

Original Research Paper

Geometry and kinematic analyses of deformation flow using shape and lattice preferred orientation, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt (northern Dehbid)

Babak Samani*¹

¹ Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 October 06

Accepted: 2024 March 10

Available online: 2024 September 22

Keywords:

Strain

Bulging recrystallization

Sub-grain rotation recrystallization

Preferred orientation

Quartz c-axis

ABSTRACT

The use of spatial orientation of structural elements provides a great help to understand the geometry of shear zones. Investigating into the indices of non-axial deformable flow in two areas of shape preferred orientation (SPO) and lattice preferred orientation (LPO) of quartz in the deformed rocks of Koli-Kosh complex in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt at the north of Fars province show the dextral shear component. Quartz c-axis preferred orientation indicates the dominance of bulging and sub-grain rotation recrystallization in the thermal range of 379 ± 50 to 448 ± 50 degrees Celsius and pressure of 3 to 3.5 kbar. According to stereography projection of pole of foliation and lineation the plane of vorticity normal section was estimated as N15W/45SW. Assuming the compatibility of the north and south thrust systems with the boundary of the shear zones, the rake angle of the boundary of the shear zone and the vorticity normal section was calculated equal to 19 degrees. Therefore, it is possible to consider the oblique transpiration model with triclinic geometry as the structural evolution model of this shear zone.

1. Introduction

Petrofabric analyses are the most important methods for kinematic and geometrical interpretation of deformation flow in the shear zones. Using the shape preferred orientation in the mesoscopic and microscopic scales and the pattern of the optical axis of some minerals help to structural geologists for understand the nature of deformation flow. There are several shear sense indicators that suggested by different researchers (Passchier and Trouw, 2006, Trouw et al., 2010, Fossen, 2016). Planar and linear structures


are the common features that are used by structural geologist for dynamic and kinematic analyses of the shear zones. According to the development of stretching lineation in the direction of maximum principal axis of the strain ellipsoid and coincidence of foliation plane to the XY principal plane of the strain ellipsoid, it will be possible to determine the principal planes and axis of strain ellipsoid (Twomey, 2010; Law et al., 2004; Fossen, 2016). Also, these structures can be used to determine the geometry of many

* Corresponding author: Babak Samani; E-mail: b.samani@scu.ac.ir

Citation:

Samani, B., 2024. Geometry and kinematic analyses of deformation flow using shape and lattice preferred orientation, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt (northern Dehbid). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 34(3), 133, 75-86. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.430331.2126>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2024.430331.2126

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.5.3



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

shear zones (Lin et al., 2007). In many deformed zones, the lack of strain markers makes an important problem for determination the principal planes and axis of strain ellipsoid. In this research, using mylonitized schists of the north of Dehbid in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, some aspects of deformation such as the nature of deformation flow, shear direction, temperature and pressure conditions of deformation and the geometry of the shear zone have been discussed.

2. Research methodology

In this research, using field studies and preparing the oriented thin sections (parallel to lineation and perpendicular to foliation) the petrofabric characteristics were investigated in two realms of shape preferred and quartz lattice preferred orientation. Results were used for determination of shear direction and symmetry of shear zone. Also, the pattern of quartz c-axis fabrics was discussed to investigate the P-T deformation conditions.

3. Results

The results of petrofabric analyses of deformed rocks in the Koli-Kosh complex in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt show an important non-coaxial deformation flow in this area. Results of shape preferred orientation show the development of different types of shear sense indicators. All indicators such as mineral fish, stair stepping porphyroclasts, sigma type porphyroclasts, s-c shear bands reveal a dextral sense of shear in the study area. Also, the results of lattice preferred orientation of quartz c-axis fabrics show a dextral sense of shear. Based on foliation and lineation structures the principal axis of strain ellipsoid were determined as: (X: 321/27; Y: 77/41; Z: 208/37). The short axis orientation of strain ellipsoid is parallel to the shortening direction due to convergence between Iran and Arabian plates. Combination of kinematic and micro-structural studies shows the triclinic geometry for this shear zone. Finally, the result of opening angle of quartz c-axis revealed green schist to lower boundary of amphibolite facies for the metamorphic rocks of the study area.

4. Discussions

Shape preferred orientation reveal development of some shear sense indicators such as: mineral fish; stair stepping, sigma type and S-C shear bands in the study area. All these shear senses show a dextral shear sense in the shear zone. Lattice preferred orientation of quartz c-axis fabric show Type I asymmetry cross girdle with non-coaxial dextral deformation. According to the study of foliation and lineation structures, the principal axis of strain ellipsoid was determined as: (X: 321/27; Y: 77/41; Z: 208/37). The plane contains lineation and pole of foliation is coincided to XZ principal plane of strain ellipsoid (Ramsay and Hubber, 1983; Xypolias, 2010). This plane is

perpendicular to the vorticity axis and therefore it can be supposed as vorticity normal section (N15W/45SW). In this research, the geometry of northern and southern thrust was assumed as shear zone boundary. This assumption takes into account also by Jones et al. (2004). Therefore, the geometry of shear zone was estimated as: (N320W/40NE). Stereographic projection of shear zone boundary and the vorticity normal section shows that the value of θ angle is equal to 19 degrees. Therefore, triclinic geometric symmetry can be considered for the studied shear zone. During crystal plastic deformation of quartz, the opening-angle of c-axis fabrics (OA) increases with rising temperature and with decreasing strain rate (Kruhl, 1998; Law et al., 2004, Law, 2014). Numerical simulations also indicate that the opening angle is sensitive to the 3D strain geometry (Price, 1985). Based on Kruhl (1998) and Law (2014) it is observed that a positive linear correlation existed between opening angle and temperature for rocks naturally deformed within the range of approximately 250–650 °C, and proposed that the opening angle can be used as a deformation-related thermometer. Therefore, in the temperature range of 250 to 650 degrees Celsius, the opening angle can be used as a thermometer to determine the deformation temperature (Morgan and Law, 2004). Faleiros et al. (2016) proposed a relation to determine the metamorphic temperature for opening angle less than 87 degrees; $T (^{\circ}\text{C}) = 6.9\text{OA} (\text{degrees}) + 48$. Based on Morgan and Law (2004) monogram and Faleiros et al. (2016) equation the deformation temperature was determined between 379 ± 50 to 448 ± 50 degrees Celsius. Also, with using the experimental diagram of Stipp et al. (2002) the metamorphic pressure was calculated between 3- 3.5 kbar. Assuming a gradient of 30°C per kilometer the depth of deformation was calculated about 12.5 to 15 km.

The results of thin section studies, quartz c-axis fabric pattern, amounts of opening angle and P-T conditions reveal that the bulging recrystallization and sub-grain rotation recrystallization are the most important deformation mechanism in the deformed rocks.

5. Conclusion

Based on structural and petrofabric studies in the realm of shape preferred orientation (SPO) and Lattice preferred orientation (LPO) of quartz in the study area, the following results were obtained:

- According to the petrofabric analysis there is a non-coaxial deformation with a dextral shear sense in the study area.
- Based on stereography analyses of foliation, lineation and shear zone boundary the θ angle is equal to 19 degree. Therefore, the triclinic symmetry can be suggested for structural evolution of the studied shear zone.
- According to the amounts of opening angle of quartz c-axis fabric, deformation temperature is in the range of 379 ± 50 to 448 ± 50 °C.

This temperature window is coincided with green schist to lower boundary of amphibolite facies.

- Bulging recrystallization and sub-grain boundary recrystallization

are the dominant deformation mechanisms in the deformed rocks.

- Results show deformation pressure about 3 to 3.5 kbar and depth of deformation near to 12.5 to 15 km.

