Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2026, Vol. 16(1): 174 - 200

Research Article

Ductile deformation analysis and determination of shear sense in the Borujerd-Dorud shear zone, Northwest of Iran

Fatemeh Ahmadi[1], Ali Solgi[1], Hsan Haji Hoseinlou[2]*, Mehran Arian[1], Siamak Baharvand[3]

1- Department of Earth Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of Geology, Khoy.C., Islamic Azad University, Khoy, Iran
3- Department of Geology, Khor.C., Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Keywords: *Borujerd-Dorud shear zone, fabric element deformation analysis, shear indicators, dextral oblique transpressional, partitioning.*

1-Introduction

The study area is located in the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone, along the Dorud and Qaleh-Hatam faults in the Borujerd-Dorud region. This zone trends northwest-southeast, parallel to the Dorud strike-slip fault and the right-lateral Qaleh-Hatam strike-slip fault. The Dorud fault, trending northwest-southeast, covers almost the entire study area, and the Qaleh-Hatam fault, trending northwest-southeast, separates the Nahavand fault from the Dorud fault (Fig. 1). Shear zones are a topic that has fascinated many geologists in recent decades. In shear zones, deformation analysis involves identifying fabric elements and shear sense indicators to understand how rocks have deformed (Haji Hosseinlou, et al., 2015). These analyses help determine the tectonic history of an area, including the direction and magnitude of stress and strain. The aim of this research is to analyze the deformations of fabric elements and shear sense indicators in the Borujerd-Dorud shear zone. By analyzing these fabric elements and shear sense indicators, we can reconstruct the deformation history in an area, including the type of stress (compression, tension), the direction of movement along faults, and the conditions (temperature, pressure) under which deformation occurred (Haji Hosseinlou, 2016).

2-Material and methods

In the studied area, during field studies, structural measurements were taken in the designated sections. For microstructural studies, approximately 80 oriented thin sections were prepared from all rocks in the studied area. For the preparation of oriented thin sections, cutting parallel to the stretching lineation and perpendicular to the mylonitic foliation was performed. The reason for sampling rocks from the area was to determine the metamorphic conditions during deformation phases and to determine the direction and sense of shear in the sections. To investigate the fabric elements and shear sense indicators of the studied area, the results were combined with the structural status of each sample and field observations. Laboratory studies included examining the relationship between the crystallization of some minerals and deformation, deformation mechanisms, and shear sense indicators. The differentiation of deformation stages in different units was carried out using field evidence and microscopic studies. Based on the fabric present in the rocks and the relationship of porphyroclasts with existing foliations, the relationship between deformation stages and metamorphic stages was interpreted. Determining the direction and sense of shear in shear zones are important tools in structural and microstructural investigations of deformed areas. In shear zones, a correct assessment of the sense and direction of shear is an essential factor in structural and microstructural observations (Haji Hosseinlou, 2021). Field and laboratory criteria can be used as shear indicators to understand the sense and direction of shear (Haji Hosseinlou, 2015). Shear indicators include various types

* Corresponding author: hajihosseinlouhassan@iau.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.51531.2557
Received: 2026-01-03
Accepted: 2026-05-20

ISSN: 2717-0764

of structures, microstructures, and fabric elements. Even using these shear indicators and fabric elements, the sense and direction of shear can be determined for zones that are reverse, normal, and strike-slip relative to displacement indicators. The study of microstructures or rock fabric, especially in the study of thin sections, can be used in two general areas. This is because the study of microstructures and metamorphism in thin sections leads to an understanding of the tectonic evolution of the rock. This article examines issues related to the study of deformation of fabric elements and shear indicators in the Borujerd-Dorud shear zone along the Dorud and Qaleh Hatam faults. The observed shear indicators and fabric elements in this area include: S- and Z-shaped shear folds, S-C shear band structures, mantle porphyroclasts of type σ, fish-shaped structures, sigmoidal tension gashes, asymmetric boudins, sheath folds.

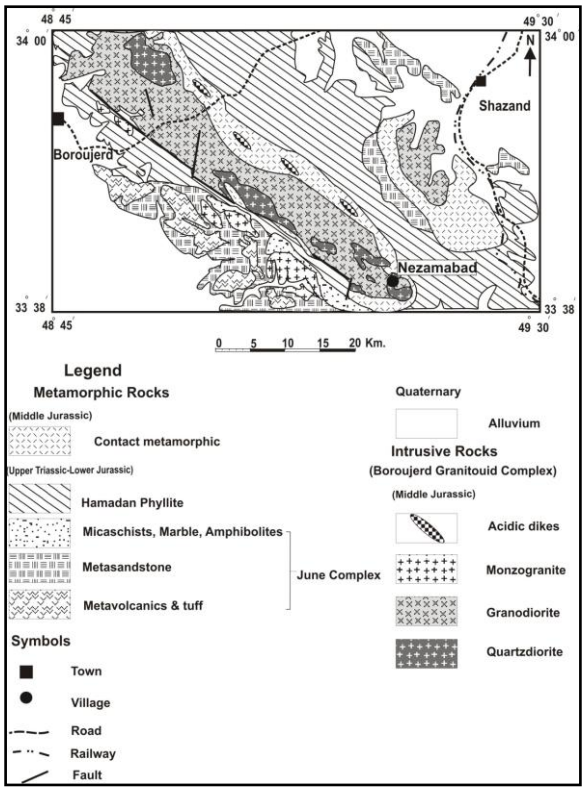


Fig.1. Geological map of the study area

3-Results and discussions

Petrographic studies in the Borujerd-Dorud shear zone show that the metamorphic grade of the rocks in this area is within the greenschist and upper amphibolite facies, with temperatures around 300C0 and above 700C0. On the other hand, the presence of andalusite and the absence of kyanite in these rocks indicate metamorphism at pressures less than 4 kilobars. Based on the information obtained from structural and microstructural studies of the Borujerd-Dorud area, it is clear that the resulting structures in this area are both high-temperature and low-temperature types, so in this area, most deformations occurred in the solid state and at high temperatures. Among the most important high-temperature structures are twin bending in plagioclase, asymmetric σ-type porphyroclastic structures in many alkali feldspars, and the absence of folding in enclosed rocks. Among the most important low-temperature structures in this area are fragmented feldspar porphyroclasts in the region's mylonites, dynamic fracturing of feldspar and quartz, undulatory extinction in quartz, and so on. The structural and tectonic position of the Borujerd-Dorud shear zone is located within the Zagros structural-tectonic belt. This area is affected by folding and faulting resulting from the collision of the Eurasian and Arabian tectonic plates. Specifically, these areas are located in the High Zagros Folded Belt and are affected by the main faults of this region, including the Main Zagros Fault. Therefore, the studied area is affected by deformation resulting from tectonic stresses with a northeast-southwest trend. In the study area, the Dorud and Nahavand faults, which are right-lateral strike-slip faults,

ISSN: 2717-0764
CC BY

have displaced the Main Zagros Reverse Fault. In the Borujerd-Dorud area, structural and microstructural studies show two main categories of structures in this area. (1) The first category of structures is related to right-lateral shear movements, and (2) the second category is related to thrust movements that occurred in this area. Right-lateral shear movements were created by the oblique transpressional strike-slip component, and thrust movements were created by the oblique transpressional compressional component. Structural and microstructural studies conducted in the Borujerd-Dorud shear zone suggest that the oblique transpressional model presented by Jones et al., (2004), which addresses the shortcomings of the Sandersone and Marchini, 1984 model, can also be considered for the Borujerd-Dorud area. The presence of right-lateral shear type indicators and ductile fabric elements indicates that the Borujerd-Dorud shear zone formed during deformation in right-lateral transpressional tectonics. Studies of the study area reveal three phases of deformation. In the first phase of regional deformation (D1), horizontal stresses, along with thermal phases, caused the rocks to metamorphose and form first-generation folds across the area. Evidence of this metamorphism appears as layering and the formation of first-generation foliation, and evidence of second deformation (D2) appears as the formation of second-generation foliation and ductile shear zones in the area. Mylonitic foliations formed in the shear zone during the second generation have been folded in the third generation of deformation (D3). The most significant deformation in the Borujerd area is the second deformation, and the third deformation causes the folding of the mylonitic foliation. Evidence of movement in the Borujerd-Dorud shear zone includes: (1) Evidence of reverse movement in the Borujerd-Dorud shear zone: Boudin axes parallel to the foliation strike, reverse faults, and elongated S-shaped folds form in reverse shear zones. (2) Evidence of strike-slip movement in the Borujerd-Dorud shear zone: In the Borujerd shear zone, boudin axes parallel to the foliation dip, and elongated Z-shaped folds form in strike-slip shear zones. (3) Evidence of combined strike-slip and dip-slip movement in the Borujerd-Dorud area: S-C shear bands, fault folds, various fish-shaped structures, and mantle porphyroclasts indicate that ductile deformation shows combined strike-slip and dip-slip movements.

