



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

## Mineralogy of graphite-bearing schists and calculation of graphitization temperature in the Band-e-Cherk district, Anarak metallogenic zone

Majid Ghasemi Siani<sup>1</sup>, Hamed Ebrahimi Fard<sup>2\*</sup>, Amir Hosein Heidari Bafruie<sup>3</sup>, Behrouz Karimi Shahraki<sup>4</sup>, Shahryar Mahmoudi<sup>5</sup>

1. Associate Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Ph.D student, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

3. Engineer of deputy of mining affairs, Isfahan's Mobarakeh Steel Company, Isfahan, Iran

4. Ph.D, Iranian Mineral Processing Research Center, Karaj, Iran

5. Associate Professor, Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

### Article info

#### Article history

Received: 02 January 2024

Accepted: 16 February 2024

#### Keywords:

Amorphous graphite, graphitization, graphite-bearing schists, Band-e-Cherk, Kuh-e-Dom metamorphic complex, Anarak metallogenic zone.



### Abstract

The Band-e-Cherk exploration area is located in the structural zone of central Iran, northeast of the city of Ardestan, and the Anarak metallogenic zone. The outcropping rock units in this area include Kuh-e-Dom metamorphic schist complex and recrystallized limestone, Cretaceous limestone sediments, Paleocene conglomerate, Eocene volcanic rocks composed of andesite, andesite-basalt, trachyte, as well as tuff and diorite intrusions. The Kuh-e-Dom metamorphic complex is of lower Paleozoic age, and includes muscovite schist to graphite-muscovite schist, epidote-hornblende-calc schist, muscovite-chlorite schist, calc schist, crystalline limestone and marble. Graphite mineralization is concentrated along the schistose surfaces of graphite-muscovite schist units, and quartz, kaolinite, illite, muscovite (sericite), orthoclase and dickite minerals are other minerals. Comparison of the temperature range for the formation of high-quality flake graphite, which is formed at temperatures above 450°C, mainly between 470 and 560°C (in the amphibolite facies), with the temperature obtained by interpreting the results of Raman spectroscopy on high-quality graphite-bearing samples from the Band-e-Cherk area, shows that graphitization in the Band-e-Cherk area is of an amorphous type and at a temperature lower than 450°C (436°C). Therefore, it was formed under the temperature conditions associated with the greenschist metamorphic facies.

### Introduction

Graphite, with the chemical formula C, is an economic mineral formed primarily under metamorphic and associated hydrothermal conditions. The main mechanisms of graphite formation include deposition from carbonaceous fluids and graphitization (Luque et al., 2012). Graphite's unique physical and chemical properties make it the key strategic component of most industrial products and

technologies, such as semiconductors, fuel cells, use in lubricants, electronic vehicles, optical fibers, nanotechnology technologies, high charge capacity anodes for lithium batteries, aircraft wings, nuclear, wind and solar power as well as a source of graphene (e.g., Luque et al., 2012; Lazzeri and Barreiro, 2014; Rosing-Schow et al., 2017; Al-Ani et al., 2018, 2020). The formation of graphite is referred to as graphitization, which represents

**DOI** <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106632>

\*Corresponding author: Hamed Ebrahimi Fard; E-mail: [hamedebrahimi772@gmail.com](mailto:hamedebrahimi772@gmail.com)

**How to cite this article:** Ghasemi Siani, M., Ebrahimi Fard, H., Heidari Bafruie, A.H., Karimi Shahraki, B., Mahmoudi, S., 2024. Mineralogy of graphite-bearing schists and calculation of graphitization temperature in the Band-e-Cherk district, Anarak metallogenic zone. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(2), 133- 162. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106632>



the in situ conversion of organic matter (Crespo et al., 2006a, b). As the degree of transformation of carbonaceous materials increases, they first transform into amorphous graphite, and with increasing of temperature, flake graphites were formed. The main controlling factors in the graphitization process are the metamorphic temperature and lithology of the host rock, and pressure plays a minor role in the graphitization process (Santosh et al., 2003).

The Band-e-Cherk district, covering approximately 30 km<sup>2</sup>, is located in the Kuh-e-Dom area within the Anarak metallogenic zone. Mineralization in the Anarak area is very diverse in terms of mineralogy, origin and the form of mineralization. Mineralization of iron, copper, molybdenum, antimony, gold, lead, zinc, arsenic, nickel, cobalt, manganese, chromite, and strontium of hydrothermal, magmatic, and metamorphic origin has been observed (Ghorbani, 2007). However, despite the extent of the metamorphic units of the Kuh-e-Dom complex, the possibility of the formation of graphite deposits in metamorphic units has not been investigated, which is the main objective of this research. Therefore, the mineralogy of graphite and the estimation of graphitization temperature in the Band-e-Cherk district were investigated in this research.

### Materials and Methods

About 300 samples were taken from different units of the Band-e-Cherk district. Among which 80 thin-polished and polished sections of metamorphic units were prepared and examined using a ZEISS Axioplan 2 microscope at Kharazmi University and Iranian Mineral Processing Research Centre (IMPRC). Furthermore, 57 powder samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD) method using Philips instrument (X'pert

model) with primary beam CoK $\alpha$ 1 (1.789Å<sup>o</sup>), single chronometer on secondary optics, power 40 kV and current 35 milliamperes at the Sharif University of Technology and also at IMPRC. SEM studies were carried out by the FEI ZEISS 650 FEG-ESEM instrument at Kharazmi University, Tehran. SEM-EDS analyses and secondary electron (SEM-SE) images were obtained using beam currents of 5 to 15 nA and electron acceleration potentials of 5 to 20 kV for mineral identification and textural studies. Two polished thin sections were selected for Raman spectroscopy analysis. They were examined using a Raman microscope manufactured by Teksan Company, model Tekram P50CR10, with a wavelength of 532 nm and a laser power of 0.5 to 70 mW at Shahid Beheshti University.

### Results and Discussion

X-ray diffraction (XRD) analysis shows a variety of minerals including quartz, kaolinite, illite, muscovite (sericite), calcite, orthoclase, and dickite. The carbon content of the graphites ranges from 45.83 to 88.82 wt%. The use of Raman spectroscopy is a suitable solution to determine the degree and temperature of graphitization, which is calculated by the ratios of R1 and R2, position and intensity of peaks D1, D2 and G based on the relationship (1) and (2).

$$R2 = (D1/G + D1 + D2)A \quad (1)$$

$$R1 = (D1/G)H \quad (2)$$

The indices A and H indicate the area of the peak and the maximum intensity of the peak, respectively (Beysac et al., 2003). The most commonly used parameters obtained from Raman spectra were obtained from two thin-polished sections of graphite-bearing schist, which is summarized in Table 1. Based on these quantitative parameters, it is possible to evaluate the metamorphic condition of

graphite-bearing schist according to the formula  $TGr (^{\circ}C) = -445R2 + 641$ .

Table 1. Raman spectrum parameters and calculated temperature peak, according to the formula of [Beyssac et al. \(2002\)](#).  $TGr (^{\circ}C) = -445R2 + 641$

	Samples	BC-03-17	BC-Tr7-27
	Parameter		
Peak Position	D1	1367	1357
	G	1588	1583
FWHM	D1	40	40
	G	18	17
R1		0.86	0.85
R2		0.46	0.46
TGr ( $^{\circ}C$ )		436	436

The application of TGr shows a temperature of  $436^{\circ}C$ , which is insufficient for pure and flaky graphite mineralization. The low values of R1 and R2 ratios, 0.85-0.86 and 0.46, respectively, indicate the low degree of graphitization. Flaky crystalline graphite occurs at temperatures above  $450^{\circ}C$ , i.e. in the range of  $470$ - $560^{\circ}C$ , up to transformation conditions and 0.1 to 0.4 and 0.2 to 0.38, for R1 and R2, respectively ([Al-Ani et al., 2020](#)). Therefore, the graphite formed in the Band-e-Cherk is characterized by amorphous graphite formed at a temperature below  $450^{\circ}C$ . The temperature obtained is consistent with the temperature conditions of the greenschist metamorphic facies.

### Conclusions

The Paleozoic east-west trending Kuh-e-Dom metamorphic complex is host for graphite mineralization within graphite-muscovite schist. Comparison of the temperature range for the formation of high-grade flake graphite with the temperature obtained for graphite-bearing samples from the Band-e-Cherk district indicates that graphitization in the Band-e-Cherk district occurs as amorphous graphite at a temperature

below  $450^{\circ}C$  ( $436^{\circ}C$ ) associated with the greenschist metamorphic facies.

### References






- Al-Ani, T., Ahtola, T., Kuusela, J., 2018. Prospecting and exploration of flake graphite occurrences in Central and Southern Finland. Geological Survey of Finland, Open File Work Report.
- Al-Ani, T., Leinonen, S., Ahtola, T., Salvador, D., 2020. High-grade flake graphite deposits in metamorphic Schist Belt, Central Finland—Mineralogy and beneficiation of graphite for lithium-ion battery applications. *Minerals* 10(8), 680.
- Beyssac, O., Goffé, B., Petitet, J. P., Froigneux, E., Moreau, M., Rouzaud, J. N., 2003. On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 59(10), 2267-2276.
- Crespo, E., Luque, F. J., Rodas, M., Wada, H., Gervilla, F., 2006a. Graphite-sulfide deposits in Ronda and Beni Bousera peridotites (Spain and Morocco) and the origin of carbon in mantle-derived rocks. *Gondwana Research* 9(3), 279-290.
- Crespo, E., Luque, F. J., Barrenechea, J. F., Rodas, M., 2006b. Influence of grinding on graphite crystallinity from experimental and natural data: implications for graphite thermometry and sample preparation. *Mineralogical Magazine* 70(6), 697-707.
- Ghorbani, M., 2007. *Economic Geology of Mineral Deposits and Natural Resources of Iran*, 1st edition, Arian Zamin Publishers 492p.
- Lazzeri, M., Barreiro, A., 2014. Carbon-based nanoscience. *Elements* 10(6), 447-452.
- Luque, F. J., Ortega, L., Barrenechea, J. F., Huizenga, J. M., Millward, D., 2012. Key factors controlling massive graphite deposition in volcanic settings: an example of a self-organized critical system. *Journal of the Geological Society* 169(3), 269-277.
- Rosing-Schow, N., Bagas, L., Kolb, J., Balić-Žunić, T., Korte, C., Fiorentini, M. L., 2017.

Hydrothermal flake graphite mineralization in Paleoproterozoic rocks of south-east Greenland. *Mineralium Deposita* 52, 769-789.

Santosh, M., Wada, H., Satish-Kumar, M., Binu-Lal, S. S., 2003. Carbon isotope “stratigraphy” in a single graphite crystal: Implications for the crystal growth mechanism of fluid-deposited

graphite. *American Mineralogist* 88(11-12), 1689-1696.

#### CRediT authorship contribution statement

 <b>Majid Ghasemi Siani</b>	Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
 <b>Hamed Ebrahimi Fard</b>	Writing - Original Draft
 <b>Amir Hosein Heidari Bafraie</b>	Funding acquisition, Writing - Review & Editing
 <b>Behrouz Karimi Shahraki</b>	Writing - Review & Editing
 <b>Shahryar Mahmoudi</b>	Writing - Review & Editing



## کانی‌شناسی شیست‌های گرافیت‌دار و تخمین دمای گرافیتی‌شدن در محدوده بندچرک، پهنه فلززایی انارک

مجید قاسمی سیانی<sup>۱</sup>، حامد ابراهیمی فرد<sup>۲\*</sup>، امیرحسین حیدری بفرئوی<sup>۳</sup>، بهروز کریمی شهرکی<sup>۴</sup>، شهریار محمودی<sup>۵</sup>

۱. دانشیار، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳. کارشناس معاونت امور معادن، شرکت فولاد مبارکه اصفهان، ایران

۴. استادیار، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، کرج، ایران

۵. دانشیار، گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

منطقه اکتشافی بندچرک در پهنه ساختاری ایران مرکزی، شمال شرقی شهرستان اردستان و در پهنه فلززایی انارک واقع شده است. واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در این محدوده، شامل مجموعه دگرگونی شیستی و سنگ‌آهک تبلور مجددیافته کوه‌دم، رسوبات آهکی کرتاسه، کنگلومرای پالئوسن و سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، آندزیت-بازالت، تراکیت و توف به سن ائوسن و توده نفوذی دیوریتی است. مجموعه دگرگونی کوه‌دم به سن پالئوزوئیک زیرین بوده و شامل مسکوویت‌شیست تا گرافیت-مسکوویت‌شیست، اپیدوت-هورنبلند-کالک‌شیست، مسکوویت-کلریت‌شیست، کالک‌شیست، آهک بلورین و مرمر هستند. کانه‌زایی گرافیت به صورت آمورف در امتداد سطوح شیستوزیته واحدهای گرافیت-مسکوویت‌شیست متمرکز شده و کانی‌های کوارتز، کائولینیت، ایلپیت، مسکوویت (سریسیت)، ارتوکلاز و دیکیت کانی‌های دیگر هستند. مقایسه بین محدوده دمایی تشکیل گرافیت‌های پرعیار صفحه‌ای (پولکی) که در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به خصوص در دماهای بین ۴۷۰ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد (در حد رخساره آمفیبولیت) ایجاد می‌شوند، با دمای به دست آمده از طریق تفسیر نتایج طیف‌سنجی رامان بر روی نمونه‌های گرافیت‌دار پرعیار محدوده بندچرک، نشان‌دهنده این موضوع است که گرافیتی‌شدن در محدوده بندچرک از نوع نامنظم و آمورف بوده و در دمای پایین‌تر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (۴۳۶ درجه سانتی‌گراد) و در شرایط دمایی مربوط به رخساره دگرگونی شیست سبز تشکیل شده است.

### اطلاعات مقاله

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

#### واژه‌های کلیدی

گرافیت آمورف، گرافیتی-شدن، شیست‌های گرافیت‌دار، بندچرک، مجموعه دگرگونی کوه‌دم، پهنه فلززایی انارک.



### مقدمه

سازوکارهای اصلی تشکیل گرافیت شامل دو فرآیند نهشت از سیال کربن‌دار و گرافیتی‌شدن است

گرافیت با فرمول شیمیایی C، در شرایط دگرگونی و گرمایی وابسته به آن تشکیل می‌شود.