تحلیل هندسی و جنبش شناختی جریان دگرشکلی با استفاده از جهت‌یابی ترجیحی شکل و شبکه کانایابی، پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان (شمال ده‌بید)

بابک سامانی*

۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

استفاده از جهت‌یابی فضایی عناصر ساختاری کمک‌شایانی جهت درک هندسه پهنه‌های برشی فراهم می‌نماید. بررسی شاخص‌های جریان دگرشکلی ناهم‌محور برپایه جهت‌یابی ترجیحی شکل (SPO) (Shape preferred orientation) و جهت‌یابی ترجیحی شبکه (LPO) (Lattice preferred orientation) کانی کوارتز در سنگ‌های دگرشکل شده مجموعه (کمپلکس) دگرگونی کولی کش واقع در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان در شمال استان فارس، وجود یک مولفه برشی راست‌گرد را نشان می‌دهد. نتایج گویای چیرگی بازبلورشی تومری و چرخش ریزدانه در قلمرو حرارتی 379 ± 50 تا 448 ± 50 درجه سانتی‌گراد و فشار ۳ تا ۳/۵ کیلوبار می‌باشد. با استفاده از تحلیل استریوگرافی قطب سطوح برگ‌وارگی و راستای خط‌وارگی مشخصات صفحه عمود بر محور تاوایی به صورت N15W/45SW تخمین زده شد. با فرض انطباق سیستم‌های راندگی شمالی و جنوبی با مرز پهنه‌های برشی، مقدار زاویه ریکر مرز پهنه برشی و صفحه عمود بر محور تاوایی معادل ۱۹ درجه محاسبه گردید. از این رو، می‌توان مدل ترافشارش مایل با هندسه تریکلینیک را به‌عنوان مدل تکامل ساختاری این پهنه برشی در نظر گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کرنش

بازبلورشی تومری

باز بلورشی چرخش ریزدانه

جهت‌یابی ترجیحی

محور C کانی کوارتز

۱- پیش‌نوشتار

ساختارهای برگ‌وارگی با صفحه اصلی XY بیضوی کرنش، امکان تعیین راستای محورها و سطوح اصلی بیضوی کرنش با تقریب نسبتاً خوبی وجود خواهد داشت (Twomey, 2010; Law et al., 2004; Fossen, 2016). همچنین از این ساختارها جهت تعیین هندسه بسیاری از پهنه‌های برشی می‌توان استفاده نمود (Lin et al., 2007). شناخت هندسه پهنه‌های برشی درک بهتری از چگونگی تکامل ساختاری این پهنه‌ها در اختیار زمین‌شناسان ساختاری قرار می‌دهد. در بسیاری از پهنه‌های دگرشکل شده به واسطه عدم وجود نشانگرهای کرنش، تعیین راستای محورها و صفحات اصلی بیضوی کرنش و محور تاوایی بسیار دشوار است. با این حال، در پهنه‌های دگرشکل شده‌ای که دارای گسترش مناسبی از ساختارهای صفحه‌ای و خطی هستند، می‌توان جهت فهم نوع هندسه دگرشکلی از آنها یاری جست. در این پژوهش، با بررسی بافت ساختاری شیست‌های میلیونیتی شده شمال ده‌بید واقع در کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان به بررسی برخی از شاخص‌های دگرشکلی

تحلیل‌های بافت ساختاری مهم‌ترین ابزار جهت تفسیر ایستایی (کینماتیکی) و تعیین هندسه دگرشکلی در پهنه‌های دگرشکل شده می‌باشند. استفاده از بافت ساختارهای نامتقارن در مقیاس مژوسکوپ و میکروسکوپ و الگوی محور نوری برخی کانی‌ها کمک‌شایانی جهت درک وجود جریان‌های دگرشکلی هم‌محور یا ناهم‌محور می‌نمایند. بافت ساختارهای متفاوتی جهت تعیین راستای برش در پهنه‌های برشی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده‌اند (Passchier and Trouw, 2006, Fossen, 2016). ماهیت کانی‌شناسی سنگ‌ها پیش از دگرشکلی، مهم‌ترین عامل در چگونگی توسعه بافت ساختارهای شاخص جهت پی بردن به راستای عملکرد نیروهای برشی در پهنه‌های برشی می‌باشد. استفاده از ساختارهای برگ‌وارگی و خط‌وارگی به عنوان متداول‌ترین ساختارها در پهنه‌های برشی، کمک‌شایانی به زمین‌شناسان ساختاری جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی و جنبشی می‌نماید. با توجه به توسعه خط‌وارگی‌های کشیدگی در راستای محور کشیدگی بیشینه بیضوی کرنش و انطباق

* نویسنده مسئول: بابک سامانی؛ E-mail: b.samani@scu.ac.ir

ماخذنگاری:

سامانی، ب.، ۱۴۰۳، تحلیل هندسی و جنبش شناختی جریان دگرشکلی با استفاده از جهت‌یابی ترجیحی شکل و شبکه کانایابی، پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان (شمال ده‌بید). فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۳)، ۱۳۳-۷۵. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.430331.2126>

doi: 10.22071/gsj.2024.430331.2126



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.5.3

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

۲) کمر بند دگرگونی سنندج-سیرجان، و ۳) کمر بند چین و رانده زاگرس می‌باشد (Alavi, 1994, 2004; 2007; Sarkarinejad and Goftari, 2019; Keshavarz and Faghih, 2020). پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان دارای روند شمال باختر-جنوب خاور بوده و از سنگ‌های دگرشکل شده با درجات مختلف دگرگونی و گسل‌های راندگی تشکیل شده است. سنگ‌های دگرشکل شده در این کمر بند دگرگونی نشان‌دهنده چندین مرحله دگرریختی در خود می‌باشند که آخرین مرحله دگرریختی در ارتباط با فرایند برخورد قاره‌ای بین بخش‌های شمالی ورقه گندوانا و جنوبی ایران می‌باشد (Mohajjel and Fergusson, 2000; McQuarrie, 2004). نتیجه مطالعات اخیر نشان می‌دهد که عملکرد همزمان تنش‌های همگرایی و برشی مهم‌ترین تاثیر را در تکامل ساختاری این بخش به عهده داشته‌اند (Mohajjel and Fergusson, 2000; Sarkarinejad et al., 2015; Fergusson et al., 2016; Samani, 2013, 2017; 2023). از این رو، می‌توان رژیم ترفشارش راست‌گرد را مهم‌ترین پارامتر در توسعه پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان دانست (Sarkarinejad et al., 2010, 2015; Fergusson et al., 2016; Samani, 2015; Samani et al., 2019; Derikvand et al., 2023). جابه‌جایی و انباشتگی توده‌های راندگی سبب افزایش ستبرای پوسته قاره‌ای به اندازه تقریبی ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر شده است که بی‌هنجاری گرانی بوگه منفی گواهی بر این حقیقت می‌باشد (Tunini et al., 2015). منطقه مورد مطالعه در ۲۰ کیلومتری شمال شهرستان ده‌بید در شمال استان فارس واقع شده است. سنگ‌های دگرگون شده در این منطقه بیشتر شامل سنگ‌های مجموعه دگرگونی کولی‌کش می‌باشد. این مجموعه دگرگونی در بخش‌های مختلف، توالی‌های متفاوتی از سنگ‌های دگرگونی را شامل می‌شود. عمده‌ترین واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه شامل: سنگ آهک‌های دگرگون شده، واحدهای شیلی و ماسه سنگی و مجموعه‌های دگرگونی اسلیتی، شیستی، میکا شیستی و کوارتزی می‌باشد. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همچون ماهیت جریان دگرشکلی، راستای برش، شرایط دما و فشار دگرشکلی و هندسه پهنه مورد مطالعه پرداخته شده است.