4-Conclusion

In response to various deformations in the Borujerd-Dorud area, deformation textures such as extensional foliation, shear band cleavage (S-C fabric), bending and fracturing, fish-shaped structures in various crystals, and micro-deformation structures including undulatory extinction and pressure solution processes have been observed in the rocks of the region, indicating a temperature range of 300 to more than 700 degrees Celsius under brittle-ductile deformation conditions. The Borujerd-Dorud shear zone has been affected by three stages of deformation (D1-D3). The first and second deformation stages acted as progressive ductile deformation, and the third deformation stage acted as brittle-ductile deformation. The mylonitic foliations collected in this shear zone have a dominant northwest-southeast strike and a moderate to high dip to the northeast. Mylonitic lineation mainly show a north-northeast to north trend and have a low to moderate plunge. In the study area, the intensity of deformations decreases from the northwest at the Qaleh Hatam fault to the southeast along the Dorud fault, and also from west to east in the Borujerd area. The concentration of deformation intensity in the north and west of Borujerd can be attributed to the presence of numerous shear zones and faults in these areas. In the research area, the general trend of boudins is parallel to the foliations of the Dorud fault, so these structures occurred due to shear movements and were formed along the Dorud fault. Based on microscopic studies of samples collected from thrust shear zones, a right-lateral strike-slip component can be inferred for all thrusts. It seems that the activity of shear zones here increases the intensity of deformations and the development of mylonitic conditions. In the Borujerd-Dorud shear zone, structures and microstructures indicating reverse and right-lateral strike-slip shear are observed together, indicating partitioning in this zone. This indicates that oblique tectonic forces relative to the Borujerd-Dorud deformation zone occurred due to convergent tectonics between the Arabian plate and the Zagros zone. From a tectonic perspective, the study area clearly shows right-lateral transpression. The cause of this tectonic regime is the oblique collision of the Arabian platform with the Zagros block, which has been separated into two components: compressional and shear, due to the collision. Compressive stress has caused folding and thrusting, and shear stress has caused the right-lateral strike-slip component in the Borujerd area.

ISSN: 2717-0764

5-References

Haji Hosseinlou H., 2015. Kinematics of Transpressional Deformation Zones in the Urmia Fault Zone, Northwest Iran. Journal of Earth Sciences 7, 59-67.

Haji Hosseinlou, H., 2016. Petro fabric. Islamic Azad University Khoy Branch publication, p. 334.

Haji Hosseinlou, H., 2021. Petrofabric analysis of the Chaharsoton-Deshwan fault area, northwest Salmas. Advanced Applied Geology 11(3), 514-535. https:// doi/10.22055/aag.2020.33165.2112.

Haji Hosseinlou, H., Solgi, A., Mohajjel, M., Pourkermani, M., 2015. Deformation partitioning in response inclined transpression collision of Arabian plate with west Alborz-to azarbayjan block, the Khoy shear zone. Geoscience 24, 181-196. https:// doi/ 10.22071/gsj.2015.43398.

Jones, R.R., Tanner, P.W.G., 1995. Strain partitioning in transpression zones. Journal of Structural Geology 17, 793-802.

Sanderson, DJ., Marchini, WRD., 1984. Transpression. Journal of Structural Geology 6, 449-458.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Ahmadi, F., Solgi, A., Haji Hoseinlou, H., Arian, M., Baharvand, S,. 2026. Ductile deformation analysis and determination of shear sense in the Borujerd-Dorud shear zone, Northwest of Iran. Adv. Appl. Geol. 16 (1), 174-200.
DOI: 10.22055/aag.2026.51531.2557
https://aag.scu.ac.ir/article_20670.html

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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

بررسی دگرشکلی خمیری و تعیین سوی برش در زون برشی بروجرد – دورود، غرب ایران

فاطمه احمدی

گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی سلگی

دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

حسن حاجی حسینلو

گروه زمین‌شناسی، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران

مهران آرین

دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

سیامک بهاروند

گروه زمین‌شناسی، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران

hajihosseinlouhassan@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

چکیده

ناحیه مورد مطالعه در زون دگرگونی سنندج - سیرجان و در طول گسل‌های دورود و قلعه‌حاتم واقع شده است. زون برشی بروجرد- دورود از سه مرحله‌ی دگرشکلی متأثر شده است (D1-D3). مرحله‌ی دگرشکلی اول و دوم به صورت شکل‌پذیر پیش‌رونده و مرحله‌ی دگرشکل سوم به صورت شکننده- شکل‌پذیر عمل کرده است. شدت دگرشکلی‌ها در این ناحیه از شمال‌غرب به جنوب‌شرق، یعنی از امتداد گسل قلعه‌حاتم به سمت امتداد گسل دورود، و نیز از غرب به شرق بروجرد کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد عملکرد زون‌های برشی در اینجا باعث افزایش شدت دگرشکلی‌ها و توسعه حالت‌های میلونیتی شده است. شواهد حرکت در زون برشی بروجرد- دورود عبارتند از: شواهد حرکت معکوس شامل محور بودین‌های در جهت امتداد برگ‌وارگی، گسل‌های راندگی و چین‌های برشی از نوع S شکل و شواهد حرکت امتدادلغز شامل بودین‌های در جهت شیب برگ‌وارگی، چین‌های برشی از نوع Z و شواهد حرکت توأم امتدادلغز و شیب‌لغز شامل باندهای برشی S-C، چین‌های گسلی، انواع بلورهای ماهی‌گون و پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای است. در این زون، هندسه و کنیماتیک فابریک های برشی، تقسیم‌شدگی دگرشکلی در هر دو شرایط شکل پذیر و شکننده در طول رژیم تکتونیکی ترافشارش پیشرونده را نشان می دهد. این موضوع مشخص می کند که زون برشی بروجرد- دورود در اثر رژیم همگرایی مایل راست گرد بین صفحه عر
ی و زون زاگرس تشکیل شده است.

واژه‌های کلیدی: *زون برشی بروجرد- دورود، تحلیل دگرشکلی عناصرفابریکی، نشانگرهای برشی، ترافشارشی مایل راستگرد، تفکیک‌شدگی*

۱- مقدمه

زون برشی بروجرد - دورود در ۳۷۲ کیلومتری شمال استان لرستان و ۳۸۹ کیلومتری شمال شرق تهران، بین عرض‌های جغرافیایی ′۳۸ °۳۳ و ′۰۰ °۳۴ شمالی و طول‌های جغرافیایی ′۴۵ °۴۸ و ′۳۰ °۴۹ شرقی قرار گرفته است. زون‌های برشی با اهمیت‌ترین مناطق در جهان می باشند که مورد توجه محققین زیادی در سرتاسر جهان در جنبه‌های گوناگون علوم زمین واقع شده است و بسیاری از زمین‌شناسان را در دهه‌های اخیر در موضوعات جدید مجذوب کرده است (Lisle, 2013; Ceccato et al., 2022; Mfa et al., 2025; Alsob and condon., 2025). مطالعات ساختاری و ریزساختاری در زون‌های برشی کمک شایانی در شناخت مکانسیم‌های ایجاد آن‌ها، جهت تنش- های وارده، بازسازی تاریخچهٔ دگرشکلی در این مناطق می باشد و تنوع ساختاری و ریزساختاری در این زون نشانهٔ عملکرد