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106632>

\*نویسنده مسئول: حامد ابراهیمی فرد [hamedbrahimi772@gmail.com](mailto:hamedbrahimi772@gmail.com)

استناد به این مقاله: قاسمی سیانی، م.، ابراهیمی فرد، ح.، حیدری بفرئوی، ا. ح.، کریمی شهرکی، ب.، محمودی، ش. (۱۴۰۲) کانی‌شناسی شیست‌های گرافیت‌دار و تخمین دمای گرافیتی‌شدن در محدوده بندچرک، پهنه فلززایی انارک، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۱۳۳ تا ۱۶۲.

<https://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106632>



سنگ میزبان است و فشار نقش کمتری در فرآیند گرافیتی‌شدن دارد (Santosh et al., 2003). منطقه بندچرک با وسعت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع در مرکز ایران و محدوده کوه‌دم قرار داشته و از دیدگاه تقسیمات پهنه‌های رسوبی - ساختاری، در منطقه انارک و بخش میانی ایران مرکزی (بلوک یزد) قرار گرفته است. انارک با ویژگی‌های فلززایی، ماگماتیسیم، دگرگونی و گسترش سنگ‌های پروتروژوئیک بالایی در آن، یکی از جالب‌ترین مناطق زمین‌شناسی ایران به شمار می‌رود. کانه‌زایی در منطقه انارک، چه از نظر نوع ماده معدنی و چه از نظر خاستگاه، شکل و کانی‌سازی بسیار متنوع است، به گونه‌ای که تاکنون کانی‌سازی آهن، مس، مولیبدن، آنتیموان، طلا، سرب، روی، آرسنیک، نیکل، کبالت، منگنز، کرومیت و استرانسیوم مشاهده شده‌اند، که دارای خاستگاه‌های متفاوتی از جمله گرمایی، ماگمایی و دگرگونی هستند (Ghorbani, 2007). با این حال، علیرغم گستردگی واحدهای دگرگونی مجموعه کوه‌دم در منطقه، احتمال تشکیل ذخایر گرافیتی در ارتباط با واحدهای دگرگونی، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این موضوع، هدف اصلی این پژوهش است. گرافیتی‌شدن در دماهای مختلف رخ داده و گرافیت با کیفیت در دماهای بالای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. بنابراین، در این پژوهش کانی‌شناسی گرافیت و تخمین دمای گرافیتی‌شدن در واحدهای

(Luque et al., 2014). خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد گرافیت، آن را به جزء اصلی استراتژیک بیشتر محصولات صنعتی و فناوری‌های در حال توسعه، مانند نیمه‌هادی‌ها، سلول‌های سوختی<sup>۱</sup>، استفاده در روان‌کننده‌ها، وسایل نقلیه الکترونیکی، فیبر نوری، فناوری‌های نانوتکنولوژی، آندهای با ظرفیت شارژ بالا برای باتری‌های لیتیومی، بال‌های هواپیما، انرژی هسته‌ای، باد و خورشیدی، پوشش‌های نسوز با کارایی بالا برای تولید فولاد، متالورژی، انرژی هسته‌ای، خودروسازی، و منبعی از گرافن تبدیل کرده است (e.g., Luque et al., 2012; Lazzeri and Barreiro, 2014; Rosing-Schow et al., 2017; Al-Ani et al., 2018, 2020). بنابراین با توجه به نادر بودن گرافیت، خواص فیزیکی و شیمیایی قابل توجه آن و همچنین اهمیت روزافزون آن در کاربردهای فناوری پیشرفته، هم توسط ایالات متحده و هم اتحادیه اروپا، حیاتی اعلام شده است (European Commission, 2020; International Energy Agency, 2021). فرایند تشکیل گرافیت را گرافیتی‌شدن می‌نامند که بر اثر دگرگونی در جای ماده آلی حاصل می‌شود (Crespo et al., 2006a, b). با افزایش درجه دگرگونی مواد کربن‌دار نخست به گرافیت بی‌شکل تبدیل شده و سپس در شرایط دما و فشار در رخساره‌های بالاتر دگرگونی به گرافیت با ساختار بلورین تبدیل می‌شود (Landis, 1971). فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده در فرایند گرافیتی‌شدن دمای دگرگونی و لیتولوژی

#### 1. fuel cells

شیستی محدوده بندچرک مورد بررسی قرار گرفته تا ضمن تأیید وجود گرافیت در شیست‌ها، بتوان نوع گرافیت را بر اساس دمای گرافیتی‌شدن و مطالعات میکروسکوپی تعیین کرد.

### زمین‌شناسی و فلززایی پهنه انارک و منطقه کوه دم

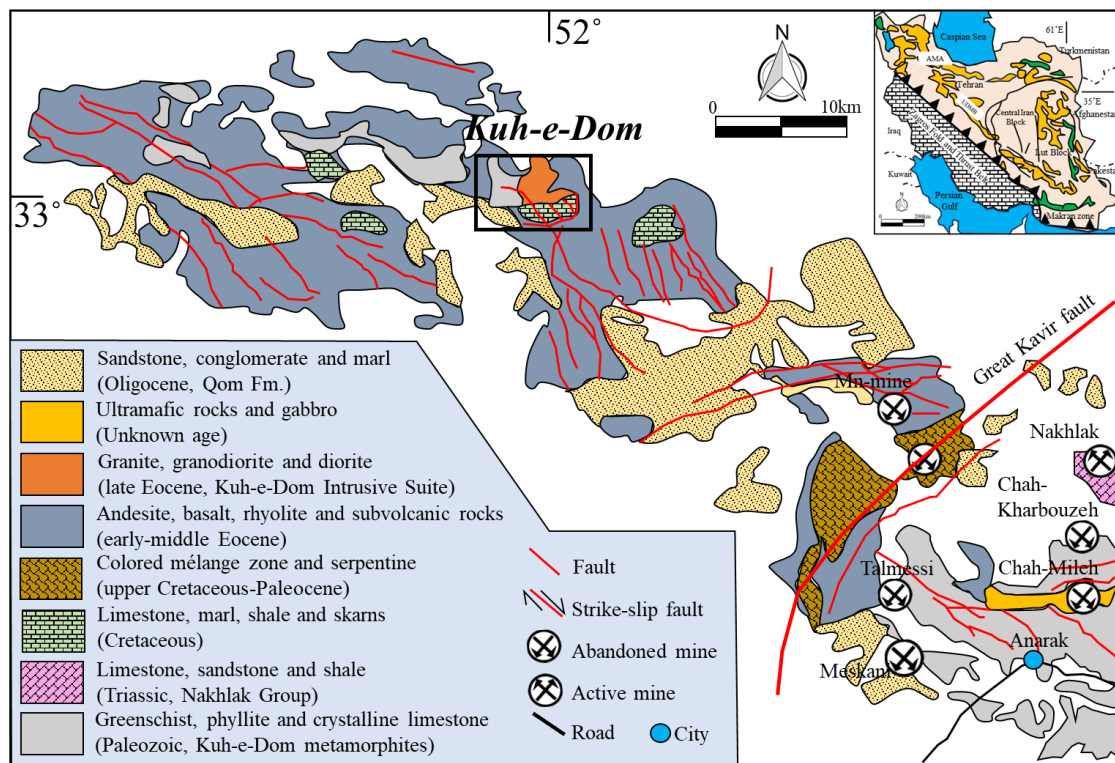
زمین‌شناسی پهنه فلززایی انارک متأثر از رخدادهای زمین‌شناسی پهنه ایران مرکزی است. خرده‌قاره ایران مرکزی با زمین‌درزهای افیولیتی سیستان، نائین- بافت، گسل درونه و افیولیت‌های کاشمر- سبزوار احاطه شده است. در ناحیه انارک که گاهی به نام ماسیو انارک- خور از آن یاد می‌شود، مجموعه‌ای از رسوبات پلیتی به همراه سنگ‌های کربناتی و آتشفشانی وجود دارند که به صورت ناحیه‌ای در شرایط رخساره‌های شیست‌سبز و شیست‌آبی دگرگون شده‌اند و با افیولیت‌ها و سنگ‌آهک‌های پلاژیک همراه هستند. منطقه مورد پی‌جوئی کوه دم در بخش مرکزی کمربند ماگمایی ارومیه-دختر قرار گرفته و از نظر زمین‌شناسی، تکتونیک و ژئوشیمیایی خصوصیات مشترکی با آن دارد.

بطور کلی واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده منطقه انارک جزء پی‌سنگ ایران مرکزی و متعلق به نئوپروتروزوئیک تا کامبرین است که نخستین بار توسط داودزاده (Davoudzadeh, 1969) تحت عنوان دگرگونی‌های منطقه انارک معرفی شدند. بر اساس این مطالعات، دگرگونی‌های منطقه انارک متشکل از ۵ کمپلکس به نام‌های کمپلکس چاه‌گربه، پتیار،

کبودان، دوشاخ و پشت‌بادام از یکدیگر تفکیک شدند. سنگ‌های کرتاسه در ناحیه انارک- خور مهم‌ترین واحد مزوزوئیک در منطقه هستند، که در ناحیه انارک بطور کلی شامل دو بخش کرتاسه زیرین و بالایی است. کرتاسه زیرین متشکل از ماسه‌سنگ، مارن، کنگلومرا و آهک اربیتولین‌دار بوده و کرتاسه بالایی بطور عمده از آهک، ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده است. رخنمون‌های سنوزوئیک گسترش نسبتاً وسیعی در منطقه مورد مطالعه دارند که بخش عمده‌ای از آن از سنگ‌های تخریبی تشکیل شده است. بیشترین حجم فعالیت‌های ماگمایی در مجموعه فلززایی انارک متعلق به دوره سنوزوئیک و به‌ویژه بازه زمانی ائوسن -لیگوسن است. ترکیب این سنگ‌ها به طور عمده شامل سنگ‌های آتشفشانی - نیمه نفوذی آندزیت، بازالت، تراکی بازالت، داسیت و ریولیت به همراه توده‌های نفوذی گرانیت، مونزونیت، سینوگرانیت و دیوریت است. بیشترین حجم این رخدادهای ماگمایی در شمال‌غربی انارک و در منطقه کوه دم دیده می‌شود که موجب رخداد کانی‌سازی‌های متعددی از مس، بیسموت، طلا، سرب و روی و نقره شده است. مهم‌ترین معادن فعال و غیرفعال ناحیه انارک در شکل ۱ نشان داده شده است. از جمله این مناطق می‌توان به معادن فعال و متروکه نخلک (سرب±روی)، چاه‌خریزه (سرب)، چاه‌میله (سرب و روی)، تالمسی و مسکنی (مس)، نیکل، کبالت، اورانیوم و نقره و معادن منگنز (محدوده مزرعه سرخشاد) اشاره کرد.

گرافیت- کالک‌شیست)، سنگ‌آهک بلورین، گرانیت پورفیری، گرانودیوریت، دیوریت و گرانیت هستند (شکل ۱). رخدادهای ماگمایی دوران سنوزوئیک (پالئوژن) در مجموعه فلززایی انارک مشابه با دیگر نواحی ایران مرکزی، البرز و مجموعه ماگمایی شرق ایران، همراه با فعالیت‌های وسیع آتشفشانی- نفوذی بوده است.

مجموعه دگرگونی کوه‌دم نیز به سن پالئوزوئیک زیرین بوده که با روند شرقی- غربی درون محدوده و در زیر سنگ‌های کرتاسه رخنمون دارند. زمین‌شناسی این محدوده، شامل واحدهای آتشفشانی، فیلیت، واحدهای شیستی (شامل مسکوویت شیست، اپیدوت- هورنبلند- کالک‌شیست، مسکوویت - کلریت‌شیست، بیوتیت-



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی مجموعه فلززایی انارک (AMC) که در بخش مرکزی کمربند ارومیه- دختر قرار گرفته است. منطقه معدنی کوه‌دم در بخش مرکزی ناحیه انارک قرار گرفته است. با تغییرات از نوگل‌سادات و الماسیان (Nogole Sadat and Almasian, 1993).

Fig. 1. Geological map of the Anarak Metallogenetic Complex (AMC), located in the central part of the Urmia-Dokhtar belt. The Koh-e-Dom district is located in the central part of the Anarak metallogenetic complex. Modified after Nogole Sadat and Almasian, (1993).

آهک بلورین به سن پالئوزوئیک بوده که با روند شرقی- غربی در محدوده بندچرک رخنمون دارند (شکل ۲). بعد از این واحدها، سنگ‌آهک‌های به سن

زمین‌شناسی محدوده بند چرک زمین‌شناسی محدوده بندچرک شامل واحدهای دگرگونی مجموعه کوه‌دم متشکل از شیست، مرمر و

این واحد رسوبی به طور پیش‌رونده و گاه دگرشیب سنگ‌های کهن‌تر دگرگونه را می‌پوشاند. واحد مذکور در بخش شرقی تا مرکزی محدوده مورد مطالعه، با یک روند غربی- شرقی و نیز به صورت ناپیوسته و گسله در کنار واحدهای سنگی آتشفشانی، جایگزین شده است (شکل ۴-ا).

#### واحد کنگلومرایی: نهشته‌های کنگلومرایی

عمده‌ترین سنگ‌های به سن پالئوسن (هم ارز کنگلومرای کرمان) در محدوده بندچرک است که حاصل چرخه‌های فرسایشی رخداد لارامید است. به طور عمده نهشته‌های کنگلومرایی و ماسه‌سنگی به صورت دگرشیب و گاه هم‌شیب، سنگ‌های کهن‌تر مانند شیست‌های مجموعه دگرگونی کوه‌دم به سن پالئوزوئیک را می‌پوشانند (شکل ۴-ب). در محدوده بندچرک، سنگ‌های پالئوسن، بر حسب محیط‌های رسوبگذاری و جغرافیایی رخساره‌های متفاوت دارند. این آواری‌ها در شماری از برونزدها قدیمی‌ترین ردیف‌های سنوزوئیک است و توسط رسوبات و دیگر سنگ‌های ائوسن پوشانده شده است.

