Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2025, Vol. 15(1): 51 - 65

Research Article

Pressure-temperature analysis of deformation based on the quartz petrofabric characteristics (case study of Samen deformed granite, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt)

Babak Samani[1*]

1- Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

Keywords: *Sanandaj-Sirjan, Samen deformed granite, Recrystallization, Quartz c-axis pattern, Preferred orientation*

1-Introduction

Quartz is one of the most abundant rock-forming minerals in the Earth's crust and can be seen in metamorphosed rocks in almost all parts of the world. Analysis of the structural texture of quartz minerals in two domains of shape-preferred orientation (SPO) and lattice-preferred orientation (LPO) helps structural geologists to understand the kinematic and dynamic nature of natural metamorphic zones. Temperature and strain geometry are two dominant factors that control the orientation of quartz crystals within a rock. Temperature determines which slip planes are active, typically reoriented to be perpendicular to maximum stress (Passchier and Trouw, 2005; Faleiros et al., 2016; Fossen, 2016). Understanding the typical way that quartz crystals reorient under different states of strain can provide geologists with an additional tool for understanding paleo-strain. Understanding quartz deformation behavior under constriction will allow geologists and working professionals to better identify the strain patterns within quartz-rich rocks associated with constriction, and it can be used to study regional strain patterns in large-scale mountain ranges. Within the field of crystallography, crystals are defined by their crystal axes. Quartz has three a-axes radiating out of the center of a crystal and through the edge where two prism planes meet. The c-axis radiates from the center of a crystal through the vertex of all of the rhombohedral planes. Stereonet projection plots are a tool used by geologists to visually represent the orientation of objects in space. Dynamic recrystallization was described by Guillope and Poirier (1979). Recrystallization occurs at elevated temperatures > ~300ºC within rocks deep in Earth's crust—the dynamic recrystallization of quartz results in crystal-preferred orientations (LPO).LPO depends upon active slip planes, slip directions, and strain orientation (Barth et al., 2010). Understanding the LPO of quartz is inherently complicated because it is a function of many additional variables, such as water content and strain rate (Stipp et al., 2002). In this research, the c-axis structural texture analysis of the quartz mineral was used to investigate the deformation temperature and pressure conditions in the Saman deformed granite located in the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt.

2-Methodology

Eight oriented samples have been prepared to study the quartz c-axis fabric pattern in the Samen deformed granite. All samples parallel the lineation and are normal to the foliation plane (XZ-plane). In many cases, the Samen deformed granite shows a dominant mylonite texture, and penetrative foliation and lineation have been developed in these mylonite parts. Using a polarizing microscope and U-stage, the nature of dynamic recrystallization, deformation flow, temperature, and pressure conditions of deformation have been analyzed.

* Corresponding author: b.samani@scu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2024.46275.2440
Received: 2024-11-04
Accepted: 2025-03-21

ISSN: 2717-0764

3-Results and Discussion

Here are three main mechanisms of dynamic recrystallization. From ~280-400°C, bulging recrystallization (BLG) is dominant. BLG combines the other two recrystallization mechanisms: subgrain rotation and grain boundary migration. Subgrain rotation (SGR) is the dominant form of recrystallization between 400-500°C (Stipp et al., 2002). Grain boundary migration (GBM) occurs from 500-650°C (Stipp et al., 2002; Twomey, 2010). Transitions between mechanisms are caused by differing rates of dislocation climb compared to dislocation production (Twomey, 2010). During the crystal plastic deformation of quartz, the opening angle of c-axis fabrics (O.A.) increases with rising temperature and 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 the opening angle and temperature for rocks naturally deformed within the range of approximately 250–650 °C, and it is 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 & Law, 2004). A close correlation between temperatures obtained using the O.A. thermometer and mineral equilibrium methods for different tectonic settings worldwide has supported using O.A. as a reliable deformation thermometer (Law, 2014).

Several reasons place the O.A. thermometer as an advantageous method to quantify temperatures in deformed rocks: (1) quartz is one of the most common rock-forming minerals of crustal rocks; (2) its deformation behavior generally dominates the rheology of the crust; (3) it is stable over the full range of crustal metamorphic conditions and can accommodate crystal–plastic deformation from diagenetic (≤150 °C) to ultra-high-temperature conditions (up to 1150 °C); (4) the thermometer applies to rocks that lack index metamorphic minerals; and (5) reliable quartz c-axis fabrics can be easily obtained from standard thin sections using inexpensive optical or computer integrated polarization techniques. However, since its proposition, the O.A. thermometer has only recently been subjected to further validation based on a few additional data (Law, 2014), and the relationship between O.A. and temperatures above ~650 °C is still poorly constrained. Faleiros et al. (2016) proposed a relation to determine the metamorphic temperature for an opening angle less than 87 degrees (T (°C) = 6.9OA (degrees) + 48). Based on Morgan and Law's (2004) monogram and the Faleiros et al. (2016) equation, the deformation temperature was determined between 393±50 and 531±50 degrees Celsius. Also, using the experimental diagram of Stipp et al., 2002, the metamorphic pressure was calculated between 3.2- 5.3 kbar. The deformation depth was calculated to be about 12 to 20 km, assuming a gradient of 30°C per kilometer. 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 critical deformation mechanisms in the deformed rocks.

4-Conclusion

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

- According to the petrofabric analysis, the study area has a non-coaxial deformation with a dextral shear sense.

According to the opening angle of the quartz c-axis fabric, the deformation temperature ranges from 393±50 to 531±50 °C. This temperature window coincides with greenschist at the lower boundary of the amphibolite facies.

- Bulging recrystallization and sub-grain boundary recrystallization are the dominant deformation mechanisms in the deformed rocks.
- Results show a deformation pressure of about 3.2 to 5.3 kbar and a depth of deformation near 12 to 20 km.

5-References

Barth, N., Hacker, B., Seward, G., Walsh, E., Young, D., and Johnston, S., 2010. Strain within the Ultrahigh

ISSN: 2717-0764

Pressure Western Gneiss Region of Norway, Recorded by Quartz CPOs. Geological Society Special Publications 335, 663-685. https://doi.org/10.1144/SP335.27.

Faleiros, FM., Moraes, R., Pavan, M., Campanha, GAC., 2016., A new empirical calibration of the quartz c-axis fabric opening-angle deformation thermometer. Tectonophysics 671, 173-182. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.014.

Fossen, H., 2016. Structural Geology, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge. 524 P.

Guillopé, M., Poirier, JP., 1979. Dynamic recrystallization during creep of single-crystalline halite: an experimental study. Journal of Geophysical Research 84, 5557-5567. https://doi.org/10.1029/JB084iB10p05557.

Kruhl, JH., 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. Journal of Metamorphic Geology 16, 142–146. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00063.

Law, RD., 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: a review. Journal of Structural Geology 66, 129-161. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.023.

Law, RD., Searle, MP., Simpson, RL., 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. https:// doi/abs/10.1144/0016-764903-047.

Passchier, CW., Trouw, RAJ., 2006. Microtectonics. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, P. 366.

Price, GP., 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. 406.

Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., 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, 1861-1884.