فازهای مختلف دگرگونی می باشد. این مناطق در ایران زیاد مورد توجه نبوده و تحقیقاتی که تا به حال صورت گرفته بخش کوچکی از این مناطق بوده است و تاکنون مطالعات جامعی بر روی مناطق برشی ایران به خصوص منطقه بروجرد انجام نگرفته است مطالعات قبلی انجام گرفته بیشتر پترولوژی و ژئوشیمی انجام شده است (Mohammadzadeh et al., 2024; Ahmadi Khalaji, 2006; Ahmadi Khalaji et al., 2006). برای مطالعات و بررسی‌های ساختاری نیاز به یک سری تحلیل‌های فابریک ریزساختاری می باشد در این راستا فابریک-های ریزساختاری کمک شایانی در بازسازی تاریخچه‌ی دگرشکلی منطقه دارد. از فابریک‌های ریز ساختاری در زون‌های برشی می توان در تشخیص زون، نوع دگرشکلی‌ها، فازهای دگرشکلی و ... استفاده کرد. در این بخش، تجزیه و تحلیل‌های ریزساختاری در منطقه صورت گرفته است که به تحلیل‌های ساختاری را تقویت می‌بخشد. اهدافی که در این پژوهش دنبال شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از : شناسایی ساختارهای اصلی منطقه مورد مطالعه و ارتباط آن ها با یکدیگر و تعیین ویژگی‌های این ساختارها می‌باشد و در نهایت تعیین جهت تنش‌های اصلی و تعیین سو و جهت زون برشی با استفاده از ساختارهای مزوسکوپی و میکروسکوپی می‌باشد.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

مطالعات صحرایی از منطقه و همچنین اطلاعات حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های میکروسکوپی به شناسایی واحدهای چینه‌شناسی زیر در زون برشی بروجرد - دورود منجر شد (شکل ۱a):

- واحد کواترنری

سازند بختیاری در منطقه مورد مطالعه، یک سازند زمین‌شناسی با سن کواترنری است. این سازند عمدتاً از رسوبات آبرفتی و کوهپایه‌ای تشکیل شده و شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ آهکی است که به صورت هم‌شیب یا دگرشیب بر روی سازندهای قدیمی‌تر نهشته شده‌اند.

- سنگ‌های نفوذی و سنگ‌های دگرگونی

در منطقه مورد پژوهش، سنگ‌های نفوذی و دگرگونی به وفور یافت می‌شوند. سنگ‌های نفوذی عمدتاً از توده گرانیتوئیدی بروجرد تشکیل شده‌اند که بخشی از توده‌های نفوذی در زون سنندج - سیرجان است. سنگ‌های دگرگونی نیز به دو دسته ناحیه‌ای و مجاورتی تقسیم می‌شوند که شامل اسلیت، فیلیت، گرانیت میلونیتی و میگماتیت هستند و مهم‌ترین واحدهای منطقه، سنگ‌های گرانیتوئیدی منطقه بروجرد به سن ژوراسیک میانی است (Ahmadi Khalaj, 2006).

- واحدهای نئوژن

در این منطقه واحد نئوژن بیشتر شامل سازندهای آسماری، سازند گچساران و سازند آغاجاری می‌باشد. بیشتر از سنگ‌های تبخیری مانند گچ و انیدریت، سنگ آهک‌های ضخیم و ماسه-سنگ‌های آهک‌دار، مارن‌های قرمز و سیلتستون تشکیل شده است.

- واحدهای پالئوژن

در منطقه مورد مطالعه، این واحد بیشتر از سازند امیران، شازند کاشکان، سازند شهبازان، سازند تله زنگ و سازند پابده تشکیل شده است. شامل سنگ‌های آهکی، شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، مارن و ژیپس، دولومیت و سنگ آهک‌های دولومیتی با رنگ‌های سفید تا قهوه‌ای، سنگ آهک‌های مارنی، شیل و شیل‌های ارغوانی است (Ahmadi Khalaj, 2006).

- واحدهای مزوزوئیک

این واحد در منطقه مورد مطالعه، بیشتر از سازندهای سورمه، سازند گورپی، سازند نیریز، سازند گوری، سازند ایلام - سروک تشکیل شده است. این سازندها شامل سنگ آهک دولومیتی و دولومیت، مارن، شیل و سنگ آهک‌های کرم رنگ با تناوب مارن خاکستری است (Haj Malaali et al., 1991).

- واحدهای پالئوزوئیک

واحد پالئوزوئیک در منطقه مورد مطالعه، بیشتر از سازندهای میلان، زردکوه و دالان تشکیل شده است. این سازندها بیشتر از سنگ‌های کربناته، شیل، ماسه‌سنگ و آهک تشکیل شده است.

۳- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حد فاصل دو شهر بروجرد و دورود در استان لرستان قرار دارد. ناحیه مورد پژوهش بر اساس تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران (Ghasemi and Talbot, 2006)، بخشی از کمربند ساختاری پهنه سنندج - سیرجان محسوب می‌گردد. در منطقه مورد مطالعه، در طی مطالعات صحرایی برداشت‌های ساختاری مورد نظر در برش‌های تعیین شده انجام گرفت. برای انجام مطالعات ریزساختاری از تمام سنگ‌های منطقه مورد مطالعه حدود ۸۰ مقطع نازک جهت‌دار تهیه گردید و برای تهیه مقاطع نازک جهت‌دار، برش موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگ‌وارگی میلونیتی انجام گرفت.

دلیل نمونه‌برداری از سنگ‌های منطقه، تعیین شرایط دگرگونی در فازهای دگرشکلی و تعیین جهت و سوی برش در مقاطع می‌باشد. به منظور بررسی عناصر فابریکی و نشانگرهای برشی منطقه مورد مطالعه، نتایج حاصل با وضعیت ساختاری هر نمونه و برداشت‌های صحرایی ترکیب شد. مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی ارتباط تبلور برخی از کانی‌ها با دگرشکلی، سازوکارهای دگرشکلی و شاخص‌های سوی برش بوده است. تفکیک مراحل دگرشکلی در واحدهای مختلف با بهره‌گیری از شواهد صحرایی و مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته است و با توجه به فابریک موجود در سنگ‌ها و رابطه پورفیروبلاست‌ها با برگ‌وارگی های موجود، ارتباط بین مرحله‌های دگرشکلی با مرحله‌های دگرگونی مورد تفسیر قرار گرفته است. بررسی ریز-ساختارها یا فابریک سنگ‌ها به خصوص در مطالعه برش‌های نازک می‌تواند در دو زمینه کلی استفاده شود. تعیین جهت و سوی برش در زون‌های برشی ابزارهای مهمی در بررسی‌های ساختاری و ریزساختاری نواحی دگرشکل شده هستند. در زون-های برشی، ارزیابی صحیح از سو و جهت برش، عاملی ضروری در برداشت‌های ساختاری و ریزساختاری می‌باشد. معیارهای صحرایی و آزمایشگاهی می‌توانند به عنوان نشانگرهای برشی برای پی بردن به جهت و سوی برش مورد استفاده قرار گیرند (Haji Hosseinlou, 2003). نشانگرهای برشی شامل انواعی از ساختارها، ریزساختارها و عناصر فابریکی می‌باشند. حتی با استفاده از این نشانگرهای برشی و عناصر فابریکی می‌توان زون-هایی که نسبت به نشان‌گرهای جابه‌جایی، معکوس، نرمال و امتدادلغز هستند سوی و جهت برش را تعیین کرد. بررسی ریز-ساختارها یا فابریک سنگ‌ها به خصوص در مطالعه برش‌های نازک می‌تواند در دو زمینه کلی استفاده شود. چون مطالعه‌ی ریزساختارها و دگرگونی در برش‌های نازک به درک تکوین تکتونیکی سنگ منجر می‌شود. در این پژوهش به بررسی مسائل مربوط به ساختارها و ریزساختارهای موجود در زون برشی بروجرد در طول گسل‌های دورود و قلعه حاتم پرداخته شده است.