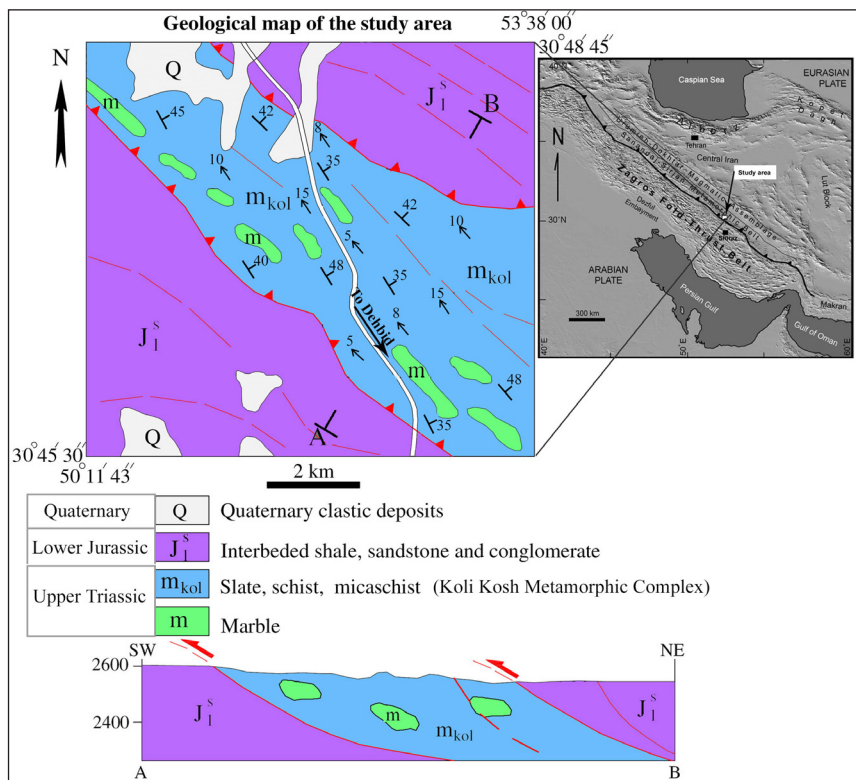
۲- روش پژوهش

در این تحقیق با استفاده از بررسی‌های میدانی و تهیه مقاطع نازک جهت‌دار (در جهت عمود بر بزرگ‌وارگی و به موازات خط‌وارگی) ویژگی‌های بافت ساختاری در دو مقوله جهت‌یابی شکل و جهت‌یابی شبکه کانی کوارتز مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصله به تحلیل راستای برش و تقارن پهنه برشی پرداخته شد. همچنین داده‌های حاصل از جهت‌یابی شبکه کانی کوارتز جهت بررسی شرایط دما و فشار دگرشکلی مورد بحث قرار گرفت.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- جایگاه زمین‌شناسی

کمر بند کوهزایی زاگرس بخشی از سامانه کوهزایی آلپ-همالیا بوده که در حاشیه شمال خاوری صفحه سنگ کره‌ای آفریقا-عربی قرار گرفته است. این کمر بند کوهزایی شامل ۸ تا ۱۴ کیلومتر از رسوبات کامبرین تا عهد حاضر می‌باشد که بر روی پی سنگ کامبرین قرار گرفته‌اند (Alavi, 1994, 2004; 2007; Tunini et al., 2015). تکامل ساختاری و زمین ساختی کمر بند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی: الف) فرورانش ورقه اقیانوسی دریای تیس جوان به زیر ورقه قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، ب) جای‌گیری و رورانش بخشی از پوسته اقیانوسی تیس جوان بر روی حاشیه شمالی ورقه گندوانا و گسترش افیولیت‌های زاگرس در اواخر کرتاسه، ج) برخورد قاره‌ای-قاره‌ای شمال گندوانا با ورقه ایران در ائوسن به بعد صورت گرفته است (Alavi, 2004). کمر بند کوهزایی زاگرس در راستای شمال خاور به جنوب باختر، شامل سه بخش اصلی: ۱) کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر،



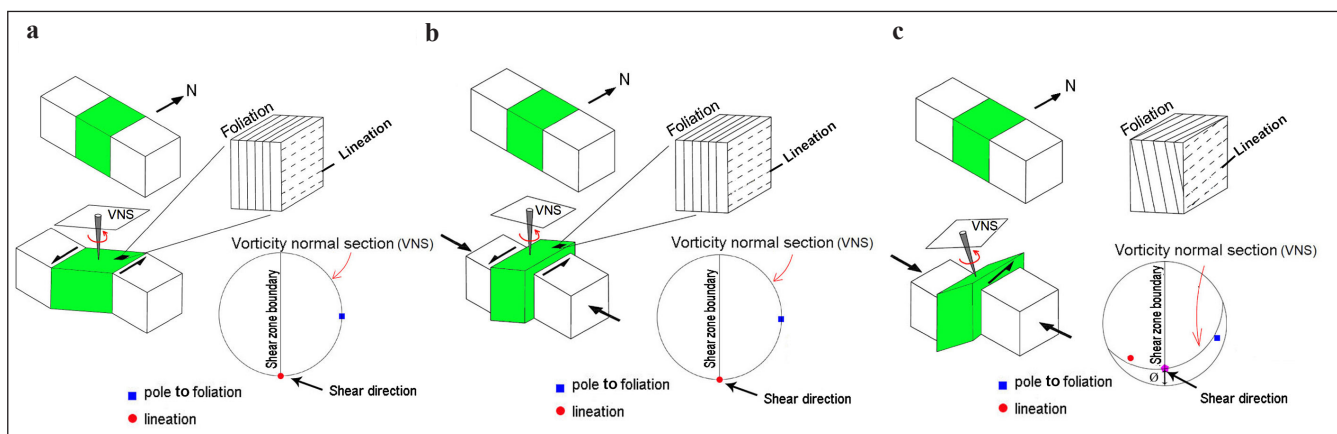
شکل ۱- نقشه و برش زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ده بید، جعفریان و زمانی پدرام، ۱۳۷۸).

Figure 1. Geological map and cross section of the study area (1:100000 Dehbid map, Jafarian and Zamanipedram, 1999).

۲-۳- مفهوم تقارن هندسی پهنه های برشی

پژوهشگران مختلف با در نظر گرفتن عناصر ساختاری متفاوت به ارائه ویژگی‌های هندسی پهنه‌های برشی پرداخته‌اند (Ramsay and Graham, 1970; Sanderson and Marchini, 1984, Tikoff and Fossen, 1999; Short and Johnson, 2006; Xypolias, 2010). به‌طور تئوری، هندسه یک پهنه برشی توسط جهت‌یافتگی فضایی عناصر ساختاری مانند مرزهای پهنه برشی، برگ‌وارگی‌ها، خط‌وارگی‌ها و راستای بردار تاوایی کنترل می‌شود (Williams et al., 2006). بردار تاوایی محوری است که در حین دگرشکلی اجزای ماده حول آن دچار چرخش می‌شوند. صفحه عمود بر این محور، صفحه عمود بر تاوایی (Vorticity normal section) یا (VNS) نام دارد (Jones et al., 2004; Lin et al., 2007). در عمل صفحه VNS صفحه‌ای است که بیشترین عدم تقارن حاصل از جریان دگرشکلی را شامل می‌شود (Xypolias, 2010). عامل مهم دیگر در تعریف هندسه پهنه برشی زاویه \emptyset می‌باشد. این زاویه معرف زاویه ریک محل برخورد مرز پهنه برشی و صفحه عمود بر محور تاوایی است (Lin et al., 2007). پهنه‌های برشی با زاویه \emptyset برابر با صفر، پهنه‌هایی هستند که هیچ‌گونه مولفه همگرایی بین مرزهای آن وجود نداشته و تنها یک مولفه برشی به موازات امتداد مرزهای پهنه برشی در آن دیده می‌شود (Ramsay and Graham, 1970). در این پهنه‌های برشی راستای خط‌وارگی کشیدگی و قطب سطوح برگ‌وارگی منطبق بر صفحه عمود بر