#### توده دیوریتی: این واحد سنگی با گستردگی

کم و به صورت توده‌های کوچک در بخش شرقی و مرکزی محدوده بندچرک رخنمون دارند و با مرز گسلی بر روی گرافیت‌شیست‌های مربوط به دگرگونی کوه‌دم قرار گرفته‌اند (شکل ۴-ج). رنگ سطح تازه این سنگ سبز بوده و در بخش شرقی محدوده، کانه‌زایی رگه‌ای آهن و منگنز در داخل آنها قابل مشاهده می‌باشد.

کرتاسه زیرین، قدیمی‌ترین واحد هستند، که عمدتاً در بخش شمالی و مرکز محدوده بندچرک دیده می‌شوند و بر روی سنگ‌های دگرگونی مجموعه کوه‌دم قرار گرفته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی، آندزیت-بازالتی و سنگ‌های آذرآواری، مانند توفها به سن ائوسن نیز حجم گسترده‌ای داشته و بخش شمالی محدوده بندچرک را در بر گرفته‌اند. توده‌های نفوذی کوچک و دگرسان شده دیوریتی نیز با مرز گسلی بر روی سنگ‌های دگرگونی مجموعه کوه‌دم قرار گرفته‌اند.

#### واحدهای دگرگونی: بخش بزرگی از واحدهای

سنگی تشکیل‌دهنده در محدوده بندچرک، از سنگ‌های دگرگونی مجموعه کوه‌دم تشکیل شده است. مجموعه دگرگونی شامل مسکوویت شیست (شکل ۳-ب)، اپیدوت-هورنبلند-کالک‌شیست، مسکوویت-کلریت‌شیست، بیوتیت-گرافیت-کالک‌شیست (شکل ۳-ا و ج)، آهک بلورین و مرمر است. مرز این سازند عموماً با رسوبات کرتاسه و سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های کوچک نفوذی دیوریتی گسله بوده و در بخش شمال محدوده با واحد ولکانیک ائوسن هم مرز است.

#### واحدهای آهکی: بخش سنگ‌آهکی متبلور با

رنگ قهوه‌ای و مربوط به مجموعه دگرگونی کوه‌دم است که در بخش غربی و جنوبی محدوده بندچرک قرار گرفته است (شکل ۴-ا). این افق آهکی به صورت توده‌ای و به رنگ قهوه‌ای نمایان است (شکل ۴-ا). سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار کرتاسه پایینی اغلب با ردیف‌های آواری سُرخ رنگ آغاز می‌شوند.

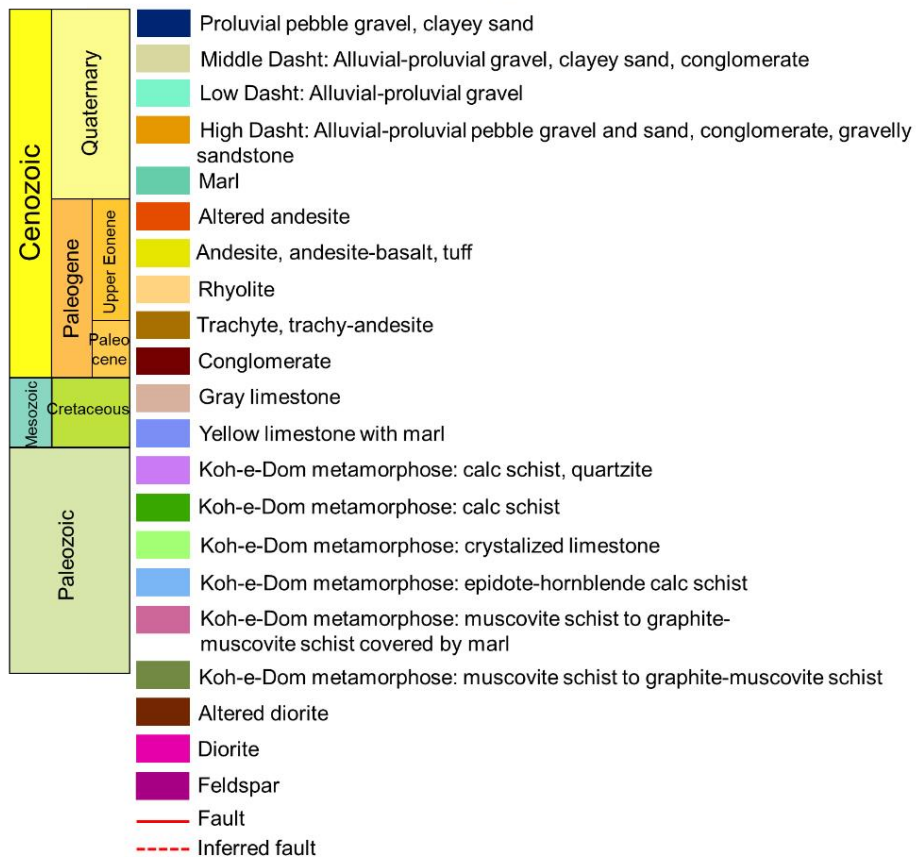
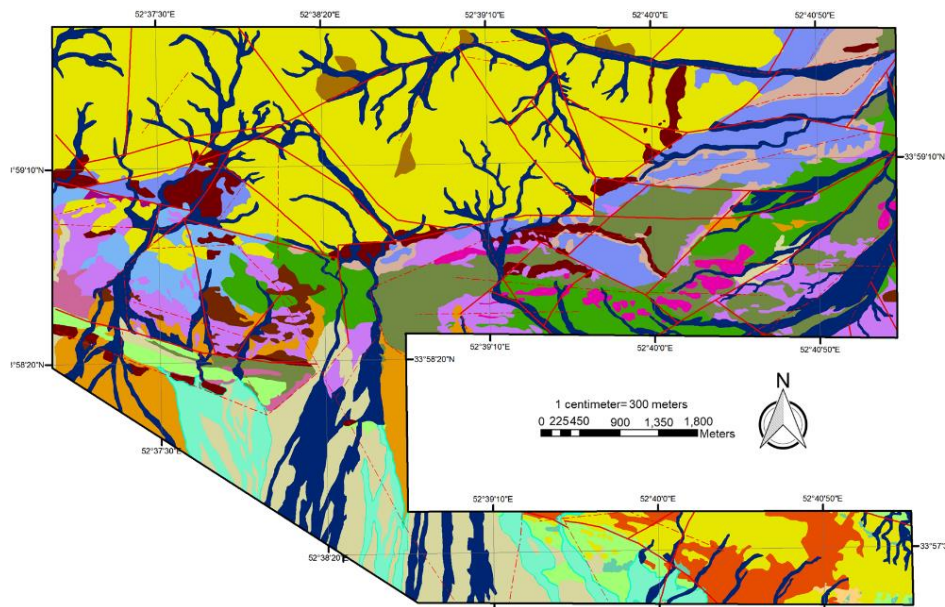
**واحدهای آتشفشانی:** واحدهای سنگی آتشفشانی و آذرآوری به سن ائوسن زیرین دارای بیشترین بیرون‌زدگی در شمال محدوده بندچرک بوده و شامل تناوبی از توف، آندزیت، آندزیت‌بازالت، ریولیت، تراکی آندزیت و تراکیت هستند. این واحدها با رنگ‌های سبز تیره، سیاه، سفید و کرمی و به صورت توالی در محدوده بندچرک و به خصوص در بخش شمالی آن قابل مشاهده است (شکل ۴-d).

**نهشته‌های کواترنری:** بخش قابل توجهی از محدوده بندچرک به وسیله رسوبات و نهشته‌های کواترنری پوشیده شده است که شامل پادگانه‌های آبرفتی و مخروطه افکنه‌های قدیمی و جوان و آبرفت‌های رودخانه‌ای است.

### مواد و روش‌ها

تقریباً تعداد ۳۰۰ نمونه معدنی از واحدهای مختلف محدوده بندچرک برداشت شد. تعداد ۹۰ مقطع میکروسکوپی (نازک- صیقلی و صیقلی) از واحدهای دگرگونی، آذرین و رسوبی در کارگاه تهیه مقاطع میکروسکوپی دانشگاه خوارزمی تهران تهیه شد. نمونه‌ها بعد از تهیه، در آزمایشگاه کانی‌شناسی نوری دانشگاه خوارزمی تهران و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) توسط میکروسکوپ زایس (ZEISS) مدل Axioplan 2 مورد مطالعه قرار گرفتند. تعداد ۵۷ نمونه پودر از پهنه‌های دگرسانی گرمایی با روش پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه فیلیپس (مدل X'pert) با پرتو اولیه  $CoK\alpha_1(1.789\text{\AA})$ ، تک کرنومتر روی

اپتیک ثانویه، توان ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۵ میلی‌آمپر در مرکز خدمات آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی شریف و نیز در بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) مورد مطالعه قرار گرفت. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی کمی XRD (روش ریتولد) تعیین شد. داده‌ها از ۴/۰ تا ۸۰/۰ درجه ۲θ، با اندازه گام ۰/۰۲ درجه جمع‌آوری شد. همچنین، جهت بررسی‌های بیشتر نمونه و احتمال وجود عناصر گرانبها و سایر عناصر کمیاب و خاکی کمیاب در محدوده مورد مطالعه، تعداد ۲۰ نمونه مقطع صیقلی و نازک‌صیقلی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه خوارزمی تهران، مورد تجزیه SEM با طیف عبوری EDAX قرار گرفتند. مطالعات SEM توسط دستگاه مدل FEI ZEISS 650 FEG-ESEM در واحد مذکور انجام شد. آنالیزهای SEM-EDS و تصاویر SEM-SE با استفاده از جریان‌های پرتو ۵ تا ۱۵ نانوآمپر و پتانسیل شتاب الکترون ۵ تا ۲۰ کیلوولت برای شناسایی کانی‌ها و مطالعات بافتی به دست آمد. تعداد ۲ نمونه مقطع نازک‌صیقلی از بخش‌های حاوی کانی‌سازی پُرعیار گرافیت، به منظور انجام تجزیه طیف‌سنجی رامان انتخاب شد. این نمونه‌ها توسط میکروسکوپ رامان، ساخت شرکت Teksan و با مدل Tekram P50CR10 و با طول موج ۵۳۲ نانومتر و توان لیزر ۰/۵ تا ۷۰ میلی‌وات در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی مورد مطالعه قرار گرفتند.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده بند چرک.

Fig. 2. Simplified geological map of the Bend-e-Cherk district.



شکل ۳- (a) واحد گرافیت-مسکوویت شیست با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی در محدوده بندچرک. (b) حضور گسترده سنگ‌های دگرگونی مسکوویت شیست در محدوده بندچرک. (c) ترانشه اکتشافی حفر شده بر روی واحد شیست گرافیت‌دار محدوده بندچرک.  
 Fig. 3. a) Graphite-muscovite schist with NW-SE trending in the Band-e-Cherk district. b) Widespread occurrence of muscovite schist rocks in the Band-e-Cherk district. c) Exploration trench on the graphite-bearing schist of the Band-e-Cherk district.

### مطالعات کانی‌شناسی

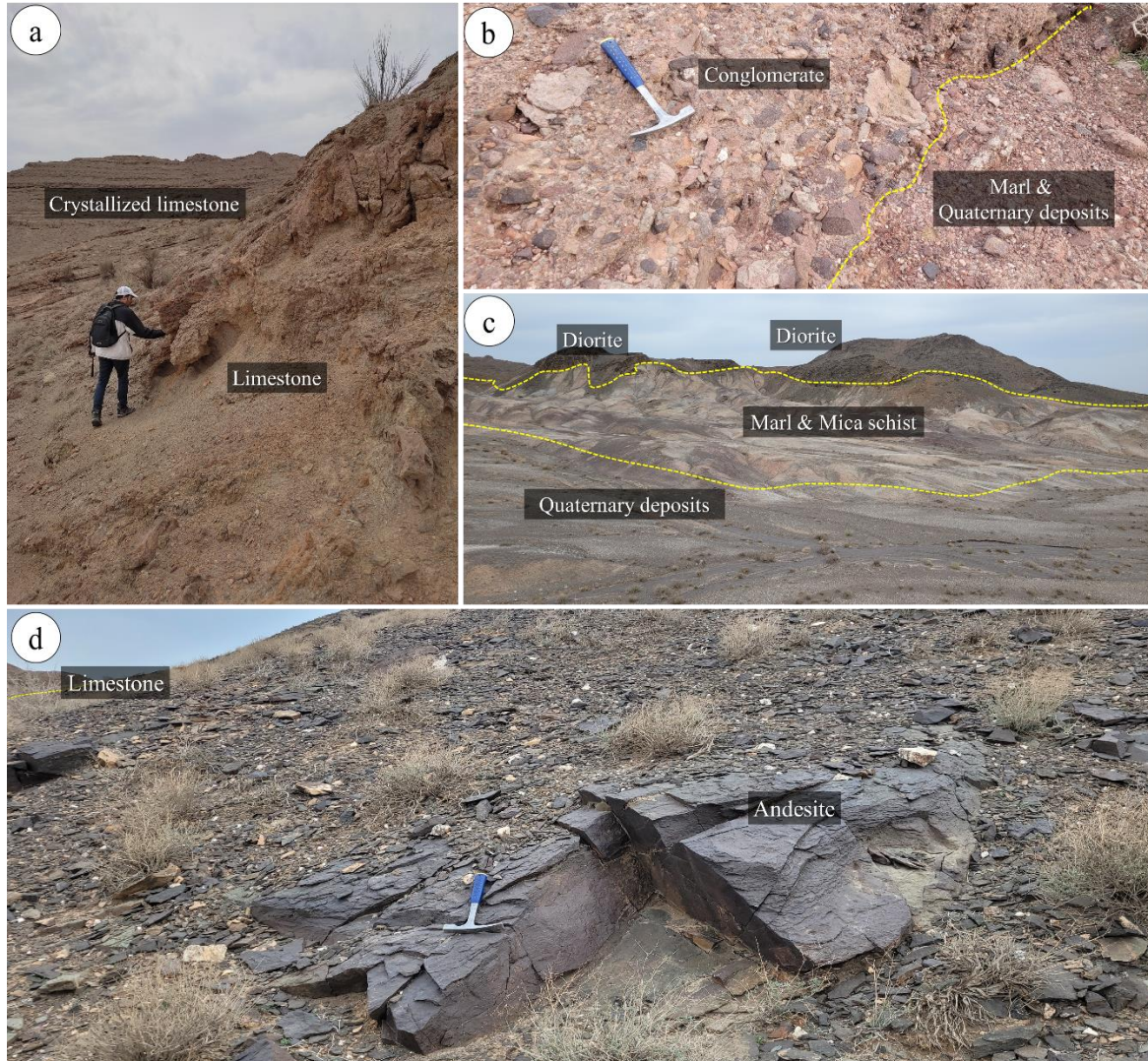
#### واحد مسکوویت شیست تا گرافیت -

مسکوویت شیست: این لیتولوژی میزبان اصلی گرافیت‌زایی در محدوده مورد مطالعه است. کانی‌های اصلی این واحد به ترتیب فراوانی، شامل مسکوویت، کوارتز، گرافیت و کانی کدر (هماتیت) است. بافت‌های رایج در این واحدها لپیدوبلاستیک تا

لپیدوپورفیروبللاستیک هستند. کانی‌سازی گرافیت آمورف (بی‌شکل) در امتداد سطوح شیستوزیته صورت گرفته است (شکل ۵- a, b, c و d). در واحدهای مسکوویت شیست و گرافیت-مسکوویت شیست، تناوب بلورهای سفید کوارتز و مسکوویت و بلورهای تیره گرافیت، باعث ایجاد نواربندی در متن سنگ شده، که بیانگر وجود لایه‌بندی ترکیب اولیه

شیست‌توزیته (فابریک موجی) در بلورهای کوارتز و مسکوویت (حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی) مشخص می‌شود.