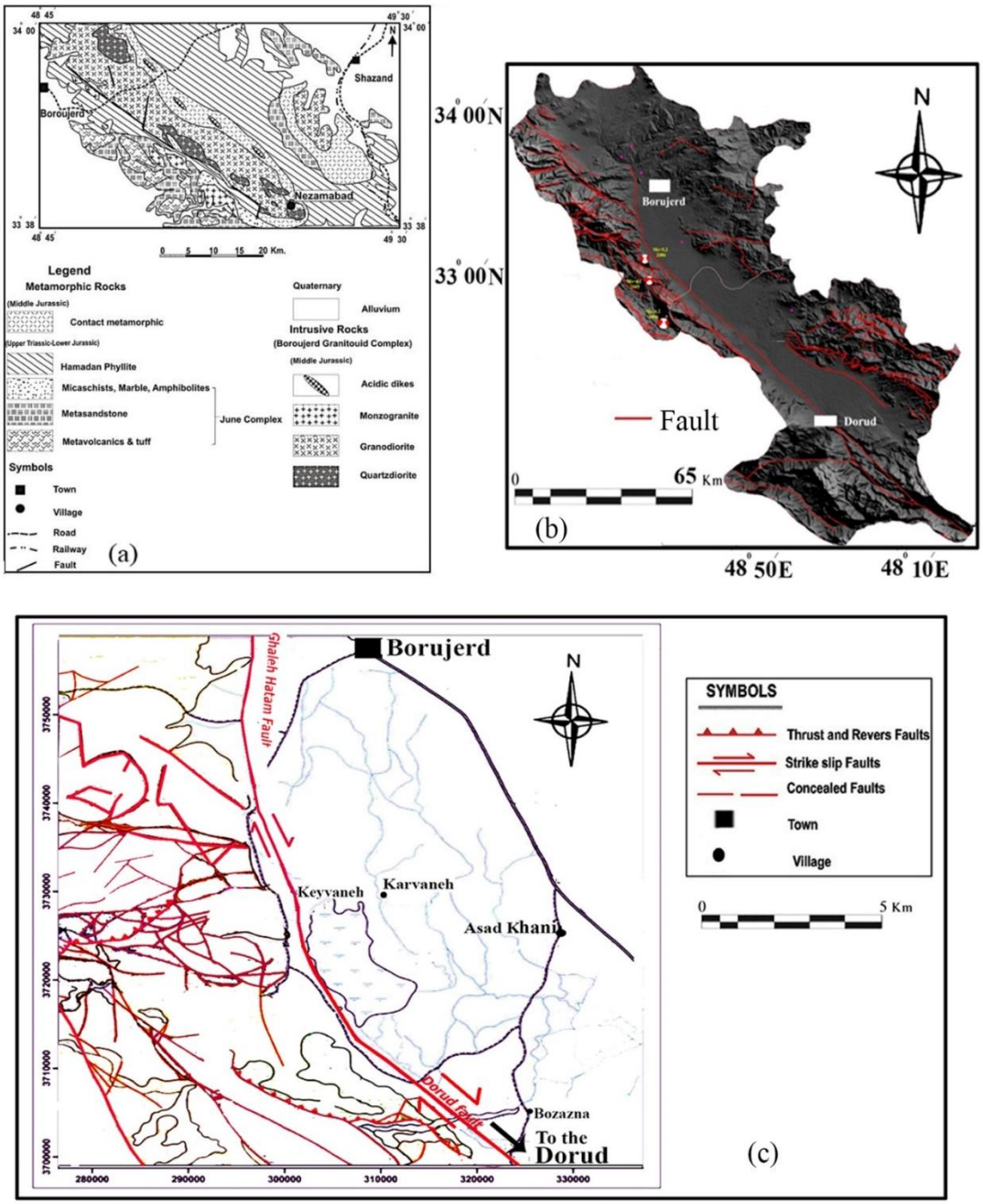
۴- بحث و نتایج

۴-۱- موقعیت ساختاری و تکتونیکی زون برشی بروجرد-دورود

زون برشی بروجرد - دورود بخشی از کمربند دگرگونی سنندج – سیرجان می‌باشد که در غرب ایران در استان لرستان واقع شده است. این زون با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق به موازات گسل امتدادلغز دورود و گسل امتدادلغز راست‌گرد قلعه‌حاتم قرار دارد. گسل دورود با امتداد شمال‌غرب - جنوب شرق تقریباً تمام منطقه مورد مطالعه را دربر می‌گیرد و گسل قلعه‌حاتم با امتداد شمال غرب و جنوب شرق گسل نهاوند را از گسل دورود جدا می‌کند (شکل ۱b, c). موقعیت ساختاری و تکتونیکی بروجرد-دورود در پهنه ساختاری-تکتونیکی زاگرس واقع شده است. این منطقه تحت تأثیر چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی ناشی از برخورد صفحات تکتونیکی اوراسیا و عربستان قرار دارد. به طور خاص، این مناطق در ناحیه زاگرس چین‌خورده مرتفع واقع شده است و تحت تأثیر گسل‌های اصلی این منطقه از جمله گسل اصلی زاگرس قرار دارد. بنابراین، ناحیه مورد بررسی تحت تأثیر دگرشکلی ناشی از فشارهای تکتونیکی با روند شمال شرقی-جنوب غربی قرار دارد. در منطقه مورد مطالعه گسل دورود و نهاوند که به صورت امتدادلغز راست‌گرد، گسل معکوس اصلی زاگرس را جابه‌جا کرده‌اند، در نتیجه فعالیت لرزه‌ای بیشتری از خود نشان می‌دهند. طبق مطالعات Sepahvand و همکاران (۲۰۱۲) گسل قلعه حاتم گسل نرمال نیست بلکه گسلی امتدادلغز راست‌گرد است. Tchalenko و Braud (۱۹۷۴) گسل جوان اصلی زاگرس را یک گسل کواترنری با عملکرد امتدادلغز راست‌گرد معرفی کردند. بر اساس مطالعات آن‌ها، قطعات گسل جوان اصلی زاگرس در ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض شمالی واقع شده که به ترتیب از جنوب‌شرق به شمال‌غرب شامل گسل‌های درود، نهاوند، گارون، صحنه، مروارید پیرانشهر است. همهٔ قطعات گسل جوان اصلی زاگرس در ۳ دسته برش-های ریدل (گسل درود، گسل نهاوند و گسل مروارید) برش‌های نوع P (گسل صحنه) ساختارهای کششی (گسل قلعه حاتم، فرونشست دشت سیلاخور و نهاوند) قرار دارند (Ahmadi Khalaj et al., 2006).

عناصر ساختاری، ابزارهای مهم شناخت دگرشکلی‌ها و دست‌یابی به الگوی دگریختی ناحیه‌ای هستند. دست‌یابی به این مهم، جز از راه تجزیه و تحلیل دقیق ویژگی‌های هندسی و جنبشی ساختارها، ممکن نیست. بر مبنای برداشت‌ها و بررسی-های صحرایی انجام شده در محدوده مورد مطالعه مشخص شد که گسل‌های راندگی و چین‌خوردگی‌های همراه با آن‌ها، از جمله ساختارهای اصلی کنترل کننده دگرشکلی منطقه مورد مطالعه هستند (شکل ۲a). گسل‌ها را می‌توان مهم‌ترین

ساختارهای موجود در ناحیه بروجرد-دورود به شمار آورد. با توجه به شواهد روی زمین و نقشه ساختاری منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس یک صد هزار و یک دویست و پنجاه هزار سازمان زمین‌شناسی و مطالعات صحرایی ترسیم شده است بیشتر گسل‌های ناحیه بروجرد-دورود دارای سازوکار راستالغز راست-گرد می‌باشند. همچنین گسل‌های معکوس و عادی نیز به صورت محلی دیده می‌شود. اما گسل‌های منطقه مورد مطالعه (گسل دورود و گسل قلعه‌حاتم) از نوع امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه شیب‌لغز نرمال می‌باشد.