محور تاوایی بوده و نشان‌دهنده تقارن هندسی مونوکلینیک می‌باشد (شکل ۲-ا). این مدل یکی از ساده‌ترین مدل‌های ارائه شده برای پهنه‌های برشی بوده که در آن هیچ انتقال ماده‌ای صورت نمی‌پذیرد. در این مدل، راستای برش بر اساس موقعیت محل برخورد مرز پهنه برشی با صفحه عمود بر محور تاوایی تعیین می‌شود. در مدل ارائه شده توسط جونز و همکاران (Jones et al., 1997) پهنه برشی افزون بر مولفه امتدادلغز دارای مولفه همگرایی نیز می‌باشد. در این مدل زاویه \emptyset برابر با صفر یا نود درجه می‌باشد (شکل ۲-ب). در این مدل عناصر مادی در راستای مرزهای پهنه‌های برشی دچار تغییر طول می‌شوند. در این مدل نیز راستای خط‌وارگی و قطب برگ‌وارگی بر صفحه عمود بر محور تاوایی منطبق بوده و محل برخورد مرز پهنه برشی و صفحه عمود بر محور تاوایی، راستای برش را نشان می‌دهد. این گونه مناطق برشی که به‌صورت همزمان ترکیبی از مولفه‌های برشی و همگرایی را نمایش می‌دهد در اصطلاح پهنه‌های برشی ترفشارشی می‌نامند (Jones et al., 2004). این مدل نیز دارای تقارن هندسی مونوکلینیک می‌باشد. مدل سوم (Williams et al., 2006) پهنه برشی دارای ماهیت ترفشارشی بوده و زاویه \emptyset دارای مقادیری غیر از صفر و نود درجه می‌باشد. در این مدل انطباق کامل خط‌وارگی و قطب سطوح برگ‌وارگی بر روی صفحه عمود بر محور تاوایی وجود نداشته و پهنه برشی دارای تقارن تری کلینیک می‌باشد. در این مدل راستای برش در راستای شیب ظاهری مرز پهنه برشی قرار می‌گیرد (شکل ۲-ج).



شکل ۲- پهنه‌های برشی با تقارن هندسی متفاوت. (a) پهنه برشی بدون مولفه همگرایی با تقارن مونوکلینیک که در آن مقدار زاویه \emptyset برابر با صفر می‌باشد. (b) پهنه برشی همراه با مولفه همگرایی (برش عمومی) با تقارن مونوکلینیک که در آن مقدار زاویه \emptyset بین صفر و نود درجه است. (c) پهنه برشی همراه با مولفه همگرایی (برش عمومی) با تقارن تریکلینیک که در آن مقدار زاویه \emptyset بین صفر و نود درجه است.

Figure 2. Shear zone with different geometrical symmetry. a) Monoclinic shear zone without convergence component and $\emptyset=0$. b) Monoclinic shear zone with convergence component (general shear) in this case the \emptyset angle is equal to 0 or 90. c) Triclinic shear zone with convergence component (general shear) in this case the \emptyset angle is between 0 and 90.

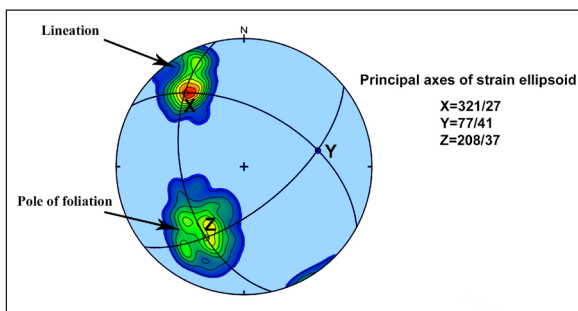
۳-۳- جهت‌یابی تریجیحی شکل

بافت ساختارهای نامتقارن در مقیاس مزوسکوپی و میکروسکوپی مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین جهت مولفه برش در پهنه‌های برشی می‌باشند. خمیدگی برگ‌وارگی، سایه‌های فشاری، اشکال نامتقارن کانی‌ها همچون میکافیش‌ها و اشکال سیگموئیدی، پورفیروکلاست‌ها و پورفیروبلاست‌های حاشیه‌دار نوع سیگما و دلتا، باندهای برشی نوع S-C، چین‌خوردگی‌های نامتقارن، دنباله‌های پله‌ای و برگ‌وارگی‌های مایل از مهم‌ترین نشانگرهای جهت برش در پهنه‌های برشی هستند (شکل ۳). مطالعات صحرائی گویای وجود یک برگ‌وارگی و خط‌وارگی چیره در منطقه مورد مطالعه

می‌باشد. برگ‌وارگی‌ها و خط‌وارگی‌ها از مهم‌ترین ساختارها برای تعیین محورهای اصلی بیضوی کرنش و تحلیل جنبش شناختی در پهنه‌های دگرشکل شده می‌باشند (Ramzay and Huber, 1983; Xypolias, 2010; Fossen, 2016). مطالعات نشان می‌دهند که راستای خط‌وارگی و صفحه برگ‌وارگی به ترتیب بر راستای محور بزرگ و صفحه XY بیضوی کرنش منطبق می‌باشد (Ramzay and Huber, 1983; Xypolias, 2010; Fossen, 2016). از این رو، می‌توان جهت‌یابی فضایی محورهای اصلی بیضوی کرنش را تعیین نمود. بر این اساس، با استفاده از تحلیل استریوگرافی ساختارهای برگ‌وارگی و خط‌وارگی، موقعیت راستای محورهای

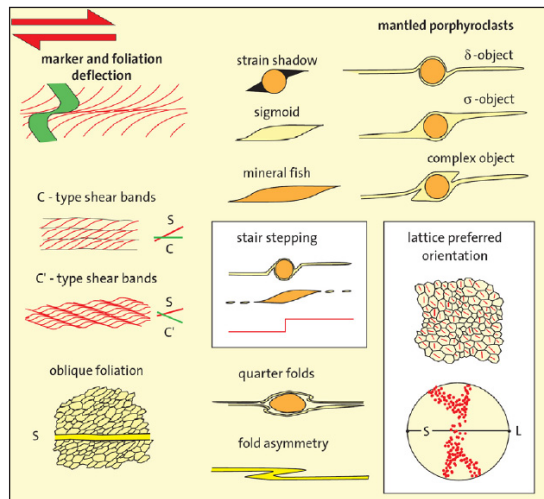
(Ramzay and Huber, 1983; Law et al., 2004; Xypolias, 2010; Fossen, 2016) با این وجود، راهکار یاد شده، اطلاعاتی را در خصوص ماهیت شکل سه بعدی بیضوی کرنش (کرنش تخت، صفحه‌ای و کشیده شده) ارائه نمی‌دهد. بررسی‌های صحرائی و مقاطع میکروسکوپی و تحلیل جهت‌یافتگی ترجیحی بافت ساختاری گویای وجود یک مولفه برشی راست‌گرد در منطقه می‌باشد (شکل ۵).

