و تخت خسرو قابل مشاهده هستند (شکل ۵). نکته حائز اهمیت، کشیدگی بی‌هنجاری‌ها با روند شمال غرب- جنوب شرق در منطقه دره‌ساری است که به خوبی با جهت‌گیری دو رگه اصلی طلادار و همچنین روند شیب‌توزیته در منطقه همخوانی دارد (شکل ۷-۸). تمامی بی‌هنجاری‌های شناسایی شده اغلب بر روی واحد دگرگونی شیب‌سبز با سن تریاس- ژوراسیک متمرکز شده‌اند که بیانگر نقش مؤثر این واحد سنگ‌شناسی در کنترل کانه‌زایی منطقه مورد بررسی است.

اعتبارسنجی ناحیه‌ای نتایج تحلیل عاملی در محور خوانسار- الیگودرز

برای اعتبارسنجی ناحیه‌ای نتایج تحلیل عاملی در سطح دو برکه زمین‌شیمیایی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلپایگان و الیگودرز، موقعیت مکانی بی‌هنجارهای استخراج شده از نقشه امتیازهای عاملی با رخدادهای



شکل ۵. نقشه توزیع فضایی نمرات عاملی مربوط به عامل کانه‌زایی استخراج شده از تحلیل عاملی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای در محور خوانسار- الیگودرز. این نقشه مناطق دارای پتانسیل بالاتر برای کانه‌زایی طلا را بر اساس ترکیب عناصر شاخص مرتبط با عامل یادشده نشان می‌دهد.

Fig. 5. Spatial distribution map of factor scores for the mineralization factor extracted from factor analysis of stream sediment geochemical data in the Khonsar–Aligudarz belt. This map delineates zones with higher potential for gold mineralization based on the combination of indicator elements associated with the respective factor.

جدول ۳. مقایسه بی‌هنجاری‌های بارزسازی در رسوب‌های آبراهه با رخداد‌های معدنی برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان و الیگودرز

Table 3. Comparison of mineralization anomalies in stream sediments with the occurrence of mineralization in the 1:100000 Golpayegan and Aligudarz map sheets

Anomaly	Location	Mineral occurrence	mineralization	Reference
1	49°55'22''E, 33°25'33''N	Reza Abad	Au-Cu-W	Soheili et al., 1992
2	49°56'03''E, 33°23'12''N	Takht-e Khosrow	Pb-Zn-Au	Soheili et al., 1992
3	50°05'21''E, 33°23'20''N	Hasan Abad	Au	Fazeli Oladi and Zamanian, 2024
4	49°57'08''E, 33°16'10''N	Darreh Sari	Au-Cu	This study

(Tbatabaei Manesh, 2016). اگرچه بر پایه داده‌های سن سنجی انجام‌شده بر روی شیست‌های سبز این ناحیه، این سنگ‌ها با سن $109 \pm 9/2$ میلیون سال، به بخش بالایی کرتاسه پیشین نسبت داده شده‌اند (Rashidnejad-Omran, 2002). این واحدها در میان دو پهنه تراسی هم‌راستا با تراس اصلی زاگرس جای گرفته و به شدت تحت تأثیر گسلش و برش‌های زمین‌ساختی قرار دارند (شکل ۱). ناحیه الیگودرز- خوانسار دارای چهار فاز دگرگونی (دیناموترمال، حرارتی، دینامیکی و دگرگونی برگشتی) و سه فاز تغییرشکل D1، D2 و D3 است. توده‌های نفوذی اسیدی در منطقه باعث دگرگونی مجاورتی در متابلیت‌ها شده‌اند و سپس تمامی سنگ‌ها تحت تأثیر دگرگونی دینامیکی قرار گرفته و به گرانیت‌های میلونیته تبدیل شده‌اند (Karimi and Tbatabaei, 2016). این روند چندمرحله‌ای دگرگونی و دگرشکلی، با شواهد ساختاری و کانی‌زایی مشاهده‌شده در منطقه دره‌ساری هماهنگی کامل داشته و چهارچوب مناسبی را برای تفسیر تاریخچه زمین‌ساختی کانساری این منطقه فراهم می‌آورد. اگرچه بخشی از این شکستگی‌ها هم‌زمان با کانه‌زایی شکل گرفته و زمینه را برای جای‌گیری رگه- رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار فراهم کرده‌اند (Hemmati et al, 2018)؛ ولی شواهد ساختاری نشان می‌دهد که بسیاری از این شکستگی‌ها و پهنه‌های برشی، پس از کانه‌زایی فعال شده‌اند و موجب جابه‌جایی و پراکندگی بخشی

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، میکاشیست‌های پرکامبرین با میان‌لایه‌های متاریولیتی است که آثار برگ‌وارگی، موج‌وارگی و بافت‌های لپیدوبلاستیک تا نماتوبلاستیک را نشان می‌دهند. متاریولیت‌ها دارای بافت پورفیری با درشت‌بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز و مسکویت در زمینه‌ای سیلیسی بوده و کشیدگی کانی‌ها، نشان‌دهنده دگرشکلی قابل توجه این واحدهاست. بر اساس پژوهش‌های اخیر، روش سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن‌های آواری، میکاشیست‌های گارنت‌دار منطقه گلیپایگان، طیف گسترده‌ای از سنین را نشان می‌دهند که بیانگر منشأ رسوبی آنهاست. شاکراردکانی و همکاران (Shakerardakani et al., 2025)، با بررسی ۳۶۲ دانه زیرکن از سه نمونه میکاشیست گارنت‌دار ناحیه موته- گلیپایگان، دریافتند که فراوان‌ترین جمعیت زیرکن‌های آواری متعلق به دوره ادیاکاران بوده و سنی غالب در حدود ۶۰۰ میلیون سال را نشان می‌دهد (Shakerardakani et al., 2025). واحدهای سنی تریاس- ژوراسیک از نظر سنگ‌شناسی، اغلب از مرمر، شیل‌های سیاه، اسلیت، فیلیت و انواع شیست (شامل شیست سریسیتی، بیوتیت- مسکویت، شیست گارنت‌دار، گارنت- استارولیت‌دار و استارولیت- کیانیت‌دار) تشکیل شده‌اند که با میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک و ماسه‌سنگ همراهی می‌شوند. این توالی تحت دگرگونی پیش‌رونده از رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت قرار گرفته‌اند (Karimi and

رگچه‌های کوارتزی با روند قطع‌کننده شیستوزیت نیز مشاهده می‌شوند که بیانگر تأثیر ساختارهای متقاطع در تشکیل کانه‌زایی است. رگه اصلی تحت تأثیر نیروهای برشی قرار دارد. برای تعیین عیار طلا، تعداد ۵ نمونه خرده‌سنگی به صورت نظام‌مند از ابتدا تا انتهای رگه اصلی یادشده برداشت شده است (شکل ۶). نتایج بررسی به روش Fire Assay به ترتیب از شرق به غرب نشان‌دهنده عیارهای ۸۷، ۱۰۵۱، ۲۵۹۱ و ۵۲۵۶ میلی گرم در تن طلا در رگه اصلی و عیار ۵۵۷ میلی گرم در تن طلا برای رگه فرعی هستند (جدول ۴). بیشترین عیارهای طلا در بخش غربی رگه است که با بی‌هنجاری شناسایی شده، تطابق خوبی دارد (شکل ۵). این داده‌ها ضمن تأیید حضور کانه‌زایی اقتصادی در محدوده، همخوانی بالای نواحی بی‌هنجار شناسایی شده در نقشه عامل کانه‌زایی با واقعیت‌های صحرایی را اثبات می‌کنند و کارایی روش تحلیل عاملی را در پهنه‌بندی پتانسیل کانه‌زایی طلا مورد تأیید قرار می‌دهند.

بررسی‌های کانه‌نگاری

بررسی‌های صحرایی در منطقه دره‌ساری نشان می‌دهد که کانه‌زایی طلا اغلب به صورت رگه‌های سیلیسی هم‌راستا با ساختارهای برشی و شیستوزیت سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک رخ داده است (شکل ۷-A و B). بررسی‌های کانه‌نگاری بر روی مقاطع نازک- صیقلی نشان می‌دهد که رگه‌های کوارتز حامل کانی‌سازی سولفیدی بوده و پیریت و پیروتیت فراوان‌ترین کانه سولفیدی در این رگه‌هاست که به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و توده‌ای در نسل‌های مختلف در متن رگه‌های کوارتزی مشاهده می‌شوند (شکل ۷-B و C). علاوه بر آن آرسنوپیریت، مارکازیت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن نیز به عنوان کانه‌های سولفیدی فرعی حضور دارند که اغلب به صورت بین‌رشدی، جانشینی و پرکننده فضاهای بین‌دانه‌ای با پیریت و پیروتیت دیده می‌شوند (شکل ۷-E و F). جانشینی پیریت توسط هماتیت با بافت داربستی نیز نشان‌دهنده

