



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، فسفات‌ها، 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 ریف‌ت‌زایی، 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 کانایایی 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 کانایایی 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.

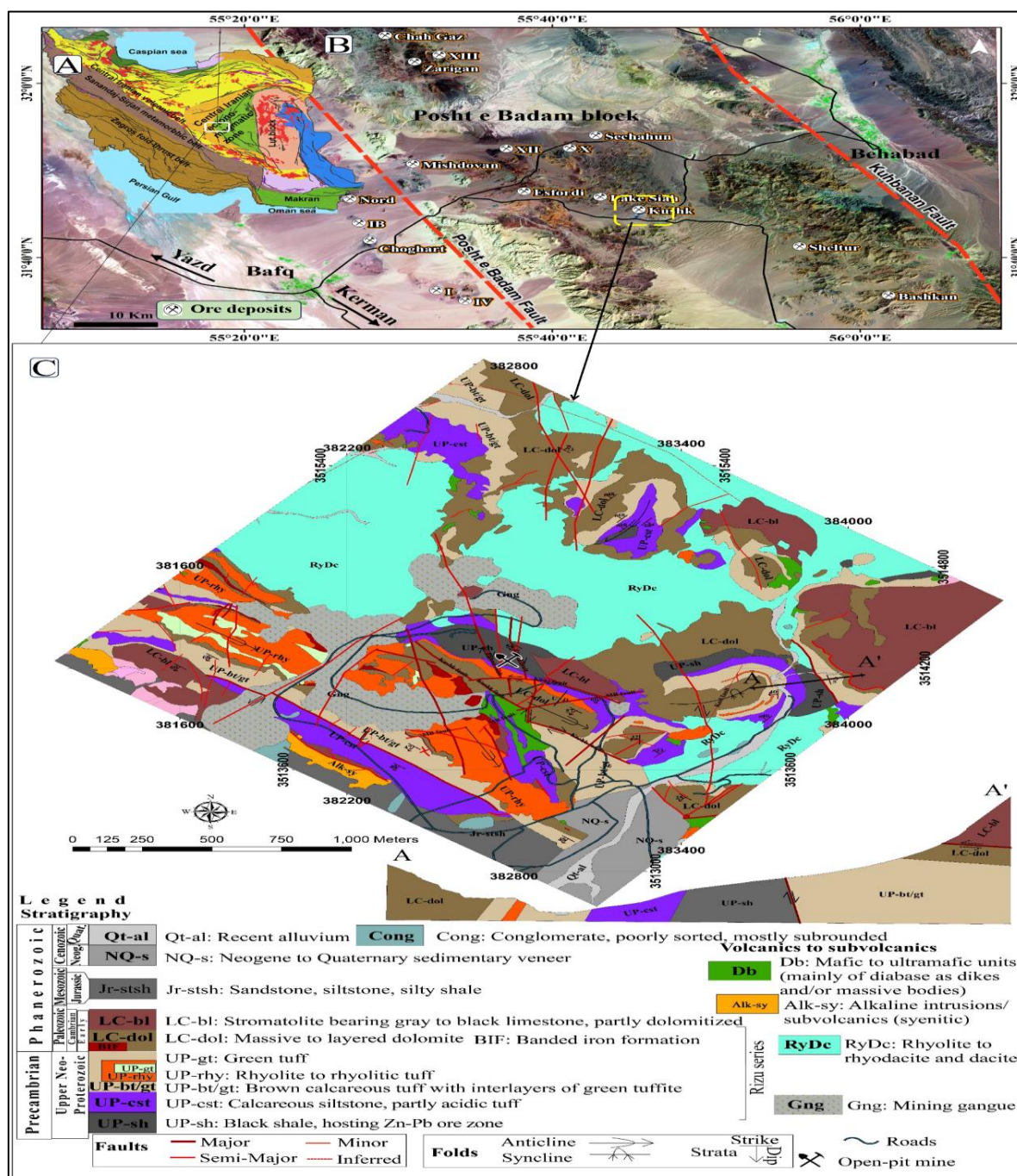
زمین‌شناسی ساختاری حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک

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 چین‌های 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 چین‌شناسی 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 چین‌شناسی (RTZ, 1972) و به حالت چین‌سان (Rajabi et al., 2020) تشکیل شده است.

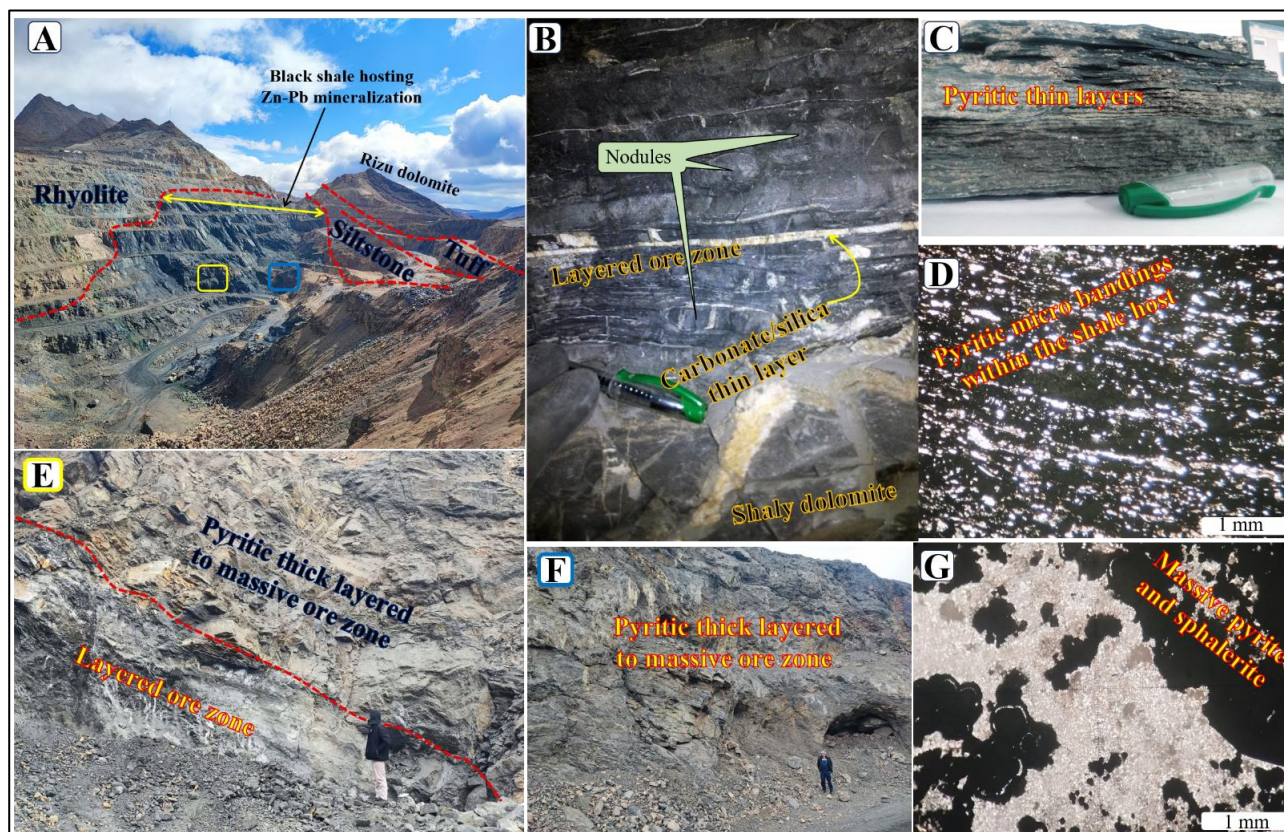
کانی‌شناسی و سیمای عمومی کانسنگ روی و سرب در کانسار کوشک

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 پشت‌بادام در نقشه واحدهای ساختمانی ایران (Aghanabati, 2004)، B: موقعیت کانسار کوشک در بلوک پشت‌بادام 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

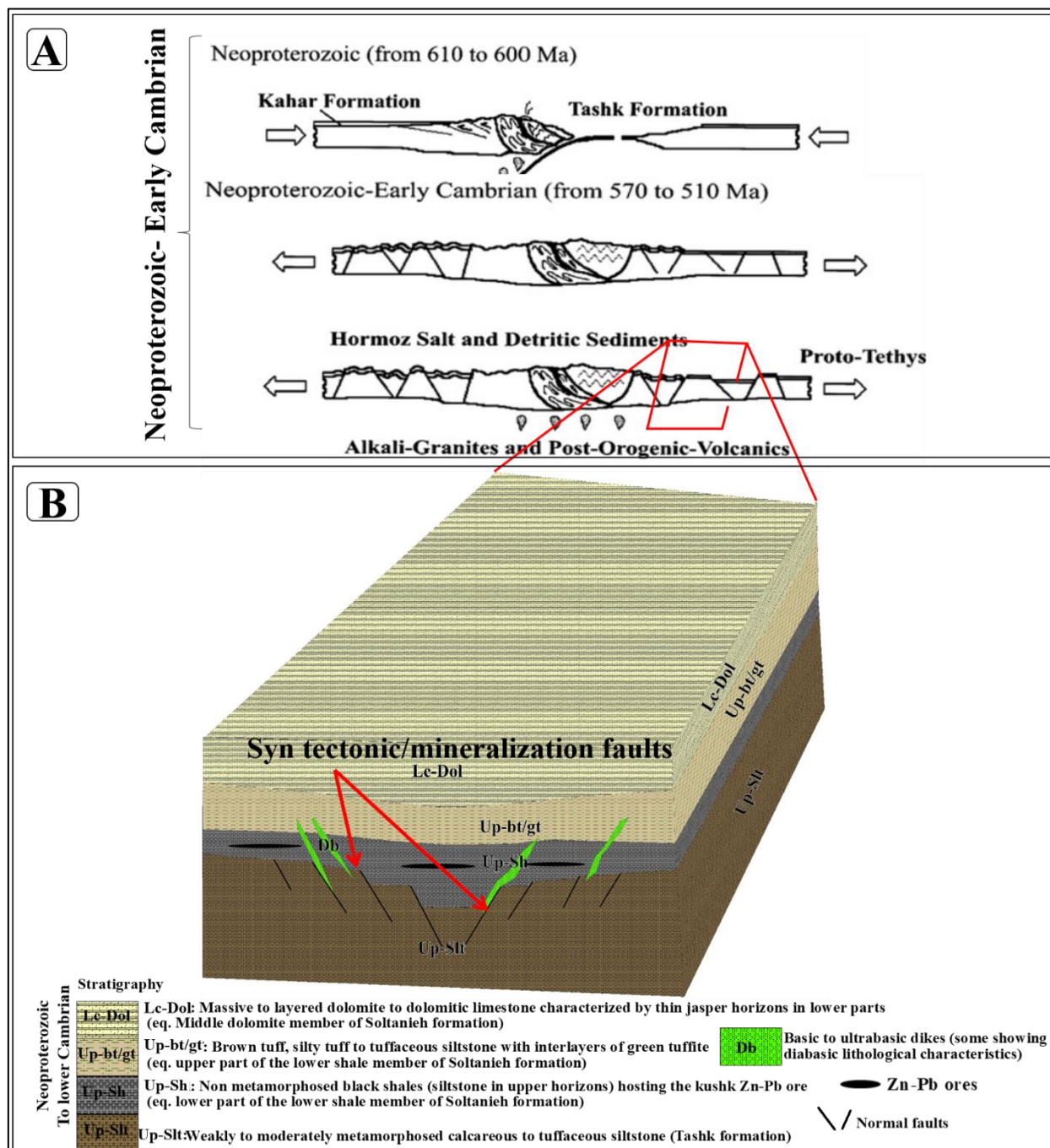
می‌شوند: ۱- ساختارهای پیشاکانه‌زایی که در ارتباط با محیط قدیمی پیش از تشکیل ریفت اولیه در حوضه آتشفشانی-رسوبی کوشک هستند؛ ۲- ساختارهای هم‌زمان با کانه‌زایی روی و سرب در حوضه رسوبی در حال تکامل و در محیط ریفتی تشکیل شده و