و سطوح اصلی بیضوی کرنش حاصل شد (شکل ۴). موقعیت محورهای بزرگ، متوسط و کوچک بیضوی کرنش به ترتیب $Z: 208/37$ و $X: 321/27$ ، $Y: 77/41$ برآورد گردید. موقعیت محور کوچک بیضوی کرنش در راستای کوتاه شدگی عمومی زاگرس حاصل از همگرایی صفحه عربی به سمت صفحه ایران می‌باشد. تحلیل فوق بر اساس جهت‌یافتگی عناصر ساختاری برگ‌وارگی و خط‌وارگی یک روش مناسب و سریع در تعیین راستاهای محورهای اصلی بیضوی کرنش خواهد بود



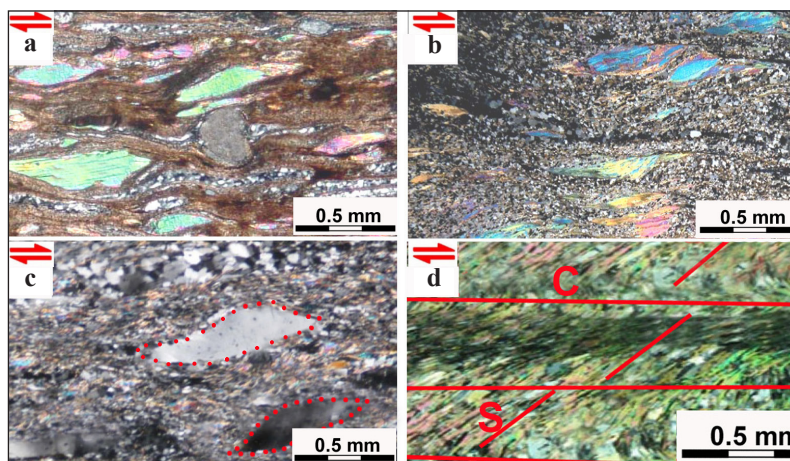
شکل ۴- تعیین راستای محورهای اصلی کرنش با استفاده از تحلیل ساختارهای برگ‌وارگی و خط‌وارگی.

Figure 4. Determination of principal axis of strain ellipsoid using foliation and linciation structures.



شکل ۳- بافت ساختارهای مختلف جهت تعیین برش در پهنه‌های برشی (Passchier and Trouw, 2006).

Figure 3. Different shear sense indicators in the shear zones (Passchier and Trouw, 2006).



شکل ۵- نشانگرهای راستای برش. (a) و (b) میکا‌های ماهی شکل و پورفیروکلاست‌های پلکانی. (c) شکل سیگموئیدی کانی کوارتز (فابریک نوع سیگما) و (d) نوارهای برشی S-C.

Figure 5. Shear sense indicators. a and b) Mika fishes and stair stepping porphyroclasts. c) sigmoidal shape of quartz (sigma type fabric). d) S-C shear bands.

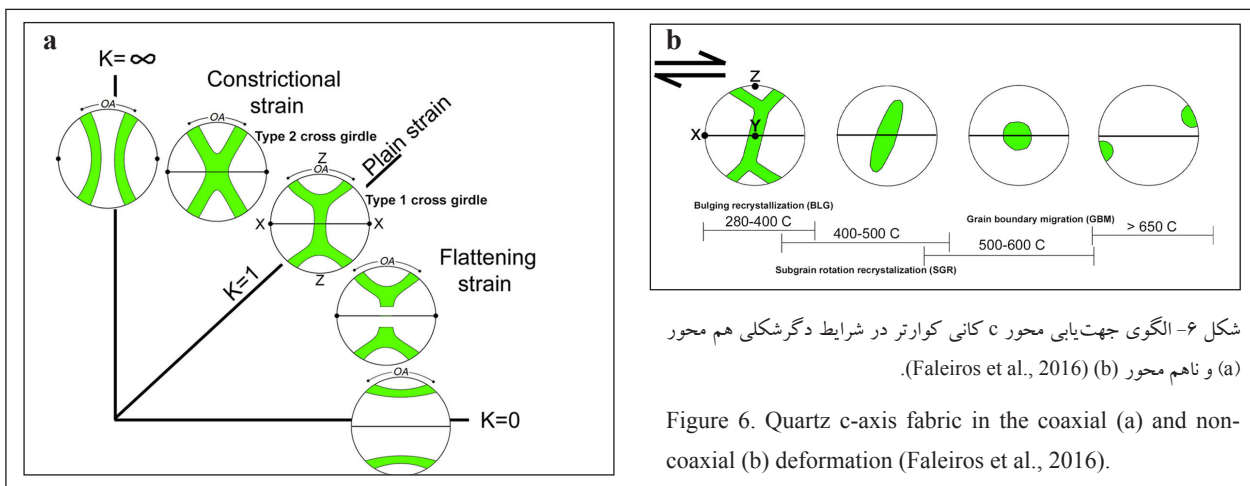
(Faleiros et al., 2016). تعیین الگوی پراکندگی و زاویه بازشدگی محور c کوارتز جهت تعیین هم‌محوری یا ناهم‌محوری جریان دگرشکلی، دما و فشار دگرشکلی از چند جنبه دارای اهمیت است: ۱) کوارتز فراوان‌ترین کانی سنگ‌ساز در پوسته زمین می‌باشد، ۲) رفتار دگرشکلی کوارتز عموماً شبیه رفتار پوسته زمین است، ۳) کانی

۳-۴- جهت‌یابی ترجیحی شبکه کانی کوارتز

در جریان دگرشکلی پلاستیکی کانی‌های کوارتز، الگوی پراکندگی جهت‌یابی و زاویه بازشدگی (Opening angle) (OA) فابریک محور c کوارتز تحت تاثیر دما، فشار و ماهیت کرنش، می‌باشد (Kruhl, 1998; Law et al., 2004, Law, 2014).

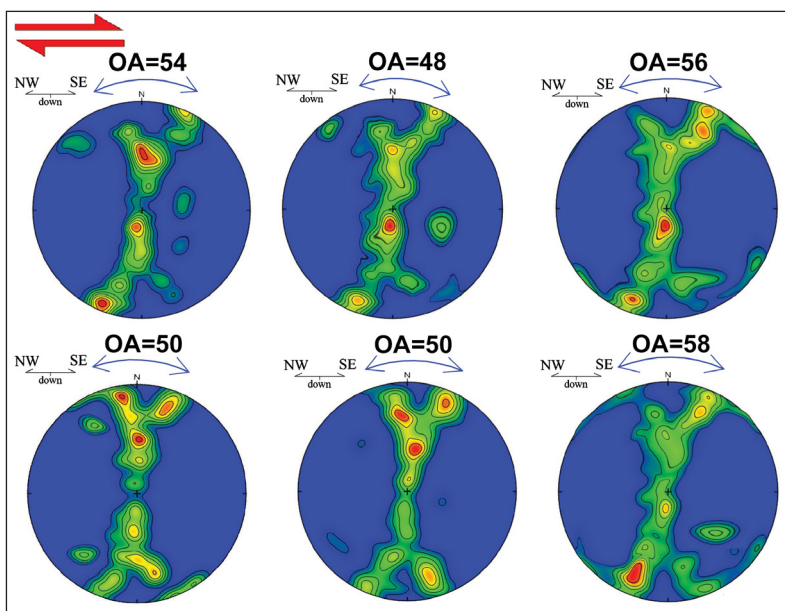
ناهم‌محور با هندسه صفحه‌ای، الگوی دیگری از جهت‌یابی ترجیحی شبکه حاصل می‌شود (Twomey, 2010; Faleiros et al., 2016). در این حالت، عموماً الگوی مقاطع نوع یک یا حلقه منفرد که به صورت مایل نسبت به برگ‌وارگی و خطوطارگی قرار گرفته، حاصل می‌شود (شکل ۶-ب). به منظور تعیین الگوی جهت‌یابی محور c کانی کوارتز، تعداد شش مقطع نازک جهت‌دار از شیب‌های منطقه تهیه گردید. ریخت‌شناسی مقاطع میکروسکوپی گویای رخداد یک دگرشکلی دینامیکی در شیب‌های منطقه بوده که آثار آن به وسیله بافت‌های میلونیتی (شکل ۵-ا و ۵-ب) و توسعه بازبلورش در کانی‌های کوارتز قابل تشخیص است (شکل ۱۱). با استفاده از میکروسکوپ نوری و صفحه یونیورسال استیج (u-stage) به مطالعه جهت‌یافتگی ترجیحی در مقیاس شبکه پرداخته شد. از هر مقطع حداقل ۲۵۰ داده از جهت‌یافتگی محور c کانی کوارتز اندازه‌گیری شد و نتایج به وسیله تصویراندازی در شبکه استریونت رسم گردید (شکل ۷).