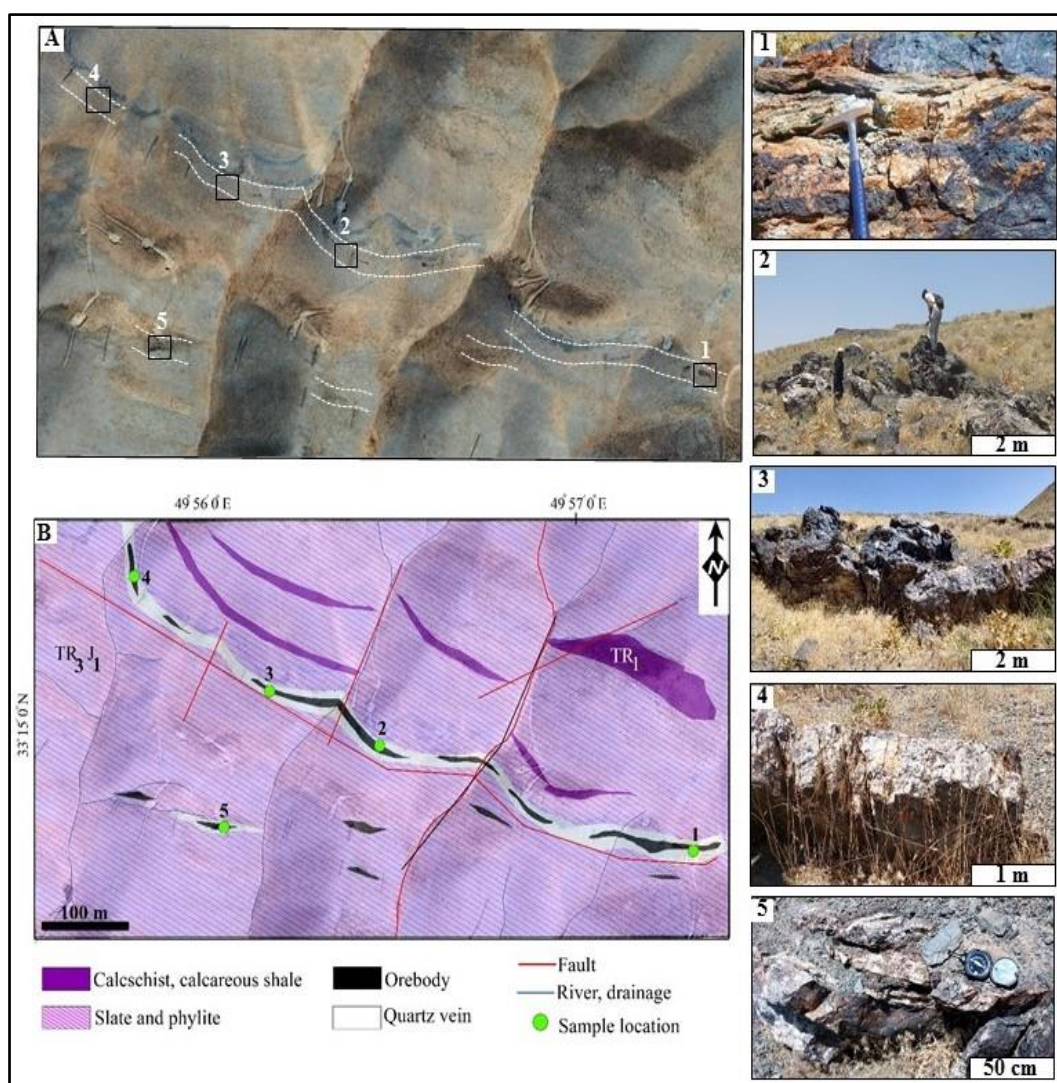
از رگه‌های کانه‌دار شده‌اند. این پدیده با الگوی ارائه‌شده برای کانسارهای طلای کوه‌زایی در مناطقی با تاریخچه زمین‌ساختی پیچیده، نظیر پهنه‌های برشی پس از دگرگونی، همخوانی دارد (Groves et al., 2020).

بررسی‌های میکروسکوپی در شیست‌های میزبان، حضور کانی‌های مسکویت، سریست، کوارتز، فلدسپات، کمتر بیوتیت و کانی‌های کدر را با بافت‌های گرانوبلاستیک، پورفیروبلاستیک و لپیدوبلاستیک نشان می‌دهد؛ در حالی که شیل‌های سیاه غنی از مواد آلی کربن‌دار (شکل ۷-D) و سولفیدهای پراکنده، احتمالاً یکی از منابع گوگرد و طلا در سامانه گرمایی منطقه محسوب می‌شوند. برون‌زدهای محدود گرانودیوریتی در بخش غربی منطقه دره‌ساری دارای بافت میکروگرانولار تا پورفیری و ترکیب کانی‌شناسی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، میکروکلین و مسکویت، همراه با مقادیر فرعی موناژیت و زیرکن هستند. این سنگ‌ها تحت تأثیر دگرسانی گرمایی کوارتز- سریست- کربنات- کلریت قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، ویژگی‌های سنگ‌نگاری این توده‌ها با گرانیتوئیدهای ژوراسیک الیگودرز و اُچستان، با بازه سنی ۱۶۰ تا ۱۷۲ میلیون سال و ماهیت نوع I کالک‌آلکان پتاسیم بالا (Tabatabaei Manesh et al., 2011; Esna- Ashari et al., 2012)، شباهت قابل توجهی دارد. این تشابه می‌تواند بیانگر ارتباط آنها با یک رویداد ماگمایی مشترک باشد. با این حال، تعیین قطعی سن و خاستگاه توده‌های نفوذی دره‌ساری نیازمند داده‌های مستقل سن‌سنجی و زمین‌شیمیایی است.

کانه‌زایی طلا در منطقه مورد بررسی اغلب به صورت دو رگه سیلیسی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق و موازی تا تقریباً موازی با جهت شیستوزیت سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک توسعه یافته است (شکل ۶-A و B). این رگه‌ها در سطح زمین با رنگ سیاه تا قهوه‌ای تیره همراه آغشتگی‌های هماتیته را به وضوح نشان می‌دهد. طول هریک از این رگه‌ها در حدود ۹۹۰ متر و پهنای متوسط آنها ۲ متر برآورد شده است. هرچند رگه‌های اصلی یادشده موازی با شیستوزیت قرار دارند؛ اما در اطراف آنها رگه-

گرمابی مرتبط با رگه‌های کوارتزی است. انطباق این شواهد صحرایی و کانه‌نگاری با بی‌هنجاری‌های استخراج‌شده از تحلیل عاملی، اعتبار مدل زمین‌شیمیایی ارائه‌شده را تأیید کرده است و نشان می‌دهد که عامل کانه‌زایی حاصل از تحلیل عاملی، توانایی مناسبی در شناسایی نواحی دارای پتانسیل کانه‌زایی طلا در منطقه مورد بررسی دارد.

بخش برون‌زاد کانه‌زایی است (شکل ۷-G). مگنتیت نیز به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار در مجاورت پیریت به صورت فرعی مشاهده شده است که بیانگر هم‌یافت آن با مراحل اولیه کانه‌زایی است (شکل ۷-H). کانی مارکازیت دارای بافت‌های کلوفرمی است (شکل ۷-I و J). این مجموعه کانیایی و روابط بافتی میان سولفیدها نشان‌دهنده تشکیل کانه‌زایی در یک سامانه



شکل ۶. A: نمایش رگه کوارتز طلادار با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق در تصویر ساس‌پلنت از منطقه دره ساری و B: شکل شماتیک از رگه اصلی کوارتز به همراه محل‌های نمونه‌برداری برای بررسی عیار طلا در منطقه دره ساری (۱-۵)

Fig. 6. A: Display of gold- bearing quartz vein with a northwest-southeast trend in the Sasplanet image of Darreh Sari area, and B: Schematic diagram of the main quartz vein along with sampling locations for gold grade assessment in the Dareh Sari area (1-5)

جدول ۴. نتایج Fire Assay طلا در منطقه دره ساری. مقادیر بر حسب ppb است.

Table 4. Fire Assay analysis results for the Darreh Sari area. The values are in (ppb).

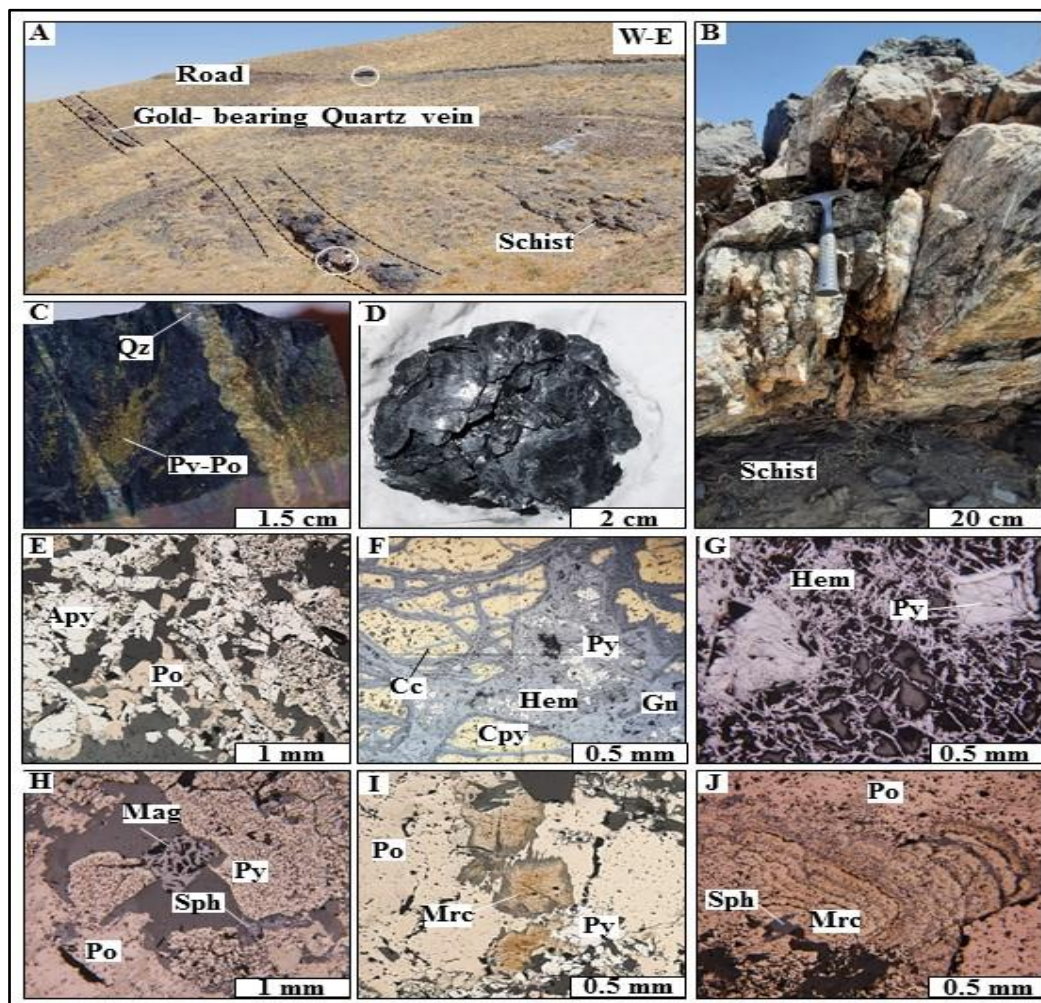
Sample No.	1	2	3	4	5
grade	87	1051	2591	5256	577

