



RESEARCH ARTICLE



10.22067/econg.2026.1173



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

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

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

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

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

ARTICLE INFO

Article History

Received: 12 May 2026

Revised: 22 June 2026

Accepted: 28 June 2026

Keywords

Variscite

Mineralogy

Geochemistry

fluid inclusions

Koushk Zn-Pb Deposit

Central Iran

*Corresponding author

Mohammad Yazdi

✉ m-yazdi@sbu.ac.ir

ABSTRACT

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

How to cite this article

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



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

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

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

Regional Geology

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

Materials and Methods

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

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

Results

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

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

Discussion

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

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

Acknowledgements

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



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

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

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

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

استناد به این مقاله

حسینی، کیامرث؛ یزدی، محمد و عزیزی، حسین، ۹. پیدایش و منشأ رنگ کانی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک (استان یزد): شواهدی از کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میان‌بارهای سیال. زمین‌شناسی اقتصادی، ۹(۴): ۹-۲۴. <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1173>

مقدمه

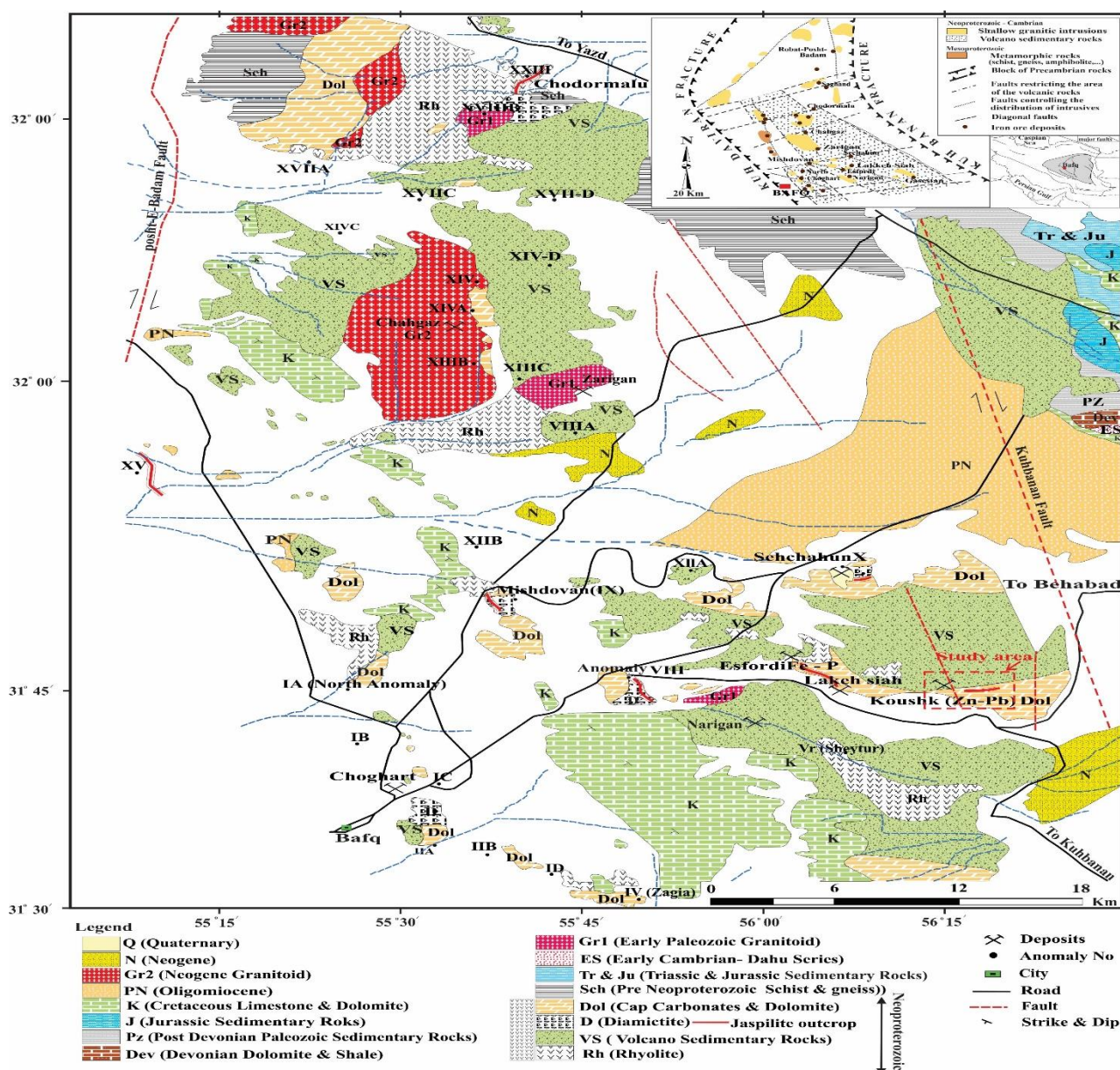
واریسکیت در سال ۱۸۳۷ توسط **بارستو** در کشور آلمان کشف شد. نام‌های دیگری مانند **اماتریس**، **کلر-یوتاهیت** و **یوتاهیت** نیز برای این کانی پیشنهاد شده است. ذخایر واریسکیت در سرتاسر جهان بسیار کمیاب است و تعداد محدود سازندهای زمین‌شناسی حاوی واریسکیت هستند (Dominguez-Bella, 2004; Odriozola and Linares-Catela,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