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، تحت‌تأثیر 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 دگرگون‌شده است که درجه دگرگونی آن زیاد نیست و بر اساس مشاهدات صحرایی، در بسیاری از رخنمون‌ها درجه دگرگونی از سریست شیبست 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

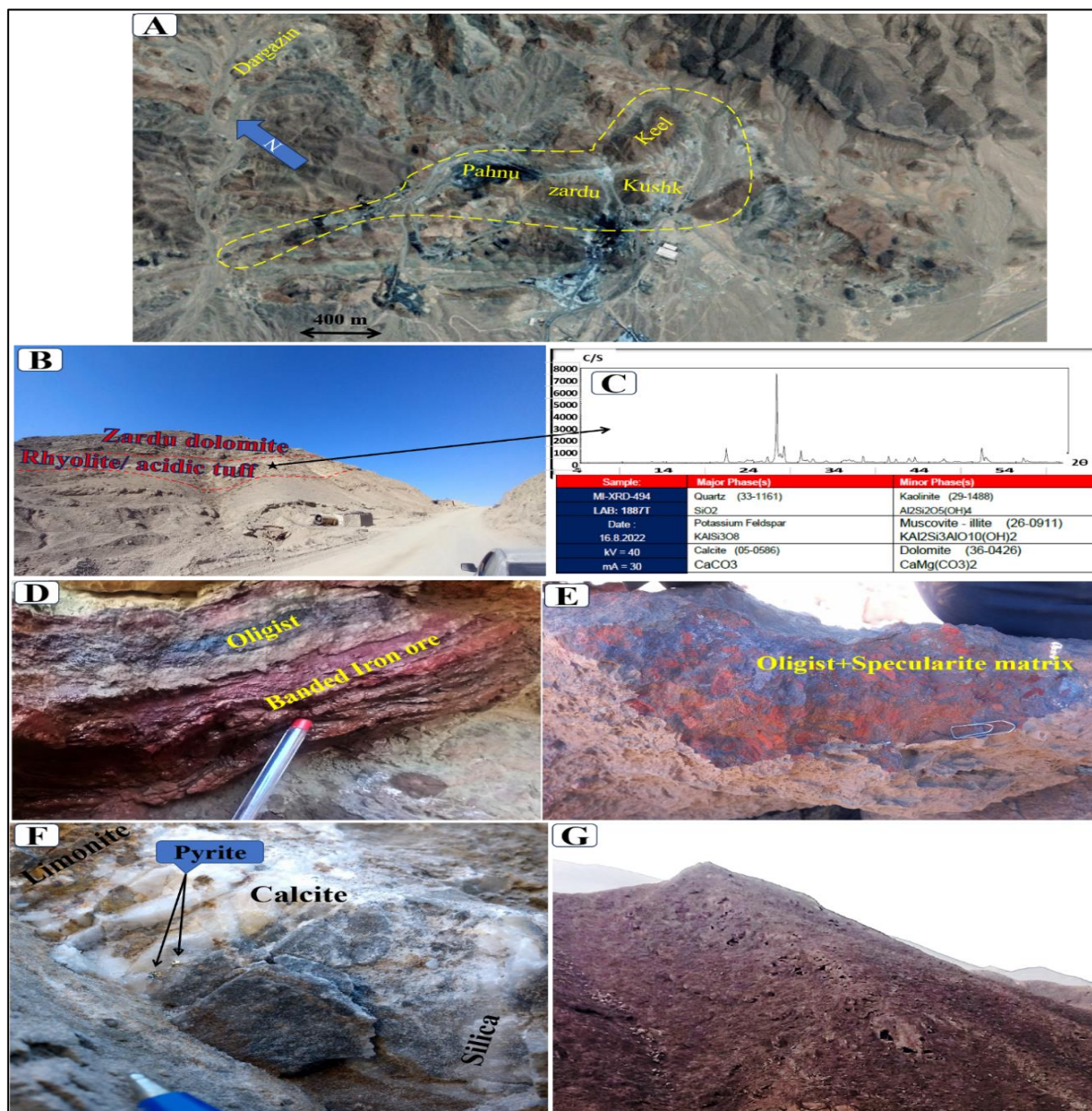
Fig. 3. A. Crustal scale geological framework of central Iranian tectono-magmatic zone from 610 Ma to 510 Ma (Nadimi, 2007), and B: Formation and development of the rift structure and development of the late Precambrian-Cambrian stratigraphy in the Kushk volcano-sedimentary basin and formation of the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

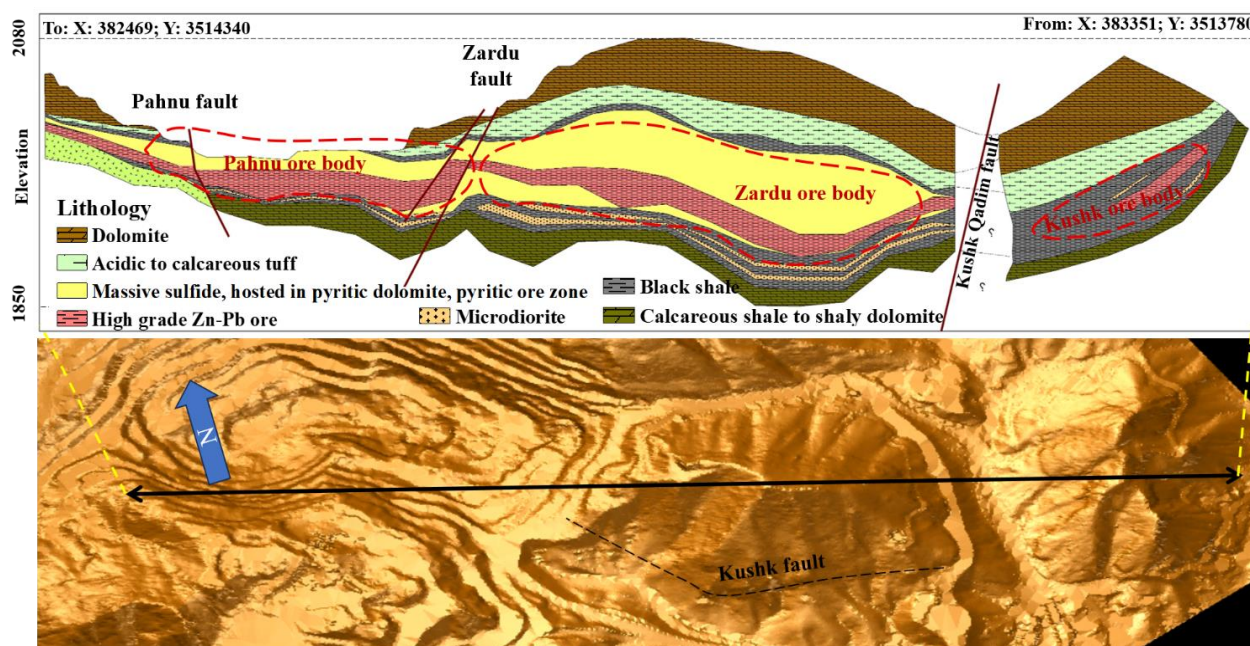
کانه‌زایی اولیه در نتیجه کنترل‌کننده‌های ساختاری در حوضه رسوبی میزبان کانسار کوشک

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 شمال‌غرب)، **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 جنوب‌شرق)

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 overlayed 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).