بحث

کانه‌زایی طلای دره‌ساری در بخشی از پهنه سهندج- سیرجان رخ داده است که تحول آن تحت تأثیر هم‌گرایی اقیانوس نئوتیس، دگرگونی ناحیه‌ای، دگرشکلی چندمرحله‌ای و توسعه زون‌های برشی پوسته‌ای بوده است (Mohajjel and Fergusson, 2000; Babaahmadi et al., 2021). در چنین محیطی، ترکیب زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه‌ای حاصل برهم‌کنش عوامل متعددی از جمله ترکیب سنگ منشأ، آزادسازی و بازتوزیع عناصر طی فرایندهای دگرگونی، انتقال آنها توسط سیالات گرمایی و تمرکز مجدد عناصر در امتداد ساختارهای مناسب و نفوذپذیر است. از این‌رو، تفکیک نسبی مؤلفه‌های ناشی از زمینه و سنگ‌شناسی از مؤلفه‌های احتمالی مرتبط با کانه‌زایی و دگرسانی گرمایی، برای تفسیر الگوهای زمین‌شیمیایی و شناسایی بی‌هنجاری‌های کانه‌زایی اهمیت اساسی دارد. در این پژوهش، این تفکیک با استفاده از تحلیل عاملی و بررسی الگوی فضایی نمرات عاملی انجام شد. نتایج نشان داد که عوامل D1 و D2، با توجه به بارهای غالب عناصر شاخص سنگ‌شناسی و الگوی پراکندگی منطقه‌ای آنها، اغلب بیانگر کنترل سنگ‌شناسی و تغییرات زمینه زمین‌شیمیایی هستند. در مقابل، عوامل D3 (Pb- Zn- Mn) و D6 (Cu) دارای استقلال نسبی از عوامل سنگ‌شناسی بوده و نمرات عاملی بالای آنها به صورت بی‌هنجاری‌های موضعی و مجزا، بدون انطباق مشخص با مرز واحدهای سنگی، ظاهر می‌شوند. افزون بر این، هم‌پوشانی فضایی این بی‌هنجاری‌ها با نواحی دارای شواهد دگرسانی گرمایی، تفسیر آنها را به عنوان مؤلفه‌های زمین‌شیمیایی محتمل مرتبط با کانه‌زایی تقویت می‌کند. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد که تغییرات Zn, Pb,

Mn و Cu در رسوب‌های آبراهه‌ای برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ گلیپایگان و الیگودرز را نمی‌توان فقط به تغییرات سنگ‌شناسی و ترکیب سنگ منشأ نسبت داد و احتمالاً فرایندهای گرمایی و کانه‌زایی نیز در شکل‌گیری این الگوها نقش داشته‌اند. همچنین، نتایج تحلیل عاملی نشان می‌دهد که اگرچه بخش مهمی از تغییرات زمین‌شیمیایی تحت تأثیر تنوع سنگ‌شناسی منطقه قرار دارد؛ اما مؤلفه مرتبط با کانه‌زایی طلا به خوبی از زمینه سنگ‌شناسی قابل تفکیک است. این موضوع در مناطق دگرگونی پهنه سهندج- سیرجان اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییرات ترکیب سنگ‌های دگرگون‌شده و آزادسازی عناصر طی دگرگونی می‌تواند موجب ایجاد بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی غیرمرتبط با کانه‌زایی شود. بنابراین، موفقیت تحلیل عاملی در جداسازی مؤلفه‌های گرمایی از زمینه زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که روش‌های چندمتغیره نسبت به تفسیر تک‌عنصری، قابلیت بالاتری در شناسایی سامانه‌های کانه‌دار در محیط‌های پیچیده دگرگونی دارند.

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، انطباق بسیار مناسب بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با زون‌های برشی، گسل‌های امتدادلغز و رگه‌های کوارتزی است. این همبستگی نشان می‌دهد که ساختارهای شکننده- شکل‌پذیر نقش اساسی در هدایت سیالات کانه‌زا، ایجاد فضاهای باز و تمرکز طلا داشته‌اند. این الگوی ساختاری با ویژگی‌های گزارش شده برای کمرند طلادار موته نیز همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که کانه‌زایی طلا اغلب در ارتباط با زون‌های برشی و رگه‌های کوارتزی توسعه یافته در سنگ‌های دگرگونی رخ داده است (Kouhestani et al., 2014).



شکل ۷. A: نمای کلی رگه کوارتزی طلا دار در منطقه دره‌ساری با روند شمال غرب- جنوب شرق که با شیستوزیته سنگ‌های میزبان گسترش یافته است، **B:** نمای نزدیک از رگه کوارتزی کانه‌دار که مرز مشخصی با سنگ‌های دگرگونی میزبان دارد و توسط رگه‌ی کوارتز نسل بعدی قطع شده است، **C:** نمونه دستی از رگچه‌های سولفیدی شامل پیریت و پیروتیت که رگه کوارتزی را قطع کرده‌اند، **D:** شیل‌های غنی از مواد آلی. تصویرهای میکروسکوپی در نور انعکاسی (E-J). **E:** آرسنوپیریت‌های لوزوجهی با بافت دانه پراکنده در کنار پیریت و پیروتیت، **F:** هماتیته شدن و کالکوسیت در اطراف کالکوپیریت، جانشینی پیریت توسط هماتیت و گوتیت و همچنین سرزیتی شدن گالن را نشان می‌دهد که بیانگر فرایندهای اکسایش و دگرسانی سوپرژن است، **G:** جانشینی پیریت توسط هماتیت با بافت دندریتی، **H:** مجموعه کانی‌های فلزی شامل پیریت، مگنتیت، پیروتیت و اسفالریت که به صورت هم‌یافت در رگچه کانه‌دار حضور دارند، **I:** پیروتیت در اطراف مارکازیت و **J:** بافت کلوفرمی کانی مارکازیت. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است. (Apy: آرسنوپیریت، Cc: کالکوسیت، Cpy: کالکوپیریت، Gn: گالن، Hem: هماتیت، Mag: مگنتیت، Mrc: مارکازیت، Po: پیروتیت، Py: پیروتیت، Qz: کوارتز و Sph: اسفالریت).

Fig. 7. A: General view of a gold-bearing quartz vein in the Darreh Sari area, with a north-west- southeast trend, developed parallel to the foliation of the host rocks, **B:** Close-up view of the mineralized quartz vein, showing a sharp contact with the surrounding metamorphic rocks and cut by a later-generation quartz veinlet, **C:** Hand specimen of sulfide veinlets, including pyrite and pyrrhotite, which cross-cut the quartz vein, **D:** Organic-rich shales. Reflected-light photomicrographs (E-J), **E:** Euhedral arsenopyrite crystals with a disseminated texture, occurring alongside pyrite and pyrrhotite, **F:** Hematization and chalcocite surrounding chalcopyrite, together with replacement of pyrite by hematite and goethite, as well as sericitization of galena, indicating oxidation and supergene alteration processes, **G:** Replacement of pyrite by hematite, exhibiting a dendritic texture, **H:** Assemblage of metallic minerals including pyrite, magnetite, pyrrhotite, and sphalerite, present as a paragenetic association within the mineralized veinlet, **I:** Pyrrhotite surrounding marcasite, and **J:** Colloform texture of marcasite. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Apy: arsenopyrite, Cc: chalcocite, Cpy: chalcopyrite, Gn: galena, Hem: hematite, Mag: magnetite, Mrc: marcasite, Po: pyrrhotite, Py: pyrite, Qz: quartz, and Sph: sphalerite).

چنین الگویی با مدل ارائه‌شده برای کانسارهای طلای کوه‌زایی پهنه سسندج- سیرجان کاملاً همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که علی‌یاری و همکاران (Aliyari et al., 2012) نیز پهنه‌های برشی عمیق و گسل‌های مرتبه اول و دوم را مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های جای‌گیری ذخایر طلای زرتروشت، قلقله، کرویان، قباقلوجه و خرابه معرفی کرده‌اند. توسعه رگه‌های کوارتز موازی با شistosozite و حضور رگه‌های متقاطع (شکل ۷-A و B) در منطقه دره‌ساری نیز بیانگر آن است که کانه‌زایی احتمالاً طی چندین مرحله فعالیت زمین‌ساختی، بازشدگی مجدد شکستگی‌ها و تزریق مکرر سیالات گرمابی رخ داده است. این ویژگی از شاخص‌های شناخته‌شده سامانه‌های طلای کوه‌زایی در کمربندهای دگرگونی به شمار می‌رود (Aliyari et al., 2014).

همراهی طلا با پیریت، پیروتیت، اسفالریت و گالن نیز بیانگر تکامل تدریجی یک سامانه گرمابی چندمرحله‌ای است (Mehrabi et al., 2012). در مدل‌های پذیرفته‌شده طلای کوه‌زایی (Groves et al., 2020; Goldfarb and Pitcairn, 2023)، سولفیدهای آهن نخستین کانی‌های ته‌نشین شده محسوب می‌شوند و با کاهش تدریجی دما، افت فشار و تغییر شرایط اکسایش- کاهش سیال، سولفیدهای فلزهای پایه و در نهایت طلا رسوب می‌شوند. این مجموعه کانی‌شناسی با هم‌یافت گزارش‌شده برای بسیاری از کانسارهای طلای کوه‌زایی شمال سسندج- سیرجان، از جمله قلقله و قباقلوجه، شباهت قابل‌توجهی دارد. علاوه بر این، هماتیتی‌شدن سطحی رگه‌ها احتمالاً حاصل اکسایش سولفیدهای اولیه در مراحل برون‌زاد است. با این حال، انطباق کامل بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی با رخدادهای واقعی طلا نشان می‌دهد که نشانه اولیه سیال گرمابی همچنان در رسوب‌های آبراهه حفظ شده و توسط فرایندهای هوازگی به طور کامل محو نشده است.

سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تمرکز کانه‌زایی داشته‌اند. نقش سنگ‌های دگرگونی به عنوان میزبان رگه‌های کوارتز- سولفیدی در کمربند طلادار موه نیز

گزارش‌شده است که بیانگر اهمیت این واحدها در تمرکز کانه‌زایی طلای کوه‌زایی در بخش مرکزی پهنه سسندج- سیرجان است (Abdollahi et al., 2009; Sakhdari et al., 2021; Sadati et al., 2022). این واحدها علاوه بر رفتار مکانیکی مناسب برای تشکیل پهنه‌های برشی و شبکه‌های شکستگی، به ویژه در بخش‌های غنی از شیل‌های کربن‌دار و افق‌های حاوی مواد آلی، می‌توانند طی واکنش‌های دگرگونی منبع مناسبی برای آزادسازی گوگرد، CO₂ و بخشی از فلزهای باشند. بر اساس مدل‌های نوین (Groves et al., 2020; Goldfarb and Pitcairn, 2023)، مواد آلی در سه مرحله در تشکیل کانسارهای طلای کوه‌زایی نقش دارند: ۱- غنی‌سازی اولیه طلا در رسوب‌های دیرینه، هم‌زمان با تشکیل پیریت دیاژنتیکی، ۲- انتقال طلا به صورت کمپلکس‌های هیدروکربنی و نانوذرات کلوئیدی طی دگرگونی و ۳- ته‌نشینی طلا از طریق احیای سیال توسط مواد آلی باقی‌مانده در سنگ میزبان، هم‌زمان با رسوب گرافیت. چنین فرایندی با مدل متامورفیک سیالات کانه‌زا در کانسارهای طلای کوه‌زایی سسندج- سیرجان سازگار است؛ مدلی که بر اساس آن، سیالات حاصل از آب‌زدایی و دگرگونی سنگ‌های رسوبی (به ویژه آنهایی که حاوی مواد آلی هستند) در امتداد زون‌های برشی عمیق مهاجرت کرده و در محل‌های کاهش فشار و افزایش نفوذپذیری، رگه‌های کوارتز- سولفیدی را همراه با کربنات و کلریت تشکیل داده‌اند. با توجه به اهمیت این موضوع، بررسی شواهد صحرایی مانند وجود لایه‌های کربن‌دار و یا تجمع‌های گرافیتی در واحدهای شیل سیاه منطقه (شکل ۷-D)، می‌تواند نقش این مواد را در کانه‌زایی منطقه مورد بررسی به وضوح نشان دهد.

از دیدگاه اکتشافی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های زمین‌شیمی رسوب‌های آبراهه، هنگامی که با روش‌های آماری چندمتغیره تحلیل شوند، قادرند نشانه‌های گرمابی را، حتی در محیط‌های دارای زمینه سنگ‌شناسی پیچیده آشکار سازند. اعتبارسنجی نتایج با اندیس‌های طلای شناخته‌شده و انطباق آنها با

شواهد زمین‌شناسی و کانه‌شناسی، رویکردی کارآمد برای شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با کانه‌زایی طلا در منطقه دره‌ساری و محور خوانسار- الیگودرز است. با جداسازی مؤلفه‌های سنگ‌شناسی از نشانه‌های گرمایی، این روش امکان تشخیص بی‌هنجاری‌های واقعی ناشی از فعالیت سیالات کانه‌زا را فراهم کرده است. انطباق بالای این بی‌هنجاری‌های طلا با پهنه‌های برشی شمال‌غرب- جنوب‌شرق، رگه‌های کوارتزی و سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک، نقش کلیدی ساختارهای زمین‌شناسی را در هدایت سیالات و تمرکز طلا تأیید می‌کند. همچنین، همخوانی نتایج با مشاهدات صحرایی و کانه‌نگاری، مدل کانه‌زایی گرمایی ساختار کنترل را در این منطقه معتبر می‌سازد. بنابراین، رویکرد تلفیقی ارائه‌شده می‌تواند به عنوان الگویی مؤثر برای اولویت‌بندی اهداف اکتشافی و کاهش عدم قطعیت در مراحل نخستین اکتشاف، به ویژه در مناطق هم‌ساخت با پهنه سندج- سیرجان، مورد استفاده قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این مقاله برگرفته از بخشی از رساله دکتری نویسنده نخست است که با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان به انجام رسیده است. همچنین از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی (ایمپاسکو) به دلیل همکاری و حمایت مالی در اجرای این پژوهش، صمیمانه قدردانی می‌شود.

ساختارهای کنترل‌کننده کانه‌زایی، نشان می‌دهد که این رویکرد نه تنها در شناسایی ذخایر شناخته‌شده موفق بوده است؛ بلکه برای تعیین اهداف اکتشافی جدید در امتداد محور خوانسار- الیگودرز نیز قابلیت بالایی دارد. در این راستا، تلفیق تحلیل عاملی با داده‌های زمین‌شناسی، ساختاری و محصولات سنجش از دور می‌تواند چهارچوبی مؤثر برای کاهش عدم قطعیت در مراحل اولیه اکتشاف و اولویت‌بندی اهداف حفاری در پهنه سندج- سیرجان فراهم کند. در مجموع، شواهد زمین‌شناسی، ساختاری، کانه‌شناسی و زمین‌شیمیایی این پژوهش از مدلی حمایت می‌کنند که در آن سیالات کانه‌ساز، در طی هم‌گرایی و دگرشکلی ناحیه‌ای (Karimi and Tabatabaei Manesh, 2016)، در امتداد زون‌های برشی عمیق گردش کرده و با تمرکز در ساختارهای شکننده- شکل‌پذیر و میلونیتی‌شده، موجب تشکیل رگه- رگچه‌های کوارتز- سولفیدی طلا در سنگ‌های دگرگونی تریاس- ژوراسیک شده‌اند. این مدل نه تنها با ویژگی‌های کانسارهای طلای کوه‌زایی معرفی‌شده در پهنه سندج- سیرجان از جمله کمربند طلا در موه- آستانه، مطابقت دارد (Kouhestani et al., 2014)؛ بلکه چهارچوب مفهومی مناسبی را برای تفسیر بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی و طراحی برنامه‌های اکتشاف طلا در سایر بخش‌های این کمربند فلز زایی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد تحلیل عاملی بر روی داده‌های زمین‌شیمیایی رسوب‌های آبراهه، همراه با تلفیق آن با

References

- Abdollahi, M.J., Karimpour, M.H., Kheradmand, A. and Zarasvandi, A.R., 2009. Stable isotopes (O, H, and S) in the Muteh gold deposit, Golpaygan area, Iran. *Natural Resources Research*, 18: 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11053-009-9091-3>
- Alavi, M., 1996. Tectono-stratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain system in Northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1): 1–33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)
- Alirezaei, S. and Hassanzadeh, J., 2012. Geochemistry and zircon geochronology of the Permian A-type Hasanrobat granite, Sanandaj-Sirjan belt: A new record of the Gondwana break-up in Iran. *Lithos*, 151: 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.015>
- Aliyari, F., Rastad, E., Goldfarb, R.J. and Sharif, J.A., 2014. Geochemistry of hydrothermal alteration at the Qolqoleh gold deposit, northern Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, northwestern Iran: Vectors to high-grade ore bodies. *Journal of Geochemical Exploration*, 140: 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.007>
- Aliyari, F., Rastad, E. and Mohajjel, M., 2012. Gold deposits in the Saanandaj-Sirjan zone: orogenic gold deposits or intrusion-related gold system? *Resource Geology*, 62(3): 296–315. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00196.x>
- Azizi, H. and Stern, R.J., 2019. Jurassic igneous rocks of the central Sanandaj-Sirjan zone (Iran) mark a propagating continental rift, not a magmatic arc. *Terra Nova*, 31(5): 415–423. <https://doi.org/10.1111/ter.12404>
- Babaahmadi, A., Davoudian, A.R. and Mohajjel, M., 2021. Transpression in the Sanandaj-Sirjan zone (Zagros Orogen, Iran) during the Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from the north Shahrekord shear zone. *Journal of Structural Geology*, 149: 104387. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104387>
- Bagheri, S. and Stampfli, G.M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics*, 451(1–4): 123–155. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.047>
- Behera, S. and Panigrahi, M.K., 2021. Gold prospectivity mapping in the Sonakhan Greenstone Belt, Central India: A knowledge-driven guide for target delineation in a region of low exploration maturity. *Natural Resources Research*, 30(6): 4009–4045. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09962-x>
- Carranza, E.J.M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. V. 11. Elsevier, Amsterdam, 368 pp. Retrieved September 27, 2026 from <https://www.sciencedirect.com/handbook/handbook-of-exploration-and-environmental-geochemistry/vol/11/suppl/C>
- Derikvand, S., 2022. Strain pattern and vorticity analysis in the transpressional Kamandan area within the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 158: 104595. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104595>
- Esmailoghli, S., Tabatabaei, S.H., Carranza, E.J.M., Hosseini, S. and Deville, Y., 2021. Spatially-weighted factor analysis for extraction of source-oriented mineralization feature in 3D coordinates of surface geochemical signal. *Natural Resources Research*, 30(6): 3925–3953. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09933-2>
- Esna-Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M.V., Hassanzadeh, J. and Sepahi, A.A., 2012. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.09.001>
- Fazeli Oladi, A. and Zamanian, H., 2024. Invers modeling and interpretation of magnetic and geoelectrical data in the gold area of Hassan abad (south of Golpayegan). *Advanced Applied Geology*, 14(2): 556–577. <https://doi.org/10.22055/aag.2024.44283.2393>
- Fletcher, W.K., 1997. Stream sediment geochemistry in today's exploration world. *Exploration Geochemistry*, (32): 249–260. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Stream-Sediment-Geochemistry-in-Today-s-World-Fletcher/4cecf9ee97c7effd1df13b9cf77c3450b435898e>
- Goldfarb, R.J. and Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>