Twomey, V., 2014. Three-dimensional strain distribution and deformation temperature interpreted from quartz microstructures and petrofabrics in the Okanagan valley shear zone, southern Canadian cordillera. M.Sc. Thesis, Simon Fraser University.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Samani, B., 2025. Pressure-temperature analysis of deformation based on the quartz petrofabric characteristics (case study of Samen deformed granite, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt). Adv. Appl. Geol. 15(1), 51-65.

DOI: 10.22055/aag.2024.46275.2440
URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19159.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

تحلیل دما و فشار دگرشکلی بر اساس ویژگی‌های بافت‌ساختاری کانی کوارتز (مطالعه موردی در گرانیت دگرشکل شده سامن، پهنه دگرگونی سنندج ـ سیرجان)

بابک سامانی
گروه زمین شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز
b.samani@scu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

چکیده

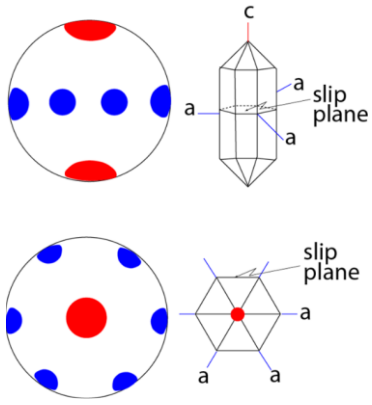
شناخت فرایندهای مختلف دگرشکلی که طی آن کانی کوارتز دچار جهت‌یافتگی ترجیحی می‌شود برای زمین شناسان می‌تواند بعنوان یک ابزار مفید جهت فهم شرایط دگرشکلی دیرین مفید باشد. شرایط دمایی و هندسه دگرشکلی به عنوان دو عامل اساسی در تعیین ماهیت جهت‌گیری ترجیحی شبکه (Lattice preferred orientation) در کانی کوارتز می‌باشند. توده‌های گرانیتی و گنیسی از سیماهای زمین‌ساختی شاخص در رژیم‌های کششی و فشارشی در کمربندهای کوهزایی هستند. گرانیت دگرشکل شده سامن واقع در کمربند دگرگونی سنندج ـ سیرجان یکی از توده‌های گرانیتی مهم در بخش شمال غربی کشور می‌باشد. در این پژوهش ویژگی‌های بافت‌ساختاری محور c کانی کوارتز در بخش‌های میلونیتی این توده گرانیتی دگرشکل شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل حاکی از آن است که الگوی محور c کانی کوارتز در اثر رخداد یک جریان دگرشکلی ناهم محور با جهت برش راستگرد در این توده سنگی توسعه یافته است. بررسی‌های بافت‌ساختاری نشان داد که کانی کوارتز در اثر توسعه رژیم‌های بازبلورش چرخش ریز دانه و مهاجرت مرز دانه در محدوده دمایی ۵۰±۳۹۳ تا ۵۰±۵۳۱ درجه سانتیگراد و قلمرو فشاری ۳/۲ تا ۵/۳ کیلوبار دچار دگرشکلی شده است.

واژه‌های کلیدی : *سنندج- سیرجان، گرانیت دگرشکل شده سامن، بازبلورش، الگوی محور c کوارتز، جهت یابی ترجیحی*

۱- مقدمه

کوارتز یکی از فراوان‌ترین کانیهای سنگ‌ساز در پوسته زمین بوده و تقریبا در همه نقاط دنیا در سنگهای دگرشکل شده قابل مشاهده می‌باشد. تحلیل بافت‌ساختاری کانی کوارتز در قالب جهت‌یابی ترجیحی شکل (Shape preferred orientation, SPO) و جهت‌یابی ترجیحی شبکه (Lattice preferred orientation, LPO) به زمین‌شناسان ساختاری جهت درک ماهیت جنبش‌شناختی و دینامیکی پهنه‌های دگرشکل‌شده کمک شایانی می‌نماید. دما عامل تعیین کننده سطوح لغزش در کانی کوارتز بوده و جهت‌یابی سطوح لغزش در جهت عمود بر تنش‌های حداکثر می‌باشد (Passchier and Trouw, 2006; Faleiros et al., 2016; Fossen, 2016; Faghih et al., 2023; Mansouri et al., 2023; Soleimani et al., 2023; Keshavarz et al., 2024). بر اساس مطالعات پیشین در شرایط دگرشکلی انقباضی، پهن‌شدگی و کرنش صفحه‌ای، جهت‌یابی محور a و c کانی کوارتز می‌تواند بصورت پراکنده، حلقوی و نقطه‌ای تشکیل شود (Bart et al., 2010; Passchier and Trouw, 2005; Fossen, 2016). در دانش بلورشناسی، کانیها بوسیله محورهای بلورشناسی مشخص می‌شوند. کانی کوارتز دارای سه محور a بوده که بصورت شعاعی از مرکز بلور و از محل برخورد دو صفحه منشورخارج می‌شوند (شکل ۱). محور c از مزکر بلور عبور کرده و از نقطه محل برخورد سطوح رمبوهدر منشورخارج می‌شود (شکل ۱). تصویر-سازی استریوگرافیک به شناخت بهتر موقعیت فضایی این محورها کمک می‌نماید. کانیهای کوارتز در درون سنگ در ارتباط با حالات متفاوت کرنش و دمای بازبلورش از طریق بازبلورش دینامیکی دچار جهت‌یافتگی ترجیحی می‌شوند. بازبلورش دینامیکی توسط Guillope و Poirier (۱۹۷۹) بصورت تغییر شکل حاصل از تغییر در اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها یا جهت‌یابی آنها بدون تغییر در ترکیب شیمیایی آنها تعریف شده است. بازبلورش در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد در سنگ‌های اعماق پوسته زمین رخ می‌دهد. سنگ‌ها در اعماق زمین تحت تاثیر تنش‌های لیتواستاتیک و تنش‌های تکتونیکی

واقع می‌شوند. بازبلورش دینامیکی و تشکیل جهت‌یابی ترجیحی کانی‌های کوارتز به صفحات لغزشی فعال، راستای لغزش و جهت‌یابی محورهای کرنش وابسته می‌باشد (Barth et al., 2010). با این حال فهم جهت‌یابی ترجیحی شبکه بلوری کوارتز ماهیتا به دلیل وجود عواملی همچون نقش آب و سایر سیالات و نرخ کرنش بسیار پیچیده می‌باشد (Stipp et al., 2002). علاوه بر این آزمایش‌های دگرشکلی سنگ‌ها عموما در شرایط برش محض (دگرشکلی هم محور) صورت پذیرفته است در حالیکه سنگهای دگرشکل شده در حالت طبیعی، می‌توانند بوسیله ترکیبی از کرنش‌های برشی محض و برشی ساده (دگرشکلی ناهم محور) نیز حاصل شوند که در هر حالت الگوی جهت‌یافتگی ترجیحی متفاوتی را حاصل خواهند نمود. از این رو مدل‌سازی جهت‌یابی ترجیحی محورهای نوری کوارتز کاری دشوار خواهد بود (Schmid and Casey, 1986; Barth et al., 2010). در این پژوهش جهت بررسی شرایط دما و فشار دگرشکلی در گرانیت دگرشکل شده سامن واقع در کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان از تحلیل‌های بافت ساختاری محور c کانی کوارتز بهره گرفته شده است.