شکل ۱- (a) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از منطقه مورد مطالعه (Haj Malaalim et al., 2006) ، (b) تصویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه و (c) نقشه گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. (a) Simplified geological map of the study area (Haj Malaalim et al., 2006), (b) Satellite image of the study area and (c) Map of major faults in the study area

۴-۲-عناصر فابریکی و نشانگرهای سوی و جهت برش در زون برشی بروجرد -دورود

نشانگرهای جنبشی (سینماتیکی) معمولاً مرتبط با زون‌های برشی می‌باشند. بعضی از ساختارهای کوچک مقیاس در مقاطع نازک و در مقیاس مزوسکوپی می‌توانند برای تعیین سوی و جهت برش مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از این نشانگرها می‌توان جهت و سوی برش را تعیین کرد که در این ناحیه نشانگرهای برشی عبارتند از:

۴-۲-۱- چین‌های برشی (کششی) در زون برشی بروجرد - دورود

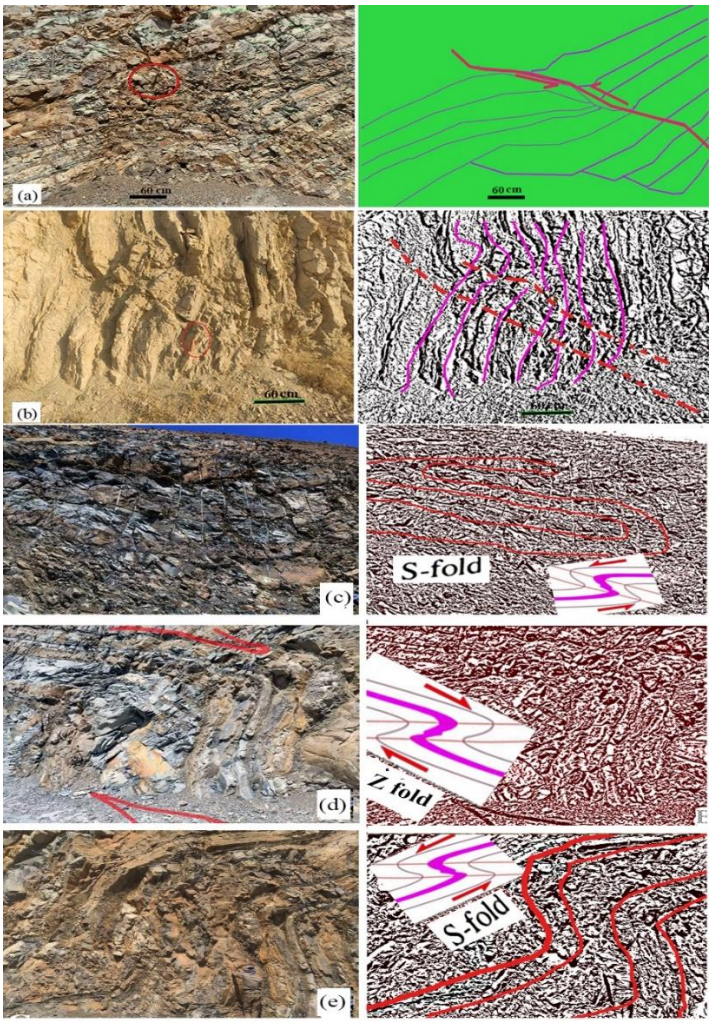
در ناحیه بروجرد - دورود به علت وجود راندگی‌های پرشمار، چین‌ها کم‌تر سالم مانده‌اند ولی به لحاظ سنگ‌شناسی، چین-خوردگی‌های نامتقارن (شکل ۲b) و متقارن کوچک پرشمار و گوناگونی رخ داده است که محور غالب آن‌ها با روند کلی و همگانی چین‌خوردگی ناحیه (شمال‌غرب ـ جنوب‌شرق) هماهنگی دارند. از دیگر ساختارهای جالبی که در مقیاس مزوسکوپی در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود چین‌های برشی از نوع Z و S شکل می‌باشند. این گونه چین‌ها در زون‌های برشی شکل‌پذیر دیده می‌شود (شکل ۲c,d). چین‌خوردگی‌های برشی (یا کششی) نوعی از چین‌خوردگی‌های زمین‌شناسی هستند که در اثر تنش برشی، به ویژه در مناطق برشی که سنگ‌ها از کنار یکدیگر می‌لغزند، تشکیل می‌شوند. این چین‌خوردگی‌ها با شکل نامتقارن خود مشخص می‌شوند و اغلب در امتداد کناره‌های چین‌خوردگی‌های بزرگ‌تر یا در مناطق برشی یافت می‌شوند. مطالعه این نوع چین‌خوردگی‌ها می‌تواند راهنمای بسیار مناسبی جهت بازسازی تاریخچه دگرشکلی ناحیه باشد. روند کلی محور این چین‌ها در جهت شمال‌شرق – جنوب‌غرب می‌باشد. مهم‌ترین عامل ایجاد کننده چین‌های برشی در ناحیه مورد مطالعه چرخش لایه‌ها توسط برش موازی لایه‌ها و تحت رژیم برشی ساده می‌توان در نظر گرفت. در زون برشی بروجرد - دورود، چین‌های برشی Z شکل در زون‌های برشی نرمال و چین‌های برشی S شکل در زون‌های برشی معکوس تشکیل شده‌اند. چین‌های برشی S شکل در محل لولای چین و در پهلوی چین‌ها نشان دهنده حرکات خمشی لغزشی در آن‌ها است. در چین‌خوردگی‌های برشی، جهت تنش عموماً موازی با صفحه محوری چین‌خوردگی است و تنش برشی موازی با یال‌های چین‌خوردگی است. به طور خاص، حداکثر تنش برشی معمولاً در امتداد خط عطف (یا سطح خنثی) چین‌خوردگی یافت می‌شود (شکل ۲e, c, d).

۴-۲-۲- رگه‌های پوششی یا ان اشلان (En-echelon)

رگه‌های پوششی در مقیاس مزوسکوپی از ساختارهای دیگر ناحیه بروجرد- دورود می‌باشند. رگه‌های پوششی مجموعه‌ای از شکستگی‌ها یا رگه‌هایی هستند که به صورت پلکانی و همپوشان تشکیل شده‌اند و معمولاً در زون‌های برشی یافت می‌شوند. در این منطقه، معمولاً ساختارهای پوششی مرتبط با گسل‌های دورود و قلعه حاتم هستند.

رگه‌های پوششی ساختارهای هستند که مقادیر متفاوتی از واتنش شکل‌پذیر را نشان می‌دهند و شواهد گویایی از توالی توسعه رگه‌ها، چرخش رگه‌های قدیمی و رابطه بین جهت توسعه رگه‌ها و محورهای واتنش افزایشی می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی چرخش عناصر خطی پس از جهت‌گیری محورهای اصلی واتنش افزایشی است بنابراین هندسه واتنش تجمع‌یافته در این زون‌های برشی غیرهم‌محور (Non coaxial) می‌باشد. در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود رگه‌های پوششی توسعه فراوانی یافته‌اند و در قسمت‌های مختلف مشاهده می‌گردند بسیاری از زون‌های برشی ناحیه بروجرد- دورود دارای رگه‌های پوششی هستند. رگه‌های پوششی به عنوان شکستگی‌های کششی تشکیل می‌شوند که با زاویه‌ای (اغلب حدود ۴۵ درجه) نسبت به جهت کلی زون برشی قرار گرفته‌اند و متعاقباً با کانی‌هایی مانند کوارتز یا کلسیت پر می‌شوند. حرکت مداوم در امتداد زون برشی می‌تواند این رگه‌ها را بچرخاند و به آن‌ها مورفولوژی مشخص سیگموئیدی (S شکل) یا عدسی‌شکل (لنز شکل) بدهد. در یک زون برشی ساده عمود بر محور کوچک‌ترین تنش فشارشی (σ3) و موازی با محور بزرگ‌ترین تنش فشارشی(σ1) این رگه‌ها در ابتدا باز شده و جهت‌گیری می‌نمایند (Haji Hosseinlou et al., 2005) (شکل ۳a). بر اساس مطالعات Srivastava و همکاران (۱۹۹۵)، رگه‌های پوششی در زون‌های برشی شکننده ـ شکل-پذیر تشکیل می‌شوند و همیشه زون‌های برشی شکل‌پذیر را قطع می‌کنند. شکل ۳a, b رگه‌های پوششی را که تحت شرایط شکننده- شکل‌پذیر ایجاد شده است نشان می‌دهند. این رگه‌ها تحت تأثیر برش ساده تشکیل می‌گردند. در ناحیه بروجرد-د.رود، جهت‌گیری رگه‌های پوششی راست‌گرد می‌باشد. تشکیل رگه‌های پوششی در ناحیه بروجرد- دورود، شواهدی دال بر