- Goldfarb, R.J. and Pitcairn, I., 2023. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita*, 58(1): 5–35. <https://doi.org/10.1007/s00126-022-01146-8>
- Groves, D.I., Santosh, M., Deng, J., Wang, Q., Yang, L. and Zhang, L., 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275–292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Hale, M. and Plant, J.A., 1994. *Handbook of Exploration Geochemistry. Drainage geochemistry*, V. 6. ELSEVIER Amsterdam, 766 pp. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.sciencedirect.com/handbook/handbook-of-exploration-geochemistry/vol/6/suppl/C>
- Helba, H.A., Khalil, K.I., El-Farnawany, H.M. and El-Raghy, S.A., 2021. Stream sediment geochemical exploration for gold in Central Eastern Desert, Egypt: Application of the concentration-number fractal model, factor analysis, and geochemical mineralization probability index. *Geochemistry*, 81(4): 125811. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125811>
- Hemmati, O., Tabatabaei Manesh, S.M. and Nadimi, A.R., 2018. Deformation mechanism of Darreh Sari metapelites Sanandaj- Sirjan zone, Iran. *Geotectonic*, 52(2): 281–296. <https://doi.org/10.1134/S0016852118020024>
- Horton, B.K., J., Hassanzadeh, D.F., Stockli, G.J., Axen, R.J., Gillis, B., Guest, A., Amini, M.D., Fakhari, S., Zamanzadeh, M. and Grove, M., 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics, *Tectonophysics*, 451(1–4): 97–122. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.063>
- Karimi, S. and Tabatabaei Manesh, S.M. 2016. Textural relations, P-T path, polymetamorphism and also geodynamic significance of metamorphic rocks of the Aligudarz- Khansar region, Sanandaj- Sirjan zone, Iran. *Petrology*, 24(1): 100–115. <https://doi.org/10.1134/S086959111506003X>
- Kouhestani, H., Rashidnejad Omran, N., Rastad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R.J. and Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91: 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.027>
- Madanipour, S., Yassaghi, A., Ehlers, T.A. and Enkelmann, E., 2018. Tectonostratigraphy, structural geometry and kinematics of the NW Iranian Plateau margin: insights from the Talesh Mountains, Iran. *American Journal of Science*, 318(2): 208–245. <https://doi.org/10.2475/02.2018.02>
- Madden, D.J. and Tripp, R.B., 1987. Geochemical signatures of mineral deposits and rock types as shown in stream sediments from the Chugach and Prince William terranes, Anchorage Quadrangle, southern Alaska. U.S. Geological Survey, Open-File Report, Report No. 87–131. 8 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr87131>
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E. and Shahabifar, M., 2012. Ore mineralogy and fluid inclusions constraints on genesis of the Muteh gold deposit (western Iran). *Geopersia*, 2(1): 67–90. <https://doi.org/10.22059/jgeope.2012.24802>
- Mohajjel, M. and Eftekhari Nezhad, J., 1992. Geological map of Golpayegan, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125–1139. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7)
- Moritz, R., Ghazban, F. and Singer, B.S., 2006. Eocene gold ore formation at Muteh, Sanandaj-Sirjan tectonic zone, Western Iran: a result of late-stage extension and exhumation of metamorphic basement rocks within the Zagros Orogen. *Economic geology*, 101(8): 1497–1524. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1497>
- Ouchchen, M., Boutaleb, S., Abia, E.H., El Azzab, D., Miftah, A., Dadi, B., Echogdali, F.Z., Mamouch, Y., Pradhan, B., Santosh, M. and Abioui, M., 2022. Exploration targeting of copper deposits using staged factor analysis, geochemical mineralization prospectivity index, and fractal model (Western Anti-Atlas, Morocco). *Ore Geology Reviews*, 143: 104762. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104762>
- Rashidnejad-Omran, N., 2002. Petrology and geochemistry of the volcano-sedimentary and plutonic rocks of the south of the Delijan, concentration on gold mineralization. Ph.D. Thesis, Tarbiat Moddares University, Tehran, Iran. 160 pp

- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S., 1979. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Academic Press, London, 637 pp.
- Sadati, S.N., Nourian Ramsheh, Z. and Yazdi, M., 2022. Genesis and nature of ore-forming fluids in the Senjedeh gold mine, Central Iran; using microthermometry study. *Advanced Applied Geology*, 11(4): 753–769.
<https://doi.org/10.22055/AAG.2020.28994.1961>
- Sadeghi, M., Billay, A. and Carranza, E.J.M., 2015. Analysis and mapping of soil geochemical anomalies: Implications for bedrock mapping and gold exploration in Giyani area, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 154: 180–193.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.11.018>
- Sakhdari, M., Behzadi, M., Yazdi, M., Rachidnejad-Omran, N. and Sadeghi Naeini, M., 2021. Geology, Mineralization and Geochemistry of Au in the Godar Sorkh area, Muteh region, Sanandaj-Sirjan zone. *Journal of Economic Geology*, 13(2): 245–265. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v13i2.85427>
- Schwertman, N.C. and de Silva, R., 2007. Identifying outliers with sequential fences. *Computational statistics and data analysis*, 51(8): 3800–3810.
<https://doi.org/10.1016/j.csda.2006.01.019>
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Monfaredi, B. and Friedl, G., 2015. Tectonic history of the central Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Potentially Permian to Mesozoic polymetamorphism and implications for tectonics of the Sanandaj-Sirjan zone. *Geophysical Research Abstracts*, 17: 2015-6474. Retrieved September 22, 2026 from <https://unizalzburg.elsevierpure.com/en/publications/tectonic-history-of-the-central-sanandaj-sirjan-zone-iran-potenti-2/>
- Shakerardakani, F., Xiao, W., Shafaii Moghadam, H. and Li, X., 2025. Cadomian Magmatism in the Muteh–Golpaygan Area, Iran: Insights into Crustal Growth and Tectono-Magmatic Evolution. *Minerals*, 15(3): 201.
<https://doi.org/10.3390/min15030201>
- Soheili, M., Jafarian, M.B. and Abdollahi, M.R., 1992. Geological map of Aligudarz, scale 1:100,000. Geological Surver of Iran.
- Stampfli, G., Marcoux J. and Baud, A., 1991. Tethyan margins in space and time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 87(1–4): 373–409.
[https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90142-E](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90142-E)
- Stern, R., Shafaii Moghadam, H., Pirouzi, M. and Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49: 9–36.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-052109>
- Tabatabaei Manesh, S.M., Mirlohi, A.S. and Movahedi, M., 2011. Petrology and mineral chemistry of Ochestan granitoids (south of Mahallat, Markazi province). *Petrological Journal*, 2(7), 51-74. Retrieved September 22, 2026 from <https://www.magiran.com/paper/997901/petrology-and-mineral-chemistry-of-ochestan-granitoids-south-of-mahallat-markazi-province?lang=en>
- Tukey, J., 1997. More honest foundations for data analysis. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 57(1): 21–28.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3758\(96\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3758(96)00032-8)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
<https://dx.doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Yilmaz, H., 2007. Stream sediment geochemical exploration for gold in the Kazdag Dome in the Biga Peninsula, Western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16(1): 33–55. Retrieved October, 2011 from <https://journals.tubitak.gov.tr/earth/vol16/iss1/3/>
- Zanchetta, S., Berra, F., Zanchi, A., Bergomi, M., Caridroit, M., Nicorab, A. and Heidarzadeh, G., 2013. The record of the Late Paleozoic active margin of the Palaeotethys in NE Iran: constraints on the Cimmerian orogeny. *Gondwana Res*, 24(3–4): 1237–1266.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.013>

- مقاله‌ای که برای بررسی و چاپ به نشریه ارسال می‌شود، نباید قبلاً در نشریه داخلی و خارجی دیگری به چاپ رسیده باشد، همچنین هم‌زمان (تا اعلام نظر نهایی این نشریه) به نشریه‌های دیگر داخلی و یا خارجی ارسال نشود. چاپ خلاصه مقاله ارائه شده در کنگره‌ها، سمپوزیوم‌ها و سمینارهای داخلی و خارجی این محدودیت را ندارد.
- در مقاله‌هایی که از پایان‌نامه ارشد یا دکتری استخراج شده است، اسامی اساتید راهنما و مشاور ذکر شود.
- در صورتی که مقاله برگرفته از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه یا طرح پژوهشی مراکز تحقیقاتی است، باید اسامی پژوهشگران و محل انجام پژوهش ذکر شود.
- نشریه در رد، قبول و ویراستاری مقاله آزاد است.
- دریافت مقاله فقط از طریق وب‌سایت نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، به آدرس <https://econg.um.ac.ir> امکان‌پذیر است.
- مقاله‌ها توسط متخصصان موضوعی داوری می‌شوند و در صورت تصویب و پذیرش مقاله، در فهرست مقاله‌های آماده انتشار سایت نشریه قرار می‌گیرند و بعد از ویراستاری و صفحه‌آرایی به نوبت به شماره‌ای خاص اختصاص داده می‌شوند.
- داوری مقاله دوسو ناشناس است (در کلیه مراحل بررسی مقاله، داوران و نویسندگان از اسامی یکدیگر مطلع نخواهند شد).
- تکمیل و ارسال فرم تعهدنامه، تعارض منافع و مشخصات نویسندگان الزامی است (برای دریافت فرم‌ها به سایت نشریه، منوی نویسندگان و زیرمنوی **فرم** مراجعه‌شود).
- ایمیل نویسنده مسئول حتی‌الامکان، ایمیل سازمانی باشد.
- اطلاعات بیشتر و کامل‌تر را در سایت نشریه (منوی نویسندگان و زیرمنوی **شرایط و ضوابط ارسال مقاله**) مشاهده نمایید.