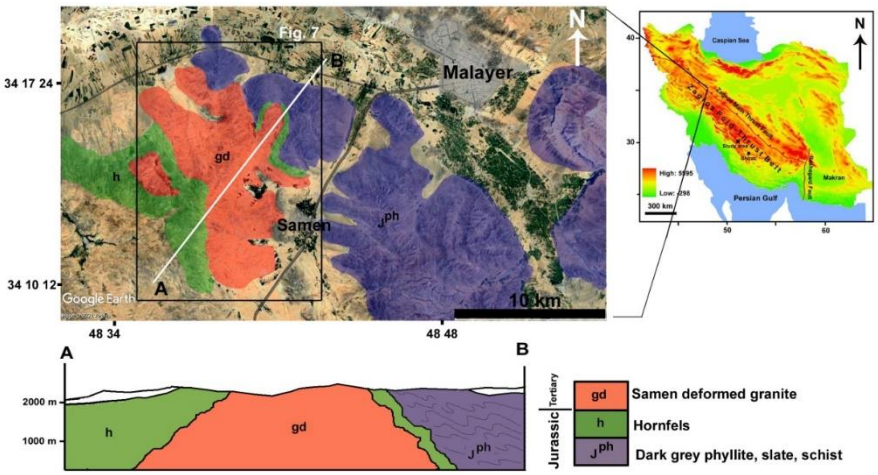
شکل ۱- (a) بلور کوارتز با سطوح لغزش قاعده ای <a> و استریوگراف محورهای نوری a وc و (b) سطوح لغزشی منشوری <a> و استریوگراف مربوط به محورهای نوری a و c (Quine et al., 2016)

Figure 1. (a) Quartz crystal with an active basal <a> slip and corresponding stereonet of quartz c- and a-axes, and (b) quartz crystal with an active prism <a> slip and the corresponding stereonet of quartz c- and a-axes (Quine et al., 2016)

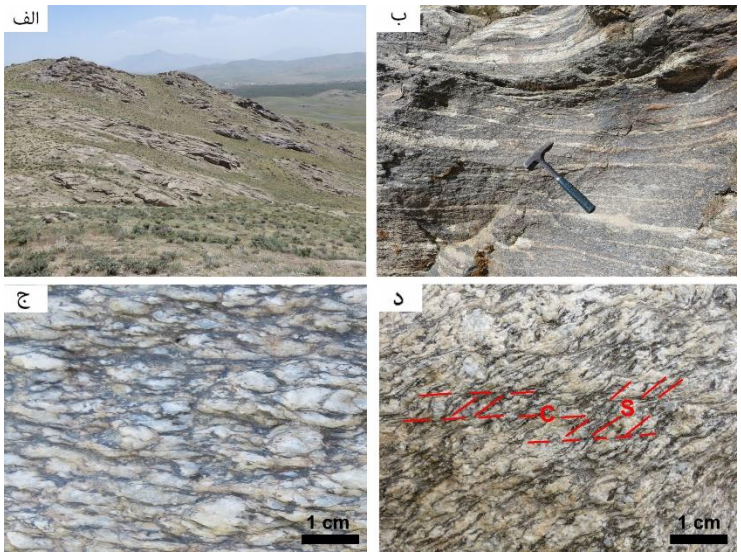
۲-جایگاه زمین ساختی و زمین شناسی

کوهزاد زاگرس بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا بوده که در حاشیه شمال‌شرقی صفحه سنگ‌کره‌ای آفریقا-عربی قرار گرفته است (Takin, 1972; Alavi, 2004; Sarkarinejad et al., 2008, 2015). کمربند کوهزایی زاگرس در نتیجه بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر خرده قاره ایران مرکزی و برخورد قاره-قاره از زمان کرتاسه پسین تا ترشیری شکل گرفته است (Stocklin, 1968; Dewey et al., 1973; Berberian and King, 1981; Blanc et al., 2003; Ghasemi and Talbot, 2006). این کمربند در راستای شمال شرق- جنوب غرب شامل پهنه‌های ساختاری مختلفی از جمله ارومیه-دختر، سنندج-سیرجان و زاگرس چین خورده-رانده می‌باشد. پهنه ساختاری سنندج-سیرجان دارای روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق بوده و از سنگ‌های دگرشکل و دگرگون شده با درجات مختلف دگرگونی و گسل‌های راندگی فراوان تشکیل شده است. ویژگی‌های سنگی و ساختاری این زون معرف یک گودی ژرف و یا کافت میانه بلوک در سپر پرکامبرین ایران و عربستان می‌باشد (Alavi, 2007; Sarkarinejad et al., 2015a, b; Keshavarz and Faghih, 2020). سنگ‌های دگرشکل شده در این کمربند دگرگونی نشان دهنده چندین مرحله دگریختی در خود می-باشند که آخرین مرحله دگریختی در ارتباط با فرایند برخورد قاره‌ای بین ورقه های آفرو-عربی و ایران می‌باشد (Mohajjel and Fergussen, 2000; Mc Quarrie, 2004). نتیجه مطالعات اخیر نشان می‌دهد که عملکرد همزمان تنشهای همگرایی و برشی مهمترین تاثیر را در تکامل ساختاری این بخش داشته‌اند. به گونه‌ای که بر اساس مطالعات اخیر می‌توان رژیم ترافشارش راستگرد را مهمترین پارامتر در توسعه پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان دانست (Sarkarinejad et al., 2010, 2017; Samani, 2015, 2017; Samani et al., 2019; Fergussen et al., 2016). جابجایی و انباشتگی توده های راندگی سبب افزایش ستبرای پوسته قاره‌ای به اندازه

تقریبی ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر شده است که بی‌هنجاری گرانی بوگه منفی گواهی بر این حقیقت می باشد (Tunini et al., 2015). منطقه مورد مطالعه در فاصله ۱۶ کیلومتری جنوب غرب شهرستان ملایر در استان همدان واقع شده است. سنگ‌های دگرشکل شده این منطقه بخشی از سنگ‌های کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان می‌باشند. از لحاظ سنگ شناسی عمده سنگ-های موجود در منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای همچون فیلیت، اسلیت، میکا شیست و شیست‌های سبز و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی همچون هورنفلس‌ها و سنگ‌های آذرین همچون توده‌های گرانیتی می‌باشد. به دلیل همجواری توده گرانیتی مذبور به شهرستان سامن این توده بعنوان گرانیت سامن شناخته می‌شود. مرز واحدهای سنگی عموما ناگهانی بوده در بخشهای شمالی و جنوبی عموما بصورت همبری با واحدهای سنگی هورنفلسی می‌باشد. شکل ۲ نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. گرانیت سامن یک گرانیت دگرشکل شده بوده که در بسیاری از بخش‌ها دارای یک بافت میلونیتی همراه با توسعه فابریک‌های خطی و صفحه‌ای می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه.
Figure 2: Geological map of the study area.



