



Kharazmi Journal of Earth Sciences

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



# Microtectonic and petrofabric investigation of graphite-bearing schist units in the Band-e-Cherk district, Kuh-e-Dom metamorphic zone

Majid Ghasemi Siani<sup>1</sup>, Hamed Ebrahimi Fard<sup>2\*</sup>, Asghar Dolati<sup>3</sup>

Abstract

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. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

#### Article info Article history

Received: 6 May 2024 Accepted: 1 July 2024 Keywords: microtectonic, structural analysis, schistosity surfaces, graphitization, ductile deformation, Kuh-e-Dom metamorphic zone, Band-e-



Ardestan, and the Kuh-e-Dom metamorphic zone. The schist units hosting graphitization in the Kuh-e-Dom metamorphic complex are of Upper Paleozoic (Permian-Triassic) age and include muscovite schist to graphite-muscovite schist. In the studied area, the occurrence of tectonic activities and regional metamorphism by creating deformations in the schistose surfaces containing carbonaceous organic materials, have provided suitable spaces for graphitization and increase in carbon content. Three principal phases of folding and deformation have affected the schist units. The first generation of folding (F1) and metamorphism (D1), by creating a foliation (S1) parallel to the primary bedding (S0) and the axial surface of the fold (AF1), has played an important role in the concentration of organic carbon formed during the deposition and formation of graphite. The second generation deformation (D2) is associated with the intrusion of the diorite body and variations in the dip and strike of the limestone and schist beds as well as the morphology of the district. The mylonitization of the schist units is one of the most important effects of this stage of deformation. The third and final generation of deformation (D3) has been the result of directional pressure, it has been the result of deformation, mainly in brittle form. The formation of kink band structures (in quartz-feldspar and graphite bands), jagged and dendritic edges (in quartz and feldspar crystals), subgraining (in quartz and feldspar crystals), undulose extinction in quartz, recrystallization of quartz and feldspar crystals in the muscovite schist and graphite-muscovite schist units are among the evidences of this generation of deformation in the district.

The Band-e-Cherk district is located in the structural zone of central Iran, northeast of the city of

#### Introduction

Fabric analysis of metamorphic rocks is effective in understanding the mechanism of formation of orogenic belts and their relationship to plate tectonics (Twiss and Moores, 1992). Deformation in rocks is achieved by many steps that occur at the scale of individual grains. External factors such as heat, static pressure, subtractive stresses, fluid pressure and the imposed stress rate in the rock environment are involved (e.g. Passchier and Trouw, 2005; Pal et al., 2010; Ghosh et al., 2013). Many of the dominant fabrics appear to be associated with high temperatures, which are overridden by fabrics associated with low temperatures (e.g., Passchier and Trouw, 2005; Mukherjee, 2011; Barker, 2013). Many metamorphic rocks have undergone a complex history of burial, metamorphism, metamorphism and uplift, and many of these steps in the chain of processes may be related to the last fabric. The Kuh-e-Dom complex is located on the eastern margin of the Urumia-Dokhtar magmatic belt and the western part of the central Iranian subcontinent. The oldest rock units of the Kuh-e-Dom metamorphic complex are of lower Paleozoic age, at the level of greenschist and phyllite facies, with interlayers of crystallized limestone. Recently, the mineralogy and

**DOI** https://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106633

\*Corresponding author: Hamed Ebrahimi Fard; E-mail: hamedebrahimi772@gmail.com



**How to cite this article:** Ghasemi Siani, M., Ebrahimi Fard, H., Dolati, A., 2024. Microtectonic and petrofabric investigation of graphite-bearing schist units in the Band-e-Cherk district, Kuh-e-Dom metamorphic zone. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(1), 152-178. https://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106633

DOR: 20.1001.1.2538449.1403.10.1.7.9

Microtectonic and petrofabric investigation of graphite ...

mineralization of graphite along with schists in the Bande-Cherk district have also been studied (Ghasemi Siani et al., 2024). In this research, the microscopic and macroscopic structural analysis of the metamorphic rocks of the schist zone in the Band-e-Cherk district, located in the Kuh-e-Dom metamorphic zone, has been carried out. Based on this, metamorphism and metamorphism are related based on mineralogical studies and microstructures controlling graphite mineralization in the Band-e-Cherk district.

#### **Materials and Methods**

In order to study the microstructures in the Band-e-Cherk district, seventy microscopic sections (thin polished and polished) of metamorphic schist units collected during several field surveys were prepared at the Microscopic Section Preparation workshop of Kharazmi University of Tehran. After preparation, the samples were examined using a ZEISS Axioplan 2 microscope at the Optical Mineralogy Laboratory of Kharazmi University of Tehran and the Iranian Mineral Processing Research Center (IMPRC).

#### **Results and Discussion**

The main metamorphism that has created the structure of the Band-e-Cherk district is ductile metamorphism, the effects of which are manifested in the form of mylonitization of rocks, extension of dominant mylonitic foliations and other shear zone fabrics in rocks. In addition to ductile deformation, brittle deformation is also widespread in the Band-e-Cherk district, the effects of which can be seen in the form of micro-fractures, veins and veinlets of graphite. The schist units of the study area have been affected by three main phases of folding and deformation. The first phase of folding during regional metamorphism (M1) and the first generation folding event (F1), which are the first tectonic movements, are located in the area. The folds of this stage are often close to the parallel ridge or the axial surface is almost horizontal and their axial trend is predominantly NE-SW. This stage of deformation (D1) eventually forms the mineralization along the foliation. The second generation metamorphism (M2) is observed as contact metamorphism around the intrusive body, the time of occurrence of these processes is different and related to the intrusion of the diorite body. One of the most important results of this stage of metamorphism is the mylonitization of the rocks in the area, which has created ductile shear zones in the folds. This stage of metamorphism (D2) has produced massive and lenticular mineralization in the schist units in contact with the diorite body. Using these Raman spectroscopy studies, Ghasemi Siani et al. (2024) estimated the temperature of graphitization in the schist units of the Band-e-Cherk district to be about 436°C, and equated this with the temperature conditions of the greenschist metamorphic facies in the commentary. The third and final phase of folding (F3) and deformation (D3) in the study area is the formation of kink-band structures in the Muscovite schist units in the western part of the district. In addition, under the influence of tectonic processes (D3), these units, together with the schist units, have been strongly fractured and jointed, and the quartz and alkali feldspar crystals have acquired a coarse and jagged texture. Undulating extinction and subgrading in quartz is well represented in the schist units under the influence of tectonic forces.

#### Conclusions

In the Band-e-Cherk district, the occurrence of tectonic activities and regional metamorphism, creating deformation in the schistose surfaces containing carbonaceous organic materials, have provided suitable spaces for graphitization and increase in carbon content. Ductile deformation is the most important deformation occurring in the Band-e-Cherk district. The effects of this deformation include the creation of microcracks, mylonitization and expansion of the dominant mylonite foliation in the rocks. Three main phases of folding and deformation have affected the schist units of the study area. The first generation of folding (F1) and deformation (D1), by creating foliation (S1) parallel to the axial surface of the fold, has played an important role in concentrating organic carbon and creating graphitization in the district. This deformation phase was mainly ductile during the regional metamorphism of the greenschist facies (M1), which is considered to be the first tectonic movement in the Band-e-Cherk district. These foliations are associated with changes in orientation, thickness, size and mineralogical composition, as well as the formation of lenticular fabrics in the alternating bedding of graphite (dark) and quartz-feldspar (light). The mechanisms involved in the formation of these foliations in the district include recrystallization and directional growth. The second generation of deformation (D2) in the Band-e-Cherk district is identified in terms of generation of fabrics such as, recrystallization and orientation of new grains and finegrains in the quartz-feldspar crystals present in the schist units. The most recent phase of deformation in the Band-e-Cherk district is the third generation deformation (D3). The third and final phase of folding (F3) and deformation (D3) in the study area occurred as brittle deformation. The formation of kinkband structures (in the alternation of guartz-feldspar and graphite bands), jagged edges (in quartz and feldspar crystals), subgraining (in quartz and feldspar crystals), undulatory extinction in quartz, regrowth of quartz crystals and feldspar in the muscovite schist and graphite-muscovite schist units are among the evidences of this generation of deformation in the district.

- 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.
- Ghosh, D., Dutta, T., Samanta, S. K., Pal, D. C., 2013. Texture, microstructure and geochemistry of magnetite from the Banduhurang uranium mine, Singhbhum Shear Zone, India—implications for physico-chemical evolution of magnetite mineralization. Journal of the Geological Society of India 81, 101-112.
- Mukherjee, S., 2011. Mineral fish: their morphological classification, usefulness as shear sense indicators and genesis. international Journal of earth Sciences 100, 1303-1314.
- Pal, D. C., Trumbull, R. B., Wiedenbeck, M., 2010. Chemical and boron isotope compositions of tourmaline from the Jaduguda U (-Cu-Fe) deposit, Singhbhum shear zone, India: implications for the sources and evolution of mineralizing fluids. Chemical Geology 277(3-4), 245-260.
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. Microtectonics. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 371p.
- Twiss, R.J., Moores, E.M., 1992. Structural geology. Freeman and Company, New York 532 p.
- Zong, Z., 2017. Transverse isotropic mechanical properties and constitutive model of slate. Shandong University.

### References

Barker, A.J., 2013. An introduction to metamorphic textures and microstructures. Oxford University Press, 289 p.

CRediT authorship contribution statement







Research Article

Kharazmi Journal of Earth Sciences Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

# بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار در محدودهٔ بندچرک، پهنهٔ دگرگونی کوهدم

مجید قاسمی سیانی<sup>۱</sup>، حامد ابراهیمیفرد<sup>۲\*</sup>، اصغر دولتی<sup>۳</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. استادیار، گروه زمینشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

کیدہ	اطلاعات مقاله چ
محدودهٔ اکتشافی بندچرک در پهنهٔ ساختاری ایران مرکزی، شمالشرقی شهرستان اردستان و در پهنهٔ دگرگونی کوهدم واقع شده است. واحد	تاريخچه مقاله
ستی میزبان گرافیتزایی در مجموعهٔ دگرگونی کوهدم، به سن پالئوزوئیک بالایی (پرمین- تریاس) بوده و شامل مسکوویتشیست تا گراف	دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷ شید
کوویتشیست هستند. در محدودهٔ مورد مطالعه، رخداد فعالیتهای تکتونیکی و دگرگونی ناحیهای با ایجاد دگرریختی در سطوح شیستو	پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱ مسک
ی مواد آلی کربندار، فضاهای مناسبی را برای گرافیتزایی و افزایش عیار کربن فراهم نموده است. سه فاز اصلی چینخوردگی و دگرریخ	<b>واژەھاى كليدى</b> حاو
دهای شیستی را تحتتأثیر قرار داده است. نسل اول چینخوردگی (F1) و دگرریختی (D1)، با ایجاد برگوارگی (S1) به موازات لایهبندی	ميكروتكتونيك، تحليل واح
؟) و سطح محوری چین (AF1)، نقش مهمی را در تغلیظ کربن آلی تشکیلشده در حین رسوبگذاری و ایجاد گرافیت ایفا نموده است. دگرریا	ساختارى، سطوح (50
ل دوم (D2)، با نفوذ تودهٔ دیوریتی و ایجاد تغییرات در شیب و امتداد لایههای آهکی، شیستی و نیز مورفولوژی محدوده، همراه است. میلونیتی،	شیستوزیته، گرافیتزایی، نسل
دهای شیستی، از جمله مهمترین آثار این مرحله از دگرشکلی است. نسل سوم و پایانی دگرریختی (D3) با اعمال فشار جهتدار، سبب ا	دگرريختي شكلپذير، پهنهٔ واح
ریختی، عمدتاً به صورت شکنا شده است. ایجاد ساختارهای کینکباند (در تناوب نوارهای کوارتز-فلدسپاتی و گرافیتی)، حاشیهٔ مضرس	دگرگونی کوهدم، محدودهٔ دندج ک
انهای (در بلورهای کوارتز و فلدسپار)، سابگرینشدگی (در بلورهای کوارتز و فلدسپار)، خاموشی موجی در کوارتز، رشد مجدد بلورهای کوار	بینچری. اکالاتخانات دندا
سپار موجود در واحدهای مسکوویتشیست و گرافیت-مسکوویتشیست، از جمله شواهد رخداد این نسل از دگرریختی در محدوده است.	المارية المارية مراجع المحقق فلد،
	<u>n</u>