کوارتز در تمام شرایط دگرگونی پایدار بوده و از محدوده دیاژنز (دمای کمتر از ۱۵۰ درجه) تا شرایط دگرگونی بسیار بالا (بالتر از ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) از خود رفتار دگرشکلی پلاستیکی نشان می‌دهد، (۴) استفاده از کوارتز جهت تعیین دمای دگرگونی در سنگ‌هایی که فاقد کانی‌های شاخص تعیین دما هستند، می‌تواند مفید باشد، و (۵) با استفاده از مقاطع نازک مناسب و با استفاده از میکروسکوپ نوری یونیورسال استیج می‌توان به مطالعه فابریک محور c کوارتز پرداخت. الگوی جهت‌یابی ترجیحی شبکه به وسیله تصویرسازی استریوگرافی، به صورت کمان‌هایی بزرگ یا کوچک قابل نمایش می‌باشد (شکل ۶-ا). الگویی از جهت‌یابی ترجیحی شبکه که در آن کمان‌ها به صورت مقاطع نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند الگوی مقاطع نوع یک (Type 1) و دو (Type 2) را نشان می‌دهند. آرایشی که در آن کمان‌ها در راستای دایره کوچک قرار گیرند، گویای شکل‌گیری جهت‌یابی ترجیحی شبکه در شرایط هندسه کرنش تخت می‌باشد. در تصویرسازی استریوگرافیکی تحت شرایط کرنش



شکل ۶- الگوی جهت‌یابی محور c کانی کوارتز در شرایط دگرشکلی هم‌محور (a) و ناهم‌محور (b) (Faleiros et al., 2016).

Figure 6. Quartz c-axis fabric in the coaxial (a) and non-coaxial (b) deformation (Faleiros et al., 2016).



شکل ۷- تصویر استریوگرافی الگوی فابریکی محور c کانی کوارتز در منطقه مورد مطالعه.

Figure 7. Stereography projection of quartz c-axis fabric in the study area.

۴- بحث

نرخ کرنش، افزایش می‌یابد (Kruhl, 1998; Law et al., 2004, Law, 2014). نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نیز گویای حساس بودن زاویه بازشدگی فابریک C کوارتز نسبت به هندسه سه بعدی کرنش می‌باشد (Price, 1985). بر اساس مطالعات پیشین، مشخص شده است که در محدوده دمایی ۲۵۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد یک رابطه خطی بین زاویه بازشدگی و دمای دگرشکلی وجود دارد (Kruhl, 1998; Law, 2014). هر چند در دمای بالاتر از ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد ارتباط بین دما و زاویه بازشدگی پیچیده‌تر است. از این رو، در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان از زاویه باز شدگی به‌عنوان یک دماسنج جهت تعیین دمای دگرشکلی استفاده کرد. مورگان و لائو (Morgan and Law, 2004) با استفاده از داده‌های مختلف فابریک محور C کوارتز روابط تجربی و نمودارهایی را جهت تعیین دمای دگرگونی ارائه نموده‌اند. همچنین فالیروز و همکاران (Faleiros et al., 2016) برای مقادیر بازشدگی کمتر از ۸۷ درجه محور C کانی کوارتز رابطه‌ای را برای تعیین دمای دگرگونی ارائه نمودند (رابطه ۱):

$$T(^{\circ}C) = 6.90A(\text{degrees}) + 48$$

در رابطه فوق، OA زاویه بازشدگی فابریکی محور C کوارتز می‌باشد. با توجه به مقادیر زاویه بازشدگی برای نمونه‌های ۱ تا ۶ با استفاده از رابطه فالیروز و همکاران (Faleiros et al., 2016) و نمودار تجربی مورگان و لائو (Morgan and Law, 2004) مقادیر دمای دگرگونی محاسبه گردید (جدول ۱ و شکل ۹).

با استفاده از نمودار تجربی استیب و همکاران (Stipp et al., 2002) مقادیر فشار دگرگونی محاسبه گردید. بر این اساس، مقادیر فشار دگرگونی در محدوده‌ای بین ۳ تا ۳/۵ کیلوبار تعیین گردید (شکل ۱۰). بر اساس مقادیر دما و فشار به دست آمده و با فرض گرادیال ۳۰ درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر، ژرفای دگرشکلی در حدود ۱۲/۵ تا ۱۵ کیلومتر به دست آمد.

نتایج حاصل از الگوی فابریکی محور C کانی کوارتز، مقادیر زاویه بازشدگی و شرایط دما-فشار دگرشکلی گویای وجود فرایند بازبلورش bulging و چرخش ریزدانه به‌عنوان سازوکار چیره در دگرشکلی پلاستیک کانی‌های کوارتز می‌باشد (شکل‌های ۶ و ۱۰). بررسی‌های انجام شده به وسیله مقاطع میکروسکوپی شواهد بازبلورش bulging و چرخش ریزدانه را تایید می‌نمایند (شکل ۱۱).

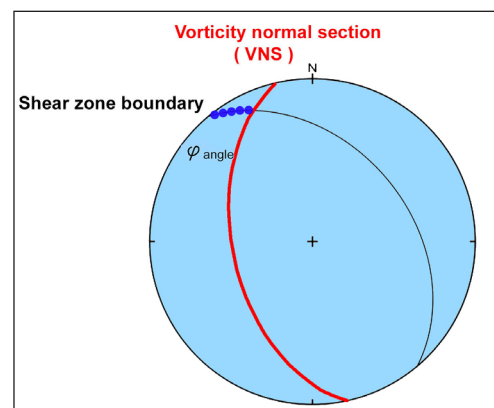
در این پژوهش، با استفاده از بررسی ساختارها در مقیاس‌های مختلف به تحلیل ویژگی‌های هندسی و جنبشی منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. بررسی‌های بافت ساختاری در مقیاس شکل (میکافیش‌ها، پورفیروکلاست‌های پلکانی، پورفیروکلاست‌های نوع سیگما و سطوح s-c) و شبکه کانی کوارتز (الگوی کمان‌های متقاطع نوع ۱ با حالت نامتقارن) گویای وجود یک مولفه برشی چیره راست‌گرد در پهنه مورد مطالعه می‌باشد (شکل‌های ۵ و ۷). با استفاده از بررسی ساختارهای برگ‌وارگی و خط‌وارگی موقعیت محورهای اصلی بیضوی کرنش مشخص گردید (X: 321/27; Y: 77/41; Z: 208/37). صفحه دربردارنده موقعیت قطب سطوح برگ‌وارگی و خط‌وارگی را می‌توان به عنوان صفحه XZ بیضوی کرنش در نظر گرفت (Ramsay and Hubber, 1983; Xypolias, 2010). این صفحه عمود بر محور تاوایی بوده و از این رو، می‌توان با تقریب خوبی موقعیت صفحه عمود بر محور تاوایی را تعیین نمود. محدوده مورد مطالعه بین دو ساختار راندگی شمالی و جنوبی قرار گرفته است. با توجه به مرز گسله بین واحدهای m_{kol} و J_1^s وجود شواهد مربوط به نشانگرهای برش در واحد m_{kol} راندگی‌های شمالی و جنوبی به عنوان مرزهای این پهنه برش خورده در نظر گرفته شدند. عملاً تعیین مشخصات هندسی دقیق گسل‌های راندگی اصلی دشوار خواهد بود، با این وجود، با استفاده از برداشت‌های صحرائی و اندازه‌گیری ویژگی‌های هندسی سطوح مختلف گسلی در واحد m_{kol} معیاری جهت تعیین ویژگی‌های گسل‌های اصلی حاصل گردید. رهیافت یاد شده، توسط جونز و همکاران (Jones et al., 2004) جهت تعیین مرزهای پهنه برشی در جنوب خاور اسکاتلند مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو، موقعیت مرز پهنه برشی به صورت 320/40NE برآورد شد. تحلیل استریوگرافی مرز پهنه برشی و صفحه عمود بر محور تاوایی نشان‌دهنده مقدار زاویه θ برابر با ۱۹ درجه می‌باشد (شکل ۸). از این رو، با توجه به مدل‌های ارائه شده توسط جونز و همکاران (Jones et al., 2004) و ویلیامز و همکاران (Williams et al., 2006) (شکل ۲) و با توجه به مقدار به دست آمده برای زاویه $\theta = 19^{\circ}$ ($0 < \theta < 90$) می‌توان تقارن هندسی تری کلینیک برای پهنه برشی مورد مطالعه در نظر گرفت.