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

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

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

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



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

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

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

زمین‌شناسی کانسار کوشک

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

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

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

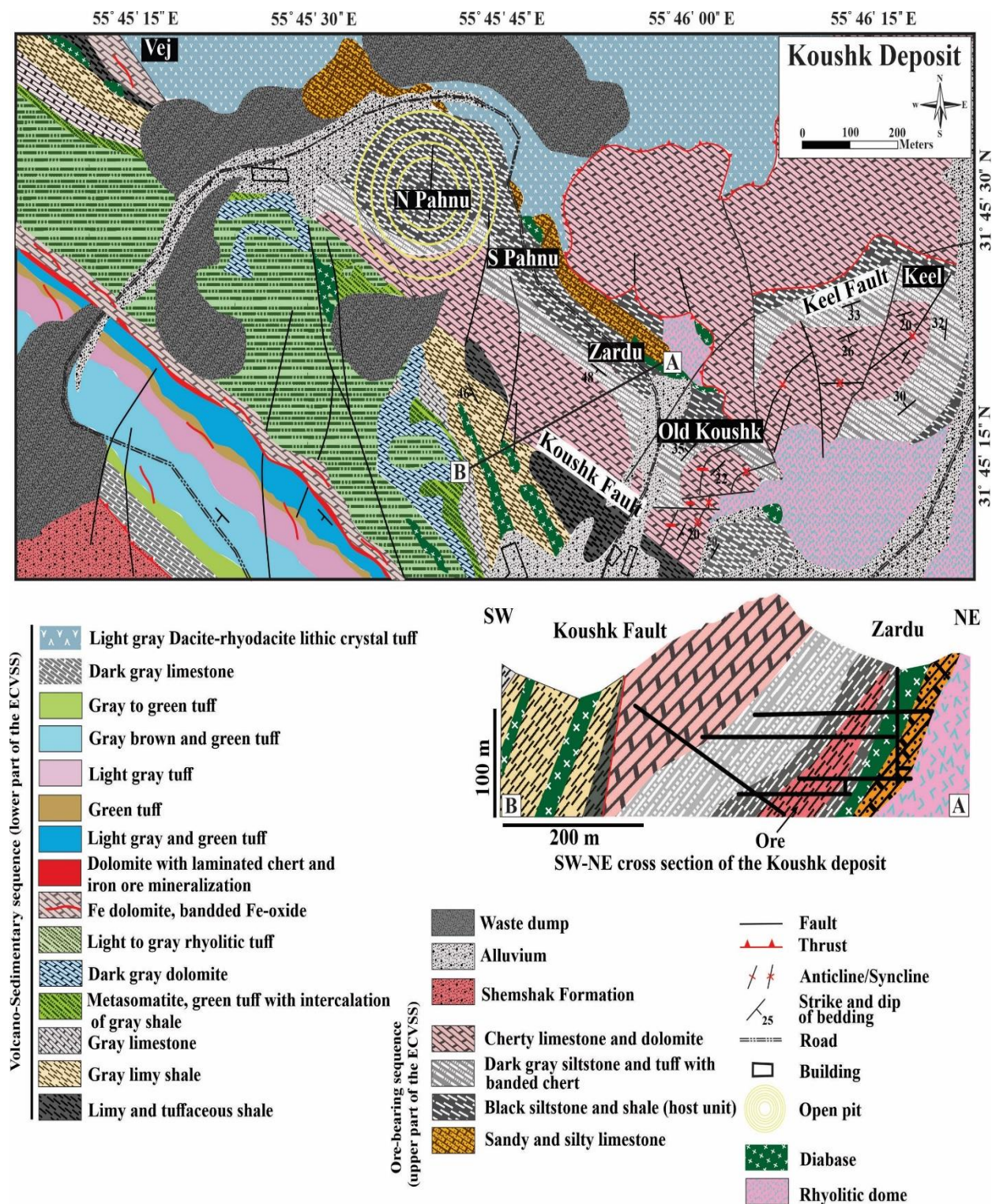
سنگ‌نگاری

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

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

مواد و روش‌ها

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

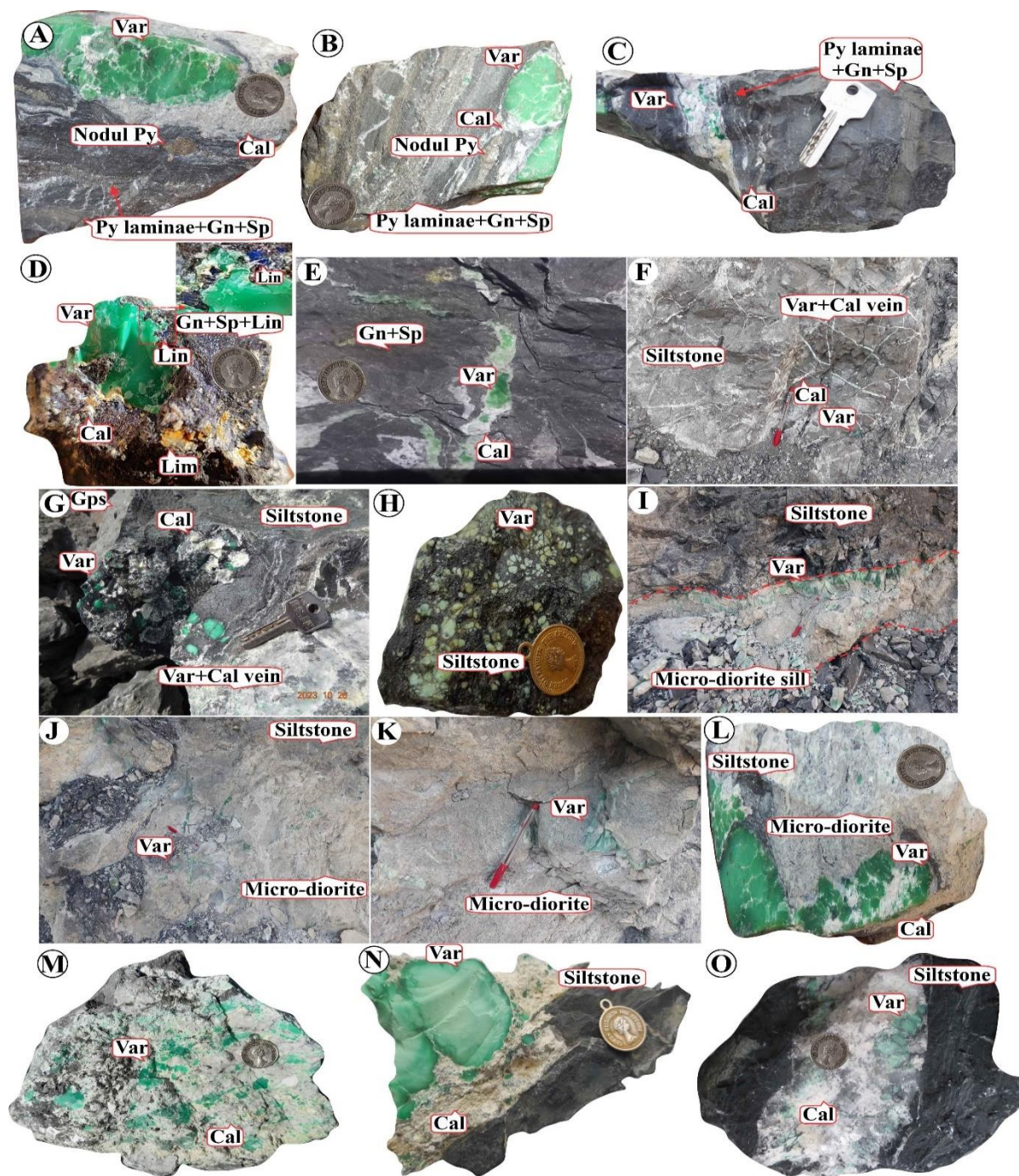


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کانسار روی و سرب کوشک و برش عرضی جنوب‌غربی - شمال‌شرقی کانسار (Rajabi et al., 2012)

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

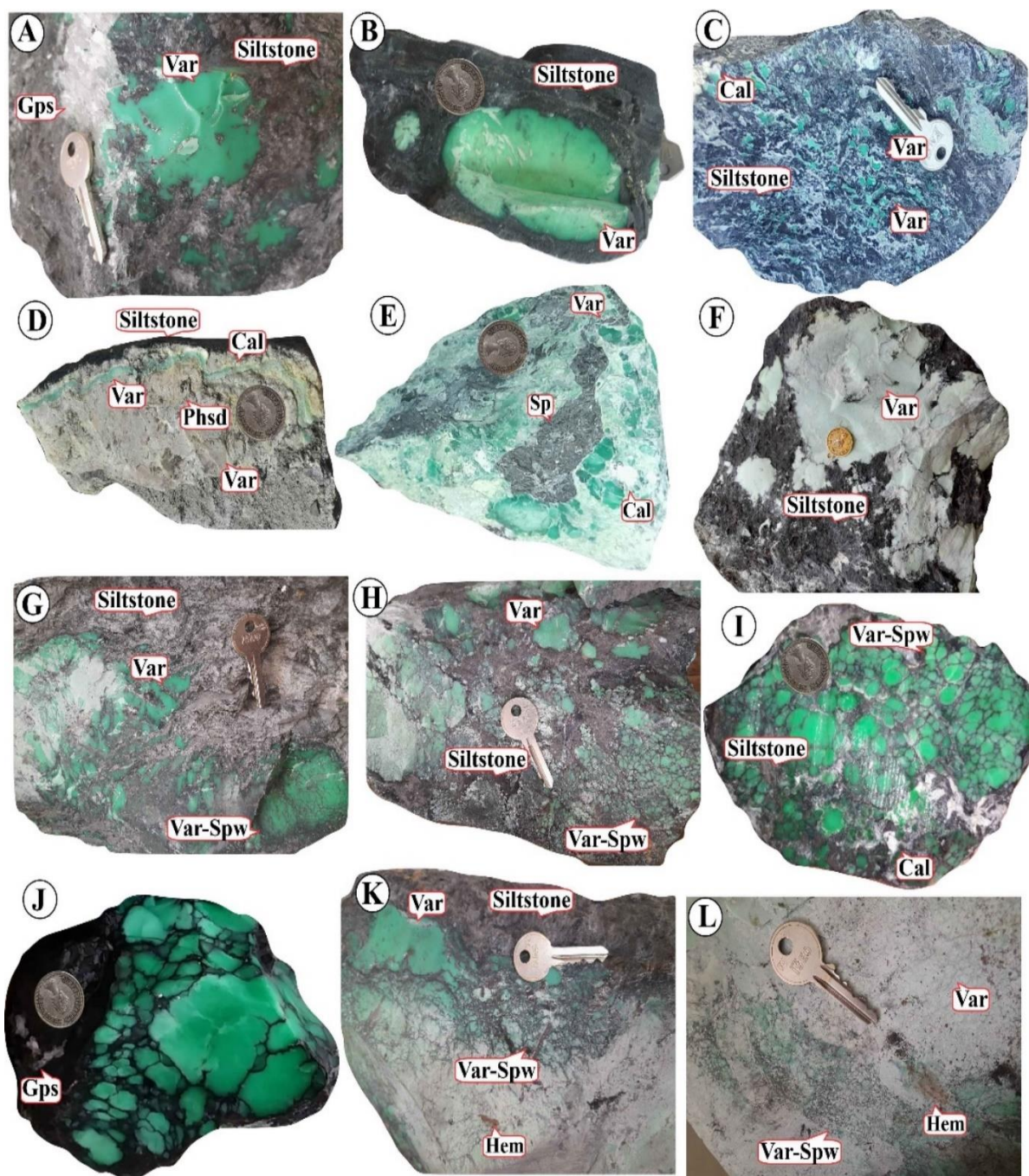
در بخش‌های معدنی شیل‌های سیاه، مجموعه‌ای از کانی‌های سولفیدی شامل گالن، پیریت، اسفالریت و مجموعه کانی‌های کربناته شامل کلسیت، دولومیت، اسمیت زونیت، ژپس و واریسکیت مشاهده می‌شود. در شیل‌های سیاه بدون کانی‌زایی روی و سرب و سیل‌های دیوریتی، واریسکیت اغلب همراه با کلسیت، ژپس و آغشتگی‌های اکسید آهن مشاهده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

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



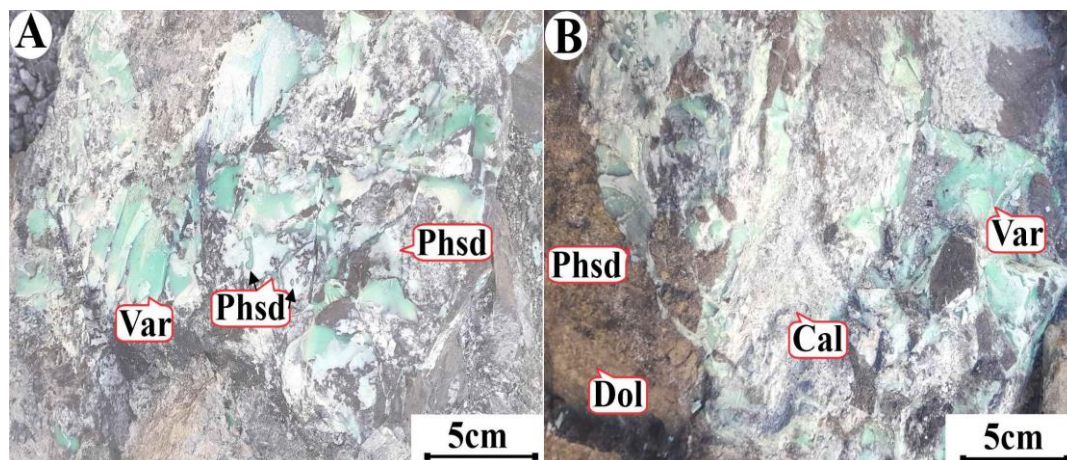
شکل ۳. کانی‌زایی واریسکیت مرتبط با A تا C: کانسنگ لایه‌ای، D و E: کانسنگ توده‌ای، F تا H: زون حاشیه‌ای، I تا L: سیل‌های دیوریتی و M تا O: رگه‌های تأخیری کربناتی ± کوارتز در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Gn: گالن، Gps: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