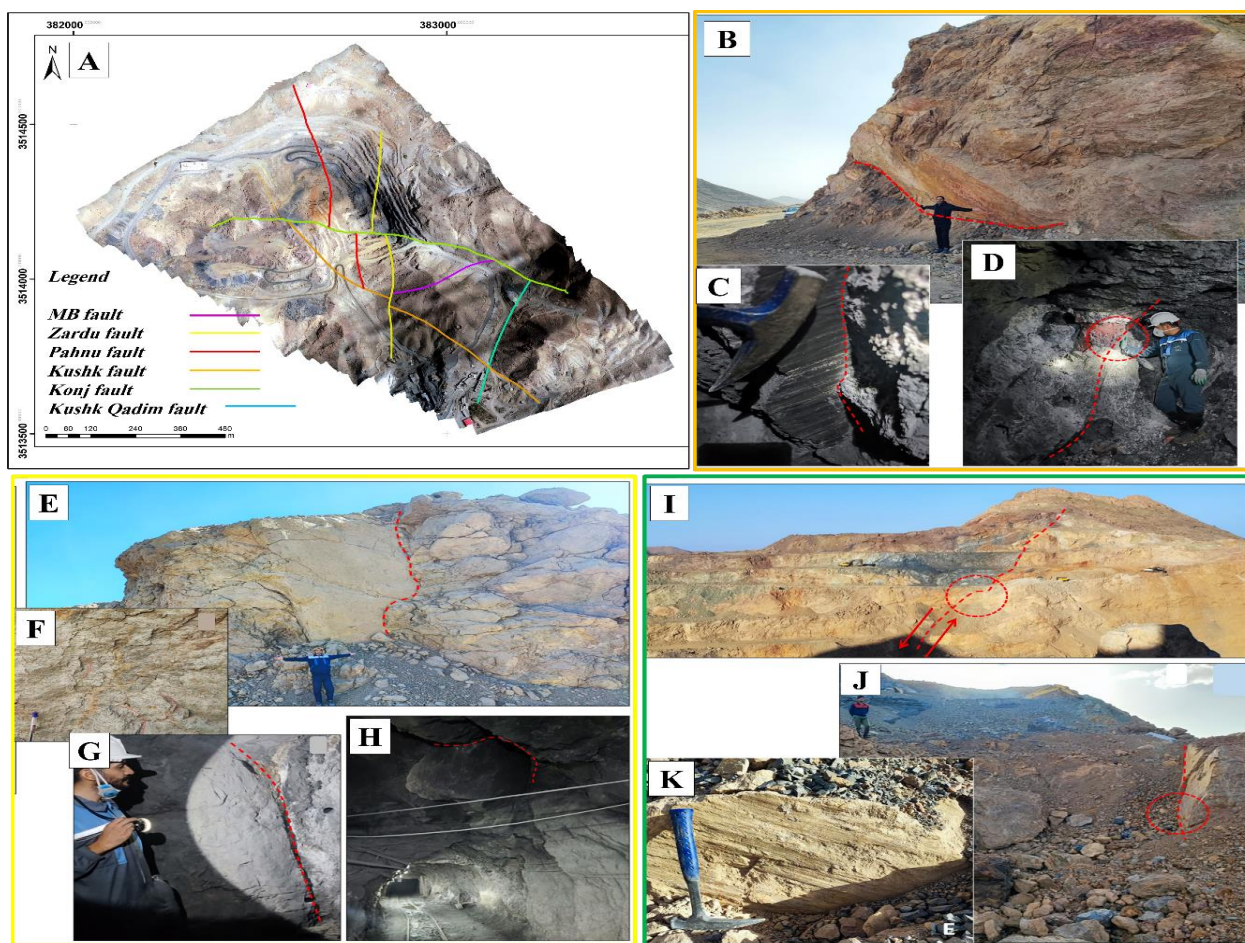
گسل کوشک: یکی از گسل‌های شاخص و اصلی محدوده، با امتداد تقریبی شمالی-جنوبی و با شیبی نزدیک به قائم به سمت غرب در بخش غربی زون معدنی واقع شده است و به عنوان مرز غربی ماده معدنی عمل می‌کند (شکل ۶-A) و تا بخش پهنوی کانسار (شکل ۶-B) و با خش‌لغزهای مشخص (شکل ۶-C)، تداوم دارد. آثار این گسل در افق ۸۹۰ معدن زیرزمینی 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.



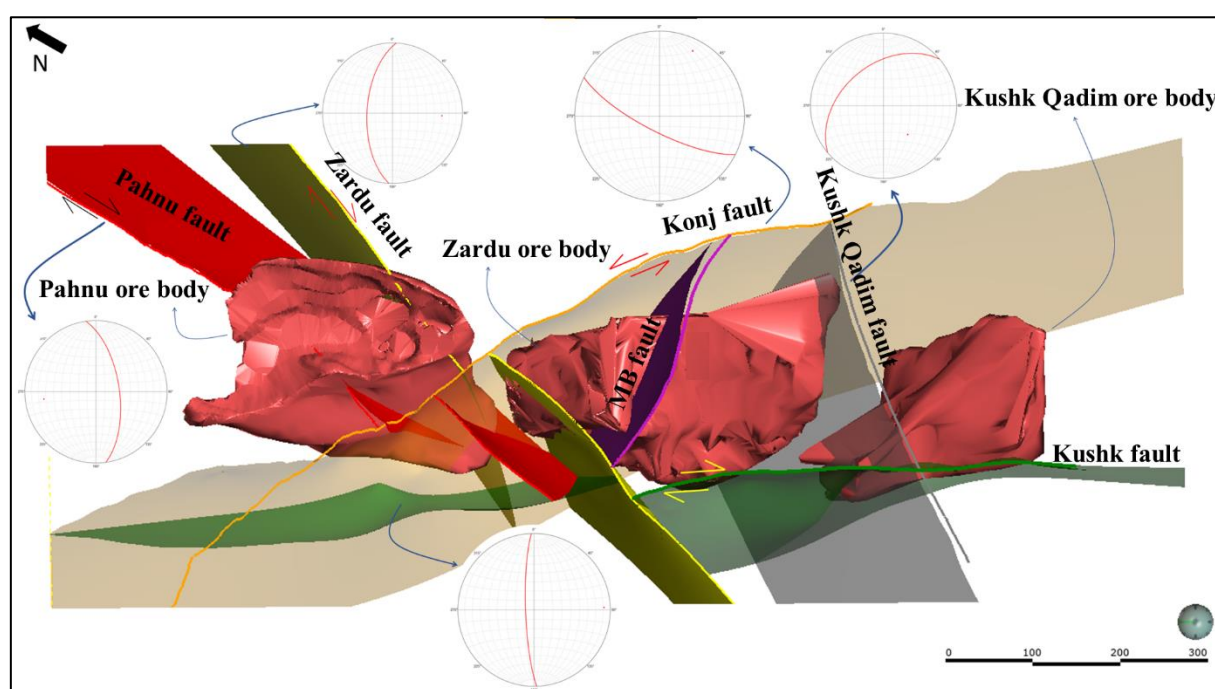
شکل ۶. وضعیت عمومی ساختارهای گسلی پساکانه‌زایی در کانسار کوشک؛ A: موقعیت گسل‌های اصلی کانسار کوشک؛ B: برون‌زد شاخه شمالی گسل کوشک در پیت روباز، افق LC-dol در نقشه زمین‌شناسی (دید به جنوب)، C: خش لغزهای گسل کوشک در تونل‌های زیرزمینی، افق UP-sh در نقشه زمین‌شناسی، D: آثار عملکرد گسل کوشک در تونل ۸۹۰ متری 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

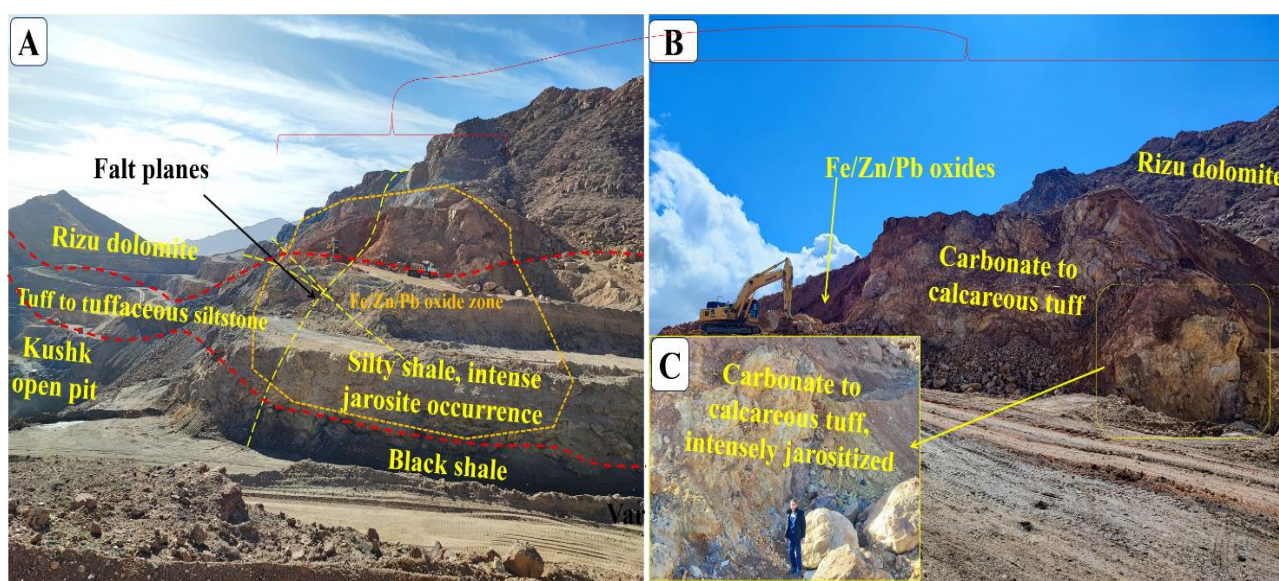


شکل ۷. وضعیت هندسی و فضایی گسل‌های پساکانه‌زایی به همراه نتایج حاصل از عملکرد این ساختارها در توده‌های ماده معدنی در کانسار کوشک (موقعیت توده‌های معدنی مزبور با توجه به چینه‌شناسی کانسار به دست آمده از گمانه‌های حفاری و برداشت‌های تونلی در مقطع شکل ۵ ارائه شده است)