در جریان دگرشکلی پلاستیکی کانی‌های کوارتز، زاویه بازشدگی (OA) (Opening angle) فابریک محور C کوارتز با افزایش دما، فشار سیال و کاهش

جدول ۱- مقادیر دمای دگرشکلی با استفاده از رابطه فالروس و همکاران (Faleiros et al., 2016).

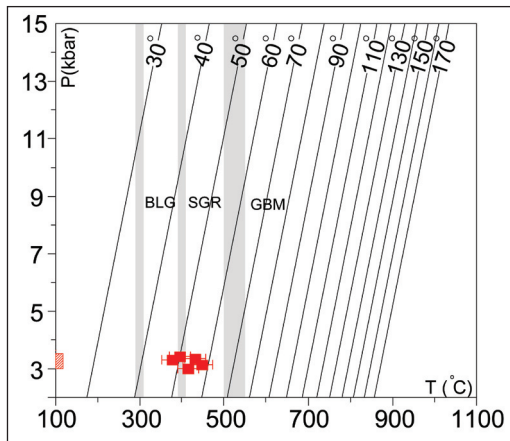
Table 1. Amounts of deformation temperature using equation of Faleiros et al. (2016).

Sample No	Opening angle (°)	Temperature (°C) (Faleiros et al., 2016)
1	54	420 ± 50
2	48	379 ± 50
3	56	434 ± 50
4	50	393 ± 50
5	50	393 ± 50
6	58	448 ± 50



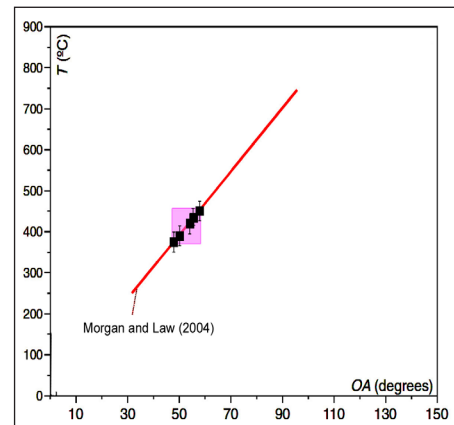
شکل ۸- تحلیل استریوگرافی صفحه عمود بر تاوایی و مرز پهنه برشی جهت تعیین زاویه θ .

Figure 8. Stereography projection of vorticity normal section and shear zone boundary for determination of θ angle.



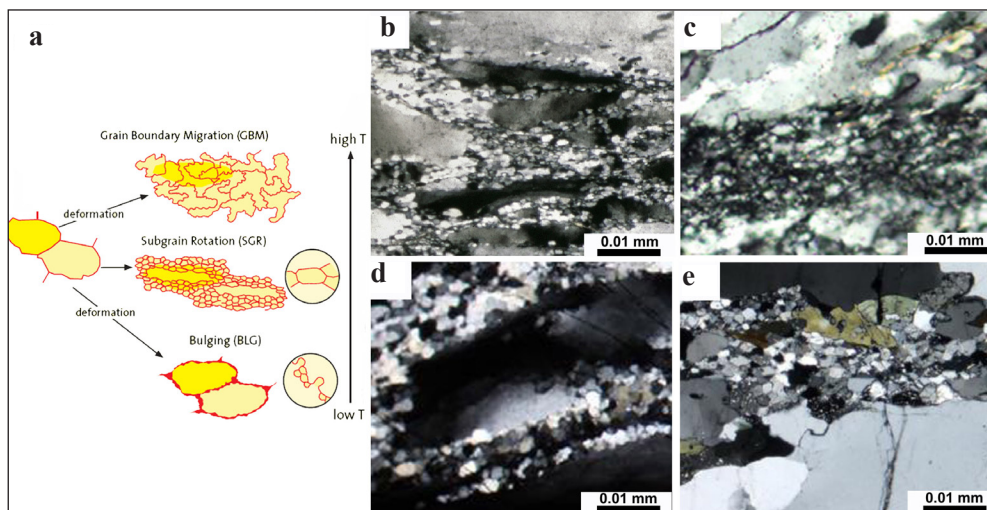
شکل ۱۰- مقادیر فشار دگرشکلی با استفاده از نمودار تجربی استیپ و همکاران (Stipp et al., 2002). محور افقی (دما بر حسب درجه سانتی‌گراد)، محور قائم (فشار بر حسب کیلوبار) و خطوط مایل مقادیر زاویای باز شدگی فابریک C کوارتز می‌باشند.

Figure 10. The amounts of deformation temperature with application of experimental diagram (Stipp et al., 2002). Horizontal axis (temperature °C), vertical axis (pressure Kbar) and inclined lines are quartz opening angles.



شکل ۹- تعیین محدوده دمای دگرشکلی با استفاده از نمودار مورگان و لاور (Morgan and Law, 2004).

Figure 9. Determination of deformation temperature using Morgan and Law (2004) diagram.



شکل ۱۱- نمایش نمادین سازوکارهای بازبلورش دینامیکی (Stipp et al., 2002). (b و c) بازبلورش ترموی، (d و e) بازبلورش چرخش ریزدانه.

Figure 10. The amounts of deformation temperature with application of experimental diagram (Stipp et al., 2002). Horizontal axis (temperature °C), vertical axis (pressure Kbar) and inclined lines are quartz opening angles.

۵- نتیجه گیری

کانی کوارتز (شکل‌های ۵ و ۷)، گویای وجود یک جریان دگرشکلی ناهم‌محور با چیرگی برش راست‌گرد در پهنه مورد مطالعه می‌باشد.
- بر اساس تحلیل ساختارهای برگ‌وارگی، خط‌وارگی و موقعیت نسبی مرز پهنه برشی مقدار زاویه θ برابر با ۱۹ درجه محاسبه گردید. بنابراین، هندسه دگرشکلی با تقارن تری کلینیک به‌عنوان مدل تکامل ساختاری در این پهنه پیشنهاد می‌گردد.

بر اساس مطالعات ساختاری و بافت ساختاری برپایه جهت‌یابی ترجیحی شکل و جهت‌یابی ترجیحی شبکه کانای کوارتز در پهنه برشی جنوب‌دهبید، نتایج زیر حاصل گردید:
- بررسی‌های بافت ساختاری (میکاهای ماهی‌شکل، پورفیرو کلاست‌های پلکانی، فابریک نوع سیگما و نوارهای برشی s-c و الگوی نامتقارن جهت‌یافتگی محور c

در محدوده ۱۲/۵ تا ۱۵ کیلومتر می‌باشد.

سیاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مالی و معنوی صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG1401.341) درانجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

- بر اساس مقادیر بازشدگی محور c کوارتز دمای دگرگونی در حدود 379 ± 50 تا 448 ± 50 درجه سانتی‌گراد و در حد رخساره شیبست سبز تا مرز ابتدایی رخساره آمفیبولیت تعیین گردید.
- بررسی‌های بافت ساختاری و دما سنجی گویای چیرگی بازبلورش Bulging و چرخش ریز دانه به‌عنوان سازوکارهای اصلی دگرشکلی در منطقه می‌باشند.
- نتایج نشان‌دهنده فشار دگرگونی در محدوده ۳ تا ۳/۵ کیلوپار و ژرفای دگرشکلی

کتابنگاری

جعفریان، م.ب.، زمانی پدram، م.، ۱۳۷۸، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ملایر. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.