مقدمه

تجزیه و تحلیل فابریک سنگهای دگرگونی در شناخت مکانیسم تشکیل کمربندهای کوهزایی و ارتباط آن با زمینساخت صفحهای مؤثر است (Twiss and Moores, 1992). حالتهای شکست سنگهای شیستوز به سه دسته تقسیم می شوند (Manthei, 2005; Alkan et al., 2007). ۱) حالت شکست برشی (shear failure)، جایی که تَرَک اصلی (main crack) با لایهبندی زاویه، معمولا بسته ایجاد می کند. ۲) حالت شکست کششی

(tensile failure)، که در آن ترک اصلی به صورت عمودی بر امتداد جهت بارگذاری ایجاد می شود. ۳) حالت شکست مختلط (mixed failure)، که در آن صفحه برشی (shear plane)، هم دچار شکست برشی و هم شکست کششی می شود. دگرریختی در سنگها با مراحل زیادی که در مقیاس دانه-های منفرد انجام می گیرد، به وجود می آید. عوامل بیرونی، مثل حرارت، فشار ایستایی، تنشهای تفریقی، فشار سیالات و نرخ تنش تحمیل شده موجود در e.g., Passchier and Trouw, 2005; ) محیط سنگ دخالت دارند (

#### DOI https://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106633

\*نويسنده مسئول: حامد ابراهيميفردmail.com@gmail.com

استناد به این مقاله: قاسمی سیانی، م.، ابراهیمیفرد، ح.، دولتی، ا. (۱۴۰۳) بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار در محدودهٔ بندچرک، پهنهٔ دگرگونی کوه-دم. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۱۵۲ تا ۱۷۸. https://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1106633



Sengupta et al., 2005; Pal et al., 2010; Ghosh et al., 2013). به نظر می رسد، بسیاری از فابریکهای غالب با حرارت بالا در ارتباط بوده، که e.g., Passchier and ) متأثر از فابریک مربوط به درجه حرارت پایین است ( Trouw, 2005; Mukherjee, 2007, 2010a, b, 2011; Mukherjee Cand Koyi, 2010; Barker, 2013).

مجموعهٔ کوهدم در حاشیهٔ شرقی نوار ماگمایی ارومیه- دختر و بخش غربی خرده قاره ایران مرکزی قرار گرفته است (شکل ۱). این ناحیهٔ از نظر تقسیمات ساختاری در زیرپهنهٔ انارک- خور قرار دارد. زمینشناسی ناحیه کوهدم با دگرگونیهای کوهدم در تماس با مجموعه آذرین شناخته شده است. کهنترین واحدهای سنگی مجموعه دگرگونی کوهدم، سن پرمین-تریاس دارند، که در حد رخسارهٔ شیستسبز و فیلیت بوده و دارای میانلایههایی از آهک متبلور است ( and Stampfli, 2008 تورین با دگرشیبی زاویهدار پوشیده شدهاند. منطقهٔ بندچرک با وسعت تقریبی ۳۰ کیلومتر مربع در مرکز ایران در محدوده کوهدم قرار دارد. دگرگونی محدوده بندچرک نیز جزیی از مجموعه دگرگونی کوهدم بوده و با



ترکیب غالب شیستی رخنمون دارد. تاکنون پژوهش های گستر دهای پیرامون مباحث زمین شناسی، کانی شناسی، خصوصیات ژئوشیمیایی، پتروژنز سنگ منشأ و محیط تکتونوماگمایی و زمین دما-فشار سنجی ماگماتیسم و دگر گونی e.g., Rabiei, 2006; Sarjoughian, ) ناحية انارك انجام شده است 2012; Kananian et al., 2008; Sarjoughian et al., 2012; Mehrabi et al., 2014; Bagheri and Stampfli, 2008). اخيراً نيز مطالعاتی بر روی مباحث کانی شناسی و کانهزایی گرافیت همراه با شیست-های محدودهٔ بندچرک انجام شده است (Ghasemi Siani et al., 2024). با این وجود، مطالعات کمی بر روی میکروتکتونیک و پتروفابریک واحدهای شیستی که میزبان گرافیت است، انجام شده است. از اینرو، در این پژوهش، به تحلیلهای ساختاری در مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی بر روی سنگهای دگرگونی ناحیهای شیستی در محدودهٔ بندچرک واقع در یهنهٔ دگرگونی کوهدم، پرداخته شده است. بر همین اساس، ارتباط دگرشکلی و دگرگونی بر اساس مطالعات کانیشناسی و میکروساختارهای کنترل کنندهٔ کانهزایی گرافیت که در ارتباط با تغلیظ کربن آلی موجود در رسوبات اولیه بوده، در محدودهٔ بند چرک صورت گرفته است.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی 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 (NogoleSadat and Almasian, 1993). موقعیت محدودهٔ بند چرک در نقشه با ستارهٔ زرد رنگ مشخص شده است.

Fig. 1. Geological map of the Anarak Metallogenic Complex (AMC), located in the central part of the Urmia-Dokhtar belt. The Kohe-Dom district is located in the central part of the Anarak metallogenic complex (NogoleSadat and Almasian, 1993). The location of the Band-e-Cherk is marked with a yellow star on the map.

زمینشناسی و تکتونیک پهنهٔ انارک و کوهدم

منطقهٔ فلززایی انارک، از شـمال به گسل درونه، از غرب به پهنهٔ آمیزه رنگین، بین زیرپهنه انارک و کوه دم، و از جنوب به فروافتادگی نايين- انارک محدود می شود ( شکل ۲) (Ghorbani, 2007). ناحيهٔ انارک از دیدگاه ساختمانی بین دو گسله امتدادلغز بزرگ، یعنی گسل درونه و گسل دهشیر – بافت قرار دارد ( , 1983; e.g., Tarkian et al., 1983; Romanko et al., 1984; Bagheri and Stampfli, 2008; Tabatabaei Manesh et al., 2021; Khalili and Torabi, 2023). سیستم گسلی که ناحیهٔ انارک را تحت تأثیر قرار داده، به دو گروه اصلی و فرعی تقسیم می شوند؛ ۱) گسلهای اصلی (مانند گسل ترکمنی- اوردیب، چاپدونی، بابابزرگی و بیاضـه)، عمیق بوده و دارای سابقه فعالیت طولانی ه ستند. ۲) گ سل های فرعی (مانند گ سل های شمال انارک، کالکافی و چوپانان) که میتوانند شاخهای از گسلهای ا صلى با شند، پهنههاى زمين ساختى منطقه را قطع كرده و در برخى موارد از آنها عبور می کنند. چینهای ناحیه انارک به دو گروه اصلی تقسیم می شوند (Almasian, 1997)؛ ۱) چین هایی که در سنگهای قدیمی پی سنگ تشکیل شدهاند و در واحدهای افیولیتی و دگرگونی انارک به وقوع پیوستهاند. این چینها شامل، الف) بزرگ تاقدیس انارک: ه سته این بزرگ تاقدیس مت شکل از سنگهای اولترابازیکی و دگرگونی مربوط به افیولیت انارک میباشد؛ ب) تاقدیس کوهمیله: که در نیمهٔ شمالی یک چین Z شکل مشاهده می شود؛ ج) تاقدیس پتیار: با هسته متشکل از سنگهای الترابازیکی و دگر سان شده، به عنوان S یک چین M شکل (جداکننده چینهای Z شکل در یال شمالی و شـکل در یال جنوبی) در ناحیهٔ لولای بزرگ تاقدیس انارک قرار دارد؛ د) ناودیس و تاقدیس کوه درهانجیر: که به عنوان یک چین S شــکل در یال جنوبی بزرگ تاقدیس انارک در نظر گرفته می شود؛ ه) تاقدیس لاک: یکی بزرگترین تاقدیس در جنوب شرقی انارک بوده و متشکل از سنگهای واحد مرمر لاک است. هستهٔ این تاقدیس M شکل، عموماً متشکل از سنگهای واحد چاه گربه است؛ و) ناودیس دولدول: یالهای

این ناودیس متشکل از سنگهای واحد مرمر لاک هستند. هسته ناودیس دولدول از واحدهای سنگی مرغاب و پتیار تشکیل شده است. ناودیس دولدول به صورت یک ناودیس تاقدیس گونه ( Antiformal Syncline) م شاهده می شود. ۲) چینهایی که در سازندهای جدید ناحیهٔ انارک رخ داده و در ساز ندهای قم و قرمز زیرین به وقوع پیوستهاند. این چینها، شامل الف) ناودیس تالمسی: سازندهای متشکله عمدتاً از سازندهای قرمز زیرین و قم و در قسمت غرب سازند ائو سن- الیگو سن (EO) ا ست؛ ب) ناودیس سه برز: در شمال غربی معدن متروکه سه برز قرار دارد.

به دلیل موقعیت ویژه زمین شناسی در ناحیه انارک گسلههای امتداد لغز، انواع گسلهای شیبلغز به ویژه گسله رانده، رورانده مشاهده می گردد. ۱) گسل درونه یا گسل بزرگ کویر ( Stöcklin, 1972): این گسل از شمال غربی انارک تا نواحی شمالی کا شمر و از آنجا به سـمت شـرق به طرف افغانسـتان ادامه مي يابد. اين گسله به شکل قوسی، به عنوان مرز شمالی خرده قارهٔ ایران مرکزی- شرقی در نظر گرفته شده است. مکانی سم گسله به صورت ترکیبی از حرکت امتدادلغز و شیب لغز (رانده) است. ۲) گسل تر کمانی- اور دیب: طول گسله در ناحیهٔ انارک- خور در حدود ۱۶۲ کیلومتر و در امتداد آن به موازات گسل بزرگ کویر (N65E) است. این گسل را میتوان به عنوان یک گسل ژرف در نظر گرفت. در بخش جنوبغربی این گسل زون برشی ترکمانی مشاهده می شود. ۳) راندگی در یال جنوبی بزرگ تاقدیس انارک: در این بخش اغلب گسلها به صورت قاشقی مشاهده می شـوند. گسـلهای رانده در یال جنوبی بزرگ تاقدیس انارک را می توان به ۴ گروه گسل های جداشده (Detachment Fault)، راندگی در عضوهای واحد چاهگربه، راندگی در واحد مرمر لاک، راندگی در واحدهای پتیار و مرغاب، تقسیم بندی کرد ( Almasian, 1997; Bagheri and Stampfli, 2008). ۴) راندگی در یال شمالی بزرگ تاقدیس انارک: در این بخش از بزرگ تاقدیس، مشابه یال جنوبی، راندگی های متعدد و ساختمان های مرتبط با آن به طور