شکل ۳- (a) نمایی از توده گرانیت دگرشکل شده سامن (دید به سمت شمال غرب)، (b) نوارهای کشیده شده و بافت میلونیتی، (c) لنزهای کوارتزی و (d) نوارهای برشی نوع S-C.
Figure 3. (a) A view of Samen deformed granite, (b) Stretch rebons and mylonite texture, (c) Quartz lenses, and (d) S-C shear bands.

۳- روش پژوهش

به منظور بررسی و تحلیل الگوی جهت‌یافتگی ترجیحی محور c کانی کوارتز در توده گرانیتی دگرشکل شده، تعداد هشت نمونه جهت‌دار تهیه گردید. از این رو مقاطع نازک منطبق با صفحه اصلی XZ بیضوی کرنش (به موازات خطوارگی و عمود بر برگوارگی) تهیه گردید. مقاطع نازک از دیدگاه شاخص‌های بافت ساختاری به منظور تحلیل ماهیت بازبلورش دینامیکی، ماهیت جریان دگرشکلی و شرایط دما و فشار حاکم بر دگرشکلی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و صفحه یونیورسال استیج مورد بررسی قرار گرفت.

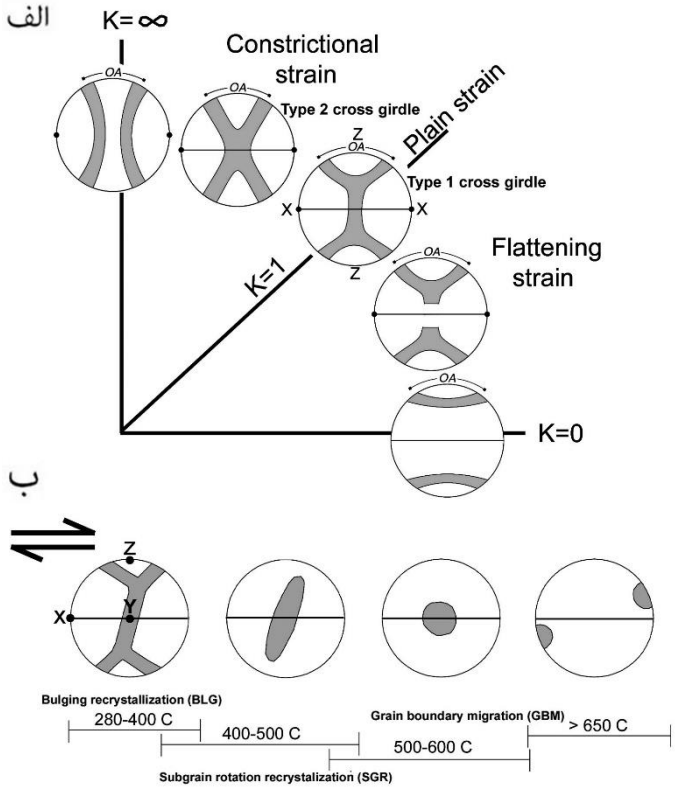
۴- جهت یابی ترجیحی محور c کوارتز

در بسیاری از سنگ‌های دگرشکل شده، جهت‌گیری محورهای بلورشناسی کانیها بصورت پراکنده نبوده و دارای یک الگوی هندسی منظم می‌باشد. این سنگ ها نشان دهنده یک جهت-یابی ترجیحی در شبکه بلورشناسی کانیهای خود می‌باشند. اغلب سنگ‌های دگرشکل‌شده غنی از کوارتز الگوهای متفاوتی از جهت‌یابی محور c را نشان می‌دهند. بسته به شرایط حاکم بر دگرشکلی و تاثیر عواملی همچون دما و فشار دگرشکلی، هندسه دگرشکلی، سیستم‌های لغزشی، تاوایی، تنش‌های تفاضلی و نقش سیالات الگوهای متفاوتی از جهت‌یابی ترجیحی شبکه در محور c کانی کوارتز حاصل می‌شود (Law, 2014; Samani, 2013; Keshavarz et al., 2018; Faghih et al., 2020). الگوی جهت یابی ترجیحی شبکه بوسیله تصویرسازی استریوگرافی، بصورت کمانهایی بزرگ یا کوچک قابل نمایش می‌باشد (شکل۴الف). الگویی از جهت‌یابی ترجیحی شبکه که در آن کمانها بصورت متقاطع نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند الگوی متقاطع نوع یک (Type 1) و دو (Type 2) را نشان می‌دهند. آرایشی که در آن کمانها در راستای دوایر کوچک قرار گیرند حاکی از شکل‌گیری جهت‌یابی ترجیحی شبکه در شرایط هندسه کرنش تخت می‌باشد. در صورتی که کمانها در راستای دوایر بزرگ آرایش یابند نشان دهنده شکل‌گیری جهت‌یابی ترجیحی در شرایط کرنش کشیده خواهد بود (شکل۴الف). در تصویرسازی استریوگرافیکی تحت شرایط کرنش ناهم محور (Non-coaxial) با هندسه صفحه‌ای، الگوی دیگری از جهت-یابی ترجیحی شبکه حاصل می‌شود (Passchier and Trouw, 2005; Law, 2014). در این حالت عموما الگوی متقاطع نوع یک یا حلقه منفرد که بصورت مایل نسبت به برگوارگی و خط وارگی قرار گرفته حاصل می‌شود (شکل۴ب). در دمای متوسط تا بالا تمرکز داده‌ها در اطراف محور Y بوده و با افزایش دما (دمای بالای ۶۵۰ درجه سانتیگراد) تمرکز داده‌ها بصورت نقطه‌ای و در راستایی نزدیک به خط وارگی قرار می-گیرد (Passchier and Trouw, 2005; Low, 2014; Faghih and Soleimani, 2015). برای اندازه‌گیری جهت ترجیحی شبکه LPO و برای بدست آوردن جهت‌گیری محور c در کوارتز از روش نوری و میکروسکپ پلاریزان استفاده می‌شود. در این مطالعات از مقاطع نازک جهت‌دار در صفحه XZ بیضوی کرنش استفاده می‌شود (Passchier, 1988). از مزیت‌های انتخاب این مقطع این است که می‌توان نسبت بیضوی کرنش و همچنین مقدار تاوایی را نیز محاسبه نمود. به دلیل عدم وجود رخ و ماکل قابل تشخیص در کوارتز و همچنین یک محوری بودن آن، بهترین جهت نوری قابل اندازه‌گیری در این کانی محورc می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جهت-یافتگی ترجیحی در شبکه بلوری استفاده می‌شود. در این مطالعه از روش نوری با استفاده از صفحه یونیورسال استیج (U-stage) برای به دست آوردن جهت‌یافتگی ترجیحی شبکه‌ای محور c کوارتز استفاده شده است.