متشکل از مواد آلی و رس است. در این واحدها، رخداد دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست‌سبز، توسط ایجاد جهت‌یافتگی و خمیدگی سطوح

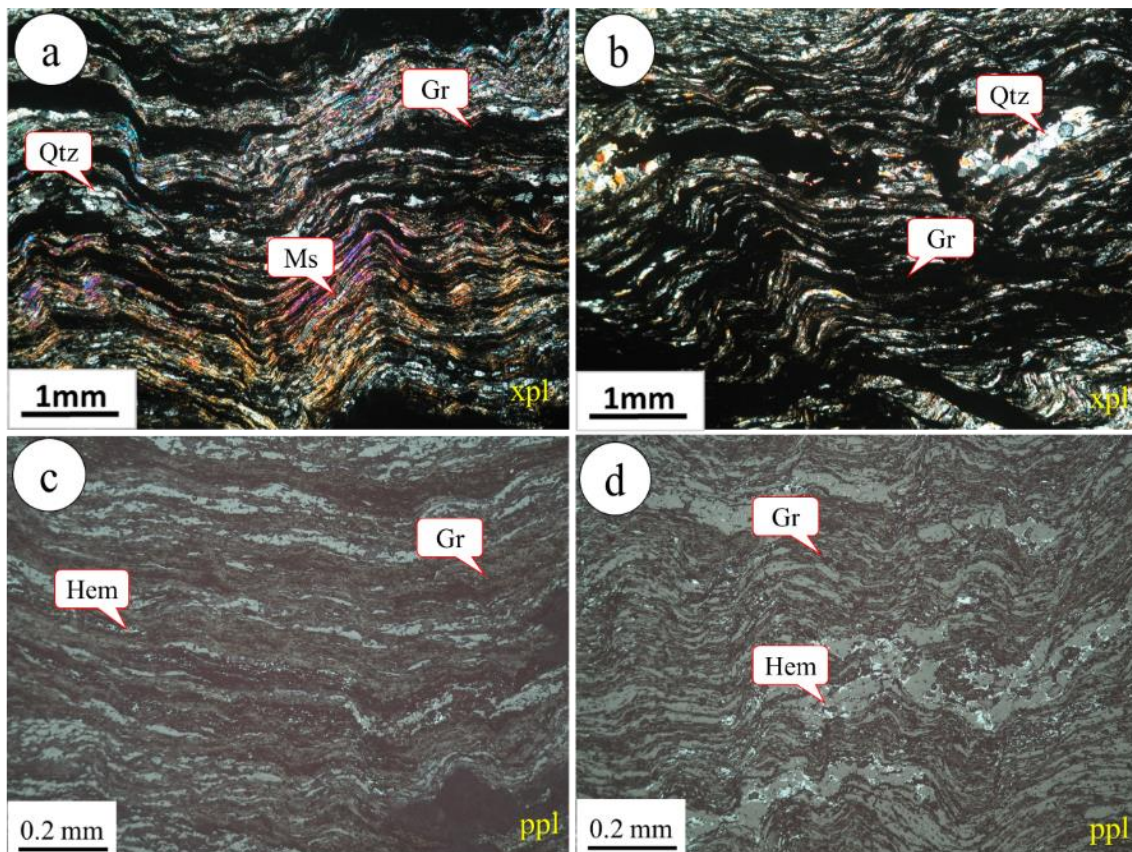


شکل ۴- (a) رخنمون سنگ‌آهک بلورین مربوط به مجموعه دگرگونی کوه‌دم در بخش غربی محدوده بندچرک. (b) رخنمون واحد کنگلومرای در تماس با واحد آتشفشانی آندزیتی در شمال محدوده بندچرک. (c) توده نفوذی دیوریتی بر روی گرافیت‌شیست‌ها در بخش غربی محدوده بندچرک. (d) نمایی از رخنمون توف و سنگ آتشفشانی آندزیتی در شمال محدوده مورد مطالعه.

Fig. 4. a) Outcrop of crystalline limestone associated with the Kuh-e-Dom metamorphic complex in the western part of the Band-e-Cherk district. b) Occurrence of the conglomerate in contact with the andesitic volcanic unit in the north of the Band-e-Cherk district. c) Diorite intrusion into the graphite-bearing schists in the western part of the Band-e-Cherk district. d) A view of the occurrence of tuff and andesitic rocks in the north of the study area.

سنگ شکل گرفته است (شکل ۵-c و d). بر اساس تجزیه‌های پراش‌سنجی پرتو ایکس (XRD) انجام‌شده بر روی واحدهای گرافیت-مسکوویت-شیست دگرسان‌شده، کانی‌های کوارتز، هالیت، کائولینیت، ایلیت، گوتیت، مسکوویت (سریسیت)، ژپس، آنهیدریت، ناتروژاروسیت، آلونیت، کلسیت، ارتوکلاز و دیکیت مشاهده شده‌اند (جدول ۱).

در این واحد سنگی همچنین، حواشی بلورهای کوارتز به حالت ساب‌گرین‌شدگی (Subgraining) و بولزینگ (Jogged edge) مشاهده می‌شوند (شکل ۵-a, b, c و d). وجود خاموشی موجی در بلورهای کوارتز، ناشی از رخداد تنش‌های تکتونیکی در حین فرآیند دگرگونی ناحیه‌ای است. بلورهای ریز و مشبک هماتیت در امتداد فضای شکستگی‌های



شکل ۵-a و b) نواربندی کوارتز-گرافیت-مسکوویت با شیستوزیته (نور عبوری). c و d) وجود گرافیت و هماتیت پراکنده در امتداد شیستوزیته (نور انعکاسی). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Gr: گرافیت، Qtz: کوارتز، Ms: مسکوویت، Hem: هماتیت).

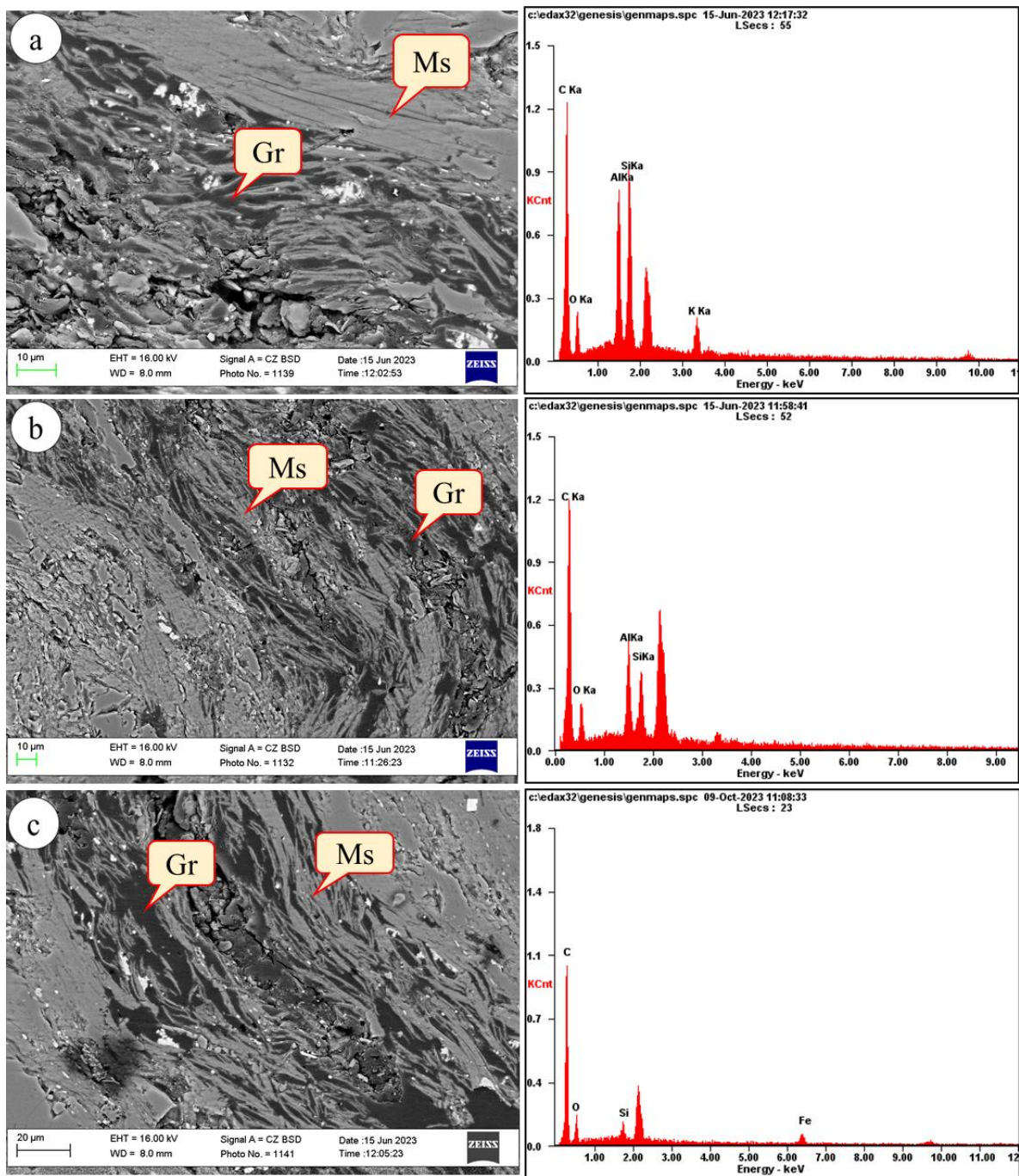
Fig. 5. a, b) Banding of quartz-graphite-muscovite with schistosity (transmitted light). c-d) The presence of disseminated graphite and hematite along the schistosity (reflected light). Abbreviations are from Whitney and Evans (2010) (Gr: graphite, Qtz: quartz, Ms: muscovite, Hem: hematite).

جدول ۱- نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شده بر روی واحد گرافیت-مسکوویت‌شیست در محدوده مورد مطالعه.  
Table 1. Results of X-ray diffraction (XRD) analysis performed on the graphite-muscovite schist in the study area.

Sample code	Lithology	Mineral assemblage
BC-TR13-29, BC-03-117, BC-03-118, BC-07-02M, BC-07-04M, BC-07-07, BC-07-07M, BC-07-22M, BC-07-23M, BC-10-04	Graphite-muscovite schist	Graphite, Muscovite, Jarosite, Pyrite, Orthoclase, Anhydrite, Quartz, Calcite, Hematite, Illite, Gypsum, Magnetite, Halite, Natrojarosite, Albite, Alunite, Andradite,
BC-TR7-26M, BC-10-05, BC-Tr7-23, BC-Tr7-24M, BC-Tr7-25, BC-Tr7-26, BC-Tr7-26M, BC-Tr7-28, BC-Tr13-29	Graphite-muscovite schist	Graphite, Muscovite, Dolomite, Orthoclase, Clinoclone, Quartz, Calcite, Magnetite, Hematite, Diopside, Gypsum, Kaolinite, Jarosite, Pyrite, Anhydrite
BC-2-3, BC-2-9, BC-3-11a, BC-3-11b, BC-3-17a, BC-3-17b, BC-3-117a, BC-3-117b, BC-7-4a, BC-7-4b, BC7-22a, BC-7-22b, BC-7-23a, BC-7-23b, BC-2-4, BC-Tr-01, BC-Tr-03, BC-TR-03-117H, BC-Tr3-10, BC-Tr3-22a, BC-Tr3-22b, BC-Tr-3a, BC-Tr-3b, BC-Tr7-27a, BC-Tr7-27b, BC-Tr-15A, BC-Tr-15B, Tr11, Tr16, Tr20, BC-3-17, BC-7-4, BC-7-23, BC-Tk-3, BC-3-11, BC-7-22, BC-Tr7-27	Graphite-muscovite schist	Graphite, Quartz, Muscovite, Gypsum, Goethite, Calcite, Dickite, Albite, Illite, Tremolite, Montmorillonite, Jarosite, Rutile, Natrojarosite, Goethite, Dolomite, Palygorskite

جدول ۲- مقادیر عنصر کربن که از مطالعات SEM در محدوده بندچرک به دست آمده است.  
Table 2. Carbon element values obtained from SEM studies in the Band-e-Cherk area.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
C (wt.%)	77.07	77.43	72.14	80.33	45.83	65.28	88.82	75.68	77.82
O (wt.%)	14.90	18.62	12.03	8.64	7.08	11.28	7.04	16.41	22.18
Al (wt.%)	3.37	2.15	02.56	3.45	13.72	4.40	----	2.15	----
Si (wt.%)	4.66	1.79	12.61	4.64	25.43	6.88	----	----	----
Fe (wt.%)	----	----	3.27	----	----	----	----	5.75	----
K (wt.%)	----	----	----	2.93	7.94	2.44	----	----	----
Cl (wt.%)	----	----	----	----	----	2.47	4.14	----	----
Total	100.00	99.99	102.61	97.06	100.00	87.84	100.00	99.99	100.00



شکل ۶- کانه‌زایی گرافیت در امتداد سطوح شیستوزیته واحد گرافیت-مسکوویت شیست محدوده بندچرک. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ms: مسکوویت، Gr: گرافیت).