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

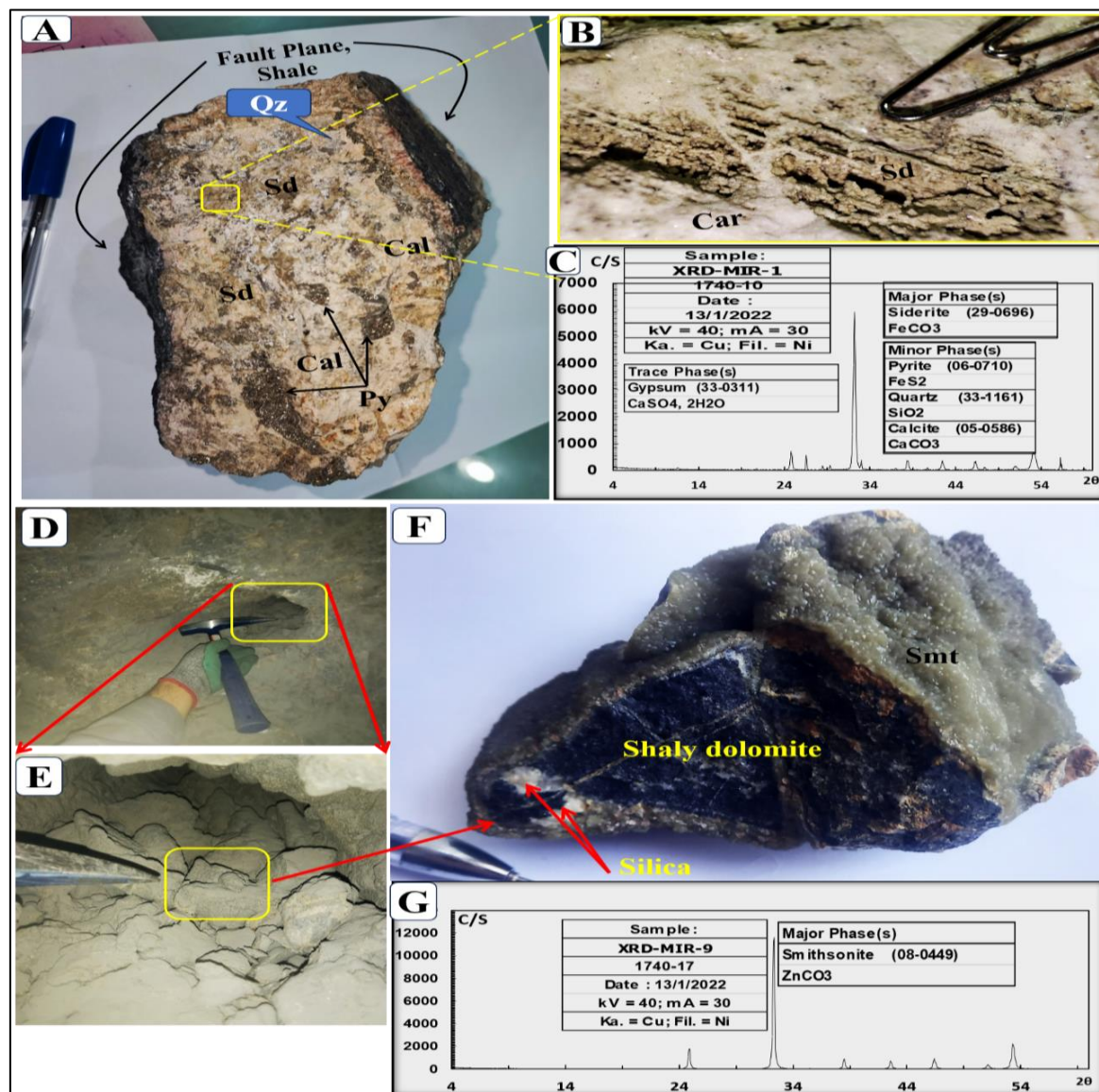
کانی‌های برونزاد در کانسار کوشک که در ارتباط با ساختارهای گسلی پسا کانه‌زایی و یا درزه‌ای تشکیل شده‌اند؛ به طور کلی شامل کربنات‌ها، سولفات‌ها، آلومینات‌ها، فسفات‌ها، اکسیدها و سیلیکات‌ها و سیلیس هستند که عوامل مؤثر بر رخداد آنها در ادامه

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

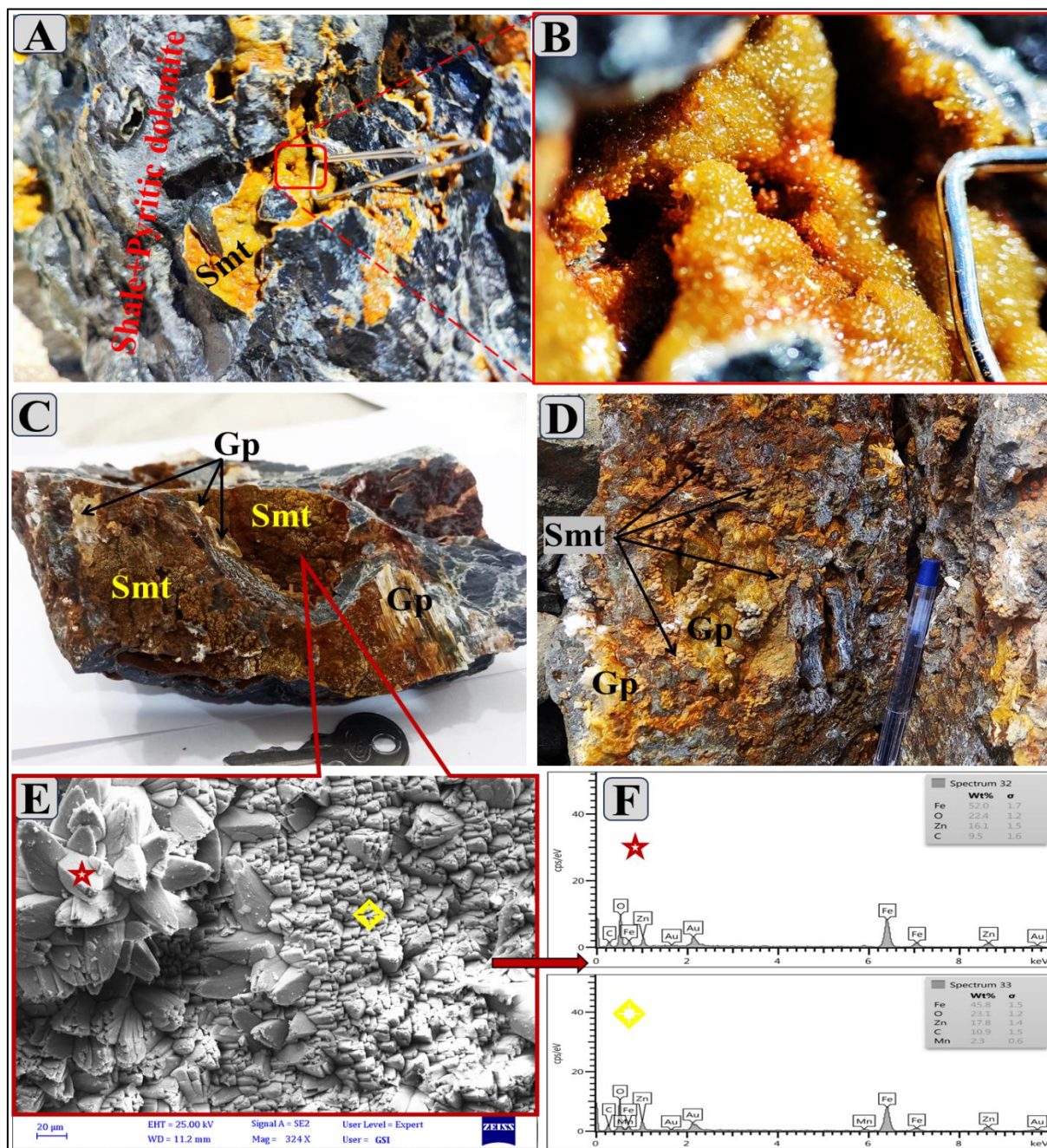
تشکیل‌شده در دو محیط باید گفت که اسمیت‌زونیت‌های تشکیل‌شده در محیط گسلی، میزبان رگه‌ها و رگچه‌هایی از اکسیدهای روی هستند؛ در صورتی که اسمیت‌زونیت تشکیل‌شده در درزه‌ها و حفره‌ها، بدون چنین آثاری است. از ویژگی‌های کانی‌شناختی قابل توجه، همراهی اسمیت‌زونیت و ژپس است (شکل ۱۰-۱۰C) که تقریباً در تمام نقاط 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).



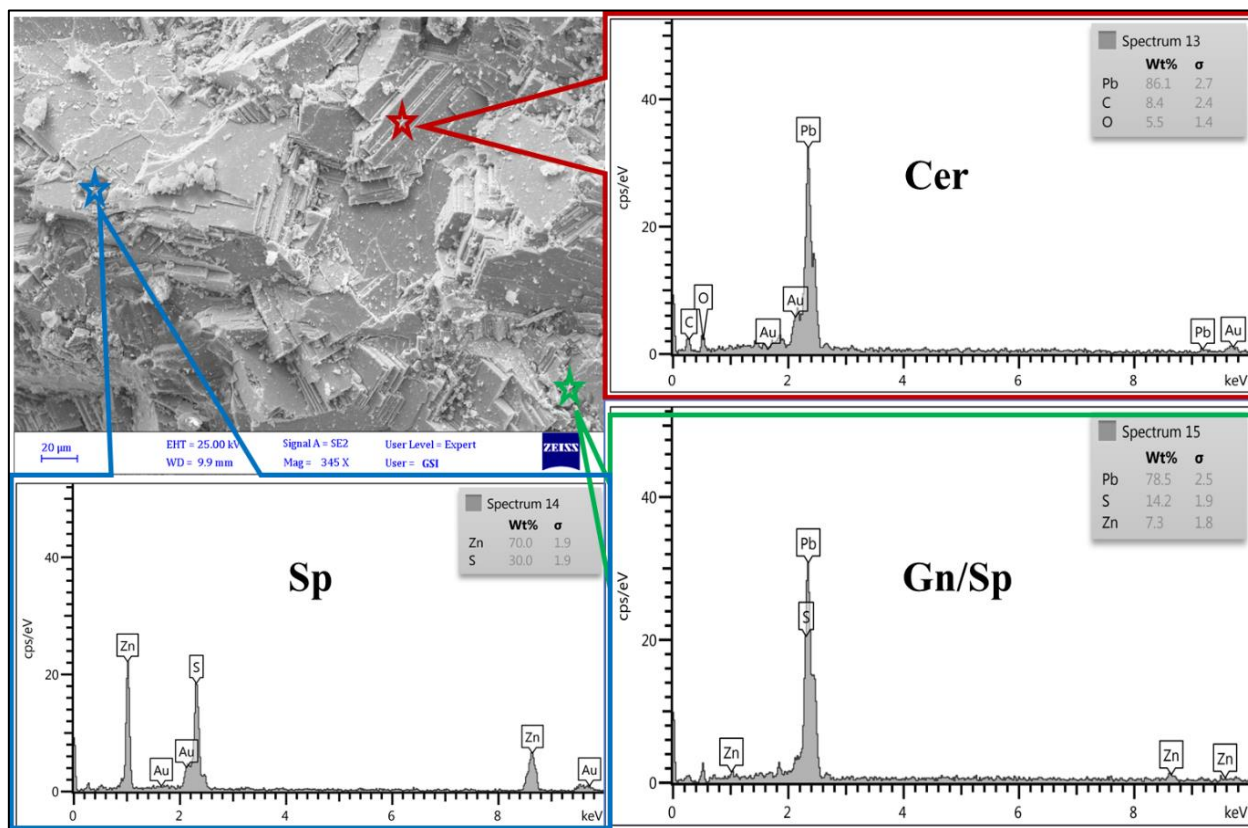
شکل ۹. A: رخداد سیدریت در رگه‌های وابسته به گسل زردو در کانسار کوشک، B: فرم تیغه‌ای کانی سیدریت در نمای نزدیک‌تر، C: نتیجه تجزیه و تحلیل XRD از کانی سیدریت نمونه منتخب، D: حفره‌های خالی در زون‌های گسلی در بخش‌هایی از معدن زیرزمینی کوشک، E: اسمیت‌زونیت در حفره‌های مرتبط با درزه‌ها و گسل‌ها که به صورت 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).