۵- مکانیزم های دگرشکلی کوارتز

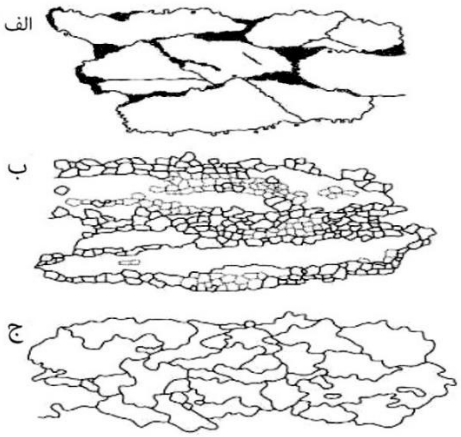
کانی کوارتز در درون سنگ در ارتباط با حالات متفاوت کرنش و دمای بازبلورش از طریق بازبلورش دینامیکی دچار جهت-یافتگی ترجیحی می‌شود. بازبلورش در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد در سنگ‌های اعماق پوسته زمین رخ می‌دهد. سنگها در اعماق زمین تحت تاثیر تنشهای لیتواستاتیک و تنشهای زمین‌ساختی واقع می‌شوند. بازبلورش دینامیکی و تشکیل جهت‌یابی ترجیحی کانیهای کوارتز به ماهیت صفحات لغزشی فعال، راستای لغزش و جهت‌یابی محورهای کرنش وابسته می‌باشد (Barth et al., 2010). به طور کلی سه مکانیزم بازبلورش برای کانی کوارتز وجود دارد. تقریبا از دمای ۲۸۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد بازبلورش تورمی (Bulging recrystallization) فرایند غالب می‌باشد. بازبلورش چرخش ریزدانه (Subgrain rotation recrystallizatio) فرایند غالب در دماهای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد است (Stipp et al., 2002). فرایند غالب در دماهای ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد بازبلورش مهاجرت مرز دانه (Grain boundary migration) می‌باشد (شکل ۴ب و ۵) (Stipp et al., 2002; Twomey

2010). مرز حرارتی انتقالی بین مکانیزم‌های مختلف باز بلورش تابعی از میزان نرخ کرنش و میزان سیال (آب) می‌باشد. مشاهدات حاصل از بررسی مقاطع نازک نشان دهنده توسعه بازبلورش چرخش ریزدانه و بازبلورش مهاجرت مرز دانه در حاشیه کانی کوارتز می‌باشد (شکل۶).



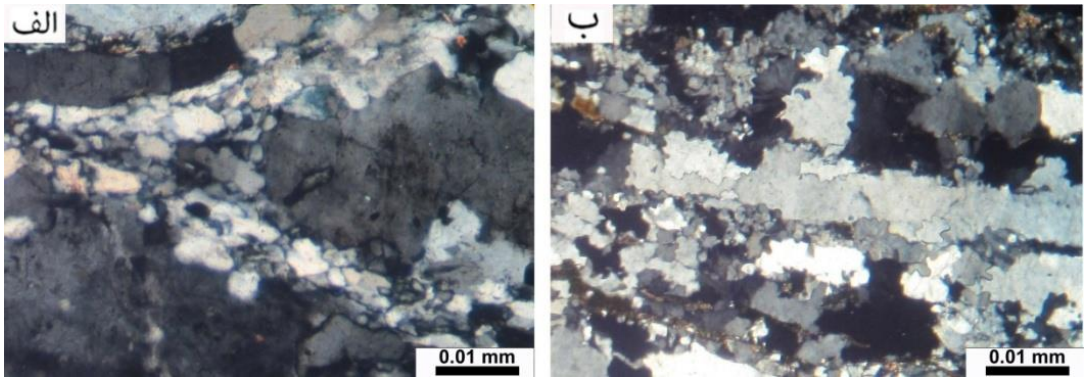
شکل۴- الگوی جهت یابی محور c کانی کوارتز در شرایط دگرشکلی هم محور (a) و ناهم محور (b) (Faleiros et al., 2016)

Figure 4. Quartz c-axis fabric in the co-axial (a) and non-co-axial deformation (b) (Faleiros et al., 2016)



شکل ۵- مکانیزم های مختلف بازبلورش دینامیکی. (a) بازبلورش تورمی، (b) بازبلورش چرخش ریزدانه و (c) بازبلورش مهاجرت مرز دانه (Stipp et al., 2002).

Figure 5. Different dynamic recrystallization mechanisms. (a) Bulging recrystallization, (b) sub-grain rotation recrystallization and (c) grain boundary migration recrystallization (Stipp et al., 2002)



شکل ۶- مکانیزم های مختلف بازبلورش دینامیکی در مقاطع میکروسکوپی. (a) بازبلورش چرخش ریزدانه و (b) بازبلورش مهاجرت مرز دانه.

Figure 6. Different dynamic recrystallization mechanisms in the microscopic thin sections. (a) sub-grain rotation recrystallization and (b) grain boundary migration recrystallization.

۶- بحث

در جریان دگرشکلی پلاستیکی کانی کوارتز، زاویه بازشدگی (Opening angle, OA) فابریک محور c کوارتز با افزایش دما، فشار سیال و کاهش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد (Kruhl, 1998; Law et al., 2004; Samani, 2013; Law, 2014, Mahmoudi Sivand et al., 2021; Mansouri et al., 2021; Partabian and Faghih, 2021; Soleimani et al., 2021). نتایج شبیه سازی‌های عددی نیز حاکی از حساس بودن زاویه بازشدگی فابریک c کوارتز نسبت به هندسه سه بعدی کرنش می‌باشد (Price, 1980). بر اساس مطالعات (Kruhl, 1998; Law, 2014) مشخص شده است که در محدوده دمایی ۶۵۰-۲۵۰ درجه سانتیگراد یک رابطه خطی بین زاویه بازشدگی و دمای دگرشکلی وجود دارد. 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 بازشدگی بعنوان یک دما سنج جهت تعیین دمای دگرشکلی استفاده کرد. استفاده از زاویه بازشدگی کوارتز جهت تعیین دمای دگرشکلی از چند جنبه حائز اهمیت است: ۱) کوارتز فراوان‌ترین کانی سنگ ساز در پوسته زمین می‌باشد، ۲) رفتار دگرشکلی کوارتز عموما شبیه رفتار پوسته زمین است، ۳) کانی کوارتز در تمام شرایط دگرگونی پایدار بوده و از محدوده دیاژنز (دمای کمتر از ۱۵۰ درجه) تا شرایط دگرگونی بسیار دما بالا (بالاتر 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 دماهستند می‌تواند مفید باشد، و ۵) با استفاده از مقاطع نازک مناسب و با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به یونیورسال استیج می‌توان به مطالعه فابریک محور c کوارتز پرداخت. شکل ۷ الگوی فابریکی حاصل از محور c کانی کوارتز در بخش های مختلف گرانیت دگرشکل شده سامن را نشان می‌دهد.