گسل‌های امتدادلغز دورود و قلعه‌حاتم و جهت راست‌گرد آن‌ها می‌باشد (شکل ۳a,b, c). شکل ۳d روند کلی رگه‌های پوششی را در ناحیه بروجرد- دورود را نشان می‌دهد که روند آن‌ها در جهت شمال غرب - جنوب‌شرق می‌باشد.



شکل ۲- (a) راندگی‌های مرتبط با گسل‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه، جهت دید عکس شمال، (b) چین‌های نامتقارن در زون برشی بروجرد – دورود، جهت دید عکس شمال، (c) چین‌خوردگی برشی از نوع S شکل در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود، نوع برش چپ‌گرد می‌باشد، (d) چین‌خوردگی برشی از نوع Z شکل در زون برشی ناحیه بروجرد-دورود. نوع برش راست‌گرد می‌باشد و (e) چین‌خوردگی برشی از نوع S شکل در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود، نوع برش چپ‌گرد می‌باشد.

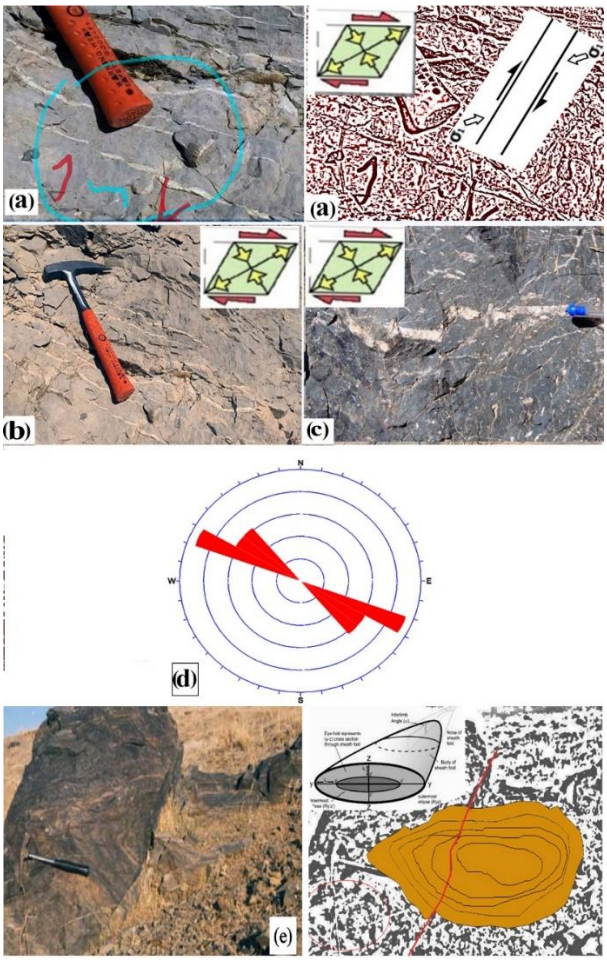
Fig 2. (a) Fault-related folds in the study area, region, the view of photo: N (b) Asymmetric folds in the Borujerd-Dorud shear zone, region, the view of photo: N, (c) S-shaped shear folding in the Borujerd-Dorud shear zone, dextral shear sense, (d) Z-shaped shear folding in the Borujerd-Dorud shear zone, dextral shear sense and and (e) S-shaped shear folding in the Borujerd-Dorud shear zone, latrail shear sense.

۴-۲-۳- چین‌های نیامی شکل در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود

چین‌های نیامی شکل نوعی چین‌خوردگی غیراستوانه‌ای هستند که معمولاً در زون‌های برشی تشکیل می‌شوند (Passchier and Trouw, 2005). مناطقی که با تغییرشکل شدید مشخص می‌شوند و در آن‌ها سنگ‌ها از کنار یکدیگر حرکت می‌کنند. این چین‌ها به دلیل خطوط لولای منحنی، کشیده و اشکال پیچیده و سه‌بعدی خود متمایز هستند. آن‌ها در عناصر فابریکی برای نشان دادن جهت برش، بزرگی واتنش و نوع واتنش کلی استفاده می‌شود. چنین چین‌هایی می‌توانند در هر زمانی از گسترش تغییرشکلی پیشرونده غیر هم‌محور ساخته شوند این نوع چین‌ها در سنگ‌های میلونیتی ناحیه بروجرد- دورود قابل مشاهده است

(شکل ۳e). چین‌های نیامی ناحیه در طول زون برشی شمال- غرب – جنوب‌شرق در جهت راست‌گرد تشکیل شده‌اند شیب زون برشی در این ناحیه زیاد است. در این زون برشی معمولاً خطواره‌های با جهت میل شمال‌غرب توسط چین‌های کشیده چین‌خورده و تشکیل چین‌های غیر استوانه‌ای دادند.

در سطوح رخنمون‌های سطحی، چین‌های نیامی شکل در زون برشی بروجرد- دورود به صورت ساختارهای چشمی شکل (eye-structures folds) توسط حلقه‌های سنگی احاطه شده- اند ظاهر می‌شوند (Mukhopadhyay and Sengupta, 1979). محور طویل این چین‌ها موازی با خطواره کششی منطقه می‌باشد و شکل‌شان منعکس کننده‌ی نوع برش هستند. این چین‌ها در زون‌های با واتنش بالا تشکیل می‌شوند. به طور کلی محور چین‌ها در این ناحیه روند شمال شرقی ـ جنوب غربی (۱۲۵۰-۰۹۵۰) نشان می‌دهد و در این چین‌ها الگوهای تداخلی نوع سوم قابل مشاهده است که تحت تأثیر برش‌های ساده ناهمگن پیش‌رونده غیر هم‌محور قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین عامل ایجاد کننده‌ی چین‌های نیامی شکل در این ناحیه را دگرشکلی چین‌ها تحت یک رژیم برشی ساده ناهمگن غیر هم- محور می‌توان در نظر گرفت.