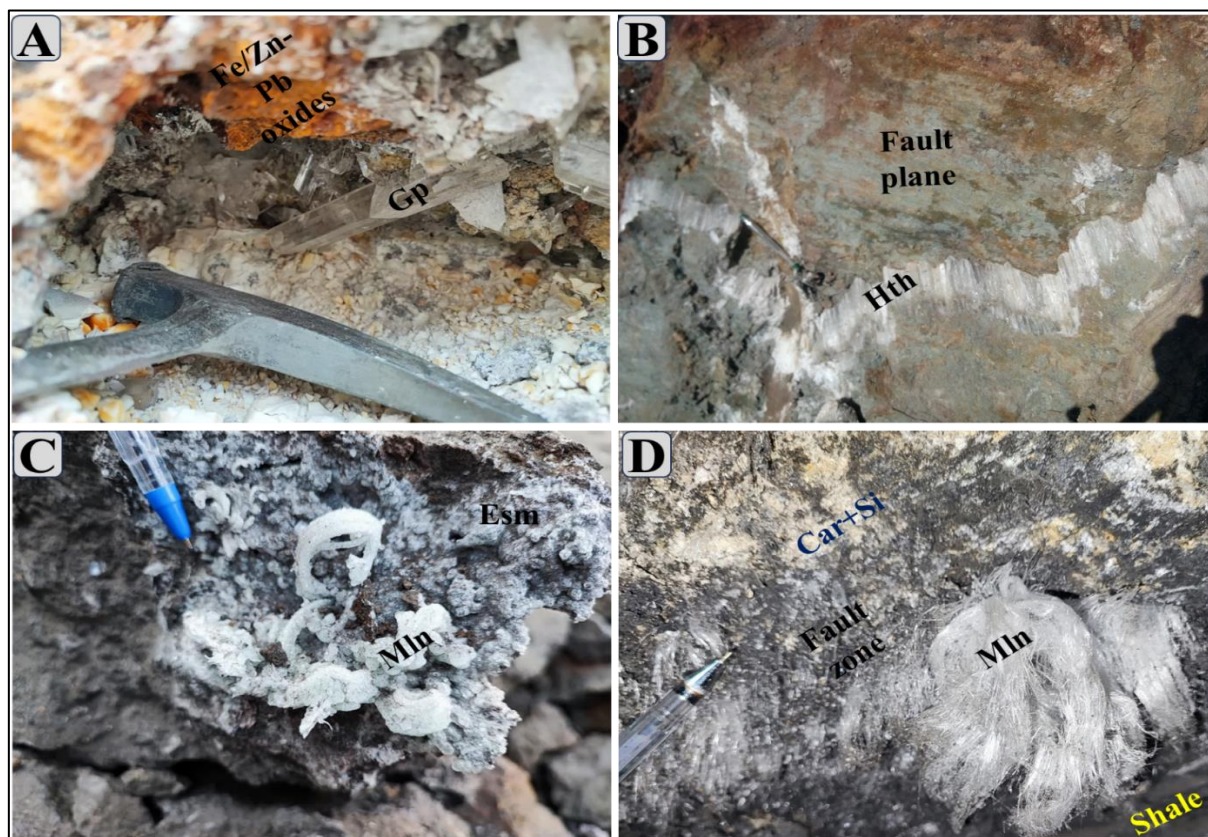
شکل ۱۱. تصویر BSE از رخدادهای سروزیت در زون اکسیدان با بقایایی از اسفالریت و گالن در کانسار کوشک. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cer: سروزیت، Sp: اسفالریت، Gn: گالن).

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 ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) (شکل ۱۳- A و B) و آلونیت ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) (شکل ۱۳- C و D) هستند که مورد اخیر اغلب به صورت ناتروآلونیت ($\text{NaAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) 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 ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$) 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 ($\text{Fe}^{2+}(\text{H}_2\text{O})_6\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 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

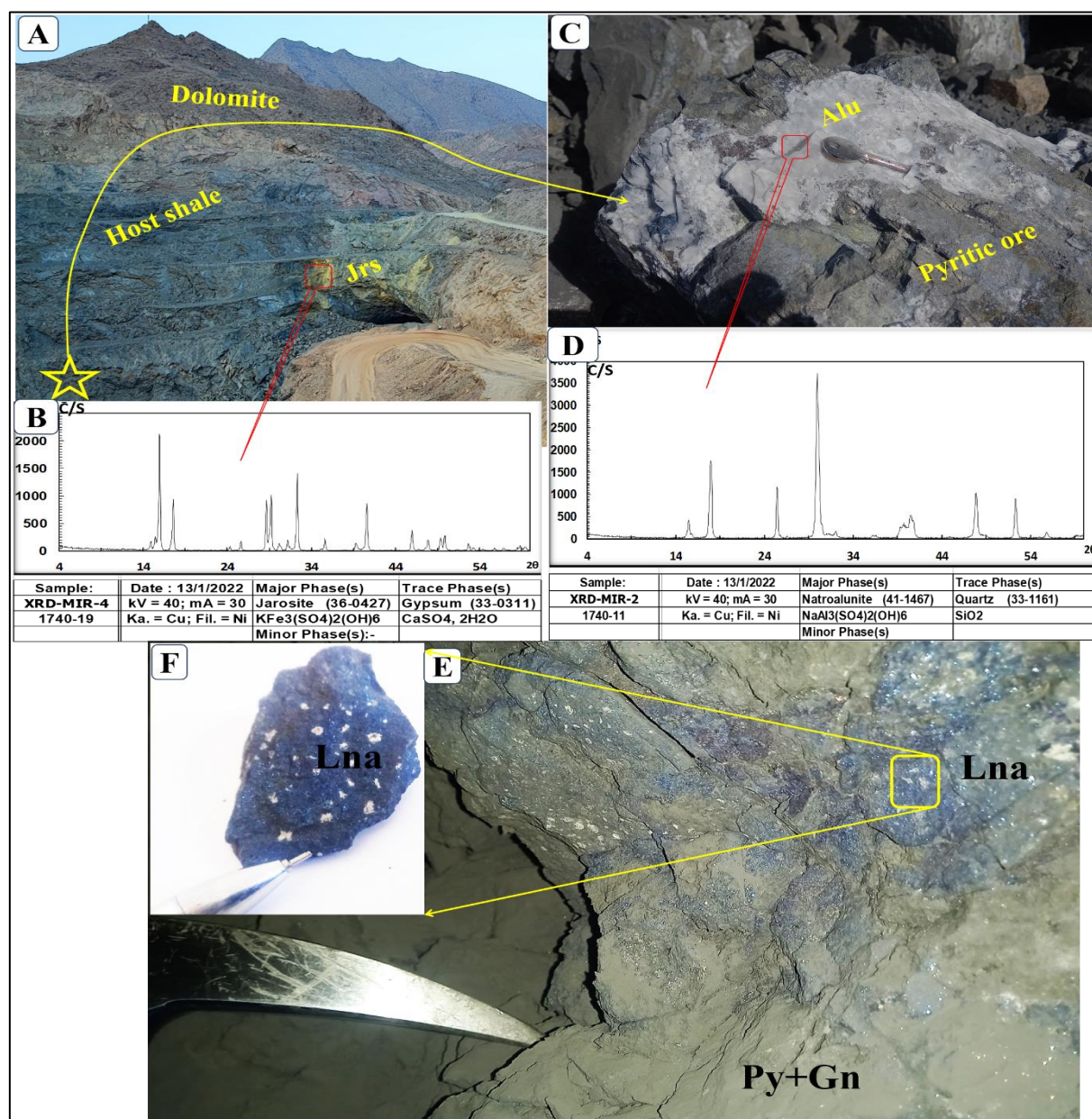


شکل ۱۲. A: رخداد سولفات‌ها (ژپس) و اکسیدهای آهن و روی-سرب در زون‌های شکستگی و سطح گسلی در کانسار کوشک، B: رخداد سولفات هالوتریچیت در زون گسلی، C: رخداد ملانتریت در شکستگی و زون‌های گسلی و D: رخداد ملانتریت در یک زون گسلی که پیشتر با سیلیس و کربنات پر شده است. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی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