زاویه بازشدگی فابریک محور c کانی کوارتز شدیدا وابسته به دما بوده و می توان از آن به عنوان یک ریزدماسنج بالقوه برای تعیین دمای دگرشکلی استفاده کرد. (Kruhl, 1998) با مطالعه سنگهای دگرگونی آلپ و با استفاده از مدل سازی ریاضی و مقادیر زوایای بازشدگی کوارتز، نموداری را جهت تعیین دمای دگرگونی ارائه داد. این نمودار بطور گسترده‌ای توسط زمین-شناسان برای اندازه‌گیری دمای دگرگونی مورد استفاده قرار گرفته است. (Morgan and Law, 2004) با استفاده از داده-های مختلف فابریک محور c کوارتز روابط تجربی و نمودارهایی را جهت تعیین دمای دگرگونی ارائه دادند. همانگونه که اشاره گردید در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد ارتباط خطی بین دمای دگرگونی و زاویه بازشدگی برقرار است. (Faleiros et al., 2016) با استفاده از داده‌های انتشار یافته در مقالات معتبر علمی (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۳) و با استفاده از کالیبراسیون سازی تجربی داده‌ها روابطی را برای تعیین دمای دگرشکلی بر اساس زاویه بازشدگی کوارتز به شرح زیرارائه نمودند:

(رابطه ۱)

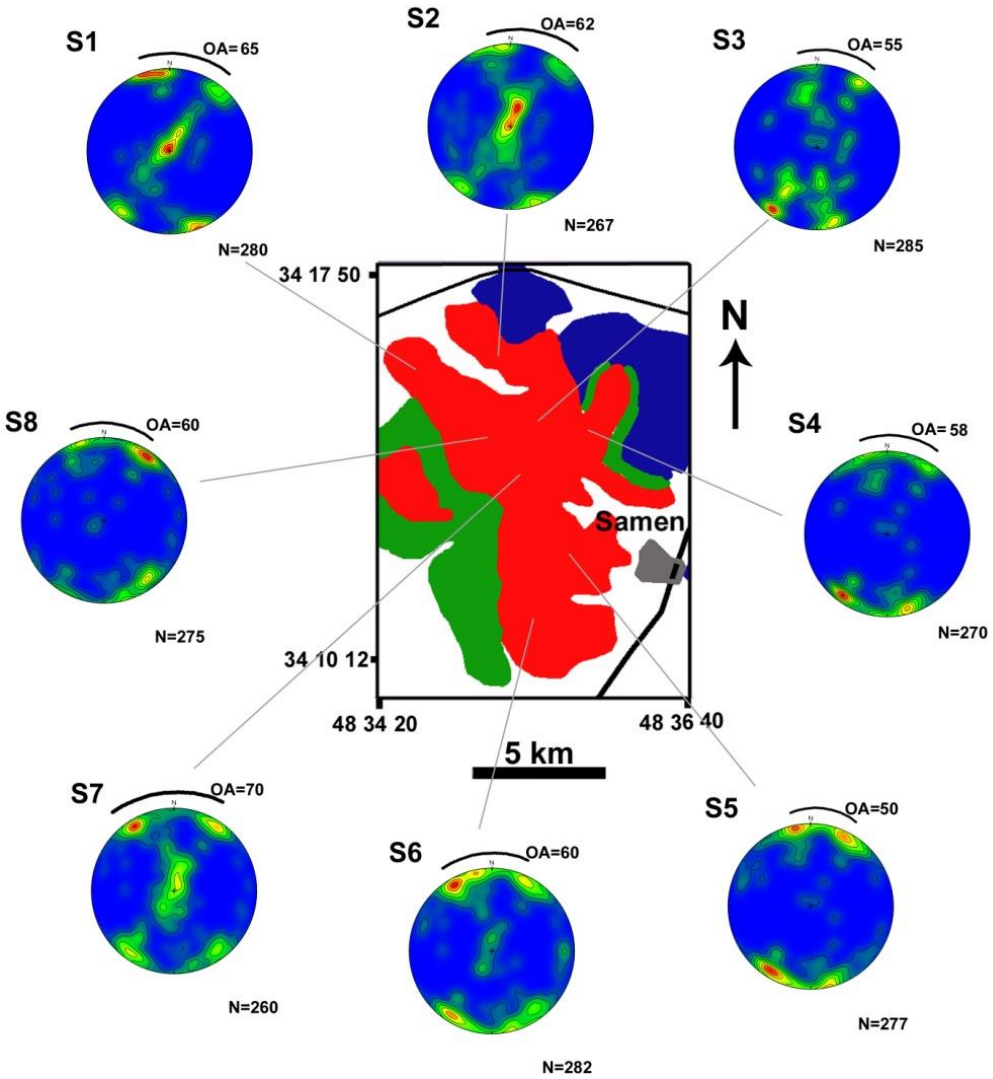
$$T(°C)= 6.9OA(degrees)+ 48$$

(رابطه ۲)

$$T(°C)= 4.6OA(degrees)+ 258$$

در روابط فوق OA زاویه بازشدگی فابریکی محور c کوارتز می‌باشد. رابطه یک برای محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد و مقادیر زاویه بازشدگی کمتر از ۸۷ درجه و رابطه دو برای محدوده دمایی ۶۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد و مقادیر زاویه بازشدگی بیشتر از ۸۷ درجه کاربرد دارد. با توجه به مقادیر زاویه بازشدگی برای نمونه‌های S1 تا S8 با استفاده از رابطه یک و نمودار تجربی Morgan and Law (2004) مقادیر دمای دگرگونی محاسبه گردید (جدول ۱ و شکل ۸).

برای تعیین فشار دگرگونی از نمودار تجربی Stipp و همکاران (۲۰۰۲) استفاده گردید. بر این اساس مقادیر فشار در محدوده‌ای بین ۳.۲ تا ۵.۳ کیلوبار تعیین گردید (شکل ۹). بر اساس مقادیر دما و فشار به دست آمده و با فرض وجود گرادیان حرارتی ۳۰ درجه سانتیگراد به ازای هر کیلومتر می‌توان عمق تدفین و دگرشکلی را در حدود ۱۲ تا ۲۰ کیلومتر محاسبه نمود. بررسی فابریکی محور c کانی کوارتز نشان دهنده توسعه الگوی حلقه‌های متقاطع نوع یک (Type 1 cross girdle) با عدم تقارن حول محور Z می‌باشد. عدم تقارن الگوی حاصله حاکی از وجود یک جریان دگرشکلی نا هم محور با مولفه برشی راستگرد در منطقه می‌باشد (شکل ۷).



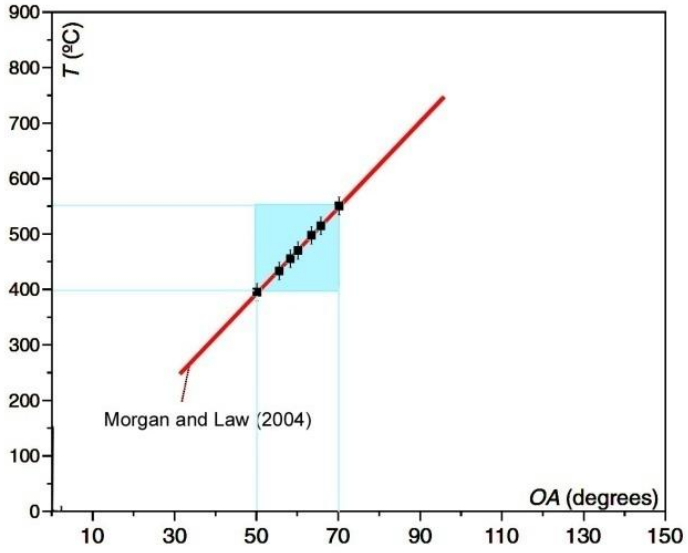
شکل ۷- تصویر استریوگرافی الگوی محور c کانی کوارتز در گرانیت دگرشکل شده سامن.