101

ماسيف انارک- خور و پهنهٔ کوهدم توسط ادامهٔ گسل بزرگ کوير و

نیز پهنهٔ آمیزه رنگین، از یکدیگر جدا شدهاند (شکل ۱). مجموعه

دگرگونی کوهدم، به موازات روند آتشفشانی شمالغربی- جنوبشرقی،

میان دو کویر اصلی قرار گرفته و توسط دو گسل، گسل کویر بزرگ و

گسل نائین- دهشیر بافت احاطه شده است ( Bagheri and

Stampfli, 2008). از لحاظ ساختاری، این منطقه توسط گسلهایی

به ۳ بلوک کوچکتر قابل تقسیم است. ارتفاعات کوهدم شامل کوههای

متعددی است که در امتداد ارومیه – دختر با شکل هلالی یا

سیگموئیدال (Sigmoidal) کا شیده شده است. گاسلهای طولی با روند NW-SE به موازات کمربند ماگمایی ارومیه- دختر هستند و

شیب گسلها معمولاً از ۶۰ تا ۹۰ درجه متغیر است. این گسلها

حرکات معکوس و راستگرد دارند و با تغییر شکل و تغییر امتداد از

WNW به NW توأم هستند. شکل گیری در زمان سنوزوئیک، بخشی

از سیستم گسلهای امتداد لغز را ستگرد با روند NW-SE محسوب

میشوند، که بخشی از ایران مرکزی را از کوههای زاگرس جدا نمودهاند

(Morley et al., 2009; Berberian and King, 1981). این گسل-

ها موجب شده ارتفاعات کوهدم از بیابانهای شمال و جنوب متمایز

شوند. گ سلهای عر ضی با روند NE-SW در منطقه کوهدم عمود بر

كمربند ماگمایی ارومیه- دختر هستند. این گسلها حرکت نرمال

چپگرد دارند که به نظر میرسد در زمان سنوزوئیک به حرکات

امتدادلغز راستگرد با روند NW-SE تغییر یافتهاند. این گسلها نسبت

به گسلهای اولیه کوتاهتر بوده و معمولاً شکل هلالی دارند و موجب

قطعشــدگی و جابه جایی توده نفوذی کوهدم شــدهاند ( Nadimi,

2010). گسل بزرگ کویر یا گسل درونه، یکی از بزرگترین گسلهای

ایران محسوب میشود و از جنوبشرقی کوهدم تا پهنه شرق ایران

امتداد می یابد و نائین محل تقاطع دو گسل بزرگ کویر با گسل نائین

است. این گسل در بخش غربی خود حرکات امتدادلغز چپگرد دارد.

گسل نائین- ده شیر کمربند ماگمایی ارومیه- دختر را قطع و جابهجا

کرده است. حرکات این گسل از معکوس را ستگرد در شمال اطراف

نائین به نرمال راستگرد در جنوب تغییر می کند (Nadimi, 2010). از

گستردهای مشاهده می شود. به دلیل عملکرد تغییر شکلهای نیرومند در این بخش از بزرگ تاقدیس انارک، میزان کوتاه شدگی بیشتر از یال جنوبی بزرگ تاقدیس است. به طوری که شیب طبقات در برخی قسمتها افزایش یافته و گاه به صورت عمودی مشاهده می شود (Almasian, 1997).

در ناحیه انارک، از شمال نائین تا حوالی ساغند- پشتبادام، یک مجموعه شیستی تیرهرنگ برونزد دارد، که مشتمل بر فیلیتهای گرافیتی، کوارتزیت، سنگآهکهای متبلور، کلریت اپیدوتشیست، میکاشیست و پاراگنیس است. زمین شناسی پهنهٔ فلززایی انارک متأثر از زمین شنا سی ایران مرکزی ا ست. پهنههای ساختاری انارک طبق تقسیمبندی تکنواکسیورت (Technoexport, 1984) عبارتند از؛ ۱) ماسيف انارک- خور، ۲) ماسيف پشتبادام، ۳) پهنهٔ چينخورده سيمرين پسين چاهپلنگ- بياضه، ۴) پهنهٔ چينخورده آلپين پيشين بيابانک، ۵) پهنهٔ افيوليتي نائين- زوار (پهنهٔ آميزه رنگي)، ۶) پهنههاي کوهدم و قلعهسردار، ۷) فروافتادگی حوضههای فرعی آلپی پسین. ویژگیهای ساختاری در منطقه انارک تحت کنترل گسل بزرگ کویر و گسلهای پیسنگی موازی با آن است ( NogoleSadat and Almasian, 1993). گسلها نقش مهم و بارزی در ساختار تکتونیکی ناحیهٔ انارک دا شته و نقش مهمی را در جایگیری سنگهای آذرین و کا نهزایی بعدی آن ها ایفا نمودها ند ( Bagheri and Stampfli, .(2008

قدیمی ترین واحدهای سنگی منطقه انارک متعلق به سنگهای دگرگونی نئوپروتروزوئیک (قبل از ۵۴۰ میلیون سال) بوده، که در ز مان پالئوزوئیک بار ها د چار دگرگونی شده و در مزوزوئیک و سنوزوئیک، تحت تأثیر رخدادهای ماگماتیسم و فلززایی قرار گرفته است. قدیمی ترین سنگهای دگرگونه در محدوده انارک براساس سنسنجی K-Ar برروی آمفیبول و میکا حدود ۲۲۲ میلیون سال قبل تخمین زده شده (Zanchi et al., 2009)، که متشکل از شیل رسی، دولومیت و ماسه سنگ دگرگونه است. (شکل ۱).

آنجایی که ناحیهٔ کوهدم بهشدت تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی قرار گرفته است، سیستمهای گسلی به طور عمده راستالغز همراه با درزهها در این منطقه به خوبی گسترش یافته است. گسلهای اصلی منطقه در سه روند کلی دیده میشوند، که عبارتند از: سیستمهای گسلی در منطقه، با روندهای شمالغربی-جنوب شرقی، شرقی- غربی و شمالی-جنوبی نسبت به دو روند دیگر گسترش بیشتری دارند.

دگرگونی کوهدم در زیر آتشفشانهای ائوسن فوقانی و نهشتههای جوان مدفون شدهاند. برای این مجموعه دگرگونی سن پرموتریاس در e.g., Nabavi and Hushmandzadeh, ) نظر گرفته شده است ( 1983; Balini et al., 2009; Zanchi et al., 2015; Bagheri and Stampfli, 2008; Pirnia et al., 2020; Saccani et al., 2013; (Shafaii Moghadam and Stern, 2015; Ahmadi et al., 2020 این واحد دگرگونی متشکل از واحدهای متاولکانیک، فیلیت، واحدهای شیستی (شامل مسکوویت شیست، اپیدوت- هورنبلند- کالکشیست، مسکوویت- کلریتشیست، بیوتیت- گرافیت- کالکشیست) و سنگهای آهک بلورین است (شکل ۱).

جوان ترین ویژگیهای ساختاری منطقه توسط فرورفتگیهای آلپین پسین و حوضههای کمعمقی که بر روی پهنههای تکتونیکی قرار گرفتهاند، نشان داده می شود. ناپیو ستگیهای زاویهای که تو سط فازهای تکتونیکی ناحیهای ایجاد می شوند، فواصل زمانی قبل از کرتاسه تا پس از پلیوسن را دربر می گیرند.

## زمينساخت وكانهزايي محدودة بندچرك

از لحاظ وضعیت سنگشناسی محدودهٔ بند چرک، شامل واحدهای دگرگونی مجموعه کوهدم مت شکل از شیاست (م سکوویت شیاست، اپیدوت- هورنبلند- کالکشیست، مسکوویت- کلریتشیست، بیوتیت-گرافیت- کالکشیست)، مرمر و آهک بلورین به سن پالئوزوئیک بالایی e.g., Nabavi and Hushmandzadeh, 1983; Balini et al., ) 2009; Zanchi et al., 2015; Bagheri and Stampfli, 2008; Pirnia et al., 2020; Saccani et al., 2013; Shafaii است، (Moghadam and Stern, 2015; Ahmadi et al., 2020 که با روند شامی (Moghadam and Stern, 2015; Ahmadi et al., 2020

(شـکل ۲ و شـکل ۳-۵، ط و ۵). بخش زیرین این واحدهای دگرگونی، از شیستهای کلریتدار و بخش بالایی شامل فیلیت، کلریتشیست و سنگهای کربناته دگرگون شده است. این دو بخش مجموعاً را ستای شرقی-غربی و شیب ۳۰ تا ۶۰ درجه به طرف شمال داشته و در زیر سـنگهای آهکی کرتاسـه بالایی قرار گرفتهاند. مرز این دو واحد به صورت دگرشیبی زاویهدار است. واحدهای دگرگونه پالئوزوئیک بالایی علاوه بر کوهدم بلندیهای کوهسـتان گرگاب واقع در شـمالغربی کوهدم را نیز تشکیل میدهند، که بخش زیادی از حاشیه جنوبی این

برا ساس مشاهدات صحرایی در شیستهای منطقه شواهدی از چین خوردگی و شیستوزیته قابل مشاهده است، که در میان این واحدهای سنگی، رگههای تأخیری کوارتز به فراوانی وجود دارد (شکل a-۴ و c). ترکیب سنگ دگرگونی اصلی در این مجموعه، شامل م سكوويت شيرست، اييدوت- هورنبلند- كالك شيرست، م سكوويت-کلریت شیست، بیوتیت- گرافیت- کالک شیست، به همراه عدسیهای کوار تزی است، که به دلیل مقاومت بالای کوار تز در مقابل فرسایش، واریزههای زیادی از کانی کوارتز در سطح این شیستها دیده می شود و باعث شده است تا ظاهری سفید رنگ به این واحد دگرگونی بدهد ( شکل b،a-۴ و c). بعد از این واحد، سنگ آهکهای به سن کرتا سه زیرین قدیمی ترین واحد می با شند که عمدتاً در بخش شمالی و مرکز محدوده بندچرک دیده می شوند و بر روی سنگهای دگرگونی مجموعه کوهدم قرار گرفتهاند (شـکل ۴-d و e). آهکهای دگرگون شده چینخوردگی شدید را تحمل کرده و تحت تأثیر تنشهای تکتونیکی به اسلیت آهکی تبدیل شدهاند. سنگهای میزبان اصلی دربر گیرندهٔ کانهزایی گرافیت در محدودهٔ بندچرک، شامل واحدهای بیوتیت شیست و به مقدار کمتر واحدهای مسکوویت شیست هستند. فعالیتهای تکتونیکی باعث ایجاد شیستوزیته و جهتیافتگی در ريزبلورهای گرافیت شده است. فعالیتهای تکتونیکی، کنترلکننده ساختارهای منطقه از قبیل چین خوردگی و گسلها، به صورت پلاستیکی و یا شکنا، بوده است. در ادامه تأثیر فعالیتهای تکتونیکی

کانهزایی عمده در محدودهٔ بندچرک به صورت تشکیل گرافیت همراه با سایر کانیهای ورقهای، در فضای بین شیستوزیتهٔ تشکیل شده است. کانهزایی هماتیت نیز در امتداد فضای شکستگیها و نیز به صورت پراکنده در متن سنگ مشاهده میشود ( Ghasemi Siani et مورت پراکنده در متن سنگ مشاهده میشود ( al., 2024) شمال شرقی محدوده رخنمون گرافیت در محدودهٔ بندچرک، در مسورت رخنمونهای پرعیاری از لایهها و عدسیهای چین خورده و نامنظم کانسنگ گرافیتی، درون واحد گرافیت- مسکوویت شیست دگرسان شده مشاهده می شود.