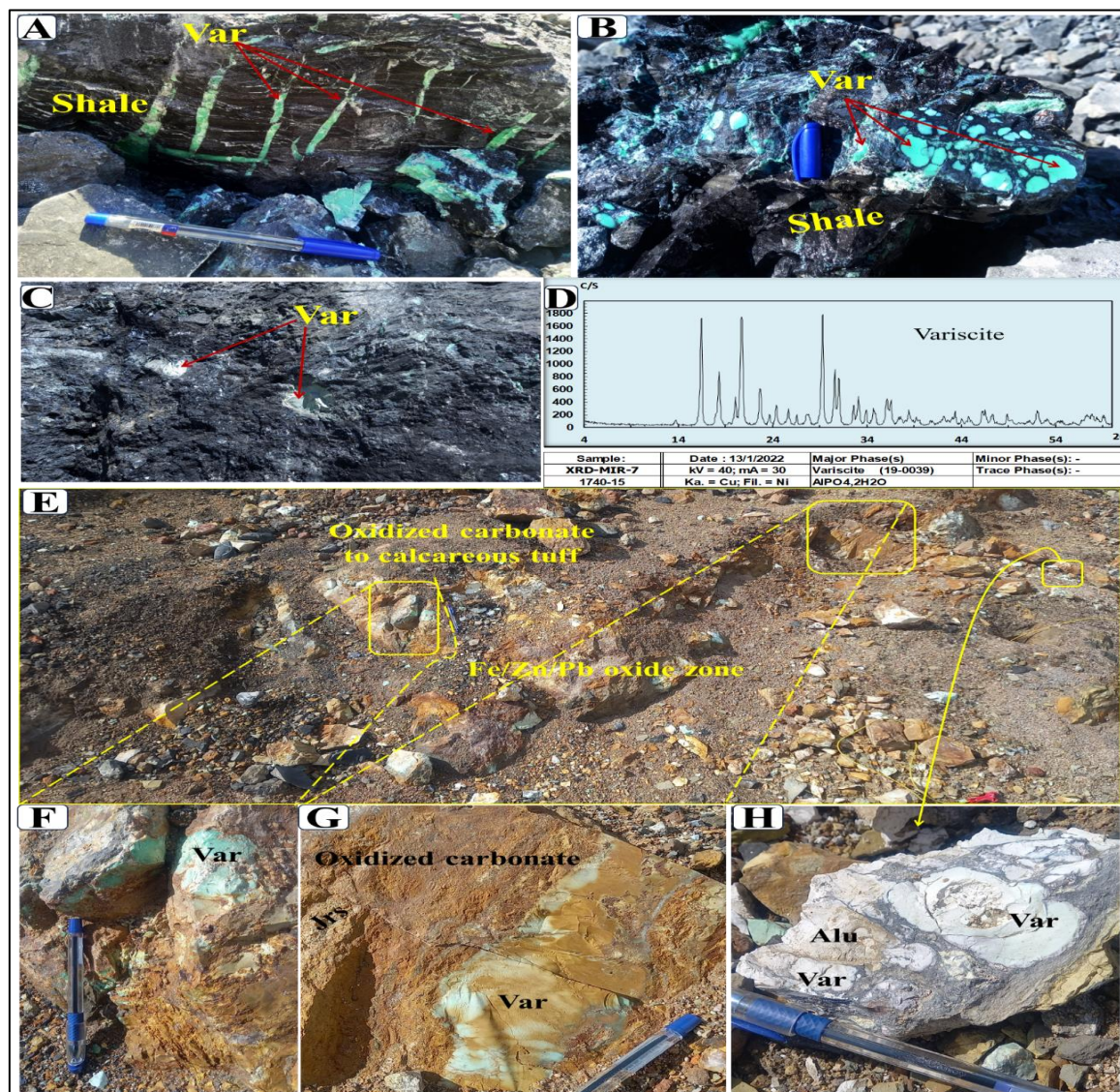
Fig. 13. A: jarosite occurrence at structure bound oxidized zones in the Kushk ore deposit, B: XRD pattern of jarosite in the representative sample analyzed, C: alunite occurrence in pyritic ore affected by faulting, D: XRD pattern of alunite in the representative sample analyzed, E: Linarite occurrence 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: alunite, 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 ارتورو میکس 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

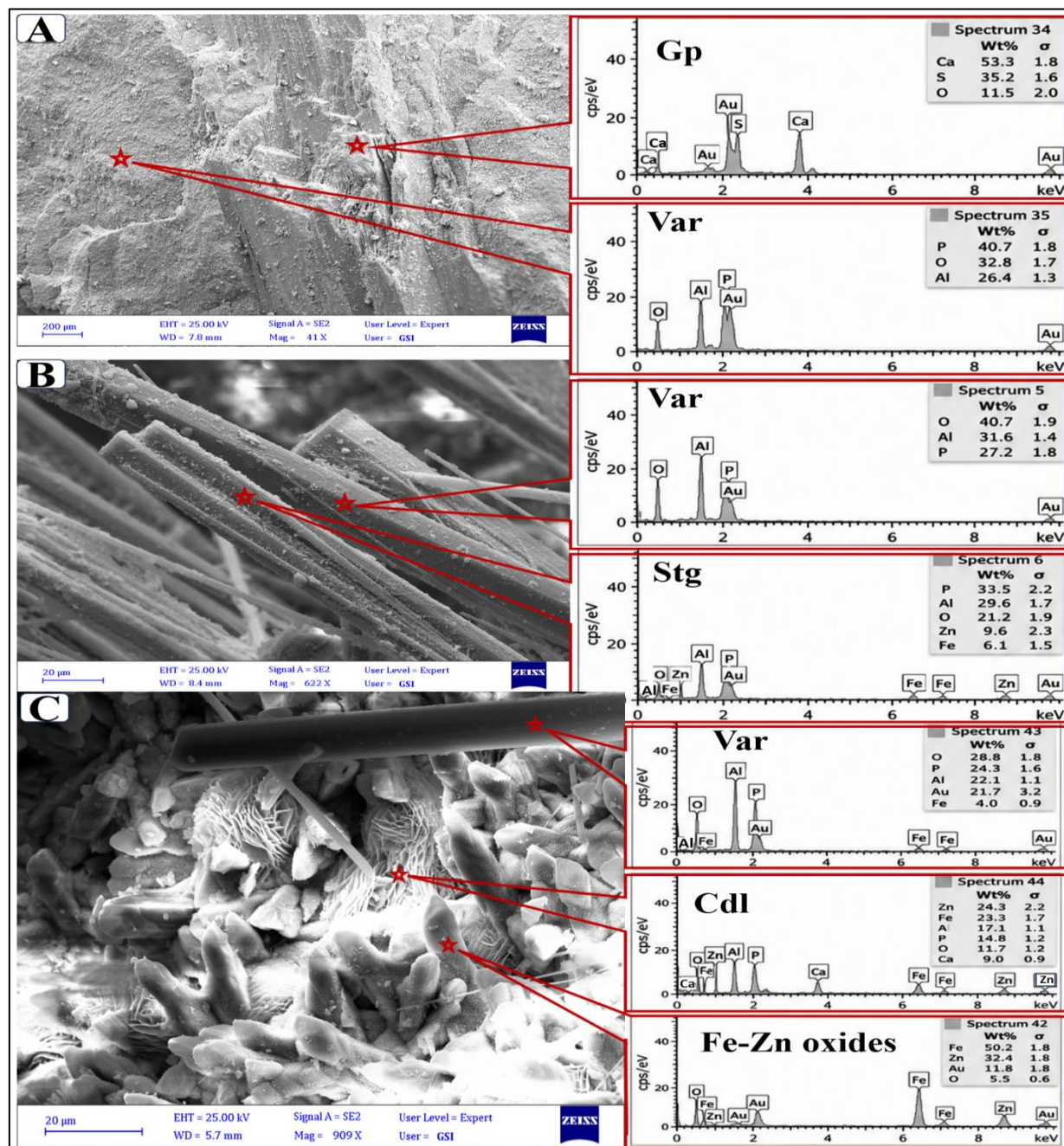
زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها نقشی بی‌بدیل به عنوان راهروهای انتقال‌دهنده سیالات ایفا می‌کنند و در صورت وجود عوامل زمین‌شیمیایی مورد نیاز برای انحلال و انتقال عناصر، به کانه‌زایی منجر می‌شوند. گسل‌ها به طور عام هم می‌توانند به عنوان راهروهایی برای انتقال سیال، نقش بازی کنند و هم اینکه با راهیابی به مناطق 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 دست دادن 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).



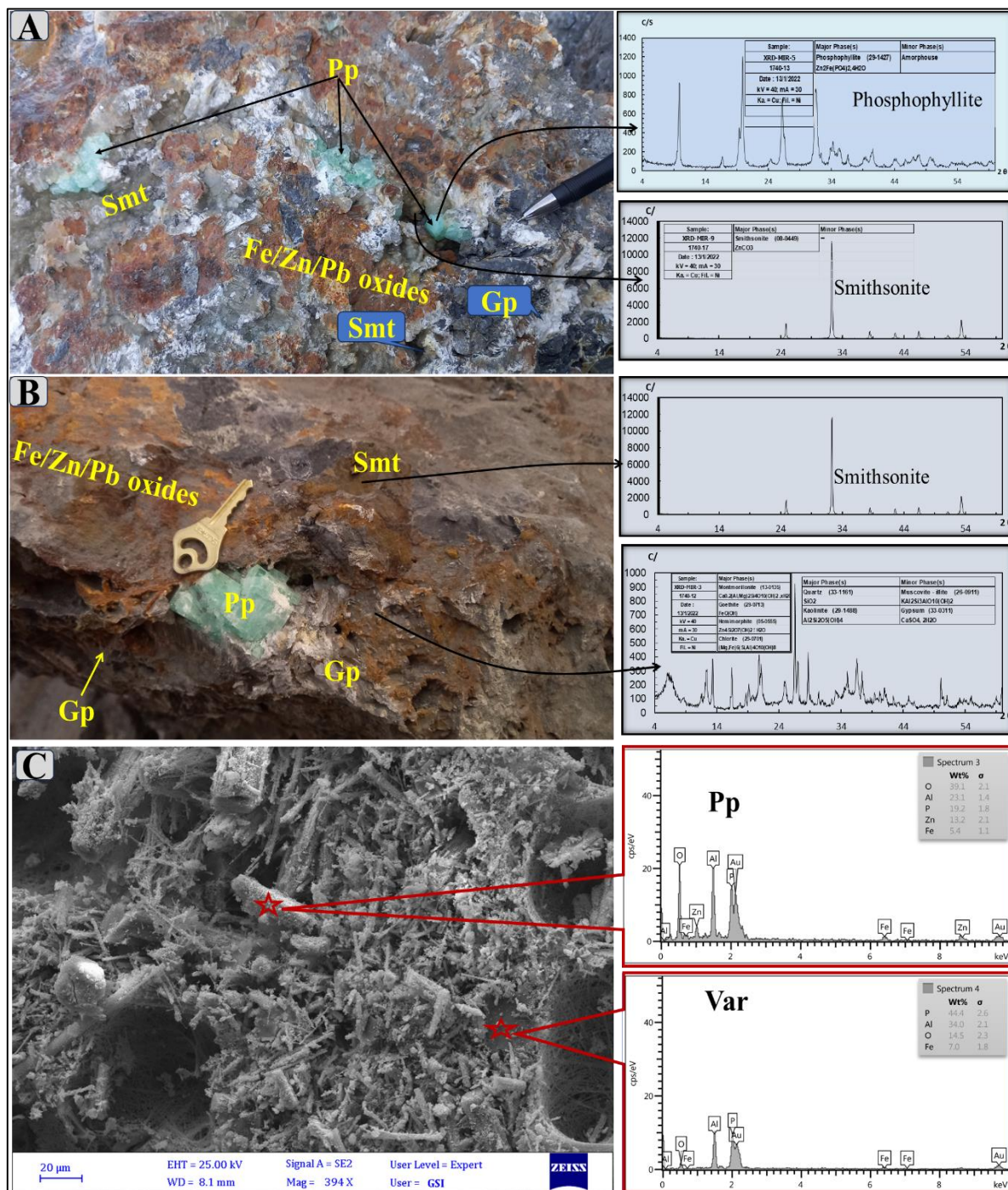
شکل ۱۵. A: تصاویر BSE از رخداد واریسکیت با سیمای صدفی هم‌یافت با ژپس در کانسار کوشک، B: تصاویر BSE از بلورهای ارتورومبیک واریسکیت و استرینگیت و C: بلور واریسکیت، بلورهای نازک کراندالیت با ساختار تیغه‌ای نازک و اکسیدهای بی‌شکل آهن و روی. علائم اختصاری از وار (Warr, 2021) و ویتنی و اوانز (Whitney and Evans,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