شکل ۳ – (a) رگه‌های کوارتز پوششی راست‌گرد در زون برشی شکننده- شکل‌پذیر ناحیه بروجرد- دورود، (b) رگه‌های کوارتز پوششی راست‌گرد در زون بروجرد- دورود، (c) رگه‌های کوارتز پوششی راست‌گرد در زون بروجرد- دورود، جهت برش در این ناحیه راست‌گرد است، (d) دیاگرام گل‌سرخی از جهات امتداد رگه‌های پوششی در زون برشی بروجرد- دورود و (e) چین نیامی ساختار چشمی شکل در سنگ‌های دگرگونی ناحیه برشی بروجرد- دورود (محور چین انحنادار)

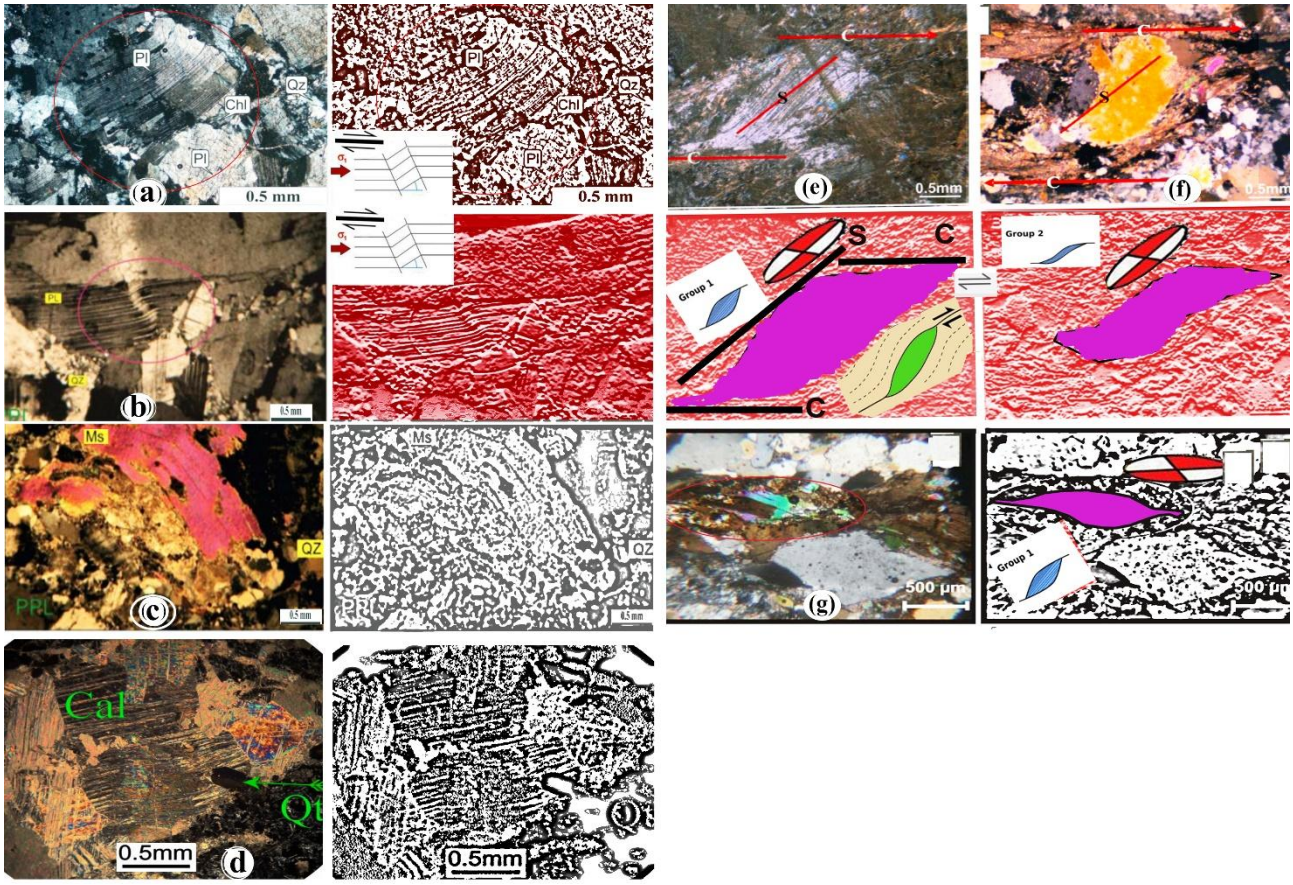
Figure 3. (a) Dextral en echelon quartz veins in the brittle-ductile shear zone of the Borujerd-Dorud area, (b) Dextral en echelon quartz veins in of the Borujerd-Dorud shear zone, (c) Dextral en echelon quartz veins in of the Borujerd-Dorud shear zone, The shear direction in this area is dextral and (d) Rose diagram of the en echelon veins directions in the Borujerd-Dorud shear zone and (e) Eye-shaped structural sheath fold in metamorphic rocks of the Boroujerd-Doroud shear zone (curvilinear fold axis)

۴-۲-۴- ساختار خمش ماکل در بلورهای زون برشی بروجرد- دورود

خمش ماکل اغلب در زون‌های برشی یافت می‌شوند که در نواحی تغییرشکل متمرکز هستند. از خمش ماکل می‌توانند به عنوان نشانگرهای برشی استفاده کرد زیرا حضور آن‌ها می‌تواند نوع و جهت برش را نشان دهد. جهت‌گیری خمش ماکل و ساختارهای داخلی آن‌ها می‌تواند برای شرایط تنش و حرکت در امتداد زون برشی استفاده شود. در ناحیه بروجرد- دورود، پدیده خمش در ساختارهای کوچک و مجزا نظیر بلورهای پلاژیوکلاز، موسکوویت و کلسیت اتفاق می‌دهد. این رخداد اگر با شکستگی‌های کاتاکلاستیک باشد، می‌تواند منجر به پدیده شکنجی نیز بشود. آثار شکنجی در پلاژیوکلازهای ناحیه در مقاطع میکروسکوپی یکی دیگر از شواهد دگرشکلی درون بلوری در ناحیه بروجرد – دورود است. تشکیل ساختار شکنجی یا خمش در کانی‌های پلاژیوکلاز، موسکوویت و کلسیت، دلیلی بر تغییرشکلی شکل‌پذیر و شکستگی‌ها دلیلی بر تغییرشکلی شکننده می‌باشد. خمیدگی ماکل در نتیجه تغییر در شبکه بلورین کانی پلاژیوکلاز رخ می‌دهد و معرف اعمال تنش است. خمش ماکل در پلاژیوکلازها ناشی از فرآیندهای دگرگونی دینامیکی دما بالا است، زیرا در دمای پایین پلاژیوکلازها خاصیت شکنندگی دارند و خرد می‌شوند اما در دمای بالا حالت شکنندگی نداشته بلکه همراه ماکل خود خم می‌شوند. در اثر این تغییرشکل، ماکل‌ها به صورت سر نیزه‌ای در آمده و یا این که خمیدگی از خود نشان می‌دهند از این ساختار می‌توان نتیجه گرفت که در زون برشی بروجرد- دورود رژیم نیمه شکل-پذیر تا نیمه شکننده حاکم بوده است (شکل 4a,b,c, d).

۴-۲-۵- ساختار بلورهای ماهی‌گون (Mineral Fish) در زون برشی بروجرد- دورود

از دیگر نشانگرهای سوی برش در ناحیه‌ی مورد پژوهش ساختار بلور ماهی می‌باشد. بلورهای ماهی‌گون معمول‌ترین نشان‌گر سوی و جهت برش شکل‌پذیر در زون برشی ناحیه بروجرد-دورود در مقیاس میکرو هستند. بلورهای ماهی‌گون، پورفیروکلاست‌های منفرد لوزی و عدسی شکل کشیده هستند که در میلونیت‌ها معمول می‌باشند (Ten Grotenhuis et al., 2003). تشکیل بلورهای ماهی‌گون همانند چرخش بلورهای میکای صفحه‌ای اولیه به دلیل تنش برشی است. این چرخش اغلب با سایر مکانیسم‌های دگرشکلی مانند لغزش در صفحات بلوری، خم شدن و تبلور مجدد همراه است. در مقاطع نازک مطالعه شده از ناحیه بروجرد - دورود، بلورهای کوارتز، موسکوویت، بیوتیت و کوارتز شکل ماهی از خود نشان می‌دهند. بر اساس ریخت‌شناسی در زون برشی بروجرد- دورود، بلورهای ماهی‌گون را به دو شکل تقسیم‌بندی شده‌اند که شامل : (۱) سیگموئید یا عدسی شکل (Lenticular) ؛ (۲) و به شکل متوازی‌الاضلاع هستند. در گرانیت میلونیتی در ناحیه بروجرد بلور کوارتز ماهی به شکل سیگموئید و موازی با برگ‌وارگی مشاهده می‌شود. بلورهای درشت کوارتز در زمینه ریز میلونیت دیده می‌شود (شکل 4g). به این دلیل است که در بسیاری از سنگ‌های تغییرشکل یافته ناحیه، کوارتز فاز ضعیف‌تری می-باشد. و شرایط ویژه‌ای نیاز است تا بلورهای ماهی‌شکل کوارتز با انحلال و رسوب بدون تغییرشکل داخلی یا با لغزش درون بلوری یا بازیابی (Recovery) و باز تبلور کم شکل گیرند (Haji Hosseinlou, 2020). میکاماهی‌ها در گرانیت میلونیتی در این ناحیه بر اساس تقسیم‌بندی (Ten Grotenhuis et al., 2003) در گروه ۱ قرار می‌گیرد. در این حالت پله‌شدگی در میکا و بال‌هایشان گسترش پیدا می‌کنند (شکل ۴). میکاسفید ماهی در ناحیه بروجرد در داخل گرانتیوئید میلونیتی (شکل ۴۸e,f, g)، به شکل سیگموئید بیشتر گسترش دارند به نظر می‌رسد به نظر می‌رسد این میکاها از چرخش به عقب از موقعیت اولیه خود که تقریباً موازی برگ‌وارگی بوده و به حالت مایل نسبتاً پایدار جدید رسیده‌اند به وجود آمده‌اند. در شکل ۴f بلور کوارتز ماهی به شکل متوازی‌الاضلاع دیده می‌شود. در انواع بلورهای ساخت ماهی‌گون، زاویه بین محور بزرگ بلورهای ماهی‌گون (بیضوی واتنش) با صفحه برش شکل‌پذیر در این زون حدود ۹۰-۰۰۰ درجه می‌باشد.