Fig. 6. Graphite mineralization along the schistosity of the graphite-muscovite schist unit of the Band-e-Cherk district. Abbreviations are from Whitney and Evans (2010) (Ms: muscovite, Gr: graphite).

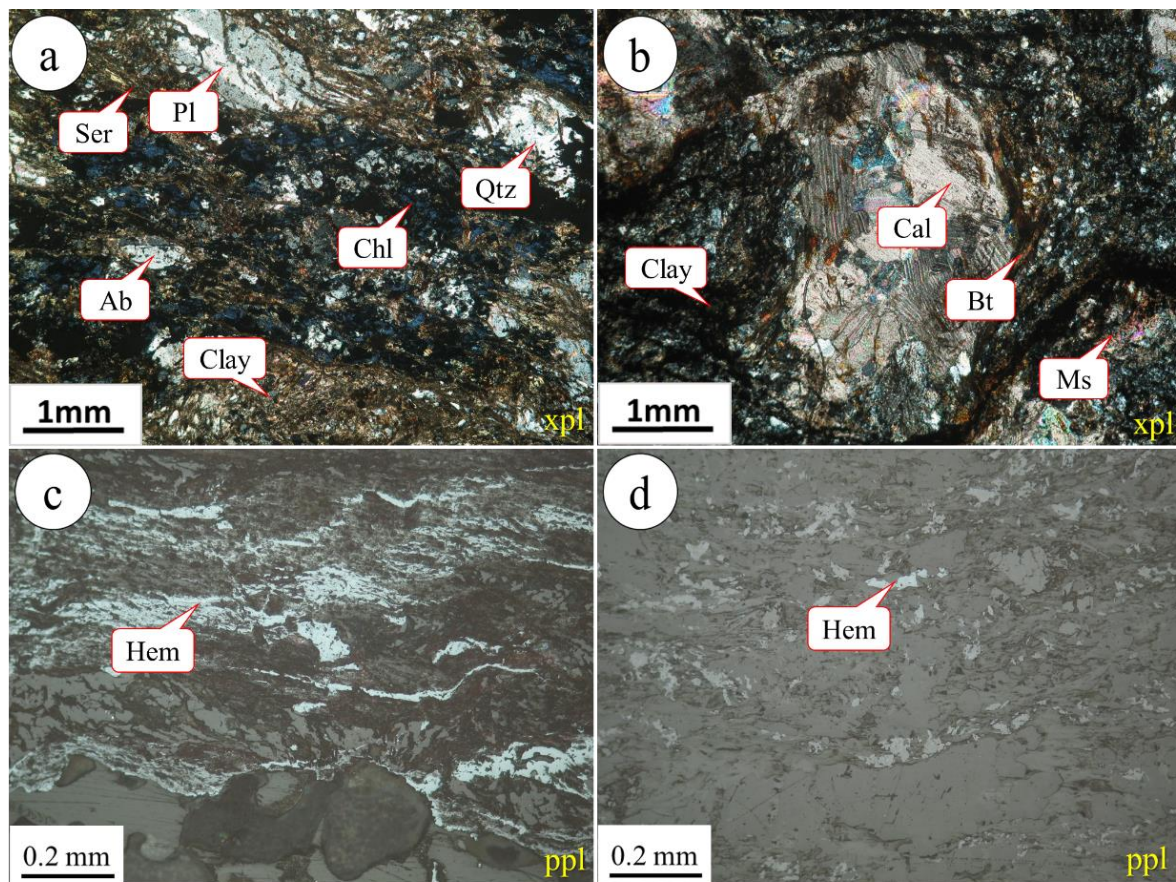
با استفاده از مطالعه مقاطع میکروسکوپی و نیز انجام تجزیه SEM، وجود بی‌هنجاری کربن به صورت گرافیت مشخص شده است (جدول ۲ و شکل ۶- a، b و c). مقادیر گرافیت (۴۵/۸۳ تا ۸۸/۸۲ درصد وزنی) توسط تجزیه SEM به دست آمد.

### واحدهای کلریت-سریسیت شیست و

**کالک‌شیست:** این واحدها، شامل یک سنگ شیستی پلیتی حاوی کانی‌هایی مانند، کلریت، سریسیت (مسکوویت سفید و ریزدانه)، کلسیت، آلکالی‌فلدسپار و کوارتز است. بافت این واحدها عمدتاً لپیدوپورفیروبلاستیک تا پورفیرولپیدوبلاستیک است. بیشتر پورفیروبلاست‌های سنگ را کانی‌های پلاژیوکلاز و کلسیت تشکیل می‌دهند. تنش‌های دینامیکی باعث چرخش پورفیروبلاست‌های کلسیتی شده است. جهت‌یافتگی بلورهای کلریت، کلسیت و سریسیت (حدود ۵۰ تا ۵۵ درصد حجمی) نشان از رخداد دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست‌سبز و تأثیر آن بر این واحدهای سنگی دارد. رگچه‌های ثانویه حاصل از عملکرد سیالات دگرگونی نیز مانند کلسیت به صورت پراکنده در آن‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۷- a و b). بلورهای آلکالی‌فلدسپار در اثر فرآیندهای گرمایی از مرکز و در امتداد سطوح شیستوزیته سنگ در حال تبدیل شدن به کانی رسی هستند. این امر به دلیل وجود نقاط ضعف بلوری در مرکز و نیز در حواشی کانی بوده، که فضای مناسبی را برای حرکت محلول‌های گرمایی فراهم آورده است.

وجود بلورهای آلبیت ثانویه نشان‌دهنده رخداد متاسوماتیسم آلکان در نمونه است. بلورهای کوارتز خاموشی موجی نیز نشان می‌دهند که ناشی از رخداد تنش‌های تکتونیکی در حین فرآیند دگرگونی ناحیه‌ای است. هماتیت به صورت پراکنده در متن سنگ و نیز به صورت رگچه‌ای در امتداد فضای شیستوزیته سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۷- c و d).

**پهنه دگرسانی سیلیسی:** این واحد یک سنگ دگرگونی دگرسان شده است که حاوی سیلیس و عناصر آلکالی بالا است. بلورها جهت‌یافتگی نشان می‌دهند که گویای این است که سنگ تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای قرار گرفته است (شکل ۸- a). احتمالاً این سنگ متحمل دگرگونی ناحیه‌ای یا خردشدگی کاتاکلاستیکی در یک زون گسلی شده است. رگچه‌های فراوان و درهم‌تنیده‌ای از هیدروکسیدهای آهن، بلورهای کوارتز تشکیل شده در مراحل پیشین را قطع نموده‌اند (شکل ۸- b). هماتیت در امتداد فضای شکستگی‌ها و نیز به صورت پراکنده در متن سنگ مشاهده می‌شود (شکل ۸- c و d). در مقاطع میکروسکوپی و با استفاده از تجزیه SEM کلنه‌زایی تیتانیوم به صورت تیغه‌های ریز تا متوسط بلور روتیل پراکنده در متن واحدهای دگرسانی شناسایی شده است (شکل ۹). مقادیر تیتانیوم (۶۹/۱۷ تا ۷۲/۲۹ درصد وزنی) در مقیاس ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون) توسط SEM به دست آمد (شکل ۹ و جدول ۳).



شکل ۷- a) جهت‌یافتگی و خمیدگی سطوح شیستوزیته در بلورهای اپیدوت، کلریت و مسکوویت در نتیجه عملکرد تنش‌های دینامیکی (نور عبوری). b) چرخش پورفیروبلست‌های کلسیتی در اثر تنش‌های دینامیکی (نور عبوری). c-d) وجود هماتیت به صورت رگچه‌ای و پراکنده در امتداد سطوح شیستوزیته (نور انعکاسی). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است: Pl: پلاژیوکلاز، Ser: سریسیت، Chl: کلریت، Ab: آلبیت، Clay: کانی رسی، Bt: بیوتیت، Ms: مسکوویت، Hem: هماتیت.

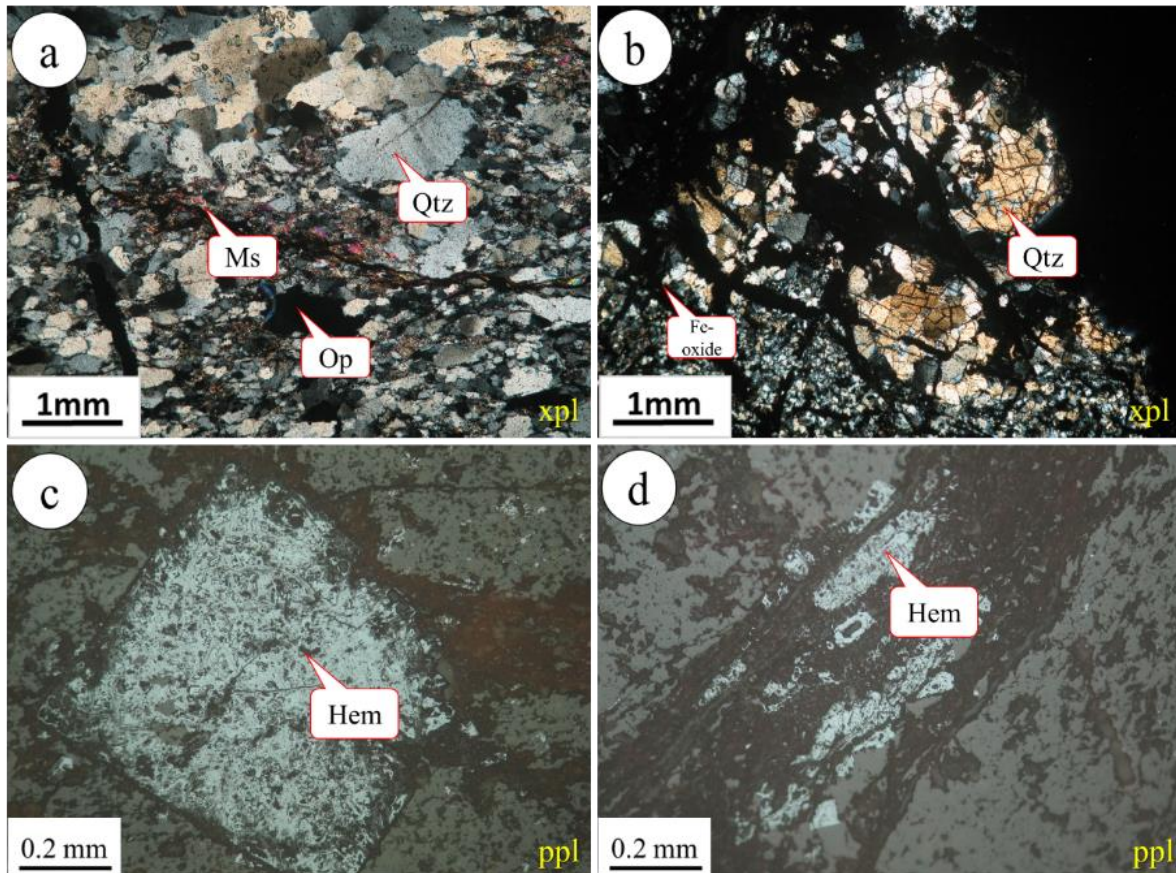
Fig. 7. a) Orientation and bending of schistosity in epidote, chlorite, and muscovite crystals as a result of dynamic stresses (transmitted light). b) Rotation of calcitic protomylonites as a result of dynamic stresses (transmitted light). c-d) The presence of veinlets and disseminated hematite along the schistosity (reflected light). Abbreviations are from Whitney and Evans (2010). Pl: plagioclase, Ser: sericite, Chl: chlorite, Ab: albite, Clay: clay mineral, Bt: biotite, Ms: muscovite, Hem: hematite.