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



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

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



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

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

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

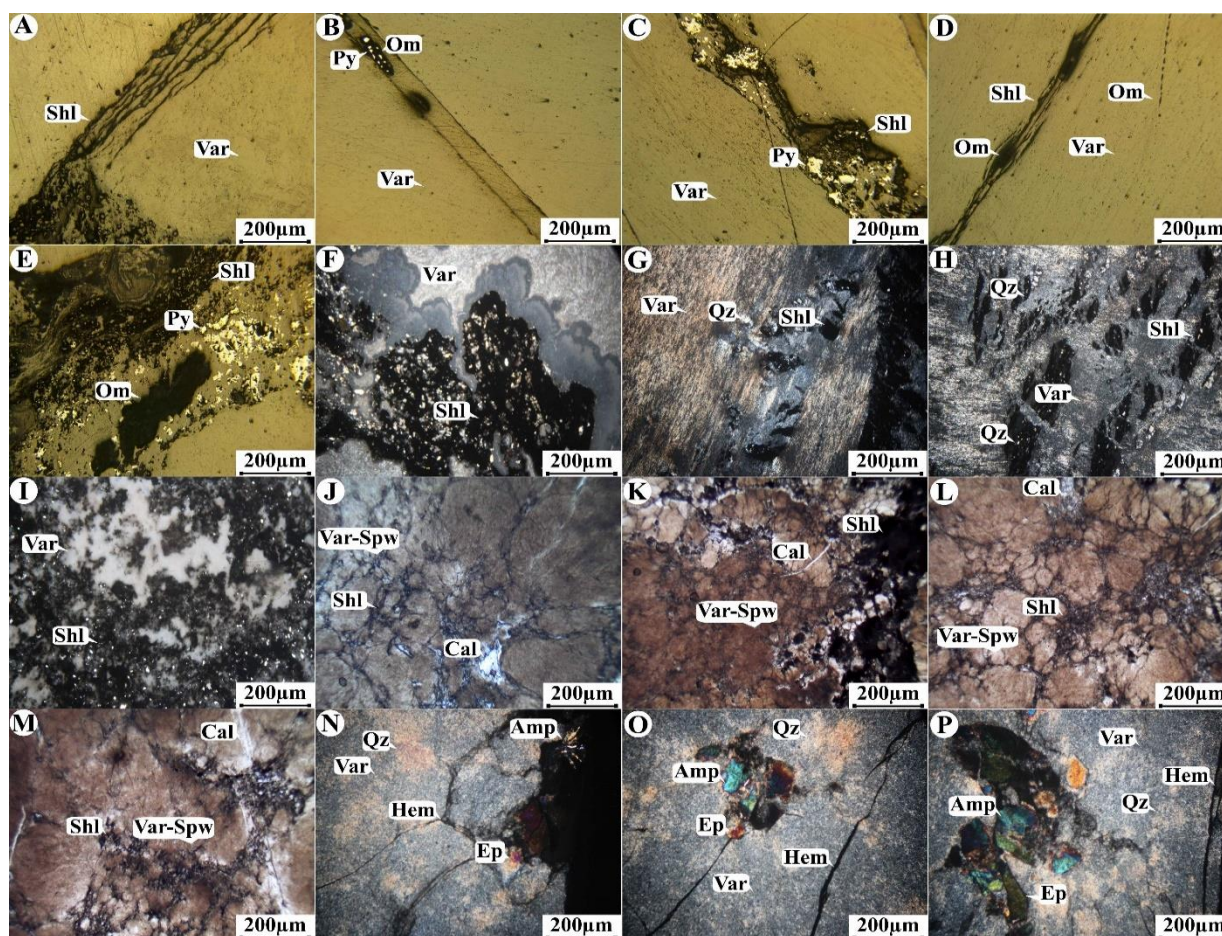
طیف‌سنجی رامان

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

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

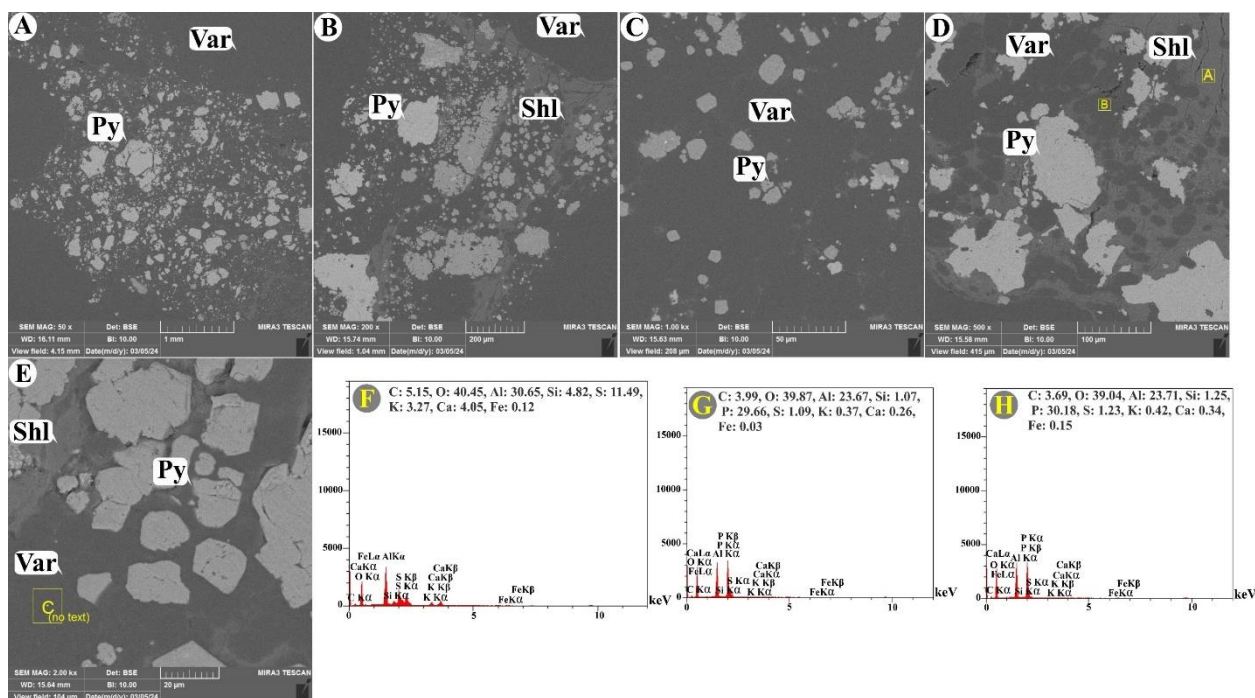
کمتر در حدود ۴۲۲، ۵۴۴ و ۵۵۰ سانتی متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد که همگی به دلیل ارتعاش‌های کششی متقارن گروه فسفات (PO_4) در مواد معدنی گروه واریسکیت و متاواریسکیت هستند (Frost et al., 2004; Onac et al., 2004).

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



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

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



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

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

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

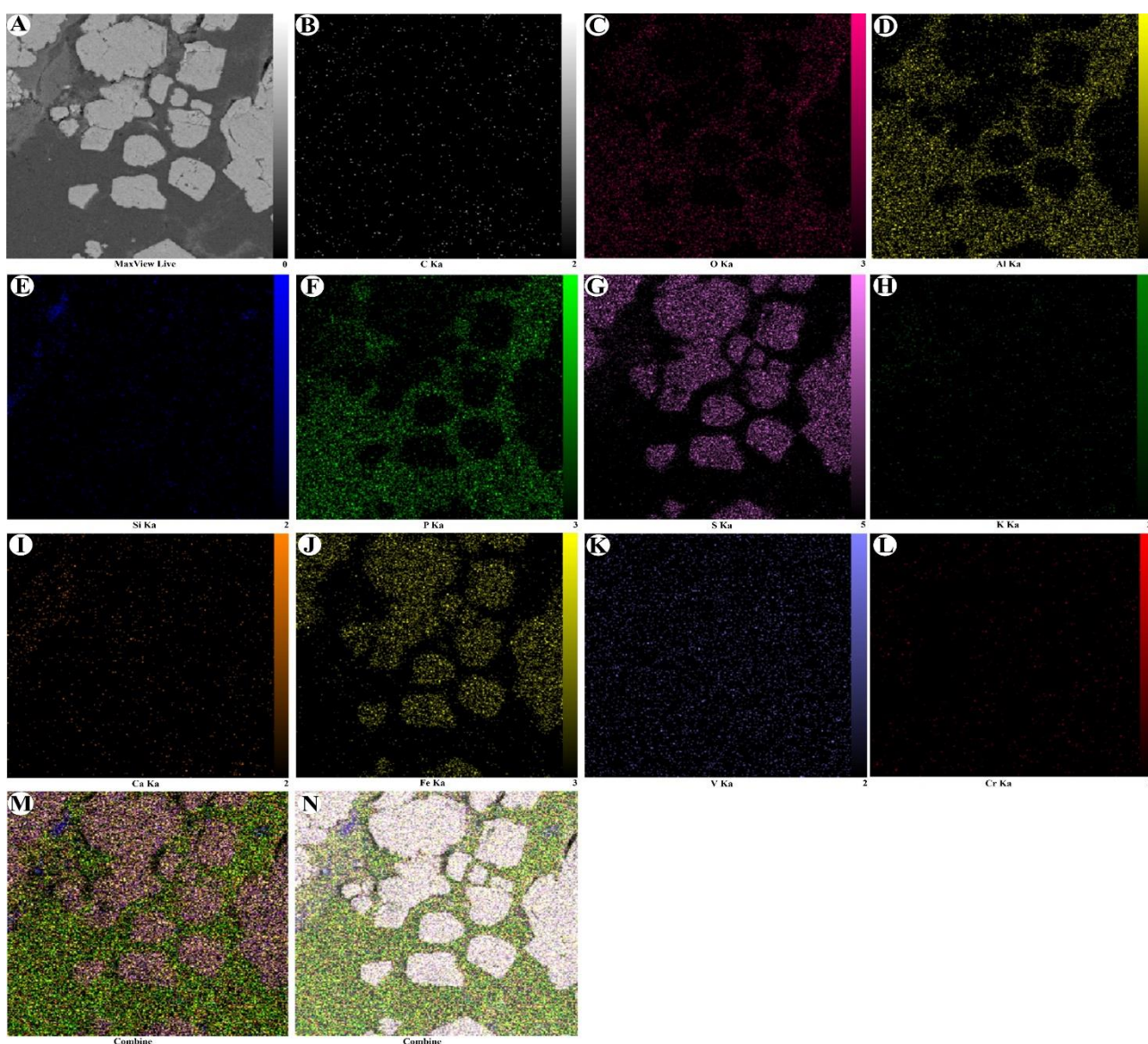
شدیدترین باندها مربوط به ارتعاش‌های کششی واریسکیت هستند؛ اما موقعیت و شکل دقیق آنها احتمالاً به دلیل وجود سایر مواد معدنی از گروه‌های واریسکیت و متا واریسکیت، مانند استرنگیت و فسفوسیدریت است. مجموعه‌ای از باندهای با شدت کمتر در نسل‌های مختلف واریسکیت، نتیجه مدهای خمشی PO_4 است. طیف‌های رامان واریسکیت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