سیاست دسترسی آزاد

این نشریه تحت مجوز بین‌المللی **Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)** است و به صورت دسترسی آزاد و بدون هزینه در دسترس خوانندگان و نویسندگان قرار می‌گیرد. تمام هزینه‌های نشریه توسط دانشگاه فردوسی مشهد تأمین می‌شود.

انواع مقاله قابل پذیرش

- مقاله پژوهشی
- مقاله مروری
- یادداشت پژوهشی
- نقد علمی

بخش‌های مقاله

مقاله شامل بخش‌های زیر باشد. اطلاعات کامل درباره هر بخش را در [راهنمای نگارش](#) (سایت نشریه، منوی نویسندگان و زیرمنوی [راهنما](#)) مشاهده نمایید.

- عنوان (فارسی و انگلیسی)
- نام نویسندگان و وابستگی سازمانی (فارسی و انگلیسی)
- چکیده (فارسی و انگلیسی)
- واژه‌های کلیدی (فارسی و انگلیسی)
- مقدمه
- روش مطالعه
- بحث و بررسی
- نتیجه‌گیری
- تعارض منافع
- قدردانی
- منابع

تدوین مقاله

در زیر خلاصه‌ای از راهنمای تدوین مقاله آورده می‌شود. اطلاعات کامل درباره نگارش مقاله را در [راهنمای نگارش](#) موجود در سایت نشریه (منوی نویسندگان و زیرمنوی [راهنما](#)) مشاهده نمایید.

- مقاله با نرم‌افزار WORD تایپ شود.
- متن مقاله به زبان فارسی باشد.
- مقاله دارای چکیده فارسی و چکیده مبسوط انگلیسی (طبق ساختار مشخص شده در [راهنمای نگارش](#)) باشد.
- نسخه اولیه به صورت تک ستونی تهیه شود.
- تعداد صفحه‌های مقاله از ۲۵ صفحه (شامل متن، شکل، جدول و منابع) تجاوز نکند.
- حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۲/۵، از راست و چپ ۲ سانتی‌متر باشد. ساین صفحه A4 و فاصله سطرها ۱/۵ (1.5 lines) تنظیم شود.
- اندازه و فونت قلم‌هایی که در نوشتن مقاله استفاده می‌شود را در فایل [راهنمای نگارش](#) موجود در سایت نشریه مشاهده نمایید.
- هنگام تنظیم مقاله از به کار بردن واژه لاتین که هم‌ارز فارسی دارد، خودداری شود.
- منابع انتهای مقاله با نیم سانتی‌متر فرورفتگی (Hanging) تنظیم شوند و از آوردن عدد و خط تیره در کنار منابع خودداری شود.
- تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.
- تمام عددها در متن مقاله، فارسی باشد و در صورت اعشاری بودن، ممیز به صورت (/) نوشته شود (عدد فقط در جدول و شکل به انگلیسی است).
- توضیح شکل (زیرنویس) و توضیح جدول (بالانویس) به دو زبان فارسی و انگلیسی باشد (در فارسی و انگلیسی مطابق هم باشند).
- در توضیح شکل و جدول به نام منطقه مورد بررسی اشاره شود.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

شکل

- شکلی که برای نشان دادن موقعیت جغرافیایی منطقه در ایران، استان و یا بخش کوچک‌تری نشان داده می‌شود، باید طول و عرض جغرافیایی، جهت شمال و مقیاس خطی داشته باشد و موقعیت (طول و عرض جغرافیایی) به درجه، دقیقه و ثانیه تنظیم شود.
- نقشه راهنما داشته باشد و در راهنما ترتیب سنی واحدهای سنگی از قدیم به جدید رعایت شود.
- به صورت رنگی و با کیفیت مناسب و مطلوب تهیه شود.
- کلمه، حرف، عدد و ... به کار رفته در داخل شکل، فقط به زبان انگلیسی باشد.
- علائم اختصاری شکل در زیرنویس آن شکل توضیح داده شوند (با ذکر منبع).
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

جدول

- در نرم افزار WORD تایپ شود.
- جدول در صفحه عمودی تایپ شود (Portrait).
- موقعیت باید به درجه، دقیقه و ثانیه ذکر شود.
- کلمه و حرف به کار رفته در داخل جدول به زبان انگلیسی (با سایز ۱۰ و فونت Times New Roman) باشد و در صورت اعشاری بودن اعداد، ممیز به صورت نقطه (.) نوشته شود.
- جدول به دلیل انگلیسی بودن باید از چپ به راست تنظیم شود.
- فاقد خط‌های عمودی باشد.
- در توضیح جدول (بالانویس)، واحد اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و فرعی ذکر شود.
- ترتیب اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی استفاده شده در جدول‌ها به ترتیب ظرفیت شیمیایی باشد.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

فرمول

- معادله و فرمول چپ‌چین شود.
- شماره‌گذاری فرمول، یک سطر بالاتر از فرمول قرار گیرد.

منابع

- منابع استفاده شده در مقاله، از منابعی باشند که به صورت کتاب، نشریه علمی، پایان‌نامه و ... بوده و قابل دسترسی توسط خواننده باشد. از منابع غیرقابل دسترسی و منابع غیرعلمی مانند درسنامه، جزوه استفاده نشود.
- استناد به منبع در متن مقاله (استنادهای درون متنی) و همچنین منابع انتهایی مقاله (برون متنی) باید به انگلیسی نوشته شوند (اگر در مقاله از منبع فارسی استفاده شده باشد، باید اطلاعات منبع به زبان انگلیسی برگردانده شود).
- اگر منبع مورد استفاده در مقاله، فارسی باشد؛ برای تبدیل اطلاعات کتابشناختی آن به انگلیسی، باید تمام اطلاعات آن (مانند نام نویسنده (نویسندگان)، عنوان منبع (نام نشریه، کتاب، گزارش) و سایر اطلاعات مورد نیاز) از صفحه عنوان انگلیسی یا سایت اینترنتی منبع گرفته شود. از ترجمه شخصی اطلاعات منابع فارسی خودداری نمایید.
- سال‌های شمسی به میلادی تبدیل شوند (در استنادهای درون متنی و منابع برون متنی).
- اطلاعات کامل همه استنادهای درون متنی (طبق نمونه‌های ذکر شده) در انتهایی مقاله آورده شود. هر منبعی که در متن مقاله، شکل و جدول و توضیح آنها آمده باشد، اطلاعات کامل آن حتماً باید در انتهایی مقاله ذکر شود و همچنین هر منبعی که در انتهایی مقاله آمده باشد، باید در درون متن نیز به آن استناد شده باشد.
- نحوه نوشتن منابع برون متنی و استنادهای درون متنی در ادامه آمده است.
- اطلاعات کامل را در [راهنمای نگارش](#) سایت نشریه مشاهده نمایید.

ارجاع درون‌متنی (استناد درون‌متنی):

به دلیل این که منابع فارسی به کار رفته در مقاله باید به انگلیسی برگردانده شوند، لازم است ارجاع درون‌متنی منابع فارسی نیز به انگلیسی ذکر شوند. ارجاع در متن مقاله طبق موارد زیر باشد:

- ارجاع به منبعی با یک نویسنده: بین نام خانوادگی نویسنده و سال نشر ویرگول قرار می‌گیرد. مانند: (Sheikhi, 1995)
- ارجاع به منبعی با دو نویسنده: بین نام خانوادگی دو نویسنده کلمه and قرار می‌گیرد و بعد از ویرگول، سال نشر منبع ذکر می‌شود. مانند: (Salavati and Fahim Guilani, 2014)
- ارجاع به منبعی با بیش از دو نویسنده: بعد از نام خانوادگی نویسنده اول، عبارت et al. و سپس بعد از ویرگول سال نشر می‌آید. مانند: (Ghourchi et al., 2014)
- ارجاع به بیش از یک منبع: اگر بخواهیم در یک محل به چند منبع ارجاع دهیم، ارجاع مانند نمونه‌های بالا صورت می‌گیرد؛ با این تفاوت که همه داخل یک پرانتز قرار می‌گیرند و با نقطه ویرگول از هم جدا می‌شوند و ترتیب آوردن آنها بر اساس سال نشر از قدیم به جدید است. مانند: (Bardossy and Aleva, 1990; Arehart, 1996; Habibzadeh et al., 2014)
- هرگاه در متن، توضیح شکل و جدول (زیرنویس و بالانویس)، به طور مستقیم به منبع و نویسنده‌ای اشاره شود، باید ابتدا نام نویسنده منبع به فارسی و بعد در داخل پرانتز همراه با سال نشر به انگلیسی (سال میلادی) بیاید. مثال: کریم پور و همکاران (Karimpour et al., 2012)

ارجاع برون‌متنی (منابع انتهایی مقاله):

- منابع استفاده شده در کل مقاله فقط به زبان انگلیسی و سال میلادی باشد.
- برای استناد به مقاله‌های فارسی، از عنوان، نام نویسندگان و سایر اطلاعات کتابشناختی مورد نیاز در صفحه عنوان انگلیسی، چکیده انگلیسی و یا صفحه انگلیسی سایت منبع استفاده کنید و از ترجمه شخصی آن خودداری نمایید:
- برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین دارند، به صفحه انگلیسی سایت منبع مراجعه کنید.
- برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین ندارند، به صفحه عنوان انگلیسی و مشخصات انگلیسی پشت جلد مراجعه نمایید.
- برای استناد به آثار خارجی ترجمه شده به فارسی، نام نویسندگان فرنگی و عنوان انگلیسی یا عنوان اصلی اثر ذکر شود و سپس نام مترجم پس از عبارت (Translated by) بیاید و بعد سایر اطلاعات کتابشناختی منبع ترجمه شده به زبان انگلیسی آورده شود (لازم است محل نشر و ناشر کتاب یا اثر ترجمه شده بیاید و نه اثر اصلی).
- منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می‌شود.
- نام همه نویسندگان ذکر شود و از آوردن عبارت "et al." و others به جای آوردن نام سایر نویسندگان منبع، خودداری شود.
- نام منبع (نشریه، کتاب و ...) و ناشر مخفف نباشد و به طور کامل آورده شود.
- برای استناد به مقاله‌هایی که هنوز منتشر نشده‌اند، به جای سال نشر از in press استفاده شود.
- برای مقاله منتشر شده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.