بر روی هر یک از واحدهای زمین شناسی به صورت مختصر شرح داده شده است. سنگهای آتشفشانی آندزیتی، آندزیت بازالتی و توفها به سن ائو سن نیز در حجم زیادی بخش شمالی محدوده بندچرک را در بر گرفتهاند. تودههای نفوذی کوچکی با دگرسانی شدید با ترکیب دیوریتی نیز با مرز گسلی بر روی سنگهای دگرگونی محدوده بندچرک قرار گرفتهاند. نهشت تههای کنگلومرایی و مارنی عمده ترین سنگهای به سن پالئو سن در محدوده بندچرک هستند، که حا صل چر خههای فرسایشی ر خداد لارامید می باشیند. به طور عمده نه شتههای کنگلومرایی و ما سه سنگی ا ست که بطور دگر شیب و گاه هم شیب، سنگهای کهن تر مانند شیستهای مجموعه دگرگونی کوه دم به سن پالئوزوئیک را می پوشانند.



شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدودهٔ اکتشافی بند چرک (با تغییرات از شار کووسکی و همکاران (Sharkovski et al., 1981). Fig. 2. Simplified geological map of the Band-e-Cherk exploration district (with modifications from Sharkovski et al., 1981).

بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...



شــکل ۳- حضـور گســتردهٔ واحدهای دگرگونی شــیســتی مجموعهٔ دگرگونی کوهدم در محدودهٔ بندچرک. a) ترانشــه حفر شــده بر روی شــیســتهای میزبان گرافیت:[ایی؛ b] رخنمون واحد مسکوویتشیست، و c) رخنمون واحد گرافیت-مسکوویتشیست. (a) Widespread presence of schist metamorphic units of the Kub o Dom metamorphic complex in the Band o Chark district

Fig. 3. Widespread presence of schist metamorphic units of the Kuh-e-Dom metamorphic complex in the Band-e-Cherk district. a) Exploration trench on schists hosting graphitization; b) outcrop of muscovite schist and c) outcrop of graphite-muscovite schist.

تهیه شد. نمونهها بعد از تهیه، در آزمایشگاه کانی شناسی نوری دانشگاه خوارزمی تهران و مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (IMPRC) تو سط میکرو سکوپ زایس (ZEISS) مدل 2 Axioplan مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روشها

قاسمی سیانی و همکاران



شکل ۴ – a، d و c) ت شکیل عد سیها و رگچههای کوارتزی در داخل سنگهای دگرگونی؛ d و e) رخنمون سنگآهکهای بلورین مربوط به مجموعه دگرگونی کوهدم در بخش غربی محدودهٔ بندچرک؛ f) همبری شیست حاوی گرافیت با مارن و سنگآهک، و g: واحدهای شیستی دگر سان شدهٔ در بخش زیرین واحدهای مارنی.

Fig. 4. a, b and c) The formation of quartz lenses and veinlets within the metamorphic rocks; d and e) Outcrop of crystalline limestone associated with the Kuh-e-Dom metamorphic complex in the western part of the Band-e-Cherk district; f) Contact of shale with marl and limestone; and g) Altered schist in the lower part of the marl.

# نتایج و بحث ساختار و دگرشکلی

مطالعات ساختاری انجام شده در محدودهٔ بندچرک در واحدهای رخنمونیافته، نشاندهندهٔ تأثیر فازهای متعدد شدید دگرریختی در محدوده است، به طوری که توالیهای سنگی رخنمونیافته در محدوده، تحتتأثیر این فازها، نظم و ترتیب اولیه خود را از دست داده و واحدهای لیتولوژیکی مختلف با ساختارها و فابریکهای متفاوتی را به وجود آورده است. نوع و شدت دگرشکلی ایجادشده یکسان نبوده و انواع دگر شکلیهای شکلپذیر و شکنا همراه با واحدهای لیتولوژیکی مختلف با ساختارها و فابریکهای متنوعی را ایجاد نموده است. مهم منتلف با ساختارها و فابریکهای متنوعی را ایجاد نموده است. مهم مختلف با ساختارها و فابریکهای متنوعی را ایجاد نموده است. مهم یرین دگرشکلی شکل پذیر است، که آثار آن به صورت میلونیتیشدن پهنههای بُر شی در سنگها تظاهر نموده است. در محدودهٔ بندچرک، علاوه بر دگر شکلی شکل پذیر، دگر شکلی شکنا نیز گسترش دارد که آثار آن به صورت تشکیل شکستگیها و رگههای کوارتزی تأخیری قطع کنندهٔ واحدهای شیستی مشاهده میشود.

سنگهای دگرگونی شیستی پایین ترین بخش توالی دگرگونی ناحیهای در محدودهٔ مورد مطالعه هستند. این سنگها تا رخسارهٔ شیست سبز دگرگون شدهاند. قاسمی سیانی و همکاران ( Ghasemi شیست سبز دگرگون شدهاند. قاسمی سیانی و همکاران ( Siani et al., 2024 گرافیتی شدن در واحدهای میزبان شیستی محدودهٔ بندچرک را حدود ۴۳۶ درجه سانتی گراد تخمین زدند و آن را معادل شرایط دمایی رخسارهٔ دگرگونی شیست سبز در نظر گرفتند. سنگهای دگرگونی رخسارهٔ دگرگونی شیست سبز در نظر گرفتند. سنگهای دگرگونی رخنمون بسیار خوبی از گسلها در افق سنگآهکی به سن کرتا سه زیرین در بخش شمال شرقی محدوده قابل م شاهده ا ست. واحدهای شیستی محدودهٔ مورد مطالعه تحت تأثیر سه فاز اصلی چین خوردگی و دگرریختی قرار گرف تما ند. فاز اول چین خوردگی در طی دگرگونی

حر کات تکتونیکی در محدوده است قرار گرفتهاند. در واحدهای شیستی محدودهٔ بندچرک، بر گوار گی اغلب قبل از S1 نیز مشاهده می شود (S0) که تشکیل آن توسط اولین مرحله دگرگونی (M1) قبل از اولین مرحله دگر شکلی (D1) به صورت ایستا رخ داده و استرس و یا نیروهای جانبی دخالت نداشتهاند. چینهای این مرحله از دگرشکلی در محدودهٔ بندچرک مشاهده نشده است. چینهای این مرحله اغلب بسته تا یال موازی یا سطح محوری تقریباً افقی ه ستند و روند محور آنها راستای غالب شمالشرقی- جنوبغربی دارد (شکل a-۵). برگوارگی این نسل غالب بوده و از نوع برگوارگی سطح محوری و در مناطقی از نوع برگوارگی میلونیتی است. دگرگونی نسل اول (D1) ناشی از دگرگونی ناحیهای بوده و باعث تشکیل چینهای نسل اول (F1) و ایجاد بر گوارگی نسل اول (S1) به موازات سطح محوری این چینها شده است. سطوح S1 برگوارگی باعث جهتیافتگی کانیهای میکایی در واحدهای شیستی شده است. جهتیافتگی کانیهای صفحهای، مانند کلریت، مسکوویت و بیوتیت در برخی نمونهها باعث ایجاد شیستوزیته شده است. طبیعی است که این برگوارگی در بخشهایی نظیر یالهای چین، موازی با لایهبندی و در بخشهایی نیز آن را قطع کند. بررسیهای انجام شده نشاندهندهٔ ارتباط مکانی و زمانی دگر شکلی با دگر سانی ا ست. این مرحله از دگر شکلی (D1) در نهایت کانهزایی در امتداد برگوارگی را تشــکیل میدهد. نسـل دوم دگرگونی (M2) به صورت دگرگونی مجاورتی در اطراف تودهٔ نفوذی مشاهده می شود، که زمان وقوع این فرآیندها متفاوت و در ارتباط با نفوذ تودهٔ دیوریتی است. نفوذ تودهٔ دیوریتی تغییرات چشـمگیری در شیب و امتداد لایه های آهکی و نیز مورفولوژی منطقه ایجاد کرده است. هنگامی که حرارت منطقه زیاد بوده، تودهٔ نفوذی کوچکی با ترکیب دیوریتی به درون مجموعههای سنگی نفوذ کرده و در اطراف خود هاله دگرگونی مجاورتی ایجاد کرده است. زمان نسبی نفوذ این توده بین دگرشکلی اول (D1) و دوم (D2) است. رویداد دگرشکلی نسل دوم (D2) شدیدترین دگر شکلی منطقه محسوب می شود که باعث تشکیل چینهای نسل دوم (F2) و برگوارگی نسل دوم (S2)، با h و g،f و h). همچنین، واحدهای شیسیتی تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی (D3) به شـدت خرد و درزهدار شـده و بلورهای کوارتز و آلکالی فلدسپار بافت مضرسی یا دندانهای و ساب گرین شد گی را نشان میدهند (شــکل *۶*-a و b). درجهٔ دگرشــکلی در یک پهنهٔ بُرشــی شکلیذیر، از حاشیهها به طرف مرکز پهنه بُرشی، افزایش شدیدی نشان می دهد (Zhou et al., 1991). هرچند در پهنهٔ بُر شی محدودهٔ بندچرک، این حالت به وضوح مشاهده نمی شود، اما شدت دگر شکلی کم و بیش از خارج یهنه به ســمت داخل، در راســتای عمود بر یهنهٔ بُرشی افزایش می یابد. در طی دگر گونی دینامیک (M3) نقش فشار به مراتب بیش از حرارت بوده است. نیروهای تکتونیکی باعث شده تا بلورهای سالم کوارتز در برابر این نیروها دارای خامو شی موجی شده، سپس با تمدید فشار وارده، دگرریختی شکنا (Brittle deformation) یا خردشدگی، دانهریز شدن بلور و تبدیل آن به بلورهای کوچکتر، دنبال شده و بافت ساروجی یا مضر سی را در سنگ پدید آورده است e.g., Stipp and Kunze, 2008; Ghosh et al., 2013). بافت مضرسی نشاندهندهٔ مهاجرت مرز دانهها است ( Passchier and (Trouw, 2005

را ستای ۵۰ تا ۶۰ و شیب ۶۰ تا ۸۰ درجه به سمت شمال غربی در واحدهای شیستی شده است. رخداد گسلههای معکوس را ستگرد و امتدادلغز به ترتیب با روند شرقی- غربی و شمالغربی- جنوب شرقی باعث تغییر در روند سطوح شیستوزیتهٔ S1 و S2 شده است. یکی از مهمترین آثار این مرحله از دگرشـکلی، میلونیتیشـدن سـنگهای منطقه است، که پهنههای بر شی شکلپذیر را در یال چینها تشکیل داده است. این مرحله از دگرشیکلی (D2) کانهزایی تودهای و عدسی شکل را در واحدهای شیستی مجاور تودهٔ دیوریتی پدید آورده است. فاز کانهزایی گرافیت را در محدودهٔ بندچرک تشکیل میدهد (شــكل b -۵ و d). دگرشـكلى مرحلة سـوم (D3) جوانترين دگر شکلی موجود در منطقه است که ساختارهای اصلی از آن بیشتر در مقیاس رخنمون دیده شده و سبب شکل گیری مورفولوژی کنونی منطقه شده است. فاز سوم و پایانی چینخوردگی (F3) و دگر شکلی (D3) در محدودهٔ مورد مطالعه به صورت ایجاد ساختاری های کینکباند (Kink band) در واحدهای مسکوویت شیست واقع در بخش غربی محدودهٔ بندچرک شده است. در ایجاد این فاز دگر شکلی و چین خوردگی، نقش فشارهای جهتدار بارز بوده است (شکل a-- e)، بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...