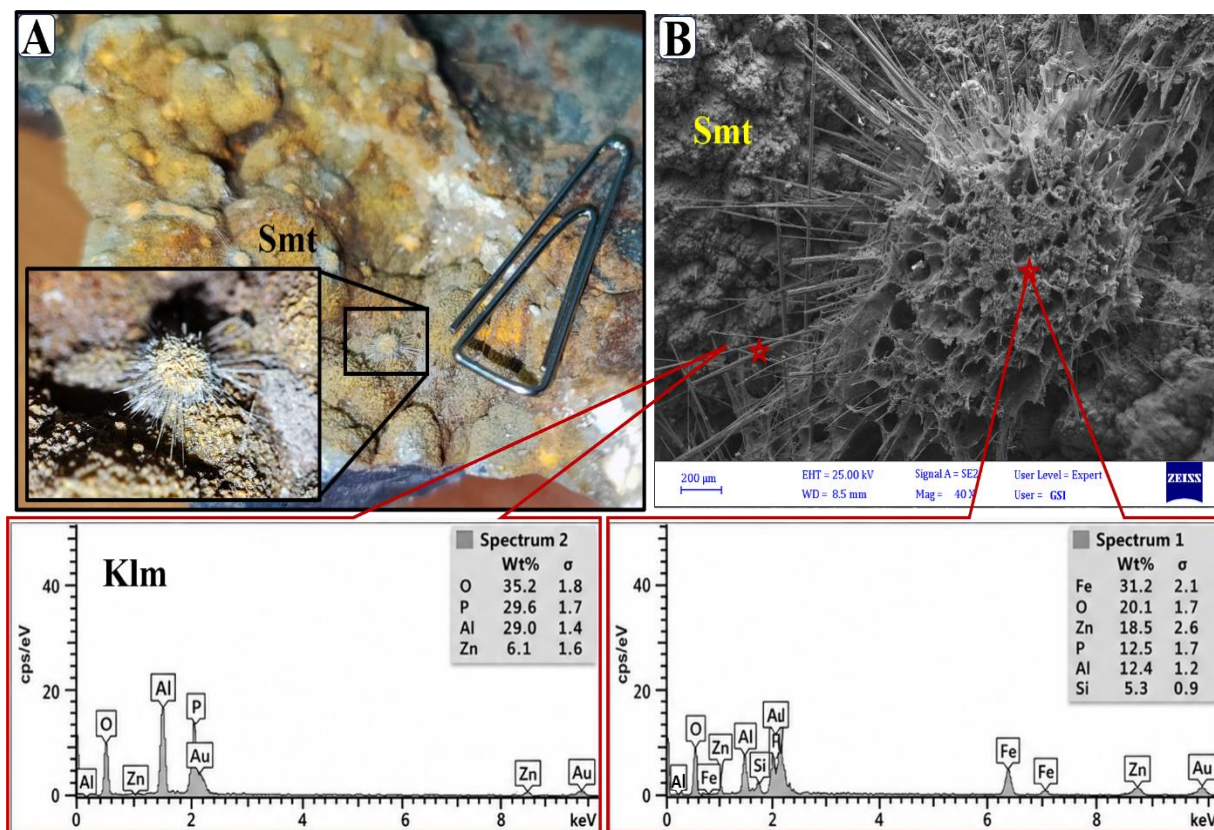
کانی‌های واریسکیت و فسفوفیلیت ارائه شده است. **کلیمانیت:** کلیمانیت یا هیدروفسفات آبدار آلومینیم و روی از جمله کانی‌های قابل توجه در مقادیر قابل مشاهده در سطوح اکسیده کانسنگ سولفیدی در کانسار کوشک است که ویژگی اصلی رخداد آن، سیمای سوزنی-شعاعی آن است که مرکز سامانه شعاعی را اکسیدهای روی و آهن با مقادیر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

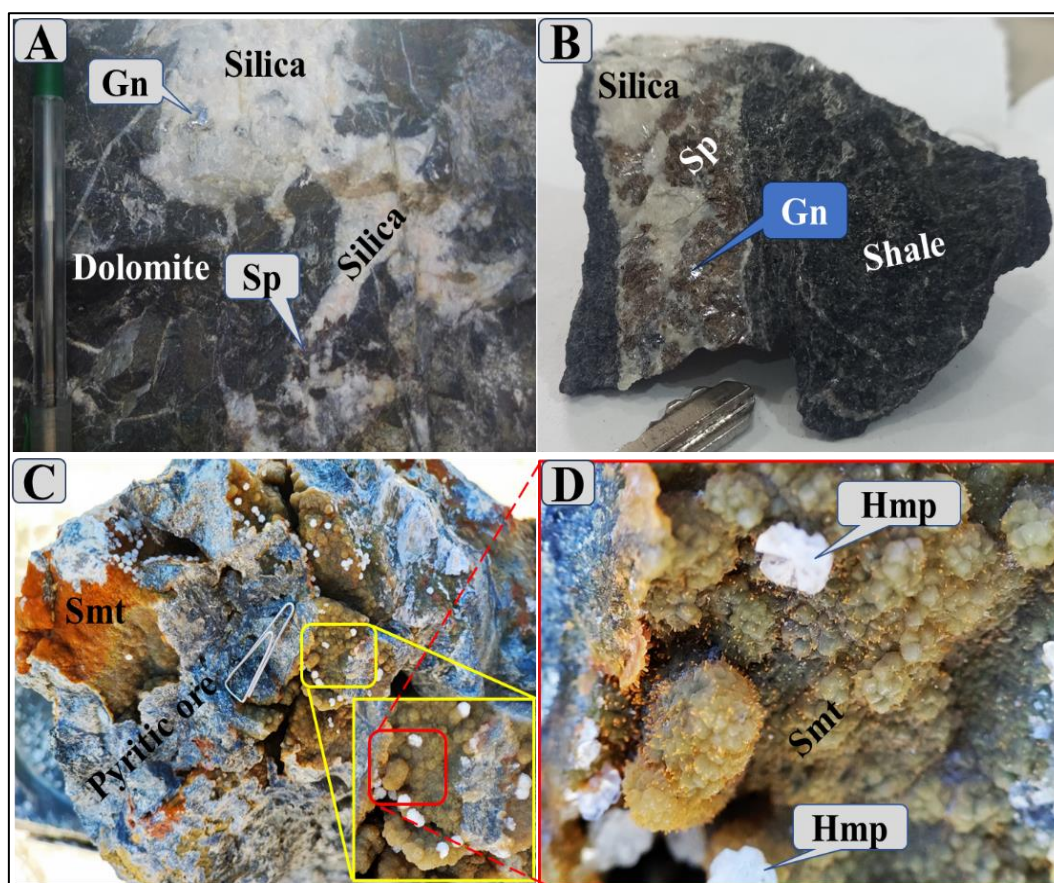
بحث

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

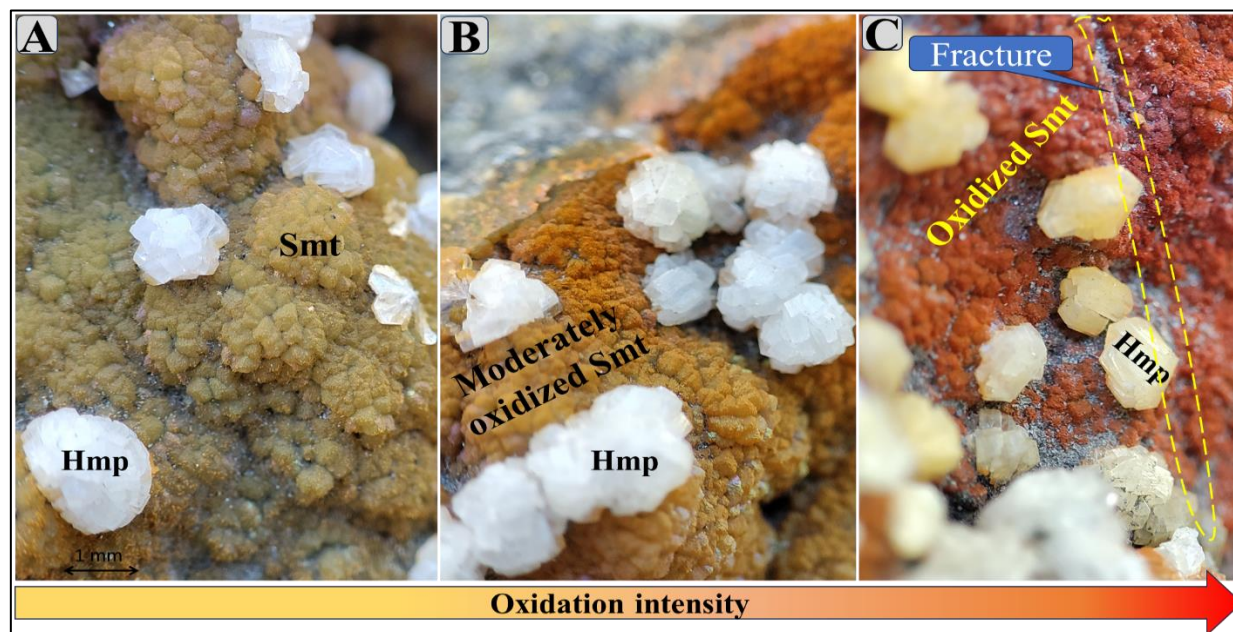
بخش‌های وسیعی از ابرقاره گندوانا، متحمل چین‌خوردگی و دگرگونی ناحیه‌ای شده است. گسل‌های مرتبط با محیط ریفت، شامل دومین فاز از گسلش اصلی منطقه هستند. این فاز به کانه‌زایی روی و سرب در سنگ میزبان شیل منجر شده است. فرایندهای غالب درگیر در رخداد کانه‌زایی عناصر پایه در این کانسار اغلب یکسان بوده و در این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