(جدول ۴). در نهایت کانی‌های پراکنده حاوی عناصر خاکی کمیاب درون واحدهای دگرسانی، توسط مطالعات SEM شناسایی شد (شکل ۱۱). مقادیر عناصر La، Ce، Gd، Pr، Nd، Sm (۳۹/۵۳ تا ۷۸/۴۹ درصد وزنی)، توسط SEM به دست آمد (شکل ۱۱ و جدول ۵). محتوای عنصر فسفر (P) نیز

مقادیر عناصر مس، قلع و تنگستن در مطالعات SEM به صورت پراکنده در متن واحدهای دگرسانی شناسایی شده است (شکل ۱۰). مقادیر مس (۳۹/۵۳ تا ۷۸/۴۹ درصد وزنی)، قلع (۷۳/۷۳ تا ۷۷/۷۱ درصد وزنی) و تنگستن (۷۱/۱۸ درصد وزنی) توسط SEM به دست آمد (شکل ۱۰) و

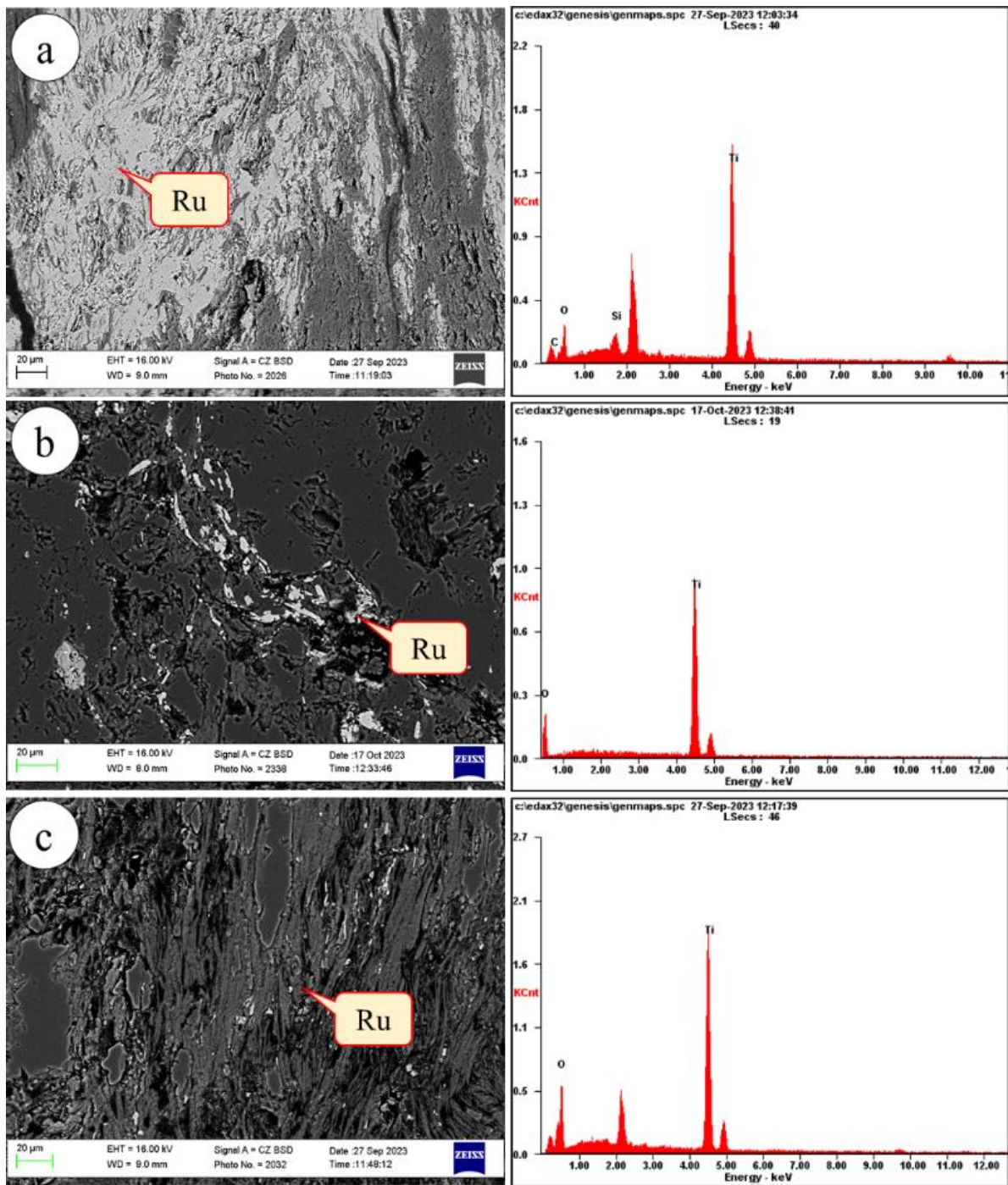
در این بررسی‌ها در حدود ۱۴/۵۱ تا ۱۵/۶۲ درصد

وزنی تعیین شد (جدول ۵).



شکل ۸- a) جهت‌یافتگی و فابریک مضرسی سطوح شیستوزیته در بلورهای کوارتز و مسکوویت (نور عبوری). b) تشکیل بلورهای کوارتز در اثر دگرسانی سیلیسی (نور عبوری). c-d) هماتیت به صورت خودشکل تا بی‌شکل با بافت پرکننده فضای خالی و پراکنده (نور انعکاسی). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qtz: کوارتز، Ms: مسکوویت، Op: کانی کدر، Hem: هماتیت).

Fig. 8. a) Orientation and jagged fabric of schistosity surfaces in quartz and muscovite crystals (transmitted light). b) Formation of quartz crystals due to silica alteration (transmitted light). c, d) Euhedral to anhedral hematite formed as open space filling and disseminated (reflected light). Abbreviations are adapted from Whitney and Evans (2010). Qtz: quartz, Ms: muscovite, Op: opaque mineral, Hem: hematite.



شکل ۹- کانه‌زایی تیتانیوم به صورت تیغه‌های روتیل (Ru) در امتداد شکستگی‌ها و نیز پراکنده در متن واحدهای دگرسان محدوده بندچرک.

Fig. 9. Titanium mineralization in the form of rutile (Ru) blades along the fractures and disseminated in the metamorphosed units of the Band-e-Cherk district.

جدول ۳- مقادیر عنصر تیتانیوم که از مطالعات SEM در محدوده بندچرک به دست آمده است.

Table 3. Amounts of titanium element obtained from SEM studies in the Band-e-Cherk district.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
O (wt.%)	20.86	24.85	33.29	30.83	30.81	28.93
Si (wt.%)	3.61	2.32	----	----	----	----
Ti (wt.%)	72.29	71.18	66.71	69.17	69.19	71.07
Al (wt.%)	----	1.65	----	----	----	----
Total	96.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

جدول ۴- مقادیر عناصر مس، قلع و تنگستن که از مطالعات SEM در محدوده بندچرک به دست آمده است.

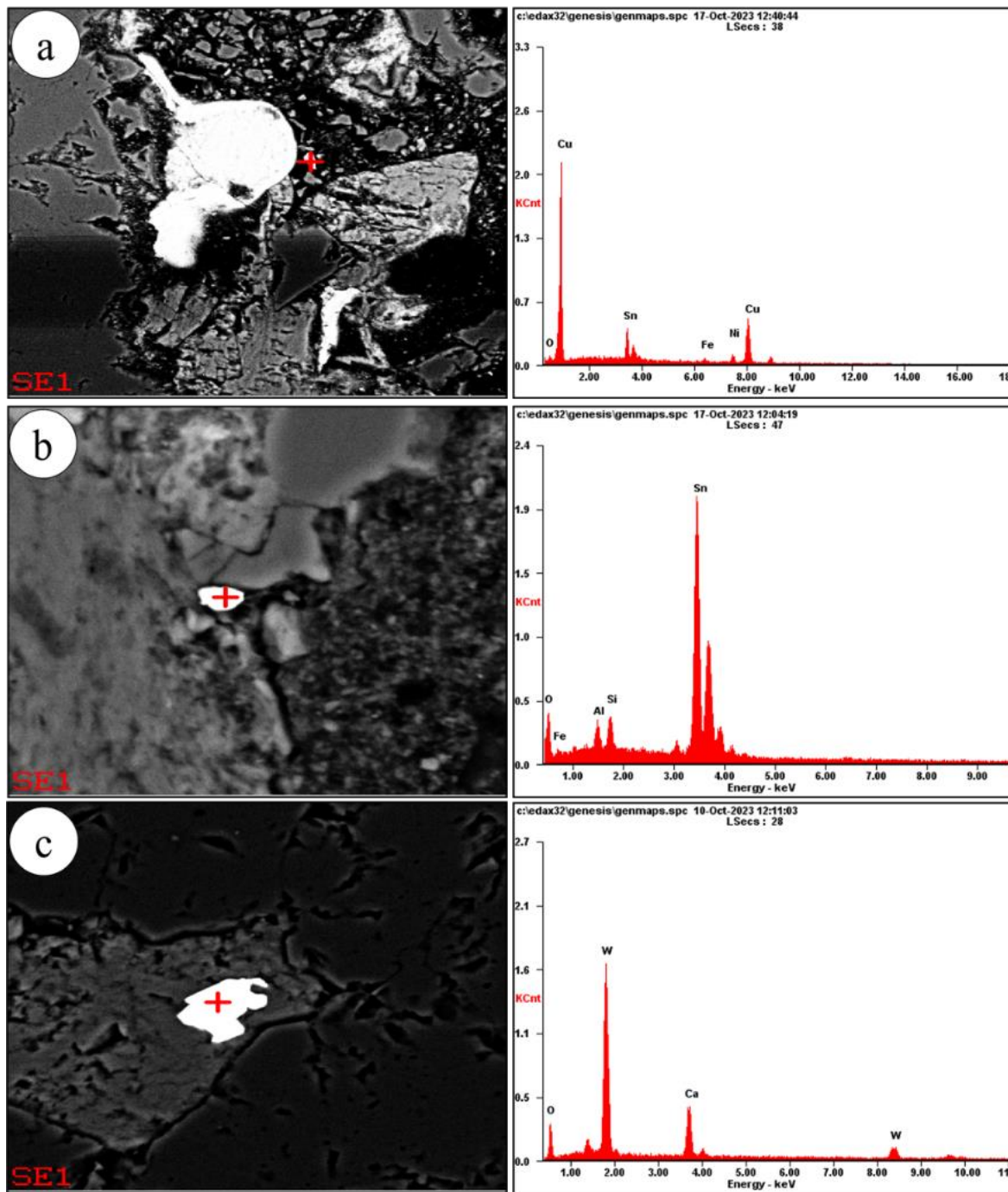
Table 4. Amounts of Cu, Sn, and W elements obtained from SEM studies in the Band-e-Cherk district.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
O (wt.%)	1.01	2.16	9.83	12.68	2.07	2.92
Sn (wt.%)	18.63	24.72	77.71	----	37.96	16.73
Fe (wt.%)	2.75	----	7.32	69.17	----	----
Ni (wt.%)	8.68	12.97	----	----	19.21	----
Cu (wt.%)	68.92	60.14	----	----	39.57	78.43
Al (wt.%)	----	1.65	2.39	----	----	----
Ca (wt.%)	----	----	----	16.14	----	----
W (wt.%)	----	----	----	71.18	----	----
Si (wt.%)	----	----	----	----	1.19	----
S (wt.%)	----	----	----	----	----	1.92
Total	99.99	101.64	97.25	169.17	100.06	100.00

جدول ۵- مقادیر عناصر نادر خاکی که از مطالعات SEM در محدوده بندچرک به دست آمده است.

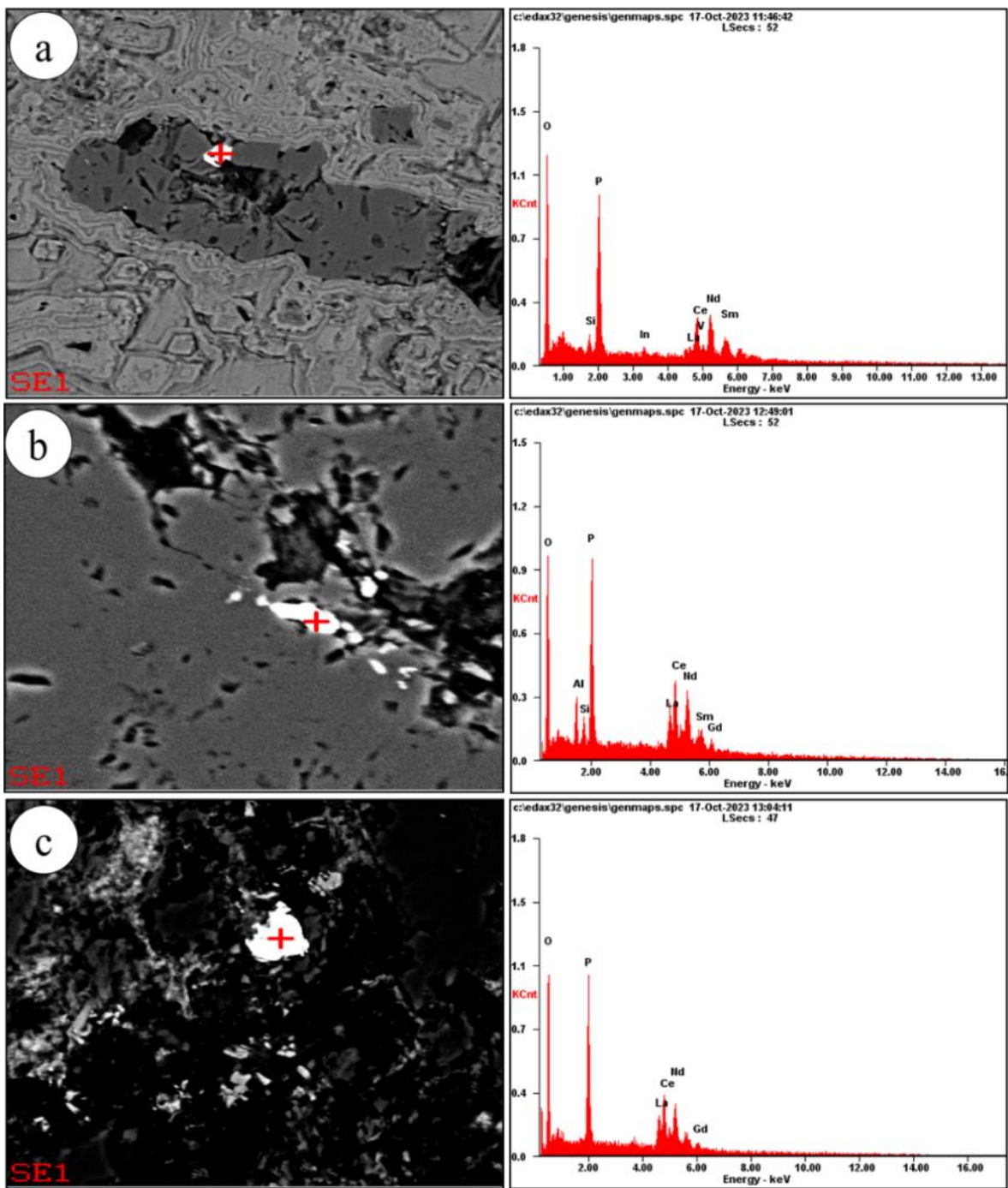
Table 5. Amounts of REEs and some other elements were obtained from SEM studies in the Band-e-Cherk district.