قاسمی سیانی و همکاران



شکل ۵- ۵) در اثر عملکرد نیروهای دینامیکی در واحدهای شیستی محدودهٔ بندچرک، چینهای نسل اول (F1) ایجاد شدهاند. سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) عمود است، b، c و b) تأثیر فاز دوم دگرشکلی (D2) باعث تغییر در سطوح برگوارگی نسل اول (S1) و نیز تشکیل چینهای نسل دوم (F2) شده است. سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) عمود است، و b، g ، f، g ، h چینخوردگی (F3) و دگر شکلی (D3)، موجب ایجاد ساختاریهای کینکباند در واحدهای مسکوویت شیست شده است. در این ساختارها، سطح محوری چین خوردگی نسل سوم (AF3) بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) عمود است. علائم اختصاری: S1 برگوارگی نسل اول، F1: چینخورگی نسل اول، AF2: سطح محوری چین محوره چینخوردگی نسل سوم (AF3) بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) عمود است. علائم اختصاری: S1 برگوارگی نسل اول، F1: چینخورگی نسل اول، AF2: سطح

Fig. 5. a) As a result of the action of dynamic forces in the tectonic units of the Band-e-Cherk district, first generation folds (F1) have been formed. The axial plane of the second generation folding (AF2) is perpendicular to the planes of the first generation (S1). b, c and d) The effect of the second deformation phase (D2) has caused a change in the plane of the first generation folds (S1) and the formation of the second generation folds (F2). The axial plane of the second generation fold (AF2) is perpendicular to the planes of the first generation (S1). e, f, g and h) The third phase of folding (F3) and deformation (D3) has created kink band structures in the Muscovite schist units. In these structures, the axial plane of the third generation fold (AF3) is perpendicular to the planes of the first generation (S1). Abbreviations: S1: first generation foliation, F1: first generation folding, AF2: second generation folding axial plane, AF3: third generation folding axial plane.



شکل ۶- a) دگرشکلی سبب مهاجرت مرز دانهای و تشکیل سابگرینشدگی در کانی کوارتز شدهاند؛ b) تبلور مجدد و ایجاد حاشیهٔ مضرسی در کوارتز. نیروهای تکتونیکی باعث ایجاد سابگرین شدگی و حاشیه مضر سی در کانیهای کوارتز شدهاند. تصاویر در نور عبوری هستند. علایم اختصاری شامل Qtz: کوارتز، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Afs: آلکالیفلدسپار، Ms: مسکوویت، Op: کانی کدر.

Fig. 6. a) Tectonic forces have caused subgraining in quartz mineral; b) Recrystallization and formation of a jagged edge in quartz. Tectonic forces have caused subgraining and jagged edge in quartz minerals. The images were taken in transmitted light. Abbreviations are Qtz: quartz, Afs: alkali feldspar, Ms: muscovite, Op: opaque mineral.

تبلور مجدد

وجود سه نوع مکانیسم دگرریختی را میتوان بر مبنای افزایش حرارت و کاهش تنش (شامل برآ مدگی، تبلور مجدد با چرخش ساب گرین و تبلور مجدد همراه با مهاجرت مرزدانه)، برای ایجاد تبلور مجدد در کوارتزهای موجود در لیتولوژیهای محدودهٔ بند چرک، در e.g., Shigematsu, 1999; Koehn et al., 2000, 100 نظر گر فت ( ,2003; Stipp et al., 2002).

BLG: Low-temperature grain ) تبلور مجدد با برآمدگی (boundary migration or bulging): در محدودهٔ مورد مطالعه، بخشهای برآمده کوارتز از بخش اصلی مستقل شده و بلورهای مستقل کوارتز کوچک دارای مرزهای م شخص در داخل آن م شاهده شدهاند e.g., Heidelbach et al., 2000; Lloyd, 2000, 2004; Stipp ) et al., 2002; de Ronde et al., 2004, 2005; Holyoke and de al., 2006; Terry and Heidebach, 2006 (mکل γ- a و d). Tullis, 2006; Terry and Heidebach, 2006 تبلور با روش BLG اغلب در حاشیهٔ بلورهای قدیمی همچنین در محل اتصالهای سه گانه بلورها مشاهده می شود. باقیمانده های

۲) تبلور مجدد همراه با چرخش سابگرین ( sGR: Subgrain) تین مرحله در نتیجه رشد یک بلور جدید در اثر از دست دادن جهتیافتگی تدریجی همراه با چرخش بلور سابگرین، ایجاد شده و بلورهای قدیمی به وسیلهٔ سابگرینها و e.g., de Bresser et مده و بلورهای قدیمی به وسیلهٔ سابگرینها و شبکهٔ بلورهای جدید، کاملاً جایگزین شدهاند ( lirich et al., 2002; Passchier and Trouw, 2005; al., 2002; Ulrich et al., 2002; Passchier and Trouw, 2005; ورجه (Bestmann and Prior, 2003; Barnhoorn et al., 2004 مرحله از تبلور مجدد، با دمای تشکیل گرافیت در حدود ۴۳۶ درجه سانتی گراد (معادل رخ سارهٔ دگرگونی شیست سبز) بد ست آمده از طریق مطالعات طیفسنجی رامان شیستهای گرافیتدار محدودهٔ بندچرک توسط قاسمی سیانی و همکاران ( , Ghasemi Siani et al. ( معادل د. تبلور مجدد همراه با چرخش سابگرین

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-21 ]

(SGR) در واقع مراحل میانی فرآیند تنش و دگرشکلی در حرارتهای بالا و به صورت شکل پذیر (Ductile) در بلورهای کوار تز اتفاق افتاده است (شکل c – ۷).



شــکل a − Y و b) تطابق ســاب گرینشــدگی همراه با تبلور مجدد با برآمدگی (BLG) در کوارتز، و c) تطابق تشــکیل رگچهٔ چندبلوری کوارتز در نتیجهٔ تبلور دینامیکی از نوع SGR در را ستای جهتیافتگی و مطابق با دمای تر شکیل گرافیت در محدودهٔ بندچرک. تر صاویر در نور عبوری ه ستند. علایم اختر صاری شامل Qtz: كوارتز، Afs: آلكالىفلدسپار، Ms: مسكوويت، Gr: گرافيت، Op: كانى كدر.

Fig. 7. a and b) Correspondence of subgraining with bulge recrystallization (BLG) in quartz, and c) Correspondence of formation of polycrystalline quartz vein as a result of dynamic crystallization of the SGR type in the direction of orientation and in accordance with the formation temperature of graphite in the Band-e-Cherk district. Photographs were taken in transmitted light. Abbreviations are Qtz: quartz, Afs: alkali feldspar, Ms: muscovite, Gr: graphite, Op: opaque mineral.

ر

تفاوت در ضخامت لایهبندی کوارتز-فلدسپاتی که در جهت عمود بر امتداد لایهبندی مشاهده میشود (شکل ۸–b)؛ ۳) تفاوت در ترکیب و اندازه دانهها در لایهبندی (شکل ۸–c و b)؛ به گونهای که لایهبندی متناوب کوارتز-فلدسپاتی و گرافیتی چینخورده S1 موازی با S0 به صورت برگوارگی اولیه افقی، به همراه برگوارگی فاصلهدار S2 به صورت برگوارگی ثانویهٔ تقریباً عمودی، در تناوب لایههای گرافیتی (تیره) و کوارتز-فلدسپاتی (روشن) گسترش یافته است (شکل ۸–۵، d و c). در این مرحله، سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) عمود است. برگوارگی نسل دوم (AF2) نیز منطبق و همروند با سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) ایجاد شده است (شکل ۸– ۵)؛ ۴) شنا سایی لایهبندی صفحهای در مقاطع مورد مطالعه (شکل ۸– ۵)؛ است.

#### برگوارگی ثانویه

برگوارگیهای ثانویه در محدودهٔ بند چرک در پاسخ به دگرریختی دائمی در سنگ گسترش یافته است ( ;Siddans, 1972; Skrotzki, 1994; Williams et Wood, 1974; Means, 1977; Skrotzki, 1994; Williams et مورد (محدودهٔ مورد al., 2001; Fueten et al., 2002) مطالعه گسترش زیادی دارد. شواهد برگوارگی ثانویه در محدودهٔ مورد مطالعه، شامل: ۱) از بین رفتن ساختهای رسوبی اولیه (اعم از

دا نه بندی و نوار بندی لایگون) از قبل موجود؛ ۲) عدم تغییر در ضـخامت لایهها و وجود تناوب کانیشـناسـی در لایهبندی (تناوبی از لایههای رو شن کوارتز-فلد سپاتی و لایههای تیرهٔ گرافیت) ( شکل ۸e)؛ ۳) ایجاد حالت عدسی شیکل و تافته (anastomosing) در لایهبندی متشکل از تجمعات بلوری کوارتز-فلدسیاتی (شکل f-۸) است. در جریان رخداد دگرریختی شکلیذیر همگنی که محدودهٔ مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده، بلور های مسلکویت و کوارتز-فلد سیات، که با جهتیابی متفاوتی در سنگ حضور داشتند، ترجیحاً به یک روند غالب تغییر خواهند کرد. این جهت یافتگی غالب به وجود آمده، صفحه XY را در بیضوی نهایی کرنش مشخص خواهد کرد (Jeffery, 1922; March, 1932) (شکل ۵-۸ تا ۵). این حالت برای دانههای کشیده و طویل شده سنگ، مانند مسکوویت نیز صادق است (e.g., Wood and Oertel, 1980). در واحدهای شیاستی محدودهٔ مورد مطالعه، قرار گیری دانههای طویل شده (کوار تز-فلدسیات) و صفحهای (مسکوویت) در جهات مختلف در یک پهنهٔ بُرشی فاصلهدار، چرخش آنها در این پهنههای بُرشی باعث ایجاد یک بر گوارگی همگن فاصلهدار در سنگ اولیه شده است (Wilson, 1984) (شکل e-۸ و f). بلورهای مسکوویت تقریباً موازی هم و با فاصله کم در پهنهٔ بُر شی قرار مي گيرند (Wilson, 1984).

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-21 ]

بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...