ویژگی‌های گوهری واریسکیت

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

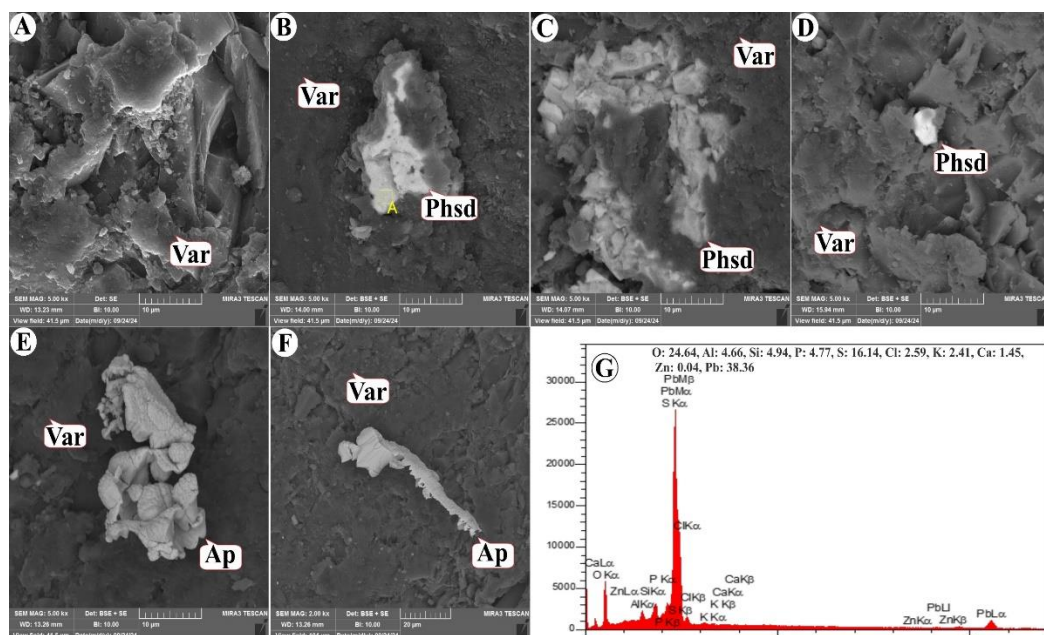
میکروسکوپی نمونه‌های ما ناخالصی‌هایی متشکل از رس، کوارتز، اکسیدهای آهن و شیل (شکل ۶- A تا P) را نشان داد؛ در حالی که نمونه‌های استرالیایی علاوه بر ماتریس متشکل از رس، کوارتز و اکسیدهای آهن، ممکن است دارای انکلوژن‌هایی طلا نیز باشند.

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



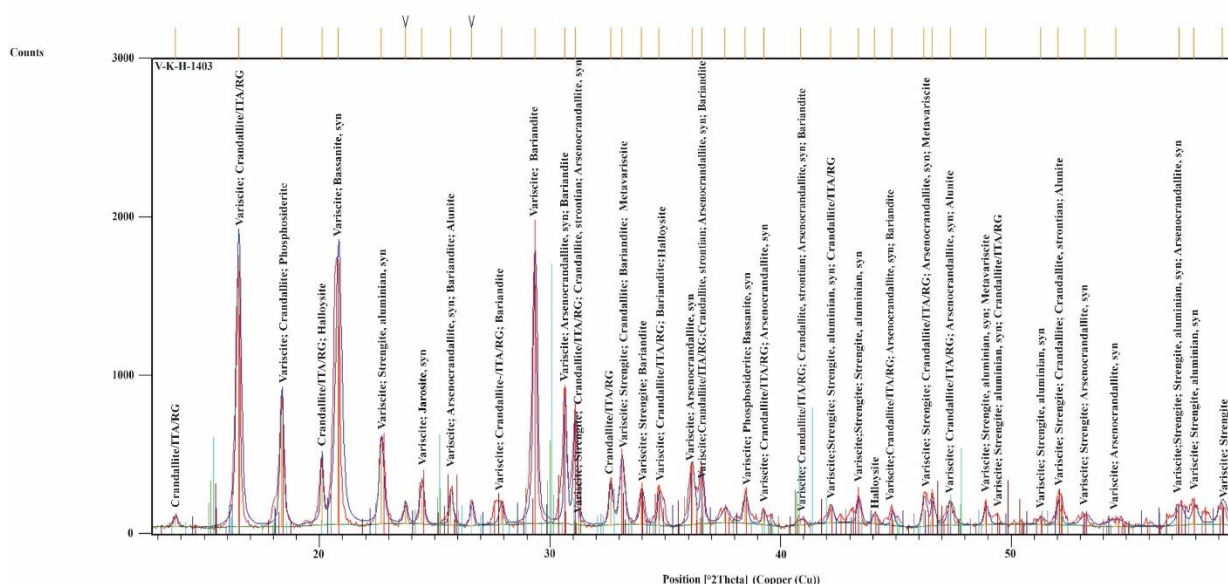
شکل ۸. A تا N: نقشه پراکندگی عنصری توسط پراش پرتو ایکس بر روی واریسکیت‌های مرتبط با زون کانسنگ لایه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک

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



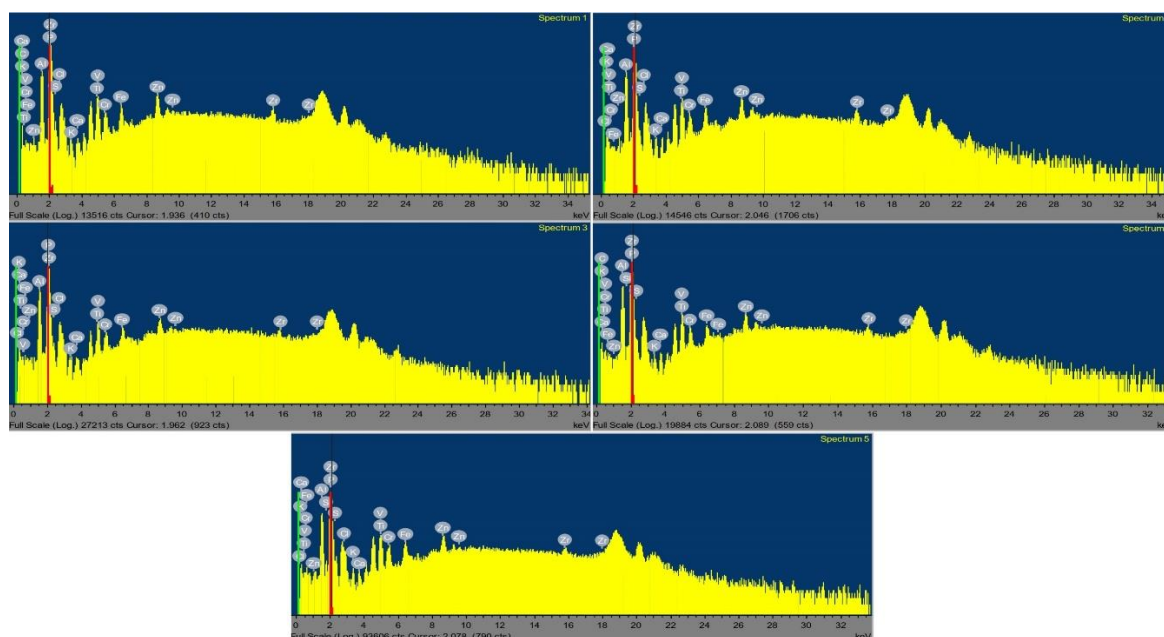
شکل ۹. A تا G: تصویرهای FE-SEM و EDS از واریسکیت‌های مرتبط با زون حاشیه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوآنز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ap: آپاتیت، Phsd: فسفوسیدریت، Var: واریسکیت ساده).

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



شکل ۱۰. نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس مرتبط با واریسکیت‌های سبز پررنگ ساده در شیل‌های بدون کانی‌زایی روی و سرب مرتبط با زون حاشیه‌ای در کانسار روی و سرب کوشک

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



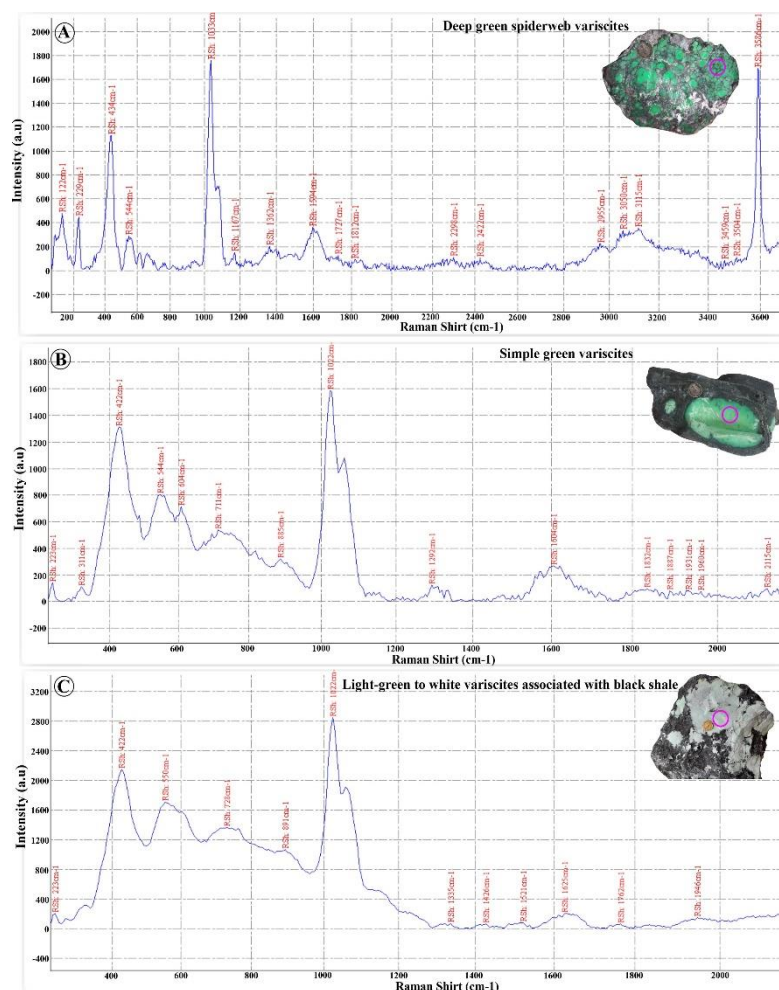
شکل ۱۱. نتایج عنصری پراش پرتو ایکس به روش XPMA بر روی کانی واریسکیت‌های سبز تیره در کانسار روی و سرب کوشک
Fig. 11. X-ray elemental microprobe (XPMA) results on deep-green variscite from the Koushk Zn-Pb deposit