	K1	K2	K3	K4
O (wt.%)	20.72	18.89	13.21	16.20
Si (wt.%)	1.36	2.12	1.64	----
P (wt.%)	14.88	14.51	13.31	15.62
In (wt.%)	2.61	----	----	----
La (wt.%)	5.70	5.03	15.90	18.98
Ce (wt.%)	23.48	21.08	29.01	31.37
Pr (wt.%)	----	5.09	----	----
V (wt.%)	0.73	----	----	----
Nd (wt.%)	22.03	21.61	17.52	14.69
Sm (wt.%)	8.47	6.31	3.83	----
Gd (wt.%)	----	5.36	2.21	3.14
Al (wt.%)	----	----	3.36	----
Total	99.98	100.81	99.99	100.00



شکل ۱۰- کانه‌زایی مس، قلع و تنگستن به صورت پراکنده در متن واحدهای دگرسان محدوده بندچرک.

Fig. 10. Copper, tin, and tungsten disseminated mineralization in the altered units of the Band-e-Cherk district.



شکل ۱۱- کانه‌زایی عناصر نادر خاکی موجود به صورت پراکنده در متن واحدهای دگرسان محدوده بندچرک.

Fig. 11. Disseminated REE Mineralization in the metamorphosed units of the Band-e-Cherk district.

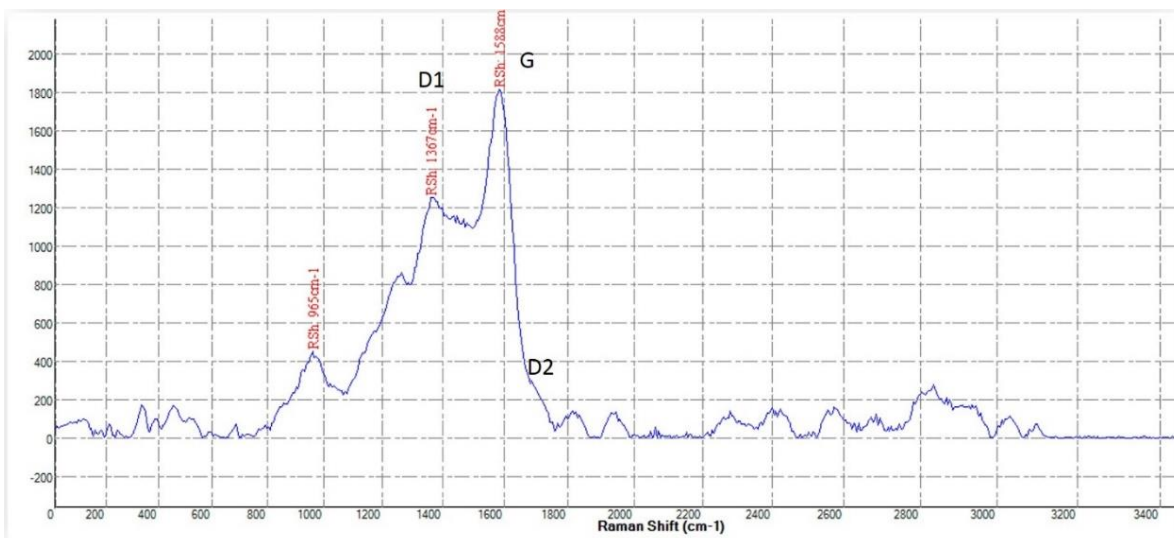
محدوده بندچرک، تعیین شد و مجموعه داده مربوطه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. پارامترهای مورد استفاده از طیف‌های رامان از تعداد

### طیف‌سنجی رامان

پارامترهای طیف رامان با فرآیند برازش پس زمینه برای نمونه‌های گرافیت برداشت شده از

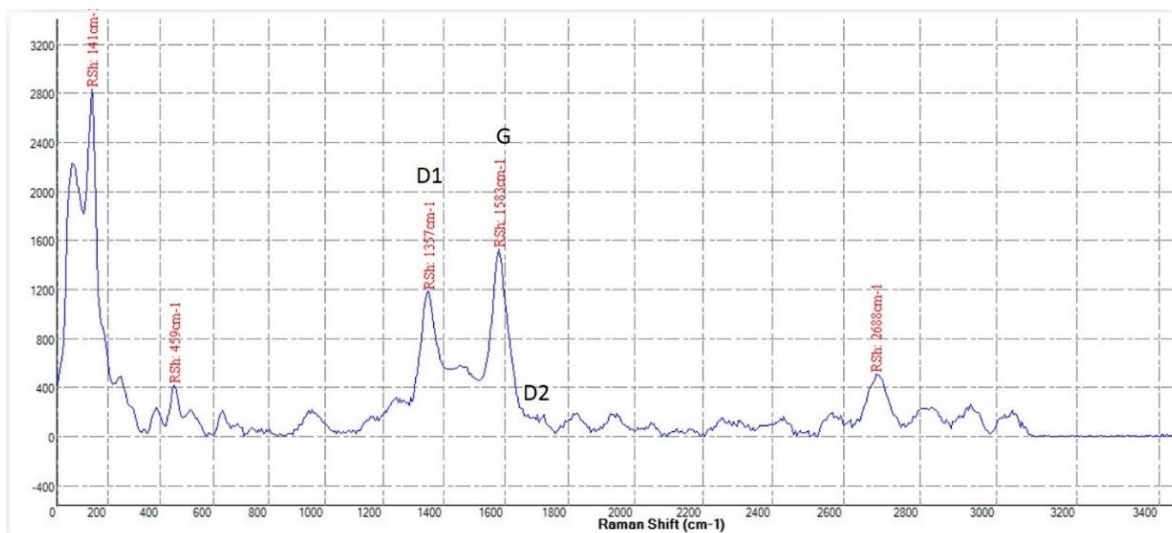
گرافیت به‌صورت مواد کربنی بی‌نظم‌تر توسعه یافته است. یک باند منفرد در حدود  $1600\text{ cm}^{-1}$  مشاهده شده ( $1583\text{ cm}^{-1}$ ) که باعث پهن‌شدن و جابجایی آشکار باند G شده است (Ueno, 2007). گرافیت در این نمونه نیز به‌صورت مواد کربن بی‌نظم و ساختار ریزبلور آمورف تشکیل شده است. در این نمونه (BC-Tr7-27)، طیف‌های مرتبه دوم از  $2400$  تا  $3100\text{ cm}^{-1}$  ثبت شده که یک طیف در  $2688\text{ cm}^{-1}$  ثبت شده که نسبت به نمونه شماره BC-03-17 شارپ‌تر شده است و نشان از مواد کربنی بیشتر است. همانطور که گفته شد باندهای D و G فقط در طیف‌های مرتبه اول ثبت و اندازه‌گیری شده و طیف‌های مرتبه دوم نادیده گرفته شده است.

دو مقطع صیقلی تهیه شده از سنگ‌های گرافیتی به‌دست آمدند که در جدول ۶ خلاصه شده‌اند. در نمونه‌های مورد مطالعه در مقطع شماره BC-03-17، پیک باند D1 در  $1367\text{ cm}^{-1}$  ثبت شد و باند G  $1588\text{ cm}^{-1}$  ثبت شده است (شکل ۱۲). یک باند منفرد در حدود  $1600\text{ cm}^{-1}$  مشاهده شده ( $1588\text{ cm}^{-1}$ ) که باعث پهن‌شدن و جابجایی آشکار باند G شده است (Ueno, 2007). در مقطع شماره BC-Tr7-27، پیک باند D1 در  $1357\text{ cm}^{-1}$  ثبت شد و باند G در  $1583\text{ cm}^{-1}$  ثبت شده است (شکل ۱۳). در این نمونه نیز باند D2 بر روی شانه G قرار گرفته و خیلی واضح نیست و به عبارتی با باند G یکی شده است و به این معنی است که در نمونه مورد مطالعه



شکل ۱۲- طیف رامان از (مقطع شماره BC-03-17).

Fig. 12. Raman spectrum (sample BC-03-17).



شکل ۱۳- طیف رامان از (مقطع شماره BC-Tr7-27).

Fig. 13. Raman spectrum (sample BC-Tr7-27).

جدول ۶- پارامترهای طیف رامان و پیک دمای دگرگونی محاسبه شده، طبق فرمول بیساک و همکاران (Beysac et al., 2002).

$$TGr (^{\circ}C) = - 445 R2 + 641$$

Table 6. Raman spectrum parameters and calculated temperature peak, according to the formula of Beysac et al. (2002).  $TGr (^{\circ}C) = - 445 R2 + 641$

Samples	Peak Position		FWHM		R1	R2	TGr ( $^{\circ}C$ )
	D1	G	D1	G			
BC-03-17	1367	1588	40	18	0.86	0.46	436
BC-Tr7-27	1357	1583	40	17	0.85	0.46	436

(Kusunose and Itaya, 1987)، طیف‌سنجی

فروسرخ پیشنهادی روزاند و همکاران (Rouzaud et

al., 1991)، پراکندگی پراش نوترونی پیشنهادی

میدنر و کارپنتر (Mildner and Carpenter, 1982)

و پراش پرتو ایکس و طیف‌سنجی رامان.

استفاده از طیف‌سنجی رامان راهکار مناسبی

برای تعیین درجه و دمای گرافیتی شدن است، که با

استفاده از محاسبه نسبت‌های  $R_1$  و  $R_2$  محاسبه شده

و بر اساس مساحت، موقعیت و شدت قله‌های  $D_1$ ،

$D_2$  و  $G$  بر اساس رابطه (۱) و (۲) به کار گرفته

می‌شود. پارامترهای  $R_1$  و  $R_2$  بنابر رابطه (۱) و (۲)

## بحث

مشاهدات میکروسکوپی و بررسی‌های پراش پرتو

ایکس، نشان می‌دهد که گرافیت در واحدهای

گرافیت- مسکوویت‌شیست با فراوانی ۱۰ تا ۲۰

درصد وزنی تشکیل شده است. این کانی به صورت

کاملاً آمورف (بی‌شکل) همراه با سایر کانی‌های

ورقه‌ای، در نمونه‌ها مشاهده شده است. از روش‌های

تجزیه‌ای مختلفی به منظور تعیین مشخصات مواد

کربن‌دار، از جمله گرافیت استفاده می‌شود. این

روش‌ها عبارتند از: اندازه‌گیری بازتابش نوری

پیشنهادی اوکایاما-کوسونسو و ایتایا (Okuyama-

مرتبه اول مربوط به اختلال ساختاری، نوار D2 در  $\sim 1620 \text{ cm}^{-1}$  است که می‌تواند به عنوان یک شانه روی باند G مشاهده شود. این شانه در مواد کربنی بی‌نظم‌تر که در آن باند G و باند D2 با هم ادغام می‌شوند، توسعه می‌یابد تا زمانی که یک ویژگی منفرد در حدود  $1600 \text{ cm}^{-1}$  مشاهده شود که باعث ایجاد پهن‌شدن و جابجایی آشکار باند G می‌شود (Ueno, 2007). طیف‌های مرتبه اول رامان از 900 تا  $1800 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شدند، در حالی که طیف‌های مرتبه دوم از 2400 تا  $3100 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شدند. اوج بی‌نظمی (D) و پیک مرتبه (G) (FWHM)<sup>2</sup> در طیف‌های مرتبه اول اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین، نسبت شدت نسبی باندهای D و G ( $R1 = D1/G$ ) می‌تواند به عنوان شاخصی برای درجه گرافیتی‌شدن استفاده شود (Tuinstra and Koenig, 1970a, b; Reich, 2004; Pimenta et al., 2007). طیف رامان گرافیت همچنین می‌تواند به عنوان یک زمین دماسنج برای تخمین دمای دگرگونی در سنگ‌های میزبان گرافیت استفاده شود. بیساک و همکاران (Beysac et al., 2002) یک ژئوترموتر بر اساس نسبت مساحت دو نوار (R2) معرفی کرده است (فرمول  $(\text{TGr } (^{\circ}\text{C})) = -445 R2 + 641$ )، که به صورت  $(R2 = D1/(G + D1 + D2))$  تعریف شده است، که می‌تواند برای سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای اعمال شود. ژئوترموتر برای دماهای بین 330 تا 650 درجه سانتی‌گراد معتبر است و عدم قطعیت مربوط

محاسبه می‌شوند و در تعیین درجه دگرگونی به کار می‌روند. دامنه باریکی از نسبت شدت (R1) و نسبت مساحت پیک (R2) برای داندهای گرافیت در دو مقطع صیقلی از نمونه‌های BC-Tr7- و BC-03-17 و 27 برابر 0/86 و 0/85 برای R1 و 0/46 و 0/46 برای نسبت R2 ثبت شد (جدول 6).

$$R2 = (D1/G+D1+D2)_A \quad (1)$$

$$R1 = (D1/G)_H \quad (2)$$

شاخص A و H به ترتیب نشان‌دهنده مساحت قله و بیشترین شدت قله است (Beysac et al., 2003). شدیدترین ویژگی‌های طیف رامان گرافیت در ناحیه مرتبه اول قابل مشاهده است، جایی که به اصطلاح باند G و باند D هستند (Eckmann et al., 2012; Ferrari and Basko, 2013). باند G مشخصه حالت ارتعاشی درون صفحه است که شامل اتم‌های کربن هیبرید شده با  $sp^2$  می‌شود که صفحات گرافن را در گرافیت تشکیل می‌دهند. موقعیت بلند G به تعداد لایه‌های گرافن بسیار حساس است و در  $1580 \text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است. با کاهش ضخامت لایه، موقعیت باند G به انرژی بالاتر یا مکان عدد موج بالاتر تغییر می‌کند. شدیدترین باندهای D نوار Di است که در ناحیه مرتبه اول در  $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$  قرار دارد و مشخصه کربن ناشناخته است. همچنین به عنوان نوار اختلال یا نقص شناخته می‌شود و حالت اتم‌های کربن  $sp^3$  را نشان می‌دهد (Beny-Bassez and Rouzaud, 1985; Sakata et al., 1988; Beysac et al., 2002). یکی دیگر از نوارهای