- منابعی که در اصل به زبان فارسی و دارای چکیده انگلیسی هستند، بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت (in Persian with English abstract) در انتها مشخص شوند.
- منابعی که در اصل به زبان فارسی هستند و چکیده انگلیسی ندارند، بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت (in Persian) در انتها مشخص شوند.
- برای مقاله‌های منتشر شده که DOI دارند، آوردن DOI در پایان هر منبع الزامی است (DOI با آدرس دقیق ذکر شود).
مثال: <https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.80951>
- برای سایر منابعی که از سایت‌های اینترنتی گرفته شده‌اند و DOI ندارند، آدرس صفحه اینترنتی را بیاورید. بدین صورت که مانند دیگر منابع همه اجزاء را با توجه به نوع منبع آورده و در پایان آدرس اینترنتی را بعد از تاریخ بازیابی بیاورید. تاریخ بازیابی را به شکل زیر بیاورید:

Retrieved September 26, 2018 from <http://> :

Karimpour, M.H. and Malekzadeh Shafaroudi, A., 2013. Geochemistry of stream sediments, waters and Uranium and Thorium anomalies on Nyshabour turquoise mine and its environmental impacts in the lives of rural areas. Iranian Journal of Mineralogy and Crystallography, 21(1): 3–18. (in Persian with English abstract) Retrieved April 22, 2021 from <http://ijcm.ir/article-1-326-fa.html>

- اطلاعات هر منبع با توجه به نوع منبع، دقیقاً مانند **نمونه‌های زیر** نوشته شود. همه اجزاء مشخص شده در نمونه‌ها ذکر شوند. از آوردن اجزاء اضافی خودداری شود و اجزاء نیز در جای مشخص شده قرار گیرند. علائم نگارشی نیز دقیق و طبق فرمت باشد (به اجزاء، علائم نگارشی، فاصله و طرز قرار گرفتن هر جزء در نمونه‌ها توجه شود).

منابع برون متنی (با اطلاعات کامل) طبق نمونه‌های زیر تنظیم شوند:

برای نشان دادن بهتر، اجزاء و علائم نگارشی منابع با رنگ‌های متفاوت اعمال شده است.

مقاله منتشر شده در نشریه (Journal Article)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان مقاله، نام نشریه، دوره نشریه (جلد)، شماره نشریه، شماره صفحه ابتدایی و انتهای مقاله در نشریه، DOI یا آدرس اینترنتی

توضیح: برای مقاله، آوردن شماره ابتدایی و انتهای مقاله در نشریه، شماره دوره و شماره نشریه (Issue) الزامی است. در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.

Ghourchi, N., Karimpour, M.H., Farmer, G.L. and Stern, S., 2014. Geology, alteration, age dating and petrogenesis of intrusive bodies in Halak Abad prospect area, NE Iran. Journal of Economic Geology, 6(1): 23–48. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.V6I1.23015>

مقاله ارائه شده در همایش (سمپوزیوم، کنگره، میتینگ و ... علمی) (Conference Article)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان مقاله، نام همایش، محل برگزاری، نام شهر محل برگزاری، نام کشور محل برگزاری، DOI یا آدرس اینترنتی

Majidifar, M., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2013. Geology, mineralization and geochemistry of Koli prospect area, northeast of Ghaen, South Khorasan province. 5th Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Retrieved September 26, 2018 from https://www.researchgate.net/publication/273575902_Geology_mineralization_and_geochemistry_of_Koli_prospect_area_northeast_of_Ghaen_South_Khorasan_province

بخشی (فصلی) از کتاب، انتشارات ویژه (به طوری که هر بخش دارای نویسنده جداگانه باشد) (Book Section)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان بخش (فصل) کتاب، ویراستار، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره صفحه ابتدایی و انتهایی بخش کتاب، DOI یا آدرس اینترنتی

توضیح: در صورتی که یک ویراستار اصلی داشته باشد، به جای (Editors) از (Editor) استفاده می شود. در این قسمت ابتدا حرف اول نام کوچک ویراستاران و سپس نام خانوادگی می آید و صفحه نیز، صفحه ابتدایی و انتهایی بخش یا فصل کتاب مورد نیاز است.

Lentz, D.R., 1994. Exchange reactions in hydrothermally altered rocks: examples from biotite-bearing assemblages. In: D.R. Lentz (Editor), Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems. Geological Association of Canada, Canada, pp. 69-99. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_128

کتاب (Book)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره کل صفحه ها
توضیح: برای کتاب، آوردن شماره کل صفحه های کتاب الزامی است.

Bardossy, G. and Aleva, G.J.J., 1990. Lateritic bauxite. Elsevier, Amsterdam, 624 pp.

ترجمه کتاب (Book Translated)

نویسنده (نویسندگان)، مترجم (مترجمان)، سال نشر، عنوان کتاب، ناشر، محل نشر، شماره کل صفحه ها
توضیح: برای محل نشر و ناشر، باید اطلاعات ترجمه کتاب بیاید و نیازی به محل و ناشر اثر اصلی نیست.

Mason, B. and Moore, K.B. (translated by Moore, F. and Sharafi, A.A.), 2003. Principles of Geochemistry. Shiraz University Press, Shiraz, 566 pp.

پایان نامه (Thesis)

نویسنده، سال نشر، عنوان پایان نامه، درجه پایان نامه، نام دانشگاه، نام شهر، کشور، شماره کل صفحه ها
توضیح: برای رساله دکتری به جای M.Sc. از Ph.D. استفاده می شود.

Sheikhi, R., 1995. Study of economic geology of Shahrak fe deposit, east of Takab. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 161 pp.

کارگاه علمی (Workshop)

برگزارکننده (برگزارکنندگان)، سال برگزاری، عنوان، نام کارگاه، محل برگزاری، نام شهر محل برگزاری، نام کشور محل برگزاری،
(تاریخ برگزاری)، DOI یا آدرس اینترنتی

Calvin, W.M., Kratt, C. and Faulds, J.E., 2005. Infrared spectroscopy for drillhole lithology and mineralogy. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, United States (21 February 2005). Retrieved September 26, 2018 from <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2005/calvin.pdf>

نقشه (Map)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان نقشه، ناشر

توضیح: در صورت داشتن محل نشر، می توانید آن را بعد از ناشر بیاورید.

Karimpour, M.H., Ashouri, A. and Saadat, A., 2009. Geological map of Taherabad, scale 1:100,000. Geological Surver of Iran.

گزارش (Report)

نویسنده (نویسندگان)، سال نشر، عنوان گزارش، ناشر، محل نشر، شماره گزارش، شماره کل صفحه ها

Hirayama, K., Samimi, M., Zahedi, M. and Hushmandzadeh, A.M., 1966. Geology of Tarom district western part (Zanjan area, northwest Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 8, 40 pp.

منابع اینترنتی (Internet Resources)

هر منبع اینترنتی را با توجه به نوع منبع به شکل های ذکر شده قبل در آورده و در پایان، آدرس صفحه اینترنتی آن منبع بعد از تاریخ بازیابی آورده شود. مثال:
Retrieved September 26, 2018 from <https://.....>

این نشریه عضو کمیته بین‌المللی اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیروی می‌کند.

منشور اخلاق نشریه زمین‌شناسی اقتصادی، بر مبنای رهنمودهای ارائه‌شده توسط کمیته اخلاق انتشار (COPE) طراحی شده است و از کلیه کاربران انتظار می‌رود به اصول اخلاقی ذکر شده پایبند باشند. بدیهی است هرگونه سرقت علمی یا سایر رفتارهای غیر اخلاقی به حذف مقاله از فرایند داوری منجر خواهد شد. این منشور جهت تعیین وظایف و تعهدات نویسندگان، سردبیر، اعضای هیئت تحریریه و داوران تنظیم شده است.

انتشار و تألیف

- مقالات پژوهشی در فرایند داوری به‌وسیله هیئت‌داوران و کارشناسان علمی که از طرف سردبیر یا مدیر مسئول یا هر دو انتخاب می‌شوند، به‌صورت محرمانه و بی‌نام ارزیابی می‌شوند.
- ملاک ارزیابی مقالات بر اصالت، کیفیت علمی، صحت ارائه و اهمیت پرداختن صحیح به سبک نگارش فارسی است.
- بر اساس تصمیم داوران و کمیته تحریریه، مقالات پذیرفته، تجدیدنظر و یا رد می‌شوند.
- نسخه تجدیدنظر شده به کمیته تحریریه مربوطه ارائه و تصمیم‌گیری نهایی بر اساس تصمیم کمیته انجام می‌شود.
- مقالات رد شده در پایگاه اطلاعاتی نشریه نگهداری می‌شوند.
- پذیرش مقاله منوط به تأیید الزامات قانونی و تسلیم تعهدنامه نویسندگان (شامل پذیرفتن مسئولیت، کپی‌رایت و سرقت علمی) است و پس از آن به‌عنوان مقاله پذیرفته شده در فهرست مقالات پیش از انتشار قرار گرفته و به‌صورت آنلاین نمایش داده می‌شود.
- سرقت علمی به‌وسیله گروه تحقیق در دانشگاه و ارجاع متقابل آن، قبل از پذیرش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نویسندگان

- گواهی اصالت مقاله توسط نویسندگان در هنگام ارسال مقاله به صورت الکترونیکی تسلیم می‌شود، همچنین باید گواهی شود که مقاله ارسال‌شده در نشریه دیگری چاپ نشده است و یا در دست بررسی برای چاپ نیست.
- اصلاحات و دیدگاه‌های پیشنهادی کمیته داوران ظرف مدت ۳۰ روز از تاریخ ابلاغ، به مدیر مسئول نشریه ارجاع داده شود.
- تقدیر و تشکر و وابستگی سازمانی نویسندگان در مقاله آورده شود و هرگونه مغایرت منافع بین نویسندگان و یا سازمان‌ها ذکر شود.
- از گزارش خطا و اشتباه در آثار منتشرشده که به بهبود کیفیت مقالات کمک می‌کند، استقبال می‌شود.
- نویسندگان بعد از تکمیل فرایند ارزیابی مقاله، حق انصراف از چاپ را ندارند.