Figure 7. Stereography projection of quartz c-axis in the Samen deformed granite.

جدول۱- برآورد مقادیر دمای دگرشکلی بر اساس زاویه بین یالی (Faleiros et al., 2016)

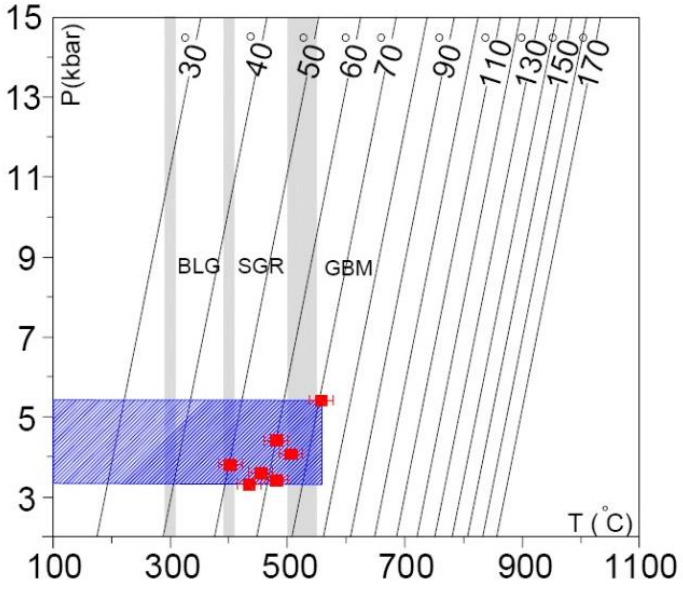
Table 1. Estimation of deformation temperature using the opening angle (Faleiros et al., 2016)

Sample No	Opening angle (°)	Temperature (°C) (Faleiros et al., 2016)
S1	65	496 ± 50
S2	62	476 ± 50
S2	55	428 ± 50
S4	58	448 ± 50
S5	50	393 ± 50
S6	60	462 ± 50
S7	70	531 ± 50
S8	60	462 ± 50



شکل۸- تعیین دمای دگرگونی بر اساس نمودار (Morgan and Law, 2004).

Figure 8. Determination of deformation temperature based on (Morgan and Law, 2004).



شکل ۹- مقادیر فشار دگرشکلی با استفاده از نمودار تجربی Stipp et al (2002)

Figure 9. The amounts of deformation temperature with application of experimental diagram (Stipp et al., 2002).

۷- نتیجه‌گیری

در مناطق دگرگونی با عدم توسعه کانی‌های شاخص حرارتی، روش تحلیل فابریکی محور c کانی کوارتز می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل شرایط دما و فشار دگرگونی و تعیین ماهیت رخساره‌های دگرگونی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از فابریک محورهای بلور کوارتز در تعیین هندسه کرنش و ماهیت جریان دگرشکلی می‌تواند کارگشا باشد. بر اساس مطالعات فابریک محور c کوارتز بر روی گرانیت‌های دگرشکل شده منطقه سامن واقع در نوار دگرگونی سنندج-سیرجان نتایج زیر حاصل گردید:

-تصویرسازی استریوگرافیکی محور c کانی کوارتز نشان دهنده الگوی نامتقارن حلقه‌های متقاطع نوع یک می‌باشد. عدم تقارن موجود در الگوی فابریکی محور c کوارتز نشان دهنده وجود مولفه کرنش ناهم محور راستگرد در این پهنه دگرشکل شده می‌باشد.

- بر اساس مقادیر زاویه بازشدگی محور c کوارتز دمای دگرشکلی در حدود ۵۰±۳۹۳ تا ۵۰±۵۳۱ درجه سانتیگراد و در حد رخساره شیست سبز تا مرز ابتدایی رخساره آمفیبولیت تعیین گردید.

- بررسی‌های بافت ساختاری حاکی از غلبه بازبلورش چرخش ریز دانه و تا حدی مهاجرت مرز دانه‌ای می‌باشد.

- نتایج نشان دهنده شرایط فشار بین ۳/۲ تا ۵/۳ کیلوبار در طی رخداد دگرشکلی می‌باشد.

قدردانی

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

مراجع

Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. American Journal of Science 304, 1–20. https://doi.org/ 10.2475/ajs.304.1.1.

Alavi, M., 2007.Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. American Journal of Science 307, 1064-1095. https://doi.org/10.2475/09.2007.02.

Barth, N., Hacker, B., Seward, G., Walsh, E., Young, D., and Johnston, S., 2010. Strain within the Ultrahigh Pressure Western Gneiss Region of Norway, Recorded by Quartz CPOs. Geological Society Special Publications 335, 663-685. https://doi.org/10.1144/SP335.27.

Berberian, M., King, GCP., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18, 210-265. https://doi.org /10.1139/e81-019.

Blanc, EJ-P., Allen, MB., Inger, S., Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. Journal of Structural Geology 160, 401–12. https://doi.org/10.1144/0016-764902-110.

Dewey, JF., Pitman Iii, WC., Ryan, WBF. Bonini, J., 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine System. Geological Society of America Bulletin 84, 3137–80. http://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<3137:PTATEO>2.0.CO;2.

Faleiros, FM., Moraes, R., Pavan, M., Campanha, GAC., 2016. A new empirical calibration of the quartz c-axis fabric opening-angle deformation thermometer. Tectonophysics 671, 173-182. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.014.

Faghih A., Dehghan M., Sobhani SS., 2023. Study of deformation pattern and kinematic characteristics in the Gelmandeh metamorphic complex, Saghand region, Central Iran. Advanced Applied Geology 12 (4), 617-634. https://doi.org/10.22055/AAG.2021.37039.2216

Faghih, A., Soleimani, M., 2015. Quartz c-axis fabric development associated with shear deformation along an extensional detachment shear zone: Chapedony Metamorphic Core Complex, Central-East Iranian Microcontinent. Journal of Structural Geology 70, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.016

Faghih A., Soleimani M., Partabian A., 2020. Exhumation style of the Chapedony core complex, Central Iran: Insights from kinematic vorticity analysis. Geotectonics 54 (5), 705-712. https://doi.org/10.1134/s0016852120050040

Fergosson, C. Nutman, A. Mohajjel, M. Bennett, VC., 2016. The Sanandaj–Sirjan Zone in the Neo-Tethyansuture, western Iran: Zircon U–Pb evidence of latePalaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis. Gondwana Research 58, 216-238. https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.08.006.

Fossen, H., 2016. Structural Geology, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge. 524 P.