References

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation. *Tectonophysics* 229, 211–238, doi: 10.1016/0040-1951(94)90030-2.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1–20, doi: 10.2475/ajs.304.1.1.
- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American journal of science*, vol. 307, 1064-1095. doi.org/10.2475/09.2007.02.
- Derikvand, S., Shoorangiz, M., Hashemi Dehsarvi, L., and Sarkarinejad, K., 2023. Kinematic analyses of the asymmetric boudins in the Tutak area within the Zagros hinterland fold-and-thrust belt, Iran. *Journal of Earth Sciences* 247, 105597. doi: 10.1007/s12303-014-0049-z.
- Faleiros, F.M., Moraes, R., Pavan, M., and Campanha, G.A.C., 2016. A new empirical calibration of the quartz c-axis fabric opening-angle deformation thermometer, *Tectonophysics* 671: 173-182. doi:10.1016/j.tecto.2016.01.014.
- Fergusson, C., Nutman, A., Mohajjel, M., and Bennett, V.C., 2016. The Sanandaj–Sirjan Zone in the Neo-Tethyan suture, western Iran: Zircon U–Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis, *Gondwana Research*, 58: 216-238. doi: 10.1016/j.gr.2016.08.006
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jafarian, M.B., and Zamani Pedram, M., 1999. *Geological map of Malayer 1:100000. Geological survey of Iran. (In Persian)*.
- Jones, R.R., Holdsworth, R.E., and Baily, W., 1997. Lateral extrusion in transpression zones. *Journal of Structural Geology* 19, 1201-1217. doi: 10.1016/S0191-8141(97)00034-5.
- Jones, R.R., Holdsworth, R.E., Clegg, P., McCaffrey, K., and Tavarnelli, E., 2004. Inclined transpression. *Journal of Structural Geology* 26, 1531–1548. doi: 10.1016/j.jsg.2004.01.004.
- Keshavarz, S., and Faghil, A., 2020. Heterogeneous sub-simple deformation in the Gol-e-Gohar shear zone (Zagros, SW Iran): Insights from microstructural and crystal fabric. *International Journal of Earth Sciences* 109: 421- 438. doi: 10.1007/s00531-019-01812-9.
- Kruhl, J.H., 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 142–146. doi: 10.1111/j.1525-1314.1998.00063.
- Law, R.D., 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: a review. *Journal of Structural Geology* 66, 129–161. doi: 10.1016/j.jsg.2014.05.023.
- Law, R.D., Searle, M.P., and Simpson, R.L., 2004. Strain, deformation temperatures and vorticity of flow at the top of the Greater Himalayan Slab, Everest Massif, Tibet. *Journal of Geological Society of London*. 161, 305–320. doi: 10.1144/0016-764903-047.
- Lin, S., Jiang, D., and Williams, P.F., 2007. Kinematics of shear zones: a review with emphasis on a triclinic model and the importance of differentiating ductile slickenside striations from stretching lineations. *Geological Bulletin of China* 26, 19–31.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 519–535. doi: 10.1016/j.jsg.2003.08.009.
- Mohajjel, M., and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22, 1125-139. doi: 10.1016/S0191-8141(00)00023-7.
- Morgan, S.S., and Law, R.D., 2004. Unusual transition in quartzite dislocation creep regimes and crystal slip systems in the aureole of the Eureka Valley–Joshua Flat–Beer Creek pluton, California: a case for anhydrous conditions created by decarbonation reactions. *Tectonophysics* 384, 209–231. doi: 10.1016/j.tecto.2004.03.016.
- Passchier, C.W., and Trouw, R.A.J., 2006. *Microtectonics*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg– New York.
- Price, G.P., 1985. Preferred Orientations in Quartzites. In: Wenk, H.-R. (Ed.), *Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analysis*. Academic Press, Orlando, pp. 385–406.

- Ramsay, J.G., Graham, R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences* 7, 786–813.
- Ramsay, J.G., and Huber, M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology. Strain Analysis*, Academic Press, London, 1: 307p.
- Samani, S., Faghhih, A., and Grasemann, B., 2019. Strain pattern and vorticity analysis of deformed conglomerate in the Heneshk area within the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Zagros Mountain, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 109: 145-157. doi: 10.1007/s00531-019-01794-8.
- Samani, B., 2013. Quartz c-axis evidence for deformation characteristics in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. *Journal of African Earth Sciences* 81:28-34.
- Samani, B., 2015. Strain analysis using structural elements and geometry of surfaces of no finite longitudinal strain. *Arabian Journal of Geosciences* 8: 8461-8468.
- Samani, B., 2017. Deformation flow analysis and symmetry of Gushti shear zone, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. *Geopersia* 7: 117-130.
- Sanderson, D.J., and Marchini, W.R.D., 1984. Transpression. *Journal of Structural Geology* 6, 449–458. doi: 10.1016/0191-8141(84)90058-0.
- Sarkarinejad, K., and Goftari, F., 2019. Thick-skinned and thin-skinned tectonics of the Zagros orogen, Iran: Constraints from structural, microstructural and kinematics analyses. *Journal of Asian Earth Sciences* 170, 249-273. doi: 10.1016/j.jseas.2018.10.021.
- Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghhih, A., 2015. Kinematics of the Sirjan mylonite nappe, Zagros Orogenic Belt: insights from strain and vorticity analyses. *Journal of Geosciences* 3, 189-202. doi: 10.3190/jgeosci.198.
- Sarkarinejad, K., Samani, B., Faghhih, A., Grasemann, B., and Moradipoor, M., 2010. Implications of strain and vorticity of flow analyses to interpret the kinematics of an oblique convergence event (Zagros Mountains, Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 38, 34–43. doi: 10.1016/j.jseas.2009.12.015.
- Short, H.A., and Johnson, S.E., 2006. Estimating vorticity from fibrous calcite veins, central Maine, USA. *Journal of Structural Geology* 28, 1167–1182. doi: 10.1016/j.jsg.2006.03.024.
- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, and Schmid S., 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. doi: 10.1016/s0191-8141(02)00035-4.
- Tikoff, B., and Fossen, H., 1999. Three-dimensional reference deformations and strain facies. *Journal of Structural Geology* 21, 1497-1512. doi: 10.1016/S0191-8141(99)00085-1.
- Trouw, R.A.J, Passchier, C.W, and Wiersma, D.J., 2010. *Atlas of Mylonites and related microstructures*. Springer Press.
- Tunini, L., Munt, I., Fernandez, M., Verges, J., Villasenor, A., 2015. Lithospheric mantle heterogeneities beneath the Zagros Mountains and the Iranian Plateau: apetrological-geophysical study. *Geophys. Journal International* 200, 596-614. doi: 10.1093/gji/ggu418
- Twomey V., 2010. Three-dimensional strain distribution and deformation temperature interpreted from quartz microstructures and petrofabrics in the Okanagan valley shear zone, southern Canadian cordillera. Simon Fraser University 2014.
- Williams, P.F., Jiang, D., and Lin, S., 2006. Interpretation of deformation fabrics of infrastructure zone rocks in the context of channel flow and other tectonic models. In: Law, R., Searle, M., Godin, L. (Eds.), *Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation of Lower-mid Crust in Continental Collision Zones*. Geological Society of London, Special Publications 268, 221–235. doi: 10.1144/GSL.SP.2006.268.01.10.
- Xypolias, P., 2010. Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications, *Journal of Structural Geology* 42: 1-21. doi: 10.1016/j.jsg.2010.08.009.