داوران

- رازداری و محرمانه‌بودن اطلاعات مقاله در همه زمینه‌ها رعایت شود. فرایند داوری مقالات به صورت مخفیانه و بی‌نام انجام می‌شود؛ درحالی‌که حفظ اصالت مقالات در اولویت قرار می‌گیرد.
- فرایند داوری باید در اسرع وقت انجام شود و دیدگاه‌های مربوط به اصالت مقاله، صرف‌نظر از پیشنهادها در مورد تجدیدنظر، رد

- و یا پذیرش مقاله، به سردبیر فرستاده شود.
- پیشنهاد‌های داوران در خصوص مقالات منتشر شده باید در قالب فرم‌های داوری و در بخش دیدگاه‌های مربوط به نویسنده و سردبیر، به آنها ارائه شود.
- سرقت علمی شامل هم‌پوشانی مقاله با دیگر مقالات چاپ شده، باید به اطلاع برسد؛ به طوری که هیئت تحریریه بتواند تصمیم نهایی را در مورد رد یا پذیرش مقاله اتخاذ کند.
- داوران باید از داوری مقالاتی که تضاد منافع دارند، امتناع کنند.

سردبیران

- همه سردبیران مسئول (سردبیر، مدیر مسئول و هیئت تحریریه) اختیار تام در رد یا قبول هر مقاله داشته و کیفیت کلی مقالات منتشر شده بر عهده آنهاست.
- سردبیران همیشه باید استراتژی‌هایی را به منظور بالا بردن کیفیت مقالات، پیشنهاد داده و اجرا کنند.
- صحت و سقم سابقه تحصیلی نویسنده قبل از بررسی مقاله باید ارزیابی شود.
- اصالت و کیفیت مقاله، صحت مطالب ارائه شده و مرتبط بودن با زمینه انتشارات باید تنها ویژگی برای پذیرفتن یا رد مقالات باشد.
- تصمیم نهایی نباید بدون ادله محکم لغو شود.
- ناشناس بودن هویت داوران و نویسندگان تا زمانی که تصمیمی در مورد مقاله اتخاذ نشده است، باید حفظ شود.
- ویراستاران راه حلی برای مسائل اخلاقی و مشکلاتی از قبیل تقابل نویسندگان در ارتباط با مقالات چاپ شده یا چاپ نشده آنها، پیدا کنند.
- رد مقالات بر اساس سوءظن امکان پذیر نیست.
- تضاد منافع میان اعضای هیئت تحریریه، نویسندگان و داوران باید به درستی و بر اساس دستورالعمل کمیته اخلاق نشر (COPE) حل و فصل شود.

بیانیه سرقت علمی آثار

- همه قوانین تعریف شده توسط کمیته اخلاق نشر (COPE) باید توسط اعضای هیئت تحریریه، داوران و نویسندگان اجرایی شود.
- مقاله در مرحله اول (فرایند بررسی سردبیر) می‌تواند از روند خارج شود؛ اما زمانی که در فرایند داوری قرار می‌گیرد، انصراف از روند داوری مشمول پرداخت جریمه به هیئت تحریریه است.
- هر تغییر عمده در مقاله پذیرفته شده با ارائه ادله قابل انجام است.
- همه اعضای هیئت تحریریه و نویسندگان، باید هر نوع اصلاحی را صادقانه و به طور کامل انجام دهند.
- اخلاق نشر باید در مقاله رعایت شود. سرقت علمی و یا ارائه داده‌های تقلبی موجب می‌شود که نویسندگان به عنوان ناقضان قوانین کمیته اخلاق نشر (COPE) تلقی شوند و نام آنها در فهرست سیاه این کمیته قرار گیرد که اتخاذ تصمیم بر عهده هیئت تحریریه است.

Contents

Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence	1
Mahin Rostami, Mohammad Maanijou, Ali Sholeh, Ali Asghar Sepahi, Reza Alipoor	
Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution	33
Mahdieh Bamorovat, Sara Dargahi, Mohsen Arvin, Alireza Shaker, Jamie J Wilkinson, Edgar A Cortes-Calderon, Majid Aminzadeh	
Origin and Genesis of the Color of Variscite in the Koushk Zn-Pb Deposit, Yazd Province: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Fluid Inclusions	61
Kiamars Hosseini, Mohammad Yazdi , Hossein Azizi	
Geology, alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion microthermometry in the Kaviran prospect area, northwest of Dehsalm (center a Lut Block)	105
Mahmoud Pourkhosro, Mohammad Hassan Karimpour, Seyed Masoud Homam, Fatemeh Sepidbar	
Supergene mineralization related to fault planes and fractures at the Koushk Zn-Pb ore deposit, central Iran	131
Gholamreza Mirzababaei, Mohammad Yazdi, Mohammad Gohari Anaraki, Mina Malek Mohammadi	
Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence	173
Mina Shahin, Zahra Alaminia, Zohre Hoseinzade, Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh, Pouria Mahmoodi	

Journal of Economic Geology as Quaterly in the field of economic geology and related sciences is published in Persian with English abstract.

Aims

- The publication of Scientific- Research papers;
- Development of research and promotion of knowledge geological and geochemical exploration;
- Dissemination of latest scientific achievements of universities and academic institutions.

Scope

- Economic Geology
- Geochemical Exploration
- Geophysical Exploration
- Remote Sensing and Mineral Exploration
- Environmental Geology
- Petrology
- Mining Engineering Sciences

Indexing and Abstracting





Journal Information

Print ISSN: 2008-7306

Online ISSN: 2423-5865

Publication: Quarterly

Publication authorization
(Ministry of Culture and Islamic Guidance)

No. 21124, 23 November 2009

Scientific- Research grade
(Ministry of Science, Research and Technology)

No. 4143, 31 July 2010

Contact Us

Mailing Address: Ferdowsi University of Mashhad (FUM) campus, Azadi Sq., Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

P.O. Box: 9177948973

Email: econg@um.ac.ir

Website: <https://econg.um.ac.ir>

Phone: +98 (51) 38804050

Fax: +98 (51) 38807352

Publisher

Ferdowsi University of Mashhad

Director-in-Charge

Editor-in-Chief

Mohammad Hassan Karimpour
Professor, Ferdowsi University of Mashhad
karimpur@um.ac.ir

Editorial Board

Dr. Mohammad Hassan Karimpour
(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Charles R. Estern
(Prof., University of Colorado, U.S.A.)

Dr. Mohammad Hossein Adabi
(Prof., Shahid Beheshti University)

Dr. Ebrahim Rastad
(Associate Prof., Tarbiat Modares University)

Dr. Gholam Reza Lashkaripour
(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Abbas Moradian
(Associate Prof., Shahid Bahonar University)

Dr. Seyed Reza Moussavi Harami
(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Seyed Ahmad Mazaheri
(Prof., Ferdowsi University of Mashhad)

Dr. Majid Ghaderi
(Prof., Tarbiat Modares University)

Dr. Farhad Bouzari
(Research Associate, The University of British Columbia)

Dr. Amir Morteza Azim Zadeh
(Senior Researcher, Luleå University of Technology)

Executive Director

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)

Consultant

Dr. Azadeh Malekzadeh Shafaroudi (Ferdowsi University of Mashhad)

Persian Editor

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)

Page Designer

Sara Habibi (Ferdowsi University of Mashhad)



ISSN (P): 2008-7306

ISSN (E): 2423-5865

JOURNAL OF ECONOMIC GEOLOGY

Vol. 18, No. 2, 2026, Serial No. 49

CONTENTS

Investigation of Low-Sulfidation Precious Metal Mineralization in the Kahyaz Mineral Prospect (Northeast Isfahan, Iran): Insights from Geological, Mineralogical, Geochemical, and Fluid Inclusion Evidence	1
Mahin Rostami, Mohammad Maanijou, Ali Sholeh, Ali Asghar Sepahi, Reza Alipoor	
Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution	33
Mahdieh Bamorovat, Sara Dargahi, Mohsen Arvin, Alireza Shaker, Jamie J Wilkinson, Edgar A Cortes-Calderon, Majid Aminzadeh	
Origin and Genesis of the Color of Variscite in the Koushk Zn-Pb Deposit, Yazd Province: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Fluid Inclusions	61
Kiamars Hosseini, Mohammad Yazdi, Hossein Azizi	
Geology, alteration, mineralization, geochemistry and fluid inclusion microthermometry in the Kaviran prospect area, northwest of Dehsalm (center a Lut Block)	105
Mahmoud Pourkhosro, Mohammad Hassan Karimpour, Seyed Masoud Homam, Fatemeh Sepidbar	
Supergene mineralization related to fault planes and fractures at the Kushk Zn-Pb ore deposit, central Iran	131
Gholamreza Mirzababaei, Mohammad Yazdi, Mohammad Gohari Anaraki, Mina Malek Mohammadi	
Assessment of Gold Mineralization Potential along the Khonsar–Aligudarz belt, with Emphasis on the Darreh Sari Area, Using Factor Analysis and Geological Evidence	173
Mina Shahin, Zahra Alaminia, Zohre Hoseinzade, Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh, Pouria Mahmoodi	