1. Full width of the peaks at half-maximum

شانه G قرار گرفته و خیلی واضح نیست و به عبارتی با باند G یکی شده است که به این معنی است که گرافیت به صورت مواد کربنی بی‌نظم‌تر توسعه یافته و یک باند منفرد در حدود  $1600 \text{ cm}^{-1}$  تشکیل داده (۱۵۸۸  $\text{cm}^{-1}$ ) که باعث پهن‌شدن و جابجایی آشکار باند G شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مواد کربنی گرافیت در محدودهٔ بند چرک به صورت مواد کربن بی‌نظم و آمورف تشکیل شده است. این نتایج نشان می‌دهد که دانه‌های گرافیت تحت دگرگونی در دمای پایین تشکیل شده‌اند. به دلیل کاهش درجه گرافیت‌شدن، طیف رامان باند گرافیت G پهن‌تر نشان داده شده است و باند D1 با کاهش گرافیتی‌شدن محدودتر شد، جایی که طیف رامان نوار گرافیتی (باند G) پهن شد و باند D1 به صورت یک نوار با شدت نسبی کمتر نسبت به گرافیتی‌شدن درجه پایین نشان داده شده است (Bernard et al., 2010; Nakamura and Akai, 2013). برای دستیابی به استفاده گسترده‌تر از رامان، روش پردازش طیف، موقعیت و نامگذاری بلندهای رامان و همه پارامترها از جمله مقادیر میانگین برای موقعیت مرکزی، FWHM باندهای D1 و G، مقادیر نسبت‌های  $(D1/G + D1 + D2)$  لازم است استانداردسازی شود. بر اساس این پارامترهای کمی، می‌توان شرایط دگرگونی نمونه‌های حاوی گرافیت را با توجه به فرمول  $TGr (\text{°C}) = -445 R2 + 641$  ارزیابی کرد. بر همین اساس TGr به نمونه‌های مورد مطالعه، محدوده دمایی ۴۳۶ درجه سانتی‌گراد را برای هر دو نمونه نشان داد. این دما تقریباً درجه ضعیف

به ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در دماهای بالاتر، نسبت R2 در  $0.5 \sim$  ثابت می‌ماند. بنابراین بیساک و همکاران (Beysac et al., 2002) اولین معادله تجربی وابسته به دما را برای تخمین دمای اوج بین ۳۳۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد در طول دگرگونی در سنگ‌های دگرگونی دارای مواد کربنی ارائه داده‌اند. نقطه عطف توسعه و تشویق استفاده گسترده‌تر از طیف‌سنجی رامان به عنوان یک زمین‌دماسنج برای سنگ‌های گرافیتی است (Beysac et al., 2002). بیساک و همکاران (Beysac et al., 2002) برای اولین بار با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی رامان مواد کربن‌دار، دماسنج دگرگونی دقیقی را تعریف کردند. بنابر بررسی‌های رال و همکاران (Rahl et al., 2005)، دمای دگرگونی و فرآیند گرافیتی‌شدن محاسبه می‌شود.

$$T(\text{°C}) = 737.3 + 320.9R1 - 1067R2 - 80.638R1^2 \quad (3)$$

فرآیند گرافیتی‌شدن مواد کربنی به شدت به دمای دگرگونی وابسته است و رابطهٔ خطی موجود بین دمای دگرگونی و پارامتر R2 طیف رامان، گرافیت را به یک دماسنج دگرگونی قابل اعتماد تبدیل کرده است. این دماسنج به ویژه کاربرد گسترده‌ای در نمونه‌هایی که در گسترهٔ دمایی کمتر از ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد تشکیل شده‌اند، دارد. در این گستره با افزایش دما، پارامتر R2 کاهش می‌یابد (Rahl et al., 2005).

در نمونه‌های مورد مطالعه، پیک باند D1 در  $1367 \text{ cm}^{-1}$  و  $1357 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شد و باند G  $1588 \text{ cm}^{-1}$  و  $1583 \text{ cm}^{-1}$  ثبت شده است. باند D2 بر روی

صفحه‌ای در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌خصوص دماهای بین ۴۷۰ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد (در حد رخساره آمفیبولیت) تشکیل می‌شود (Al-Ani et al., 2020).

### نتیجه‌گیری

در محدوده بندچرک، کانه‌زایی گرافیت به صورت آمورف در امتداد سطوح شیست‌توزیته واحدهای گرافیت-مسکوویت‌شیست متمرکز شده است. کانی‌های کوارتز، هالیت، کائولینیت، ایلیت، گوتیت، مسکوویت (سریسیت)، ژپس، روتیل، آنهیدریت، ناتروژاروسیت، آلونیت، کلسیت، ارتوکلاز و دیکیت این کانه‌زایی را همراهی می‌کنند. مقایسه بین محدوده دمای تشکیل گرافیت‌های پرعیار صفحه‌ای (پولکی) که در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌خصوص در دماهای بین ۴۷۰ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد (در حد رخساره آمفیبولیت) ایجاد می‌شوند. دمای به دست‌آمده از طریق تفسیر نتایج طیف‌سنجی رامان بر روی نمونه‌های گرافیت‌دار پرعیار محدوده بند چرک، نشان‌دهنده این موضوع است که گرافیتی‌شدن در محدوده بند چرک از نوع نامنظم بوده و در دمای پایین‌تر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (۴۳۶ درجه سانتی‌گراد) و در شرایط دمایی مربوط به رخساره دگرگونی شیست سبز تشکیل شده است.

### قدردانی

این پژوهش بخشی از نتایج طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۴۰۲۴۸۵۶۵۱۱۰۰۰۱ تحت حمایت

گرافیتی‌شدن را به همراه دارد و گرافیت صفحه‌ای که در نمونه‌های گرافیت با کریستالی بالا تشکیل می‌شود تشکیل نشده است. همچنین این دما به گونه‌ای نیست که هیچ گرافیتی تشکیل نشود و گرافیت‌های تشکیل شده از نوع آمورف خیلی ریزبلور بوده که در مطالعات کانی‌شناسی نیز مشخص شد. کم بودن مقادیر نسبت‌های R1 و R2 به ترتیب ۰/۱۰-۸۶/۸۵ و ۰/۴۶ نشان‌دهنده درجه گرافیتی‌شدن ضعیف است. گرافیت کاملاً بلوری، زمانی که شرایط دگرگونی ناحیه‌ای در دماهای بیش از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (محدوده ۴۷۰-۵۶۰ درجه سانتی‌گراد) قرار دارد، ظاهر می‌شود (Al-Ani et al., 2020). مشاهدات جالب دیگر، مقایسه بین تکامل R1 و R2 در گرافیت کم کریستالی (گرافیت نامنظم و آمورف) بود. نسبت‌های شدت R1 (۰/۱۰-۸۶/۸۵) و نسبت‌های مساحت پیک R2 (۰/۴۶) مقادیر بالاتری نسبت به مقادیر گرافیت کریستالی با درجه بالا (به ترتیب ۰/۱ تا ۰/۴ و ۰/۲ تا ۰/۳۸ به ترتیب برای R1 و R2) نشان دادند (Al-Ani et al., 2020). بنابراین گرافیت‌های تشکیل شده در محدوده بندچرک به نوع گرافیت نامنظم اشاره دارد که در دمای پایین‌تر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است. دمای به دست آمده با شرایط دمایی رخساره دگرگونی شیست سبز همخوانی دارد. بنابراین وجود گرافیت بی‌نظم و نبود گرافیت منظم و صفحه‌ای در محدوده بندچرک را می‌توان به یک رویداد دگرگونی ناحیه‌ای ضعیف (با درجه دگرگونی کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) توضیح داد. چراکه گرافیت‌های پرعیار

رضایی به جهت در اختیار دادن داده‌ها و تأمین مالی برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مجتمع فولاد مبارکه اصفهان است. بدینوسیله نگارندگان مقاله از مجتمع فولاد مبارکه اصفهان و مدیریت ارزیابی و اکتشاف معادن، جناب آقای دکتر

## References

- Al-Ani, T., Ahtola, T., Kuusela, J., 2018. Prospecting and exploration of flake graphite occurrences in Central and Southern Finland. Geological Survey of Finland, Open File Work Report.
- Al-Ani, T., Leinonen, S., Ahtola, T., Salvador, D., 2020. High-grade flake graphite deposits in metamorphic Schist Belt, Central Finland—Mineralogy and beneficiation of graphite for lithium-ion battery applications. *Minerals* 10(8), 680.
- Beny-Bassez, C., Rouzaud, J. N., 1985. Characterization of carbonaceous materials by correlated electron and optical microscopy and Raman microspectroscopy. *Scanning electron microscopy* 1, 119-132.
- Bernard, S., Beyssac, O., Benzerara, K., Findling, N., Tzvetkov, G., Brown Jr, G. E., 2010. XANES, Raman, and XRD study of anthracene-based cokes and saccharose-based chars submitted to high-temperature pyrolysis. *Carbon* 48(9), 2506-2516.
- Beyssac, O., Goffé, B., Chopin, C., Rouzaud, J. N., 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology* 20(9), 859-871.
- Beyssac, O., Goffé, B., Petitet, J. P., Froigneux, E., Moreau, M., Rouzaud, J. N., 2003. On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 59(10), 2267-2276.
- Crespo, E., Luque, F. J., Rodas, M., Wada, H., Gervilla, F., 2006a. Graphite-sulfide deposits in Ronda and Beni Bousera peridotites (Spain and Morocco) and the origin of carbon in mantle-derived rocks. *Gondwana Research* 9(3), 279-290.
- Crespo, E., Luque, F. J., Barrenechea, J. F., Rodas, M., 2006b. Influence of grinding on graphite crystallinity from experimental and natural data: implications for graphite thermometry and sample preparation. *Mineralogical Magazine* 70(6), 697-707.
- Davoudzadeh, M., 1969. *Geologie und Petrographie des Gebietes nördlich von Nain, Zentral-Iran* (Ph.D. thesis, ETH Zurich).
- Eckmann, A., Felten, A., Mishchenko, A., Britnell, L., Krupke, R., Novoselov, K. S., Casiraghi, C., 2012. Probing the nature of defects in graphene by Raman spectroscopy. *Nano letters* 12(8), 3925-3930.
- European Commission., 2020. *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*.
- Ferrari, A. C., Basko, D. M., 2013. Raman spectroscopy is a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature Nanotechnology* 8(4), 235-246.
- Ghorbani, M., 2007. *Economic Geology of Mineral Deposits and Natural Resources of Iran*. 1<sup>st</sup> edition, Arian Zamin Publishers 492p.
- International Energy Agency., 2021. *The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions*.
- Landis, C. A., 1971. Graphitization of dispersed carbonaceous material in metamorphic rocks. *Contributions to mineralogy and petrology* 30, 34-45.
- Lazzeri, M., Barreiro, A., 2014. Carbon-based nanoscience. *Elements* 10(6), 447-452.
- Luque, F. J., Ortega, L., Barrenechea, J. F., Huizenga, J. M., Millward, D., 2012. Key factors controlling massive graphite deposition in volcanic settings: an example of a self-organized critical system. *Journal of the Geological Society* 169(3), 269-277.

- Luque, F. J., Huizenga, J. M., Crespo-Feo, E., Wada, H., Ortega, L., Barrenechea, J. F., 2014. Vein graphite deposits: geological settings, origin, and economic significance. *Mineralium Deposita* 49, 261-277.
- Mildner, D. F. R., Carpenter, J. M., 1982. On the short-range atomic structure of non-crystalline carbon. *Journal of non-crystalline Solids* 47(3), 391-402.
- Nakamura, Y., Akai, J., 2013. Microstructural evolution of carbonaceous material during graphitization in the Gyoja-yama contact aureole: HRTEM, XRD, and Raman spectroscopic study. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 108(3), 131-143.
- Nogolesadat, M. A., Almasian, M., 1993. Tectonic map of Iran, a treatise on the geology of Iran. Ministry of Mines and Metals, Tehran
- Okuyama Kusunose, Y. A., Itaya, T., 1987. Metamorphism of carbonaceous material in the Tono contact aureole, Kitakami Mountains, Japan. *Journal of Metamorphic Geology* 5(2), 121-139.
- Petrella, L., Thébaud, N., Evans, K., LaFlamme, C., Occhipinti, S., 2021. The role of competitive fluid-rock interaction processes in the formation of high-grade gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 313, 38-54.
- Pimenta, M. A., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S., Cancado, L. G., Jorio, A., Saito, R., 2007. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy. *Physical chemistry chemical physics* 9(11), 1276-1290.
- Rahl, J. M., Anderson, K. M., Brandon, M. T., Fassoulas, C., 2005. Raman spectroscopic carbonaceous material thermometry of low-grade metamorphic rocks: Calibration and application to tectonic exhumation in Crete, Greece. *Earth and Planetary Science Letters* 240(2), 339-354.
- Reich, S., Thomsen, C., 2004. Raman spectroscopy of graphite. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 362(1824), 2271-2288.
- Rosing-Schow, N., Bagas, L., Kolb, J., Balić-Žunić, T., Korte, C., Fiorentini, M. L., 2017. Hydrothermal flake graphite mineralization in Paleoproterozoic rocks of south-east Greenland. *Mineralium Deposita* 52, 769-789.
- Rouzaud, J. N., Guechhati, E., Conard, J., Kister, J., 1991. Structural Characterization of coalification: example of Gironville borehole. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 162(2).
- Sakata, H., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S., Endo, M., 1988. Effect of uniaxial stress on the Raman spectra of graphite fibers. *Journal of Applied Physics* 63(8), 2769-2772.
- Santosh, M., Wada, H., Satish-Kumar, M., Binu-Lal, S. S., 2003. Carbon isotope "stratigraphy" in a single graphite crystal: Implications for the crystal growth mechanism of fluid-deposited graphite. *American Mineralogist* 88(11-12), 1689-1696.
- Sun, L., Xu, C. P., Xiao, K. Y., Zhu, Y. S., Yan, L. Y., 2018. Geological characteristics, metallogenic regularities, and the exploration of graphite deposits in China. *China Geology* 1(3), 425-434.
- Tuinstra, F., Koenig, J. L., 1970a. Raman spectrum of graphite. *The Journal of Chemical Physics* 53(3), 1126-1130.
- Tuinstra, F., Koenig, J. L., 1970b. Characterization of graphite fiber surfaces with Raman spectroscopy. *Journal of Composite Materials* 4(4), 492-499.
- Ueno, Y., 2007. Stable carbon and sulfur isotope geochemistry of the ca. 3490 Ma Dresser Formation hydrothermal deposit, Pilbara Craton, Western Australia. *Developments in Precambrian Geology* 15, 879-896.
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist* 95(1), 185-187.