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

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

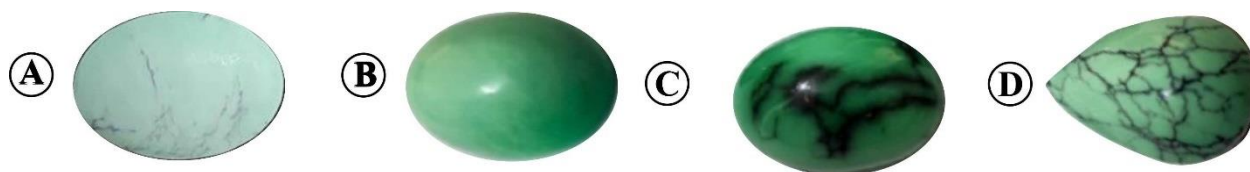
زمین‌شیمی عناصر اصلی و جزئی در کانسنگ

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

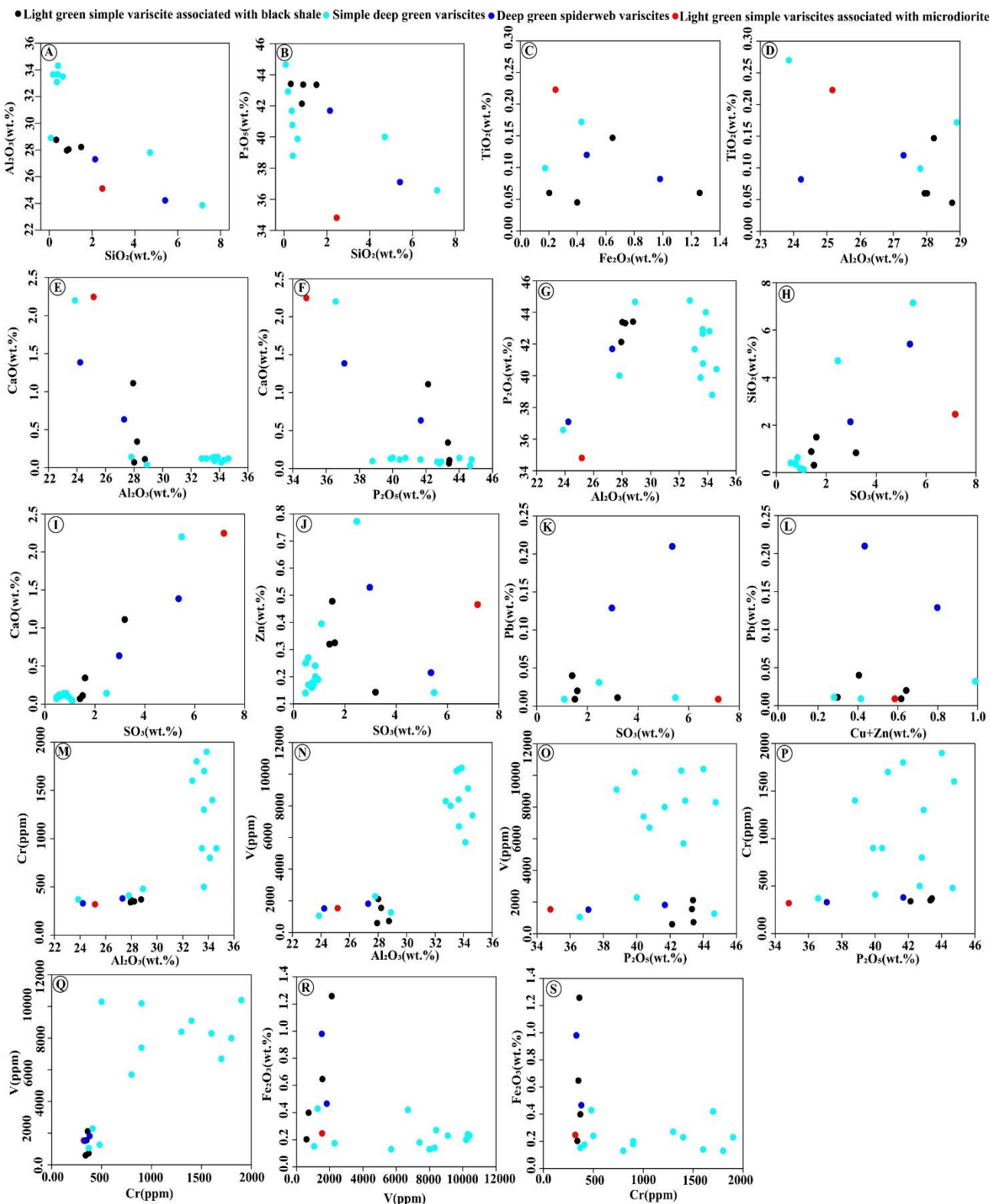
جدول ۵. مؤلفه‌های آماری عناصر در واریسکیت‌های تجزیه‌شده در کانسار روی و سرب کوشک

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

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

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

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



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

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

تفاوت رنگ در واریسکیت کوشک

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

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

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

سایر پژوهشگران نیز اشاره کرده‌اند که این رنگ آمیزی می‌تواند ناشی از حضور یون‌های V^{4+} یا V^{3+} نیز باشد (Marty et al., 1999; Foster and Schaller, 1996; Rossman, 2004). در سال‌های اخیر، یک بررسی نظام‌مند که نمونه‌های واریسکیت را از سه منطقه مختلف در اروپا مقایسه کرده است، به این نتیجه رسید که کروم سه‌ظرفیتی در موقعیت هشت‌وجهی (Cr^{3+}) به احتمال زیاد عامل ایجاد رنگ سبز واریسکیت است (Calas et al., 2005).

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

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

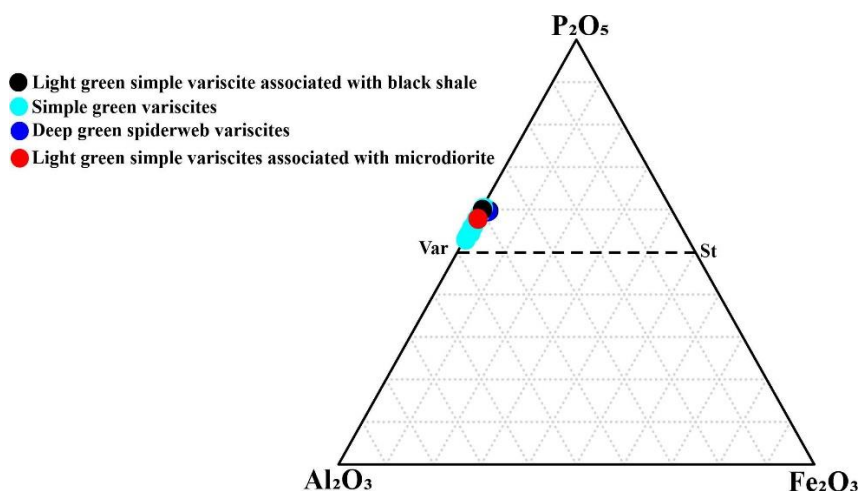
تفاوت در طیف‌های رنگی سبز/آبی را می‌توان به طور تقریبی به تفاوت در محتوای Cr^{3+} نسبت داد. در واریسکیت‌های سبز پررنگ و واریسکیت‌های سبز پررنگ تار عنکبوتی مرتبط با شیل‌های سیاه میانگین محتوای کرم و وانادیوم به ترتیب ۹۸۰ ppm و ۶۱۶۴ ppm است؛ در حالی که در واریسکیت سبز کم‌رنگ مرتبط با شیل‌های سیاه و سیل‌های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

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

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

از مقادیر کم فسفات‌های آهن مانند استرنگیت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، ارتوروامبیک و فسفوسیدریت ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، مونوکلینیک باشد. در واریسکیت‌های با رنگ سبز مایل به آبی (سبز کم‌رنگ)، که رنگ اغلب ناشی از وجود آهن دوظرفیتی است، مقادیر Cr و V نسبت به واریسکیت‌های سبز پر رنگ و واریسکیت‌های تار عنکبوتی ناچیز است. تجزیه زمین‌شیمیایی دانه‌های واریسکیت، نشان‌دهنده ترکیب اصلی کانی‌های واریسکیت متعلق به گروه واریسکیت و سری واریسکیت-استرنگیت ($[\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$) است. (شکل ۱۵).

داشت. در واریسکیت‌های کوشک رنگ‌سازهای Cr، V و Fe همراه با مقادیر کمی CaO ، Na_2O ، K_2O و TiO_2 و SO_3 شناسایی شدند. حضور SO_3 ناشی از حضور کانی‌های سولفیدی (پیریت، اسفالریت، گالن) و سولفات‌های آلونیت، ژاروسیت است. در مقایسه با واریسکیت استرالیا (Willing et al., 2008) و ایالات متحده، پرتغال، فرانسه و ایتالیا (Calas et al., 2005) و تاجیکستان مرکزی (Litvinenko et al., 2016)، مقادیر Fe_2O_3 ، V_2O_5 و Cr_2O_3 در واریسکیت‌های کوشک کمتر است (جدول‌های ۲، ۳ و ۴). مقادیر پایین آهن می‌تواند ناشی



شکل ۱۵. نمودار سه‌تایی P_2O_5 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 و قرارگیری واریسکیت در امتداد اتصال واریسکیت-استرنگیت در کانسار روی سرب کوشک

Fig. 15. Ternary diagram of P_2O_5 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 showing the position of variscite along the variscite-strengite join in the Koushk Pb-Zn deposit

بهنجارشده نسبت به کندریت (شکل ۱۶-C و D)، غنی‌شدگی ناچیز عناصر نادر خاکی سبک با آنومالی منفی Eu، Ce و عناصر کمیاب Ti، K و Rb و ناهنجاری مثبت U، Ba و P در بیشتر نمونه‌ها نشان می‌دهد. الگوی REE+Y، غنی‌شدگی LREEs و ناهنجاری منفی Ce نشان می‌دهند و روند دمای پایین سیالات گرمایی تا شبیه آب دریا را پوشش می‌دهند.