قاسمی سیانی و همکاران



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از رخداد برگوارگی و چینخوردگی در محدودهٔ بندچرک. a و b) لایهبندی چینخورده S1 (برگوارگی اولیه به صورت افقی) موازی با S0 به همراه برگوارگی فاصلهدار S2 (برگوارگی ثانویه به صورت تقریباً عمودی) که در تناوب لایهای گرافیتی (تیره) و کوارتز-فلدسپاتی (روشن) گسترش پیدا کرده است. سطح محوری چینهای نسل اول (AF1) همروند با برگوارگی نسل اول (S1) مشاهده می شود. سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) عمود بر سطوح برگوارگی نسل اول (S1) قابل مشاهده است، c b) سطح محوری چینهای نسل اول (AF1) همروند با برگوارگی نسل اول (S1) متشکل از تناوب لایههای گرافیت و کوارتز- فلدسپاتی ایجاد شده است. z b) سطح محوری چینهای نسل اول (AF1) همروند با برگوارگی نسل اول (S1) متشکل از تناوب است، e f) برگوارگی نسل اول (S1) قابل مشاهده است. z b) سطح محوری چینهای نسل اول (AF1) همروند با برگوارگی نسل اول (S1) متشکل از تناوب لایههای گرافیت و کوارتز- فلدسپاتی ایجاد شده است. برگوارگی نسل دوم (S2) نیز منطبق و همروند با سطح محوری چینخوردگی نسل دوم (AF2) ایجاد شده است، e f) برگوارگی ثانویه (S2) که از جدایش کانیهای کوارتز-فلدسپاتی و گرافیت در یال کنگرهها به وجود آمده، به حالت افقی مشاهده می شود. در این برگوارگی S1 موازی S1 است. لایهبندی متناوب کوارتز-فلدسپاتی و گرافیت در یال کنگرهها به وجود آمده، به حالت افقی مشاهده می شود. در این برگوارگی S1 موازی S1 است. لایهبندی متناوب کوارتز-فلدسپاتی و گرافیت در یال کنگره به و جود آمده، به حالت افقی مشاهده می شود. در این برگوارگی S1 موازی S1 است. لایهبندی متناوب کوارتز-فلدسپاتی و گرافیت در یال کنگره به و جود آمده، به حالت افقی مشاهده می شود. در این برگوارگی S1 موازی S1 است. لایهبندی متناوب کوارتز-فلد سپاتی و گرافیت در یال کنگره او یکنواخت دارد که به صورت موزون در صفحات افقی مسکوویت، Afs: آلکالی فلدسپار، ترکیب و اندازهٔ دانه ها در لایهها متفاوت است. تصاویر در نور عبوری هستند. علایم اختصاری (Gr:

Fig. 8. Microscopic images of the occurrence of foliation and folding in the Band-e-Cherk district. a and b) Folded layering S0 (horizontal primary foliation) along with S2 spaced foliation (almost vertical secondary foliation) which is extended in alternating graphite (dark) and quartz-feldspar (light) layers. The axial plane of the first generation fold (AF1) is observed together with the first generation foliation (S1). The axial plane of the second generation of folds (AF2) is visible perpendicular to the foliation planes of the first generation (S1), c and d) The axial plane of the first generation fold (AF1) coincides with the first generation foliation (S1), which consists of alternating layers of graphite and quartz-feldspar. The second generation foliation (S2) also coincides with the

axial plane of the second generation fold (AF2). e and f) The secondary foliation (S2) in the studied area, which was created from the separation of quartz-feldspar and graphite minerals on the edge of congresses, is observed horizontally. In this foliation, S1 is parallel to S0. Alternating layering of quartz-feldspar and secondary graphite (S2) has the same and uniform state, which is harmonic in horizontal planes. Alternating layering of quartz-feldspar and secondary graphite (S2) has the same and uniform state, which is balanced in horizontal planes. In these images, the composition and size of the grains are different in the layers. Microscopic images were taken in transmitted light. Abbreviations (Gr: graphite, Qtz: quartz, Ms: muscovite, Afs: alkali feldspar, Ep: epidote).

و باندهای تیرهٔ کربن آلی) در واحدهای شیستی مشاهده می شود (شکل c – ۹). کانهزایی در امتداد برگوارگی تا پهنههای برشی تشکیل ساختارهای ماهیگون (Mica fish) در سنگهای شیستی میلونیتی شدهٔ موجود در محدودهٔ مورد مطالعه به خوبی میتوان ماهیگون و فابریک C-S را در بلور کوارتز و آلکالیفلدسـپار مشـاهده کرد. در این فابریک، سـطوح C فولیاسـیون میلونیتی و جهت بر گوارگی را نشان میدهد و سطوح S فولیاسیون e.g., Passchier and Trouw, 2005; ) مورب را شــکل می دهند ( Mukherjee, 2011; Mukherjee and Koyi, 2010; Barker, 2013). لامينه هاي كوارتز- فلدس پاتي واقع در درون واحدهاي شيستي، همرونده با برگوارگي قرار گرفته و در مرحلهٔ چينخوردگي، آلکالی فلدســــپار و کوارتز در امتداد برگوارگی و همروند با آن ها چین خوردهاند (شـکل ۱۰ - a و b). در مقاطع تهیه شـده از واحدهای شییسیتی میزبان گرافیتزایی در محدودهٔ مورد مطالعه، مشیاهده می شـود که پورفیروبلاسـتهای کوارتز و آلکالی فلدسـیار سـطوح C و بلورهای آلکالیفلدسیار و کوارتز فابریک S را می سازند (شکل ۱۰–a و b). ساختارهای ماهیگون مورد مطالعه در سنگهای شیستی میزبان

b). ساختارهای ماهیگون مورد مطالعه در سنگهای شیستی میزبان گرافیتزایی، مشتمل بر بلورهای آلکالیفلدسپار و کوارتز هستند و براساس مورفولوژیهای ارائهشده در (شکل ۱۱) از نوع ۱، ۴ و ۵ هستند (شکل ۱۰ –۵ و b). پهنههای بُرشی شکل پذیر

کینکباند (Kink band) در پهنههای برشی

دگرریختی در پهنهٔ بُرشیے محدودهٔ بندچرک، عمدتاً به صورت شکل پذیر رخ دادہ است. تجمعات بلوری نواری شکل کوار تز-فلدسیاتی موجود در واحدهای شیسیتی محدودهٔ بندچرک، پدیده دگرریختی شــکلیذیر را به صـورت وجود کینکباند به نمایش می گذارد. در این محدوده، کینکباند معمولاً به صورت چینهایی با مقیاس کوچک و و یالهای تخت و هموار و با طولهای نابرابر رخ میدهد. سینگ در اثر اعمال تنش (دگرریختی شـکلیذیر) با کوتاهشـدن طول و در برخی موارد با ایجاد یالهای کوتاه کینکباند، اثر تنش وارده را خنثی کرده و با این دگرریختی سازش پیدا می کند ( e.g., Rosenberg and Stunitz, 2003; Frash et al., 2019). تنش هاى تكتونيكي باعث ایجاد خمش (کینک) در نوارهای کوارتز-فلدسپاتی شده است ( شکل a-۹). دگرریختی شکل پذیر، بی شتر به صورت خمیدگی در نوارهای کوار تز-فلدســیاتی دیده میشـود که در برخی مواقع تا ۴۵ درجه نیز پیش می رود ( شکل b - ۹). درزههای کششی در مجموعهای به شکل یلکانی تشکیل می شوند. در یهنههای گسلی شکنای محدودهٔ بندچرک، در اثر اعمال نیروهای کششی، رگچههای کوارتز-فلدسیاتی موجود در واحدهای شیستی دگرسان شده، به موازات جهت بیش ترین کشیدگی باز شده و به قطعاتی با ساختار اناشلون (En-echlon) تقسیم شدهاند (شکل c -۹). ساختار پلکانی در محدودهٔ بندچرک گرافیتزایی به صورت نوارها (تشکیل باندهای روشن کوارتز-فلدسیاتی

بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...

قاسمی سیانی و همکاران



شکل ۹– a) ایجاد کینکباند و خمیدگی در نوارهای روشن کوارتز-فلدسپاتی و نوارهای تیرهٔ کربن در اثر تنشهای تکتونیکی؛ b) دگرریختی شکلپذیر شدید در شیست، تناوب نوارهای روشن کوارتز-فلدسپاتی و نوارهای تیرهٔ گرافیت؛ c) ساختار ان-اشلون در نوارها و رگچههای کوارتز-فلدسپاتی و کربنی، در اثر اعمال تنش (که با پیکان نشان داده شده است)، این نوارها دچار دگرریختی شدهاند. خطچینها محدودهٔ ان-ا شلون را مشخص میکنند. تصاویر نور عبوری هستند. علایم اختصاری (Qtz: کوارتز، Afs: آلکالیفلدسپار، Gr؛ گرافیت، Ms: مسکوویت، Ser: سریسیت، P): کانی کدر).

Fig. 9. a) The formation of kink band and bending in the quartz-feldspar bright bands and dark bands of carbon as a result of tectonic stresses; b) Strong plastic deformation in the schist, alternation of the quartz-feldspar bright bands and dark bands of graphite; c) The en-echelon structure in the bands and veinlets of quartz-feldspar and carbon, due to the application of stress (shown by the yellow arrow), these bands have been deformed. Dashed lines mark the en-echelon range. Images were taken in transmitted light. Abbreviations (Qtz: quartz, Afs: alkali feldspar, Gr: graphite, Ms: muscovite, Ser: sericite, Op: opaque mineral).

بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...



شکل ۱۰- a و b) ساختار ماهیگون تشکیل شده در شیستهای میلونیتی، بر ا ساس تن گروتنهو (Ten Grotenhui, 2003)، از نوع (۱)، (۴) و (۵) ا ست (نور عبوری). علایم اختصاری (Qtz: کوارتز، Chl: کلریت، Afs: آلکالیفلدسپار، Ser: سریسیت، Gr: گرافیت).

Fig. 10. a and b) According to Ten Grotenhui (2003), the mica structure in mylonitic schists are (1), (4) and (5) (transmitted light). Abbreviations (Qtz: quartz, Chl: chlorite, Afs: alkali feldspar, Ser: sericite, Gr: graphite).



شکل ۱۱– a) تصویر شماتیک در ارتباط با فولیاسیون میلونیتی (C) و فولیاسیون مورب (S) (Ten Grotenhui, 2003)، و b) انواع مورفولوژیهای مربوط به ساختار ماهیگون (Ten Grotenhui, 2003).

Fig. 11. a) Schematic image related to mylonitic foliation (C) and oblique foliation (S) (Ten Grotenhui, 2003), and b) types of morphologies related to Mica fish (Ten Grotenhui, 2003).

#### ميلونيتىشدن

میلونیت در پهنه های برشی با کرنش بالا که با نام پهنه های میلونیتی شناخته می شوند، تشکیل می شود ( Passchier and Trouw, 2005). میلونیت های بیشتر با دگرریختی شکل پذیر ایجاد می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند می شوند و معمولاً باز تبلور قابل توجهی در زمینهٔ نشان می دهند این سیگموئید و ماهیگون است.

معمولاً علائمی مانند تغییر شکل داخلی و تبلور مجدد در سرتاسر دانه را نشان میدهند (Passchier and Trouw, 2005). از پدیدههای قابل توجه در مقاطع میکروسکوپی مربوط به واحدهای شیستی محدودهٔ بندچرک، وجود ساختار میلونیتی به صورت پروتومیلونیت است (شکل ۱۲). ساختار پروتومیلونیت به صورت حضور قطعات درشت باقیمانده از کلسیت، کوارتز، فلدسپار و پلاژیوکلاز سنگ آذرین یا ر سوبی اولیه در میان قطعات ریزتر از کانیهای مذکور ا ست (شکل ۱۲–۵ تا d). وجود دو نوع دانهبندی پورفیروکلاست و زمینهٔ

ریزبلور از مشخصه واحدهای دگرشکلشدهٔ محدوده در مقیاس میکروسکوپی بوده و بیانکنندهٔ دگرشکلی متفاوت در سراسر پهنهٔ بُر شی است. تمرکز و تراکم کانیهای کدر که بیشتر شامل گرافیت و کمی هماتیت و پیریت است، که در بین بخشهای میلونیتیشده واحدهای شیستی مورد مطالعه، بالاست.