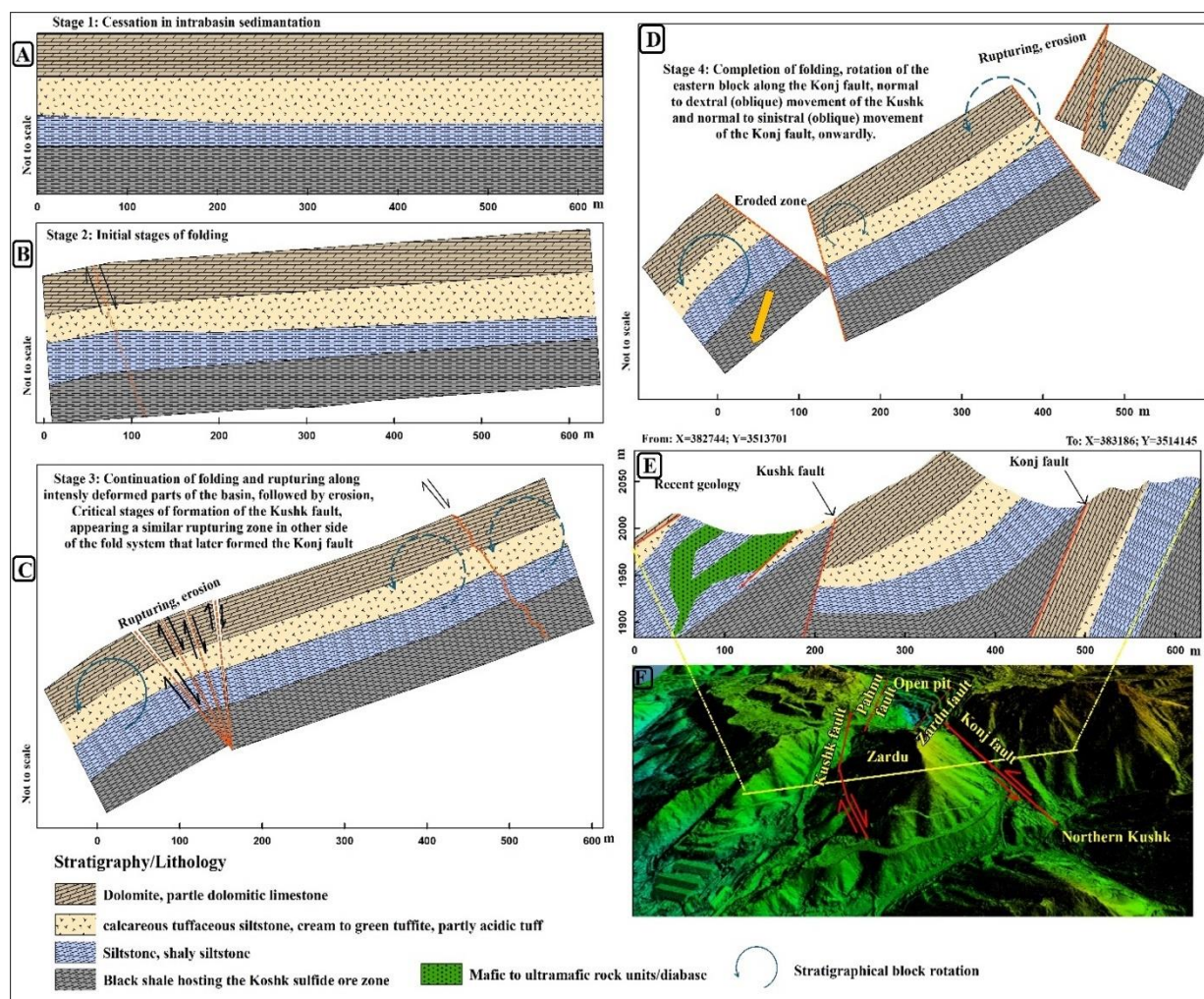
تشکیل فازهای سولفیدی اولیه از جمله پیریت، اسفالریت و گالن حاکم است. تا کنون چندین پژوهش پایه برای بررسی کانه‌زایی و زمین‌شناسی کانسار کوشک، انجام شده است (RTZ, 1972; Rajabi et al., 2020). از مهم‌ترین عوامل تغییر در پایایی شرایط تشکیل کانسارها می‌توان به عملکرد سامانه‌های گسلی اشاره کرد که به پویایی مجدد 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 تراکشنی، 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

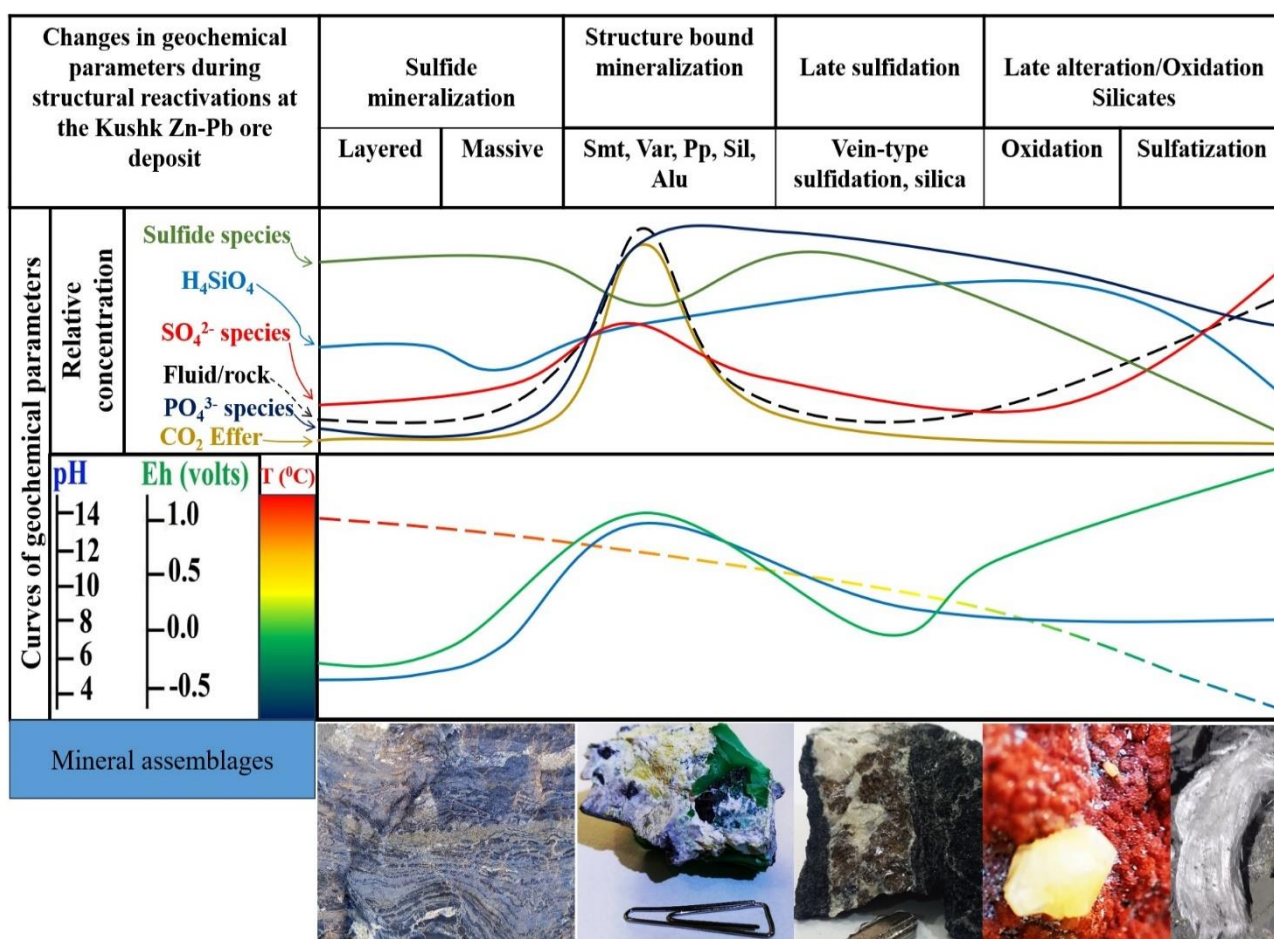
تشکیل نوع کانی با بنیان فسفاتی (واریسکیت، فسفوفیلیت کراندالیت یا کلیمانیت) در وابستگی به جنس سنگ میزبان بیانگر آن است که سیال عامل تشکیل واریسکیت، همان سیال عامل تشکیل فسفوفیلیت است. سیال فسفات‌دار مزبور در برخورد با شیل‌های کم‌عیار یا توف (به عنوان منابع غنی از آلومینیم) کانی واریسکیت و در برخورد با 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 پساسولفیدی هستند. در شکل ۲۱، نمودار تغییرات زمین‌شیمیایی از تشکیل کانسنگ سولفیدی روی و سرب تا فازهای پساسولفیدی وابسته به سامانه‌های گسلی یا روبه‌های اکسیدی در کانسار کوشک ارائه شده است.

بدون شک، نقطه عطف در پیدایش فازهای پساسولفیدی، 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 پساسولفیدی 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 پساسولفیدی 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>