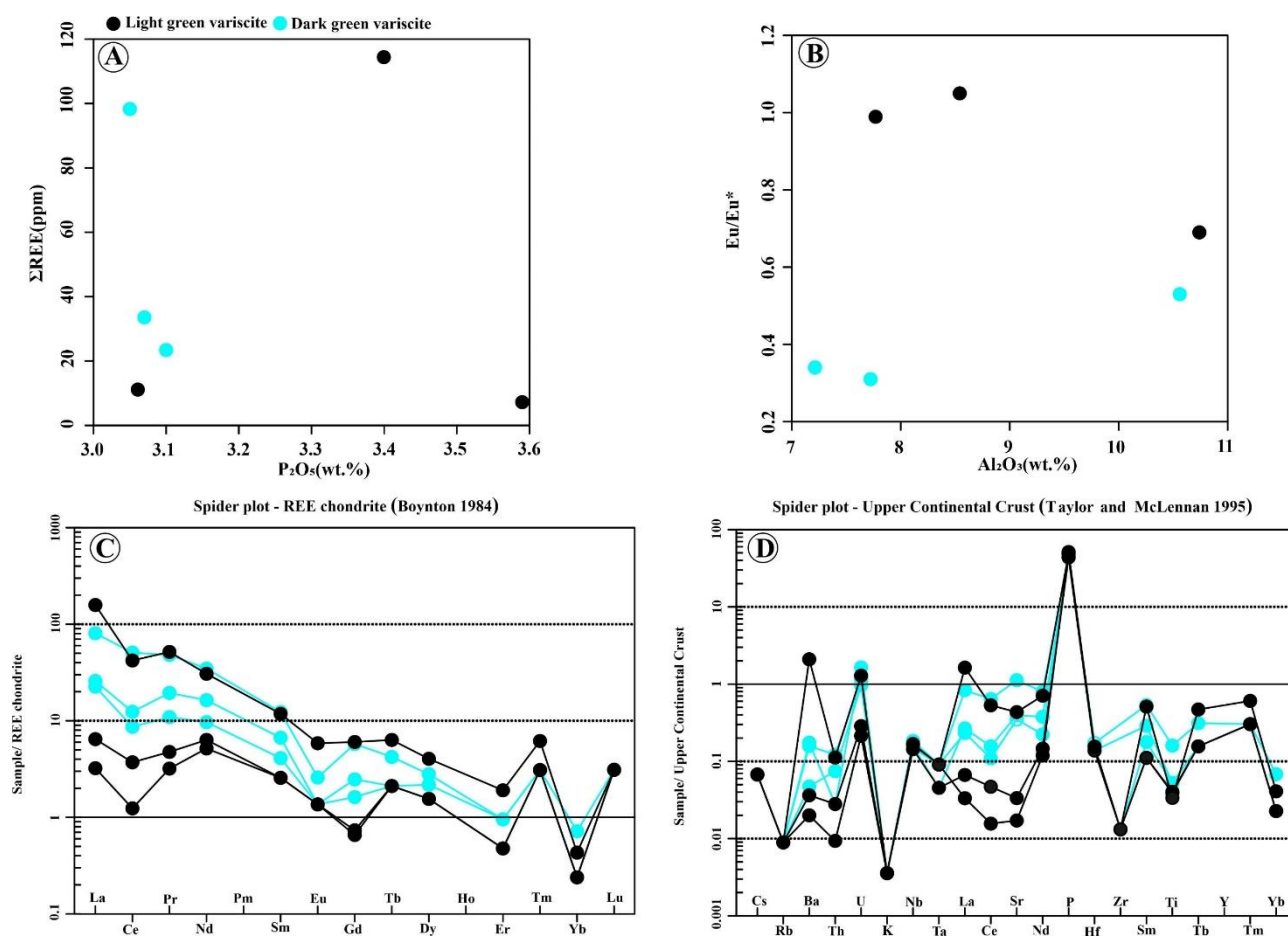
زمین‌شیمی عناصر کمیاب

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال

بررسی‌های سرمایشی

در این مرحله، دمای میان‌بارها تا انجماد کامل فازها به حالت جامد کاهش داده شد (کمترین دمای اندازه‌گیری $190^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد است) و سپس با گرم کردن مجدد، تغییرات در مرحله ذوب ثبت شد. دمای یوتیکتیک (T_e)، دمای مربوط به زمانی است که نخستین قطره مایع پدید می‌آید و مقدار آن به میزان کاتیون‌های حل شده در سیال وابسته است. نقطه یوتیکتیک برای سامانه خالص متشکل از $NaCl+H_2O$ معادل $Te = -20/8^\circ C$ است (Williams-Jones et al., 1992). با توجه به اینکه T_e میان‌بارهای نوع B و C پایین‌تر از $20/8^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد ($38^\circ C$ - تا $30/5^\circ C$ - درجه سلسیوس) است (شکل ۱۸-A)، بنابراین $NaCl$ و سایر نمک‌ها مانند KCl و $NaSO_4$ ممکن است در سیال کانه‌زا حضور داشته باشند (شکل ۱۸-F) (Williams-Jones et al., 1992). با افزایش دما، آخرین بلورهای یخ ناپدید می‌شوند. در میان‌بارهای نوع B و C، دامنه تغییرات ذوب آخرین قطعه یخ (T_m) در کانی کوارتز و کلسیت از $16^\circ C$ تا $4^\circ C$ - درجه سانتی‌گراد

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

میان‌بارهای سیال

بررسی‌های سنگ‌نگاری

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

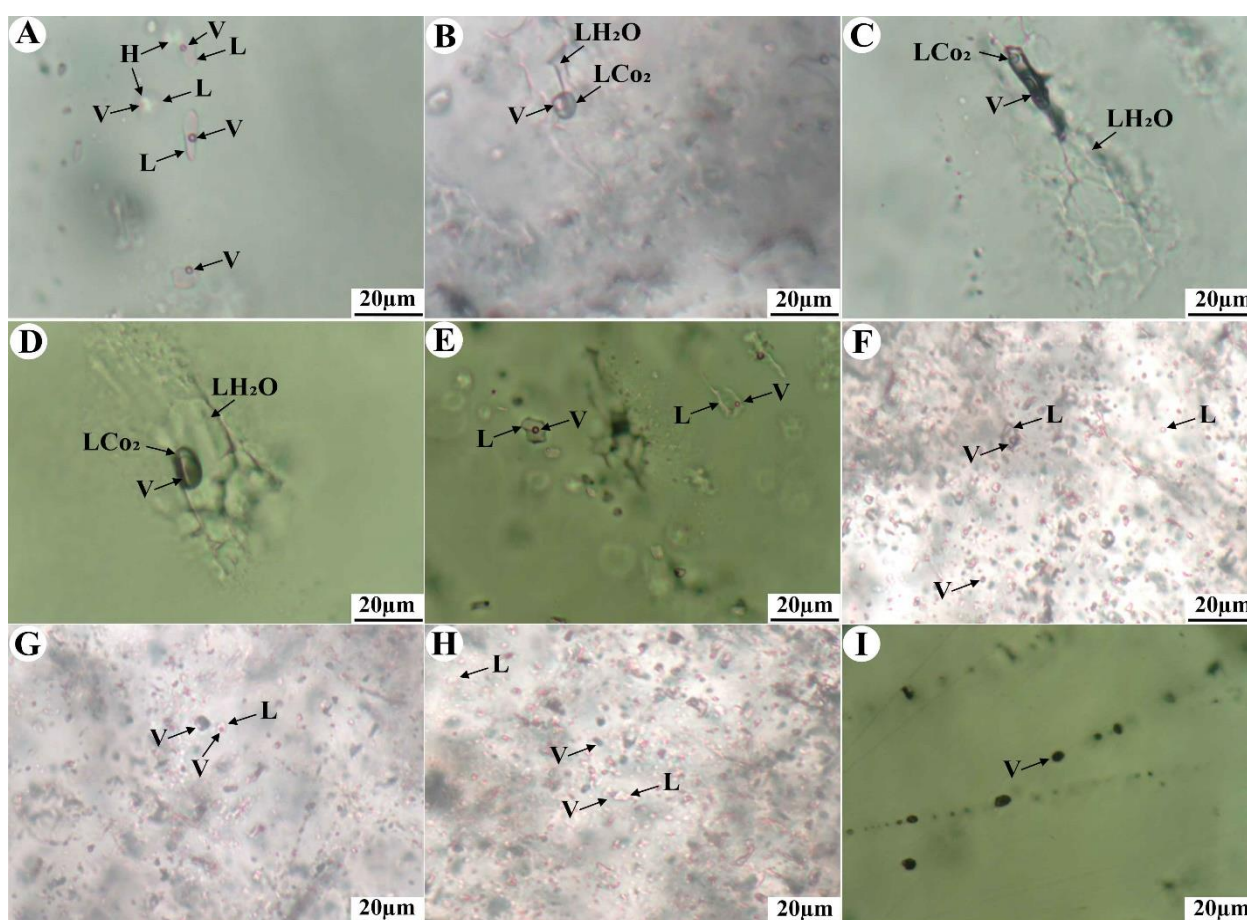
این میان‌بارها تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز هستند و می‌توان آنها را به ۶ گروه تقسیم کرد که عبارتند از:

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

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

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

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



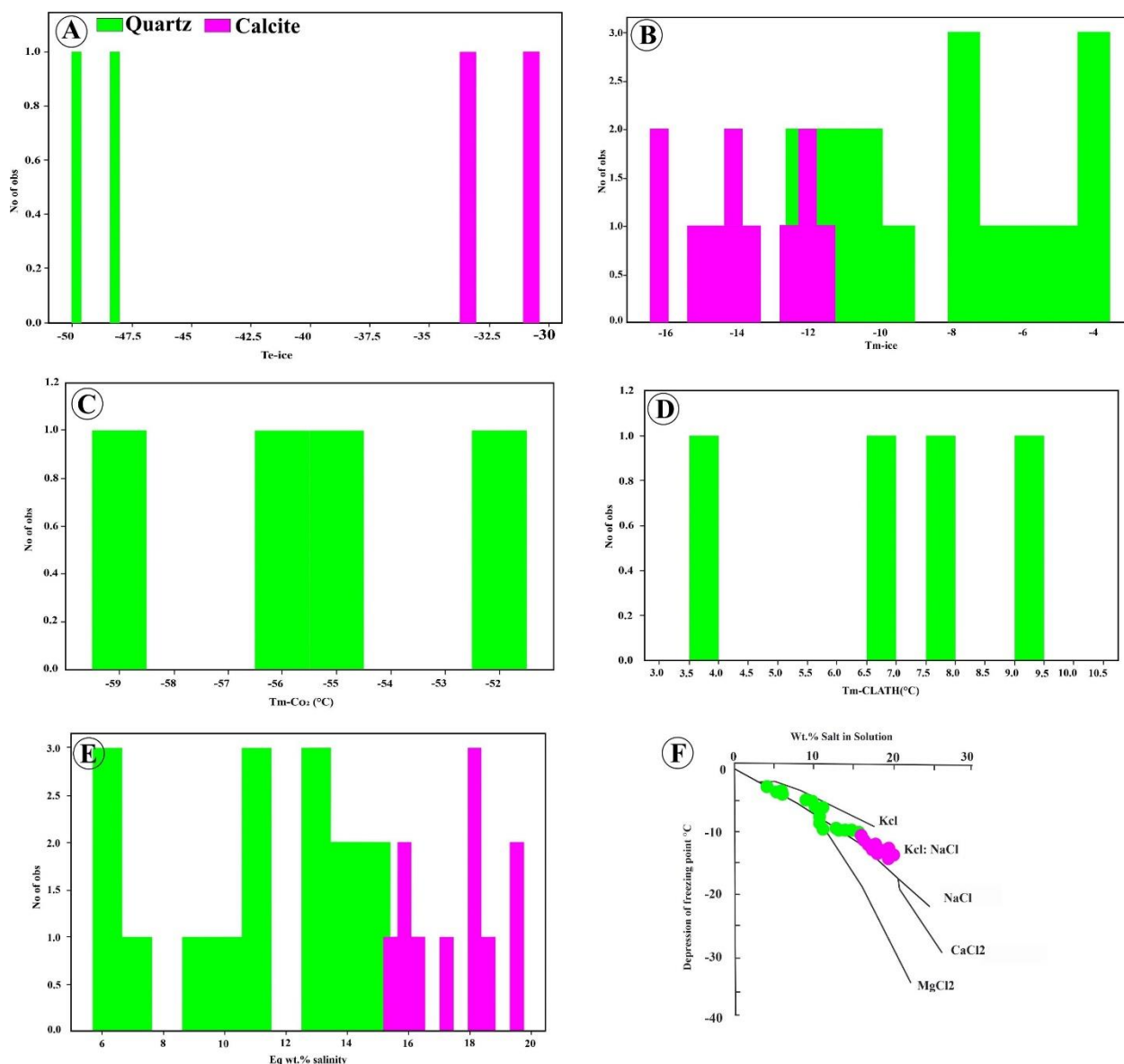
شکل ۱۷. میان بارهای سیال در کانی کوارتز (قسمت های A تا E و I) و کلسیت (قسمت های F تا H) مرتبط با افق های کانی زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک. A: میان بارهای سه فاز (LVS)، دوفازی غنی از مایع (LV)، B تا D: میان بارهای دوفازی همراه با فاز CO₂، E تا H: میان بارهای دوفازی غنی از مایع و میان بارهای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