Ghasemi, A., Talbot, CJ., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). Journal of Asian Earth Science 26, 683-93. https://doi.org/doi:10.1016/j.jseaes.2005.01.003.

Guillopé, M., Poirier, JP., 1979. Dynamic recrystallization during creep of single-crystalline halite: an experimental study. Journal of Geophysical Research 84, 5557-5567. https://doi.org/10.1029/JB084iB10p05557.

Keshavarz, S., Faghih, F., 2020. Heterogeneous sub-simple deformation in the Gol-e-Gohar shear zone (Zagros, SW Iran): insights from microstructural and crystal fabric analyses. International Journal of Earth Sciences 109, 421-438. https://doi.org/10.1007/s00531-019-01812-9.

Keshavarz, S., Faghih A., Asadi S., Soleimani M., Zarei S., 2024. PT conditions of deformation of the Gol-e-Gohar shear Zone, SW Iran: Insights from analysis of quartz c-axis fabrics, recrystallization mechanisms and syndeformational fluid inclusions. Journal of Asian Earth Sciences 262, 106010. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106010.

Keshavarz, S., Faghih A., Shahpasandzadeh M., Zarei S., 2018. Steady state deformation in the shear zones of the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Neyriz region. Journal of Tectonics 2 (5), 97-109. https://doi.org/10.22077/JT.2018.952.

Kruhl, JH., 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. Journal of Metamorphic Geology 16, 142-146. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00063.

Law, RD., 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: a review. Journal of Structural Geology 66, 129-161. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.023.

Law, RD., Searle, MP., Simpson, RL., 2004. Strain, deformation temperatures and vorticityof flow at the top of the Greater Himalayan Slab, Everest Massif, Tibet. Journal of Geolgical Society of London 161, 305-320. https:// doi/abs/10.1144/0016-764903-047.

Mahmoudi Sivand, S., Faghih, A., Keshavarz, S., Soleimani, M., 2021. Characterizing syn-convergent extension along the Neybaz-Chatak detachment shear zone, Central Iran: insights from microstructures, quartz petrofabrics and flow vorticity analysis. Journal of Structural Geology 143, 104270. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104270.

Mansouri, SM., Keshavarz, S., Shahpasandzadeh, M., Faghih, A., 2021. Strain and vorticity analyses using rotated porphyroclasts in the Tanbour metamorphic rocks: Evidence of transpressional deformation along the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt. Journal of Structural Geology 148, 104358. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104358.

Mansouri, S.M., Keshavarz, S., Shahpasandzadeh, M., Faghih, A., 2023. Kinematics of the Tanbour Metamorphic Complex (SE Iran): Implications for Cenozoic Metamorphism and Deformation in the Northeastern Margin of the Afro-Arabian Plate. Geotectonics 57 (2), 213-229. https://doi.org/10.1134/S001685212302005X.

McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. Journal of Structural Geology 26, 519-535. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.009.

Mohajjel, M., Fergusson, CL., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. Journal of Structural Geology 22, 1125-139. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00023-7.

Morgan, SS., Law, RD., 2004. Unusual transition in quartzite dislocation creep regimes and crystal slip systems in the aureole of the Eureka Valley–Joshua Flat–Beer Creekplúton, California: a case for anhydrous conditions created by decarbonation reactions. Tectonophysics 384, 209–231. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.016.

Partabian A., Faghih A., 2021. Doming along the Zagros transpression zone, SW Iran: insights from microstructural analysis of heterogeneous deformation. Arabian Journal of Geosciences 14, 1-19. https://doi.org/10.1007/s12517-021-06835-8.

Passchier, CW., 1988. Analysis of deformation paths in shear zones. Geologische Rundschau 77, 309-318. https://doi.org/10.1007/BF01848692.

Passchier, CW., Trouw, RAJ., 2006. Microtectonics. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, P. 366.

Price, GP., 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. 406.

Ramsay, JG., Graham, RH., 1970. Strain variation in shear belts. Canadian Journal of Earth Sciences 7, 786-813. https://doi.org/10.1139/e70-078.

Ramsay, JG., Huber, MI., 1983. The Techniques of Modern Structural Geology. Strain Analysis, Academic Press, London. 307 PP.

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. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.01.006.

Samani, B., 2015. Strain analysis using structural elements and geometry of surfaces of no finite longitudinal strain. Arabian Journal of Geosciences 8, 8461-8468. https://doi.org /10.1007/s12517-015-1842-3.

Samani, B., 2017. Deformation flow analysis and symmetry of Gushti shear zone, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. Geopersia 7, 117-130. https://doi.org /10.22059/geope.2017.219333.648281.

Samani, B., Faghih, A., 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. https://doi.org /10.1007/s00531-019-01794-8.

Sarkarinejad, K., Samani, B., Faghih, A., Grasemann, B., 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. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.12.015.

Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A., Samani B., 2017. Kinematic analysis of rock flow and deformation temperature of the Sirjan thrust sheet, Zagros Orogen, Iran. Geological Magazine 154(1), 147-165. https://doi.org/10.1017/S0016756815000941.

Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A. 2015a. Kinematics of the Sirjanmylonite nappe, Zagros Orogenic Belt: insights from strain and vorticity analyses. Journal of Geosciences 60, 189–202. https://doi.org/10.3190/jgeosci.198.

Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A., 2015b. Strain analysis in the Sanandaj-Sirjan HP-LT Metamorphic Belt, SW Iran: Insights from small-scale faults and associated drag folds. Journal of African Earth Sciences 105, 47-54. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.02.006.

Schmid, SM., Casey, M., 1986. Complete fabric analysis of some commonly observed quartz c-axis patterns in mineral and rock deformation. In: Hobbs, B.E., Heard, H.C., (Eds.), Mineral and rock deformation: laboratory studies: The Paterson Volume: American Geophysical Union, Geophysical Monograph 36, 263-286. https://doi.org/10.1029/gm036p0263.

Soleimani, M., Faghih, A., Bagherpour, B., Adibinejad, M., Sobhani, SS., 2023. Deformation microthermometry in the Toutak gneiss dome based on petrofabric characteristics of quartz crystal, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. Advanced Applied Geology 14, 106-121. https://doi.org/10.22055/aag.2023.43423.2360.

Soleimani, M., Faghih, A., Kusky, T., 2021. Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Central East Iranian Microcontinent: evidence from the Boneh Shurow metamorphic core complex. Journal of the Geological Society 178 (6), 2020-123. https://doi.org/10.1144/jgs2020-123.

Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. Bulletin of American Association of Petroleum Geology 52, 1229-1258. https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D.

Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., 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, 1861-1884.

Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. Nature 235, 147-150. https://doi.org/10.1038/235147a0.

Tunini, L., Munt, I., Fernandez, M., Verges, J., Villasenor, A., 2015. Lithospheric mantle heterogeneities beneath the Zagros Mountains and the Iranian Plateau: a petrological-geophysical study. Geophysical Journal International 200, 596-614. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4.

Twomey, V., 2014. Three-dimensional strain distribution and deformation temperature interpreted from quartz microstructures and petrofabrics in the Okanagan valley shear zone, southern Canadian cordillera. M.Sc. Thesis, Simon Fraser University.