دگرریختی شکنا در میلونیت نقش ضعیفی دارد زیرا تنش اعمالی به صورت دگرریختی بلور-پلاستیک عمل میکند ( ,Tullis et al میکند ( ,1978; Bell and Etheridge, 1973; Hobbs et al., 1976; 1982; Bell and Etheridge, 1973; Hobbs et al., 1976; Hanmer and Passchier, 1991; Treagus and Lan, 2003, 2004 میلونیتی شدن می انجامد 2004 میلونیتی شدن می انجامد و ف ضاهای ایجاد شدهٔ بین دانهها، معابر منا سبی برای عبور سیالات دگرسان کننده و کانهساز هستند. فرآیندهایی که در شرایط شکنا اتفاق می افتد، در سنگهای شیستی دگرسان شده (شکل ۲۲- d و c) محدودهٔ بند چرک، در اثر نیروهای تکتونیکی اعمال شده به سنگ پس از ایجاد خاموشی موجی و ساب گرین شدگی دانههای ریزتر موجب می شود. افزایش ساب گرین شدگی و تشکیل دانههای ریزتر موجب شده ا ست تا ف ضاهای فراوانی برای تمرکز سیالات دگر سان کننده و کانهساز متعاقب آن در بخشهای حاوی ریزبلورهای کوارتز، آلکالی فلد سپار و مسکوویت، فراهم آید. از طرفی، وجود کربن با عیار (حدود Cont of the cont) (2024) ما در این از ما در از موجب کار در موجاری با عیار (حدود

در ف شردگی و خرد شدگیهای ایجاد شده در تناوب لایههای کوارتز-ف لدس پاتی (روشنن) و گرافیتی (تیره) وا حد های شیستی پروتومیلونیتی شده است، که نشاندهندهٔ نقش ویژهٔ دگر شکلی شکنا در افزایش عیار کربن در برخی بخشها است.

زانچی و همکاران (Zanchi et al., 2009)، تحولات ساختاری ناحیهٔ انارک را به عنوان نتیجه تکامل یک سیستم کمان-گودال مربوط به رویدادهای کوهزایی ائوسیمرین (پالئوزوئیک بالایی؛ ۲۲۲ میلیون سال قبل) در نظر گرفتهاند. در پی رخداد این فاز کوهزایی ائوسیمرین، پدیدههای فشردگی شدیدی که ناحیه انارک را تحت تأثیر قرار داده، موجب ایجاد دو نسل برگوارگی (S0 و S1) و چینخوردگی (F1 و F2) در واحدهای آذرین الترامافیک و واحدهای دگرگونی این کمپلکس شده است. دگرریختی در ناحیه انارک به صورت نابالغ و تکامل نیافته بوده است. دگرریختی در ناحیه انارک به صورت نابالغ و پهنهٔ دگرگونی کوهدم و محدودهٔ بندچرک (بیانشده در این تحقیق)، متأثر از رخداد مراحل پایانی فاز کوهزایی ائوسیمرین در زمان پرمین-احتمالاً ناشی از ادامه و تکامل رخداد کوهزایی ائوسیمرین در این پهنهٔ دگرگونی کوهدم است.



شکل ۱۲- ساختار پروتومیلیونیتی در واحدهای شیستی محدودهٔ بند چرک. a، b، a و d) بلورهای در شت کلسیت و کوارتز به صورت عد سیهایی با ساختار پروتومیلونیت در بین جهتیافتگی سابگرینها و تجمعات کوارتز-فلدسپاتی ریزبلور و مسکوویت قرار گرفتهاند. تصویر d، در نور عبوری طبیعی گرفته شده است. علایم اختصاری (Qtz: کوارتز، Cal؛ کلسیت).

Fig. 12. Protomylonite structure in the schist units of the Band-e-Cherk district. a, b, c and d) Coarse crystals of calcite and quartz are placed in the form of lenses with the structure of protomylonite between the orientation of subgrains and aggregates of microcrystalline quartz-feldspar and muscovite. Image d, taken in transmitted light. Abbreviations (Qtz: quartz, Cal: calcite).

## نتيجهگيرى

در محدودهٔ بندچرک، ر خداد فعالیت های تکتونیکی و دگرگونی ناحیهای با ایجاد دگرریختی در سطوح شیستوزیتهٔ حاوی مواد آلی کربندار، فضاهای مناسبی را برای گرافیتزایی و افزایش عیار کربن فراهم نموده است. از طرفی، اعمال تنش های دینامیکی (ایجاد گسلش، درزه و شکستگی)، فضاهای منا سبی را برای عبور سیالات دگر سان کننده و کانه ساز فراهم نموده است. از شواهد این دگرگونی، میتوان به ایجاد چین خوردگی و حالت مورب و چرخشی نسبت به شیستوزیته خارجی در بلورهای کوارتز، آلکالیفلدسپار و گرافیت اشاره نمود. توالیهای سنگی رخنمون یافته در محدوده، تحت تأثیر فازهای متعدد و شدید دگرریختی، نظم و ترتیب اولیه خود را از دست داده و

واحدهای لیتولوژیکی مختلف با ساختارها و فابریکهای متفاوتی را ایجاد کردهاند. دگرشکلی شکل پذیر، مهم ترین دگرشکلی به وجود آمده در محدودهٔ بندچرک است. از آثار این دگرشکلی می توان ایجاد ریزچینها، میلونیتیشدن و گسترش بر گوارگی غالب میلونیتی در سانگها اشاره نمود. در محدودهٔ بندچرک، علاوه بر دگرشکلی شکل پذیر، دگر شکلی شکنا نیز گسترش دارد، که آثار آن به صورت تشکیل ریزشکستگیها و رگههای کوارتزی در واحدهای شیستی شناسایی می شود. سه فاز اصلی چین خوردگی و دگرریختی، واحدهای شیستی محدودهٔ مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. نسل اول چین خوردگی (F1) و دگرریختی (D1)، با ایجاد برگوارگی (S1) به موازات سطح محوری چین، نقش مهمی را در تغلیظ کربن آلی

تشکیل شده در حین رسوبگذاری و ایجاد گرافیت در محدوده ایفا نموده است. این فاز دگرریختی، عمدتاً به صورت شکل پذیر و در طی رخداد دگرگونی ناحیهای رخسارهٔ شیست سبز (M1)، که اولین حرکات تکتونیکی در محدودهٔ بندچرک محسوب می شود، عمل کرده است. این نسل از دگرریختی، با ایجاد برگوارگی های اولیه و ثانویه در واحدهای شیستی شناسایی می شود. این برگوارگی ها با ایجاد تغییراتی در جهتیافتگی، ضخامت، اندازه و ترکیب کانی شناسی و نیز ایجاد فابریک عدسی شکل در لایهبندی متناوب گرافیتی (تیره) و کوارتز-فلدسپاتی (روشن) همراه هستند. مکانیسمهایی که در ایجاد این برگوارگی ها در محدوده دخالت دا شته، شامل انحلال فشاری و ر شد جهتدار می باشند.

در پی نفوذ تودهٔ دیوریتی، تغییرات چشمگیری در شیب و امتداد لایههای آهکی، شیستی و نیز مورفولوژی محدوده ایجاد شده است. میلونیتی شدن واحدهای شیستی، از جمله از مهم ترین آثار این مرحله از دگرشکلی بوده و پهنههای بُرشی شکل پذیری را در یال چینها شکل داده است. دگرریختی نسل دوم (D2) در محدودهٔ بندچرک، به

active margin. Geological Society, London, Special Publications 312(1), 287-321.

- Barker, A.J., 2013. An introduction to metamorphic textures and microstructures. Oxford University Press 289 p.
- Barnhoorn, A., Bystricky, M., Burlini, L., Kunze, K., 2004. The role of recrystallisation on the deformation behaviour of calcite rocks: large strain torsion experiments on Carrara marble. Journal of Structural Geology 26(5), 885-903.
- Bell, T. H., Etheridge, M. A., 1973. Microstructure of mylonites and their descriptive terminology. Lithos 6(4), 337-348.
- Berberian, M., King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of earth sciences 18(2), 210-265.
- Bestmann, M., Prior, D. J., 2003. Intragranular dynamic recrystallization in naturally deformed calcite marble: diffusion accommodated grain boundary sliding as a result of subgrain rotation recrystallization. Journal of Structural Geology 25(10), 1597-1613.

صورت ایجاد فابریکهایی مانند ماهیگون، تبلور مجدد، احلال فشاری، جهتیافتگی دانهها و خرددانههای جدید در بلورهای کواتز-فلدســـپار موجود در واحدهای شیستی، شناسایی می شود.

بررسی ریززمینساختی و پتروفابریکی واحدهای شیستی گرافیتدار ...

جوان ترین فاز دگرریختی در محدودهٔ بندچرک، دگرریختی نسل سوم (D3) است. این نسل از دگرریختی، سبب شکل گیری مورفولوژی کنونی محدوده شده است. در ایجاد این فاز دگرشکلی و چین خوردگی، نقش فشار همهجانبه به مراتب بیشتر از حرارت بوده است. فاز سوم و پایاانی چین خوردگی (F3) و دگرریختی (D3) در محدودهٔ مورد مطالعه، به صورت دگرریختی شکنا رخ داده است. ایجاد ساختاریهای کینکباند (در تناوب نوارهای کوارتز-فلدساپتی و گرافیتی)، حاشیهٔ مضرسی و دندانهای (در بلورهای کوارتز و فلدسپار)، ساب گرین شدگی (در بلورهای کوارتز و فلدسپار)، خاموشی موجی در کوارتز، رشد مجدد بلورهای کوارتز و فلدسار)، خاموشی موجی در کوارتز، رشد مجدد ردر بلورهای کوارتز و فلدسار)، خاموشی موجی در کوارتز، رشد مجدد در رایت-مسکوویت شامی از جمله شام مسکوویت شامی از در محدوده است.

#### References

- Ahmadi, M., Sharifi, M., Torabi, G., 2020. Paleotethys-related water-rocks interactions in gabbros of the Anarak ophiolite (Central Iran): constraints from mineralogy and geochemistry. Periodico di Mineralogia 89(2), 147-169.
- Alkan, H., Cinar, Y., Pusch, G., 2007. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44(1), 108-119.
- Almasian, M., 1997. Tectonics of Anarak Area (Central Iran), unpublished Ph.D. Thesis, University of Azad, Tehran, Iran 164 p.
- Bagheri, S., Stampfli, G. M., 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: new geological data, relationships and tectonic implications. Tectonophysics 451(1-4), 123-155.
- Balini, M., Nicora, A., Berra, F., Garzanti, E., Levera, M., Mattei, M., Mossavvari, F., 2009. The Triassic stratigraphic succession of Nakhlak (Central Iran), a record from an

Davoudzadeh, M., Emami, S., 1972. Stratigraphy of the Triassic Nakhlak Group, Anarak Region, Central Iran.

- de Bresser, J. H. P., 2002. On the mechanism of dislocation creep of calcite at high temperature: Inferences from experimentally measured pressure sensitivity and strain rate sensitivity of flow stress. Journal of Geophysical Research, Solid Earth 107(B12), ECV-4.
- de Ronde, A. A., Heilbronner, R., Stünitz, H., Tullis, J., 2004. Spatial correlation of deformation and mineral reaction in experimentally deformed plagioclase–olivine aggregates. Tectonophysics 389(1-2), 93-109.
- de Ronde, A. A., Stünitz, H., Tullis, J., Heilbronner, R., 2005. Reaction-induced weakening of plagioclase–olivine composites. Tectonophysics 409(1-4), 85-106.
- Frash, L. P., Carey, J. W., Welch, N. J., 2019. Scalable enechelon shear-fracture aperture-roughness mechanism: Theory, validation, and implications. Journal of Geophysical Research, Solid Earth 124(1), 957-977.
- Fueten, F., Robin, P. Y. F., Schweinberger, M., 2002. Finite element modelling of the evolution of pressure solution cleavage. Journal of structural geology 24(6-7), 1055-1064.
- 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.
- Ghorbani, M., 2007. Economic Geology of Mineral Deposits and Natural Resources of Iran. 1st edition, Arian Zamin Publishers 492p.
- Ghosh, D., Dutta, T., Samanta, S. K., Pal, D. C., 2013. Texture, microstructure and geochemistry of magnetite from the Banduhurang uranium mine, Singhbhum Shear Zone, India—implications for physico-chemical evolution of magnetite mineralization. Journal of the Geological Society of India 81, 101-112.
- Hanmer, S., Passchier, C.W., 1991. Shear sense indicators: a review. Geol Surv Can Pap 90, 1–71.
- Heidelbach, F., Kunze, K., Wenk, H. R., 2000. Texture analysis of a recrystallized quartzite using electron diffraction in the scanning electron microscope. Journal of Structural Geology 22(1), 91-104.
- Hobbs, B.E., Means, W.D., Williams, P.F., 1976. An Outline of Structural Geology: John Wiley and sons 571 p.