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

جدول ۷. داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال کانی کوارتز و کلسیت مرتبط با افق‌های کانی‌زایی واریسکیت در کانسار روی و سرب کوشک

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

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



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

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

بررسی‌های گرمایشی

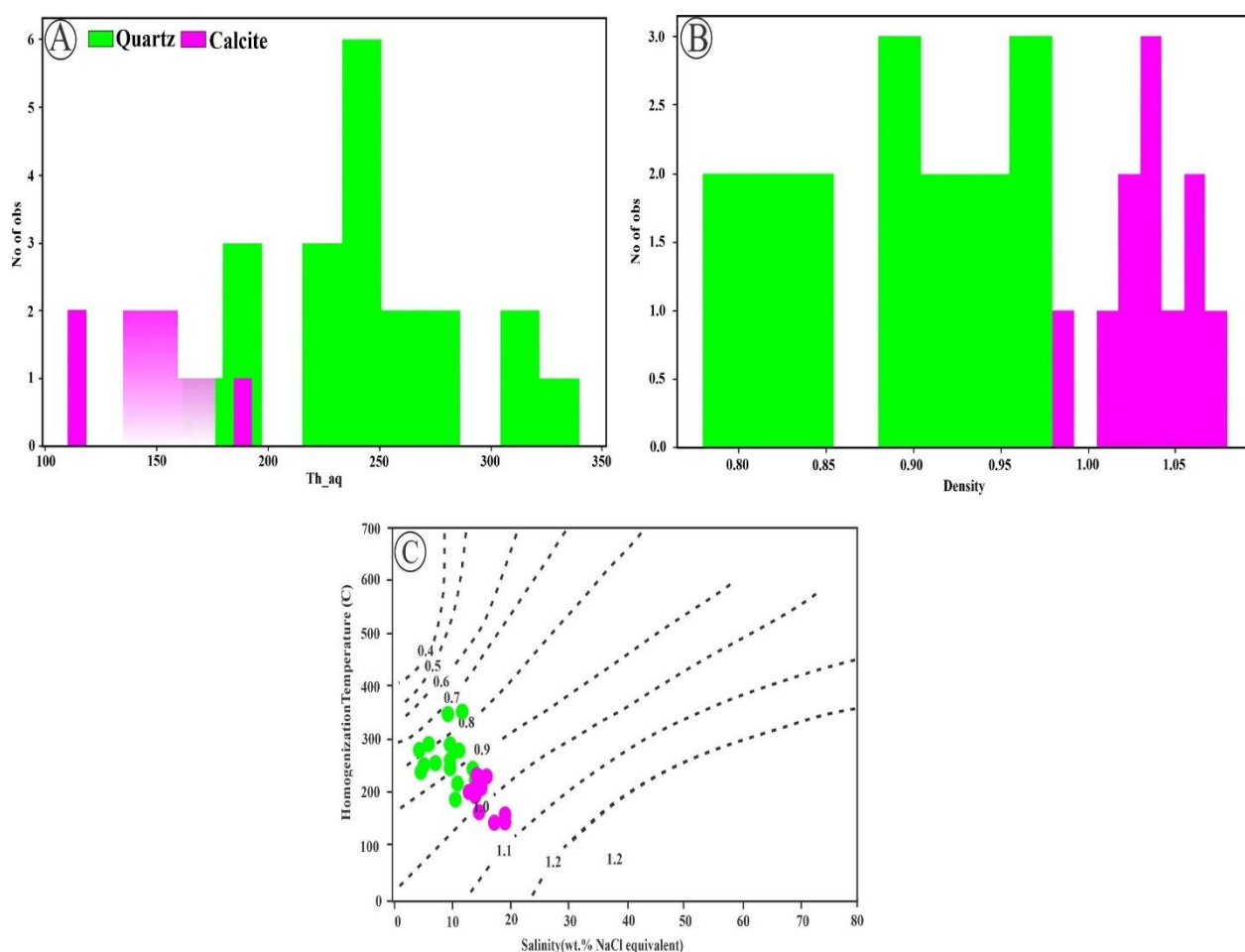
مایع و در نمونه‌های غنی از فاز بخار با تبدیل مایع به بخار

صورت گرفته است (بیشترین دمای اندازه‌گیری توسط دستگاه ۶۰۰

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

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

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



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

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

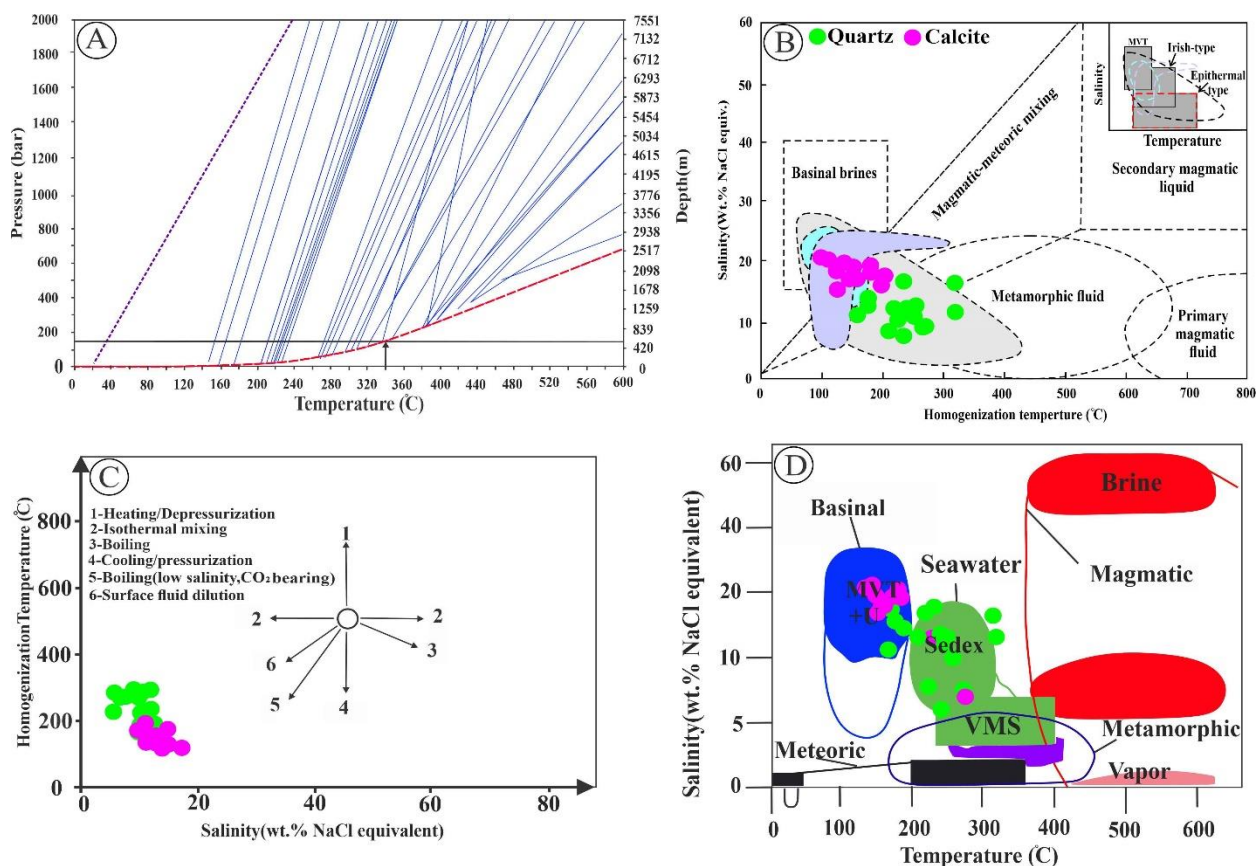
تعیین عمق و نوع محیط تشکیل کانسنگ واریسکیت در کانسار کوشک