- Holyoke III, C. W., Tullis, J., 2006. Mechanisms of weak phase interconnection and the effects of phase strength contrast on fabric development. Journal of Structural Geology 28(4), 621-640.
- Jeffery, G.B., 1922. The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid. Proceedings of the Royal Society of London A102,161–179.
- Kananian, A., Ahmadian, J., Sarjoughian, F., 2008. Mineral chemistry and thermobarometry of Kuh e-Dom granitoid, NE Ardestan.
- Khalili, R., Torabi, G., 2023. Petrology of Eocene dacites and rhyolites from the Gooreh Mountain (NW of Anarak, Isfahan Province). Kharazmi Journal of Earth Sciences 8 (2), 62-93.
- Koehn, D., Bons, P. D., Passchier, C. W., 2003. Development of antitaxial strain fringes during non-coaxial deformation: an experimental study. Journal of Structural Geology 25(2), 263-275.
- Koehn, D., Hilgers, C., Bons, P. D., Passchier, C. W., 2000. Numerical simulation of fibre growth in antitaxial strain fringes. Journal of Structural Geology 22(9), 1311-1324.
- Lloyd, G. E., 2000. Grain boundary contact effects during faulting of quartzite: an SEM/EBSD analysis. Journal of Structural Geology 22(11-12), 1675-1693.
- Lloyd, G. E., 2004. Microstructural evolution in a mylonitic quartz simple shear zone: the significant roles of dauphine twinning and misorientation. Geological Society, London, Special Publications 224(1), 39-61.
- Manthei, G., 2005. Characterization of acoustic emission sources in a rock salt specimen under triaxial compression. Bulletin of the Seismological Society of America 95(5), 1674-1700.
- March, A., 1932. Mathematische Theorie der Regelung nach der Korngestalt bei affiner Deformation. Z Krist 81, 285– 297.
- Means, W. D., 1977. Experimental contributions to the study of foliations in rocks: a review of research since 1960. Tectonophysics 39(1-3), 329-354.
- Mehrabi, B., Tale Fazel, E., Tabbakh Shabani, A., 2014. Whole Rock Geochemical Techniques for Discrimination of Hydrothermal Alteration of the Kuh-e Dom Fe– Cu (±Au) prospect, Central Iran. Advanced Applied Geology 4(1), 58-74.
- Morley, C. K., Kongwung, B., Julapour, A. A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Kazemi, H., 2009. Structural development of a major late Cenozoic

basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area. Geosphere 5(4), 325-362.

- Mukherjee, S., Koyi, H. A., 2010. Higher Himalayan Shear Zone, Zanskar Indian Himalaya: microstructural studies and extrusion mechanism by a combination of simple shear and channel flow. International Journal of Earth Sciences 99, 1083-1110.
- Mukherjee, S., 2007. Geodynamics, deformation and mathematical analysis of metamorphic belts of the NW Himalaya. Unpublished Ph. D. thesis, Indian Institute of Technology Roorkee.
- Mukherjee, S., 2010a. Microstructures of the Zanskar shear zone. Earth Science India, 3.
- Mukherjee, S., 2010b. Structures at Meso-and Micro-scales in the Sutlej section of the Higher Himalayan Shear Zone in Himalaya. e .Terra 7, 1-27.
- Mukherjee, S., 2011. Mineral fish: their morphological classification, usefulness as shear sense indicators and genesis. international Journal of earth Sciences 100, 1303-1314.
- Nabavi, M.H., Hushmandzadeh, A., 1983. 1:100.000 Geological map of the Kuh-e-Dom. Geological Survey of Iran.
- Nadimi, A., 2010. Active strike-slip faults in the centeral part of the Sanandaj-Sirjan zone of Zagros Orogen (Iran), Ph.D Thesis, Poland. University of Warsaw 121p.
- Nogolesadat, M. A., Almasian, M., 1993. Tectonic map of Iran, a treatise on the geology of Iran. Ministry of Mines and Metals, Tehran.
- Pal, D. C., Barton, M. D., Sarangi, A. K., 2010. Deciphering a multistage history affecting U–Cu (–Fe) mineralization in the Singhbhum Shear Zone, eastern India, using pyrite textures and compositions in the Turamdih U–Cu (–Fe) deposit. Mineralium Deposita 44, 61-80.
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. Microtectonics. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 371p.
- Pirnia, T., Saccani, E., Torabi, G., Chiari, M., Goričan, Š., Barbero, E., 2020. Cretaceous tectonic evolution of the Neo-Tethys in Central Iran: Evidence from petrology and age of the Nain-Ashin ophiolitic basalts. Geoscience Frontiers 11(1), 57-81.
- Rabiei, M., 2006. Geochemical explorations of Kuh-e-Dom area and investigation of the genesis of its gold index, M.Sc. thesis, Tarbiat Moalem University, Tehran 130 p.
- Romanko, E., Kokorin, Yu., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov, I., Sharkovski, M., 1984. Outline of metallogeny

of Anarak area (Central Iran). Technoexport Report 19, 143 p.

- Rosenberg, C. L., Stünitz, H., 2003. Deformation and recrystallization of plagioclase along a temperature gradient: an example from the Bergell tonalite. Journal of Structural Geology 25(3), 389-408.
- Saccani, E., Azimzadeh, Z., Dilek, Y., Jahangiri, A., 2013. Geochronology and petrology of the Early Carboniferous Misho Mafic Complex (NW Iran), and implications for the melt evolution of Paleo-Tethyan rifting in Western Cimmeria. Lithos 162, 264-278.
- Sarjoughian, F., 2012. The nature of plutonism of Kuh-e-Dom (northeast of Ardestan), its geological history and magmatic evolutions. Ph.D. thesis in petrology, University of Tehran 230p.
- Sarjoughian, F., Kananian, A., Haschke, M., Ahmadian, J., Ling, W., Zong, K., 2012. Magma mingling and hybridization in the Kuh-e Dom pluton, Central Iran. Journal of Asian Earth Sciences 54, 49-63.
- Sengupta, N., Mukhopadhyay, D., Sengupta, P., Hoffbauer, R., 2005. Tourmaline-bearing rocks in the Singhbhum shear zone, eastern India: Evidence of boron infiltration during regional metamorphism. American Mineralogist 90(8-9), 1241-1255.
- Shafaii Moghadam, H., Stern, R. J., 2015. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia:(II) Mesozoic ophiolites. Journal of Asian Earth Sciences 100, 31-59.
- Sharkovski, M., Filichev, I., Selivanov, E., 1981. Geological map of Kuh-e Dom, scale 1: 100000. Geological Survey of Iran.
- Shigematsu, N., 1999. Dynamic recrystallization in deformed plagioclase during progressive shear deformation. Tectonophysics 305(4), 437-452.
- Siddans, A. W. B., 1972. Slaty cleavage—a review of research since 1815. Earth-Science Reviews 8(2), 205-232.
- Skrotzki, W., 1994. Defect structure and deformation mechanisms in naturally deformed augite and enstatite. Tectonophysics 229(1-2), 43-68.
- Stipp, M., Kunze, K., 2008. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates. Tectonophysics 448(1-4), 77-97.
- Stipp, M., StuÈnitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S. M., 2002. The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory'for crystal plastic deformation of quartz over a temperature

range from 250 to 700 C. Journal of structural geology 24(12), 1861-1884.

- Stöcklin, J., 1972. Iran Central, Septentrional et Oriental. Lexique stratigraphique International 3, Fasicule 9b, Iran. Centre National de la Recheche Scientifique, Paris, 1-283.
- Tabatabaei Manesh, S. M., Shirdashtzadeh, N., Ranjbar, S., 2021. Petrography, geothermobarometry and tectonomagmatic setting of intrusive rocks in Khuni (Northeast of Anarak, Central Iran). Kharazmi Journal of Earth Sciences 6 (2), 375-396.
- Tarkian, M., Bock, W. D., Neumann, M., 1983. Geology and mineralogy of the Cu-Ni-Co-U ore deposits at Talmessi and Meskani, Central Iran. Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt (Austria) 32(2-3), 111-133.
- Technoexport., 1984. Geological map of Kabudan: Geological survey of Iran, 1:100000 series, sheet 68. 1:250000, No. H7.
- Ten Grotenhuis, S. M., Trouw, R. A. J., Passchier, C. W., 2003. Evolution of mica fish in mylonitic rocks. Tectonophysics 372(1-2), 1-21.
- Terry, M. P., Heidelbach, F., 2006. Deformation-enhanced metamorphic reactions and the rheology of high-pressure shear zones, Western Gneiss Region, Norway. Journal of Metamorphic Geology 24(1), 3-18.
- Treagus, S. H., Lan, L., 2003. Simple shear of deformable square objects. Journal of Structural Geology 25(12), 1993-2003.
- Treagus, S. H., Lan, L., 2004. Deformation of square objects and boudins. Journal of Structural Geology 26(8), 1361-1376.

- Tullis, J., Snoke, A. W., Todd, V. R., 1982. Significance and petrogenesis of mylonitic rocks. Geology 10(5), 227-230.
- Twiss, R.J., Moores, E.M., 1992. Structural geology. Freeman and Company, New York, 532 p.
- Ulrich, S., Schulmann, K., Casey, M., 2002. Microstructural evolution and rheological behaviour of marbles deformed at different crustal levels. Journal of Structural Geology 24(5), 979-995.
- Williams, P. F., Jiang, D., 2001. The role of initial perturbations in the development of folds in a rockanalogue. Journal of Structural Geology 23(6-7), 845-856.
- Wilson, C.J.L., 1984. Shear bands, crenulations and differentiated layering in ice-mica models. Journal of Structural Geology 6, 303–320.
- Wood, C. A., 1974. Reconnaissance geophysics and geology of the Pinacate craters, Sonora, Mexico. Bulletin Volcanologique 38, 149-172.
- Wood, D.S., Oertel, G., 1980. Deformation in the Cambrian slate belt of Wales. J Geol. 88,309–326.
- Zanchi, A., Malaspina, N., Zanchetta, S., Berra, F., Benciolini, L., Bergomi, M., Kouhpeyma, M., 2015. The Cimmerian accretionary wedge of Anarak, Central Iran. Journal of Asian Earth Sciences 102, 45-72.
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Garzanti, E., Balini, M., Berra, F., Mattei, M., Muttoni, G., 2009. The Cimmerian evolution of the Nakhlak–Anarak area, Central Iran, and its bearing for the reconstruction of the history of the Eurasian margin. Geological Society, London, Special Publications 312(1), 261-286.