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

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

بحث

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



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

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

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

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

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

نتیجه‌گیری

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

مقایسه با دیگر کانی‌زایی‌های مشابه در دنیا پایین است. نمونه‌هایی که دارای مقدار بیشتری از Cr^{3+} هستند، دارای رنگ سبز شدیدتر و پررنگ‌تری هستند. بنابراین، برای آنکه واریسکیت کیفیت گوهرگونه داشته باشد، باید مقدار Cr^{3+} در آن بالا و سهم اختلاط با سایر کانی‌ها به ویژه کانی‌های زرد تا قهوه‌ای مایه بسیار کم باشد. مقادیر ناچیز آهن در واریسکیت‌ها احتمالاً به دلیل وجود مقادیر ناچیز کانی استرنگیت است. بررسی‌های زمین‌شیمی بر روی نسل‌های مختلف واریسکیت نشان می‌دهد کانسنگ واریسکیت کوشک از دو گروه متمایز تشکیل شده است: گروه اول، واریسکیت سبز روشن تا سبز تیره مرتبط با شیل سیاه است. این نمونه‌ها دارای خلوص بالاتری هستند ($\text{SiO}_2 < 1.5\%$ ، Al_2O_3 28%، $\sim 43\%$ P_2O_5) و نسبت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ نزدیک به مقدار استوکیومتری واریسکیت (۵۵/۰ تا ۶۵/۰) است. محتوای SO_3 پایین (۱/۱ تا ۱/۶ درصد) نشانه کمترین درهم‌رشدگی با سولفات‌هاست. گروه دوم شامل واریسکیت‌های سبز تار عنکبوتی مرتبط با شیل سیاه و واریسیت‌های سبز روشن مرتبط با میکرودیوریتی است. این نمونه‌ها دارای SiO_2 بالاتر (۵/۲ تا ۷/۱ درصد)، Al_2O_3 پایین‌تر (۲۴ تا ۲۷ درصد) و SO_3 بالاتر (۵/۲ تا ۷/۲ درصد) هستند که نشانه درهم‌رشدگی گسترده با کانی‌های رسی (کائولینیت، هالوزیت) و سولفات‌های (آلوانیت، ژاروسیت) است. نسبت بالای $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ (۶۵/۷۲ تا ۷۰/۰) نشانه آلاش با کانی‌های آلومینوسیلیکاتی (رس، کائولینیت، هالوزیت) است، نتایج XRD تأییدکننده این مطلب است. بر اساس بررسی‌های طیف‌سنجی رامان، بیشترین شدت پیک مشاهده شده در واریسکیت‌های تار عنکبوتی در حدود ۱۰۳۳ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است و دو پیک با شدت کمتر در حدود ۴۳۴ و ۳۵۸۰ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد. در واریسکیت‌های سبز ساده و واریسکیت‌های صابونی (سبز-آبی کم‌رنگ تا سفید)، بیشترین شدت پیک در حدود ۱۰۲۲ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) است و سه پیک با شدت کمتر در حدود ۴۲۲، ۵۴۴ و ۵۵۰ سانتی‌متر معکوس (cm^{-1}) وجود دارد که همگی به دلیل

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

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

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

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

References

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

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

- icle-abstract/27/4/281/538206/The-mineralogy-and-paragenesis-of-the-variscite?redirectedFrom=fulltext
- Lawrence, M.G., Greig, A., Collerson, K.D. and Kamber, B.S., 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12: 39–72. <https://doi.org/10.1007/s10498-005-4471-8>
- Lindberg, M.L. and Pecora, W.T., 1958. Phosphate minerals from Sapucaia Pegmatite Mine. Minas Gerais. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 7(2): 5–14. Retrieved July 12, 2026 from http://boletim.siteoficial.ws/pdf/1958/7_2-1-14.pdf
- Litvinenko, A.K., Sorokina, E.S., Karampelas, S., Krivoschekov, N.N. and Serov, R., 2016. Variscite from central Tajikistan: Preliminary results. *Gems and Gemology*, 52(1): 60–65. <https://doi.org/10.5741/gems.52.1.60>
- Marchig, V., Gundlach, H., Moller, P. and Schley, F., 1982. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Marine Geology*, 50(3): 241–256. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90141-4)
- Marty, J., Howard, D.G. and Barwood, H., 1999. Minerals of the Utahlite Claim, Lucin, Box Elder County, Utah. Utah Geological Survey Miscellaneous Publication, Salt Lake City, UT, USA, 16 pp.
- Mattson, S.M. and Rossman, G.R., 1987. Identifying characteristics of charge transfer transitions in minerals. *Physics and Chemistry of Minerals*, 14: 94–99. <http://doi.org/10.1007/BF00311152>
- Mehdipour Ghazi, J., Harris, C., Rahgoshay, M. and Moazzen, M., 2019. Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposit in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite. *Ore Geology Reviews*, 105: 590–604. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.006>
- Mehdipour Ghazi, J. and Moazzen, M., 2024. Cadomian iron ore bodies in the Bafq-Saghand metallogenic province, Iran: genetic constraints from field observations and laser ablation ICP-MS mineral studies. *International Geology Review*, 66(5): 1144–1164. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2238210>
- Mehdipour Ghazi, J., Moazzen, M., Rahgoshay, M. and Wilde, S.A., 2020. Zircon U–Pb–Hf isotopes and whole rock geochemistry of magmatic rocks from the Posht-e-Badam Block: A key to tectonomagmatic evolution of Central Iran. *Gondwana Research*, 87: 162–187. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.010>
- Melgarejo, J.C., Arqués, L., Villanova-de-Benavent, C., Jahwari, T., Torró, L., Bosch, J., Castillo-Oliver, M., Campeny, M., Amores, S., Andreazini, A., Lehibib, S. and Camprubi, A., 2019. The use of Raman spectroscopy in the characterization of variscite provenance: The Gavà case. In: G. Querré, S. Cassen and E. Vigier (Editors), *La Parure en Callaïs du Néolithique Européen*, Archaeopress, Oxford, UK, pp. 241–251. <https://doi.org/10.2307/jj.15136071.14>
- Mohseni, S. and Aftabi, A., 2015. Structural, textural, geochemical and isotopic signatures of synglaciogenic Neoproterozoic banded iron formations (BIFs) at Bafq mining district (BMD), Central Iran: the possible Ediacaran missing link of BIFs in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 71: 215–236. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.018>
- Nassau, K., 1978. The origins of colour in minerals. *American Mineralogist*, 63(3–4): 219–229. Retrieved June 18, 2026 from <https://scispace.com/pdf/the-origins-of-color-in-minerals-341khlgnog.pdf>
- Nayebi, N., Esmaily, D., Chew, D.M., Lehmann, B. and Modabberi, S., 2021. Geochronological and geochemical evidence for multi-stage apatite in the Bafq iron metallogenic belt (central Iran), with implications for the Chadormalu iron-apatite deposit. *Ore Geology Reviews*, 132: 104054. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104054>
- NISCO (National Iranian Steel Company), 1980. Report on the results of research and evaluation of studies at magnetic anomalies in the Bafq iron ore district during 1976-1979, Unpublished Report, 260 pp.
- Nriagu, J.O. and Moore, P.B., 1984. *Phosphate Minerals*. Springer, Berlin, Germany, 442 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61736-2>
- Odrizola, C.P.Y. and Linares-Catela, J.A., 2012. Cuentas de variscita: producción, circulación y presencia en contextos funerarios del suroeste peninsular. *Revista del Museu de Gavà*, 5: 323–332. Retrieved June 18, 2026 from <http://hdl.handle.net/11441/52726>

- Onac, B.P., Kearns, J., Breban, R. and Cîntă Pânzaru, S., 2004. Variscite (AlPO₄ 2H₂O) from Cioclovina Cave (Sureanu Mountains, Romania): a tale of a missing phosphate. *Studia UBB Geologia*, 49(1): 3–14.
<https://doi.org/10.5038/1937-8602.49.1.1>
- Palache, C., Berman, H. and Frondel, C., 1951. Dana's system of mineralogy. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 74(2): 218–219.
<https://doi.org/10.1080/11035895209453366>
- Querré, G., Calligaro, T., Cassen, S., Dabard, M.P. and Domínguez-Bella, S., 2019. Provenance des parures en variscite du Néolithique européen: Élaboration d'un modèle chimiométrique. In: G. Querré, S. Cassen and E. Vigier (Editors), *La Parure en Callaïs du Néolithique Européen*. Archaeopress Publishing Ltd.: Oxford, UK, pp. 105–128. <https://doi.org/10.2307/jj.15136071.11>
- Rahimzadeh, B., Raeiszadeh, S. and Hadipanah, P., 2022. Gem-quality Variscite from Central Iran. *The Journal of Gemmology*, 38(4): 319–321. Retrieved July 12, 2026 from <https://www.proquest.com/docview/2755871097?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&source type=Scholarly%20Journals>
- Rajabi, A., Rastad, E., Alfonso, P. and Canet, C., 2012. Geology, ore facies and sulphur isotopes of the Koushk vent-proximal sedimentary-exhalative deposit, Posht-e-Badam Block, Central Iran. *International Geology Review*, 54(14): 1635–1648.
<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659106>
- Roedder, E., 1984. Inclusion sample selection, preparation, petrography and photography. In: P.H. Ribbe (Editor), *Fluid Inclusions*. Mineralogical Society America., Washington, D.C, pp. 149–180.
https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781501508271_A35506584/preview-9781501508271_A35506584.pdf
- Rossmann, G.R., 2004. Mineral Spectroscopy Server. California Institute of Technology: Pasadena, CA, USA. Retrieved July 12, 2026 from <http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/Variscite/Index.html>
- Salvador, S.P. and Fayos, J., 1972. Some aspects of the structural relationship between “Messbach-type” and “Lucin-type” variscites. *American Mineralogist*, 57(1–2): 36–44. Retrieved July 12, 2026 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/57/1-2/36/542587/Some-aspects-of-the-structural-relationship?redirectedFrom=fulltext>
- Samani, B.A., 1988. Metallogeny of the Precambrian in Iran. *Precambrian Research*, 39(1–2): 85–96.
[https://doi.org/10.1016/0301-9268\(88\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90053-8)
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie Press, London, 239 pp. Retrieved July 12, 2026 from https://books.google.com/books/about/A_Practical_Guide_to_Fluid_Inclusion_Stu.html?id=CVSGAAAAIAAJ
- Sherafat, S., Mohammady Nasab, E., Mackizadeh, M. and Khodami, M., 2007. Variscite occurrence in Koushk deposit, Bafq (Yazd Province). *Journal of Geotechnical Geology*, 3(4): 260–265. Retrieved July 12, 2026 from <https://iranjournals.nlai.ir/handle/123456789/9912>
- Sheridan, A., 2000. Achnacreebeag and its French connections: Vive the ‘auld alliance’. In: J.C. Henderson (Editor), *The Prehistory and Early History of Atlantic Europe*, BAR International Series 861, Oxford, pp. 1–15.
<https://doi.org/10.30861/9781841710624>
- Slansky, M., 1986. Geology of Sedimentary Phosphates. *Geological Magazine*, 124(3): 290–291.
<https://doi.org/10.1017/S0016756800016496>
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific Publications (Oxford), London, 312 pp. Retrieved July 12, 2026 from <https://commons.library.stonybrook.edu/geo-articles/12/>
- Torab, F., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. Ph.D. Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences, Clausthal University of Technology, Germany, 144 pp.
- Vesali, Y., Sepidbar, F., Palin, R.M. and Chiaradia, M., 2021. Crustal architecture studies in the Iranian Cadomian arc: Insights into source, timing and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 136: 104280.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104280>

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