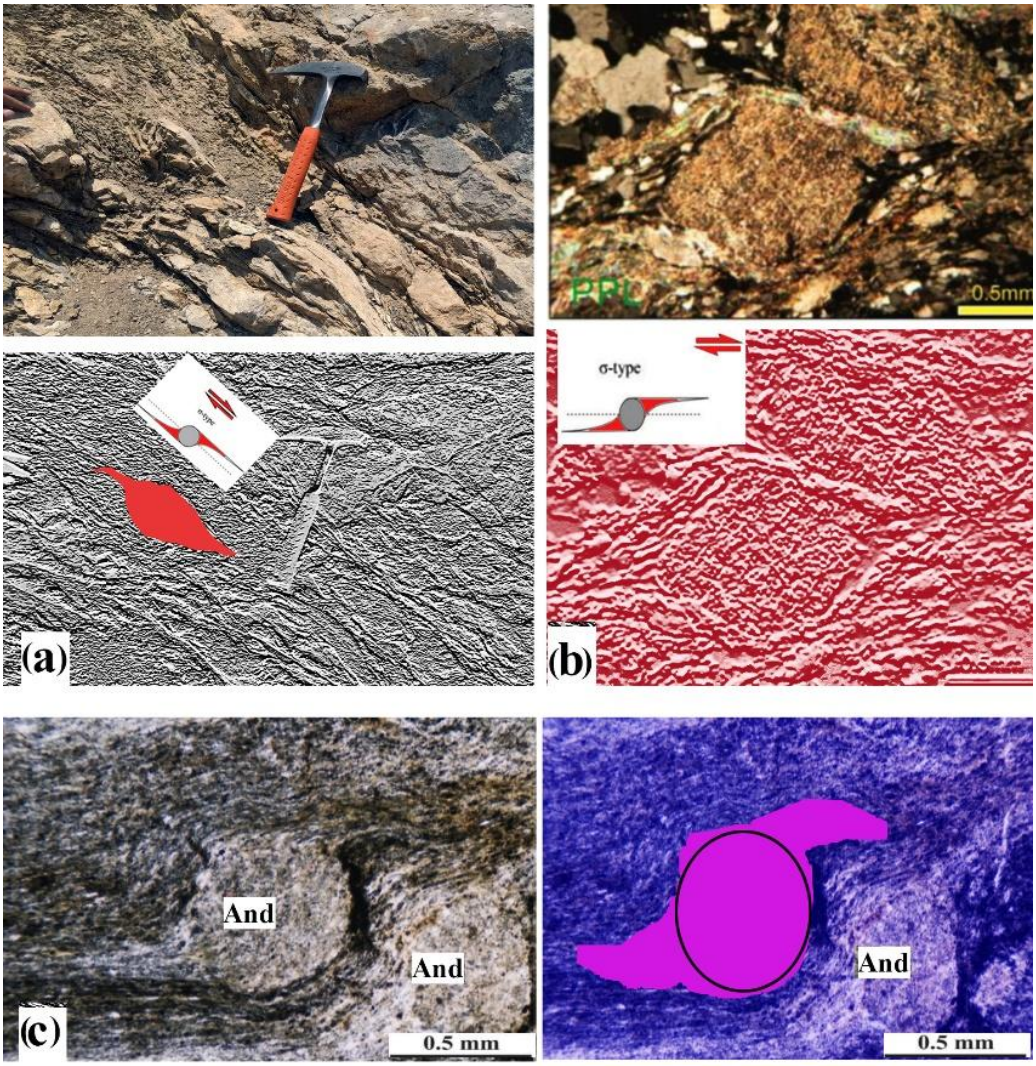
شکل ۴- (a, b) خمش ماکل و تشکیل کینک (Kink) نسبت به تنش در روی ماکل‌های پلی‌سنتیک در پلاژیوکلازهای فلدسپار موجود در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود را نشان می‌دهد. برش موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگ‌وارگی میلونیتی می‌باشد، (c) خمیدگی در کانی مسکوویت، (d) خمیدگی در کانی کلسیت. نوع برش در منطقه راست‌گرد می‌باشد، (e) پورفیروکلاست تجدید تبلور یافته بیوتیت کشیده به شکل ماهی موازی با برگ‌وارگی میلونیتی، (f) کوارتز ماهی به شکل متوازی‌الاضلاع و (g) میکا ماهی به شکل عدسی شکل. نوع و سوی حرکت برشی در همه تصاویر راست‌گرد است. برش موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگ‌وارگی میلونیتی

Fig 4. (a, b) Twinning Bending and kink formation relative to stress on polysynthetic twinning in feldspar plagioclases in the Borujerd-Dorud shear zone. Section parallel to the stretching lineation and normal to the foliation. (c) Bending in muscovite mineral, (d) Bending in calcite mineral. Shear sense in all photographs is dextral, (e) Recrystallized biotite porphyroclast elongated into a fish shape parallel to the mylonitic foliation and (f) fish Quartz in a parallelogram shape and (g) Mica fish in a lenticular shape. Shear sense in all photographs is dextral. Section parallel to the stretching lineation and normal to the foliation

۴-۲-۶- ساختار پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای (Mantle Porphyroclasts) در زون برشی بروجرد- دورود

پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای به ویژه انواع سیگما و دلتا، ابزارهای ارزشمندی برای درک تاریخچه تغییرشکل زون‌های برشی هستند. شکل آن‌ها و جهت‌گیری برگ‌وارگی اطراف، سرنخ‌هایی در مورد جهت و سوی برش در داخل سنگ ارائه می‌دهد. این ساختار نشانگر برشی اغلب در گابروهای میلونیتی و گرانیتوئیدهای میلونیتی ناحیه مورد مطالعه دیده می‌شود. پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای از بلور منفرد مرکزی و پوشش دانه‌ریز از بلور هم جنس تشکیل شده‌اند. در پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای، پوشش دارای بلورهای ریز ممکن است به صورت دنباله تغییرشکل شده باشند که در دو طرف از پورفیروکلاست به موازات اجزای کشیده شده در میلونیت ادامه دارند (Rasoulzadeh et al., 2022). شکل ۵a,b,c پورفیروکلاست پوششی نوع σ در فلدسپار پتاسیم‌دار را نشان می‌دهد. پورفیروکلاست‌های نوع سیگما، در مناطق برشی شکل‌پذیر زمانی تشکیل می‌شوند که یک دانه بزرگ‌تر و سخت‌تر

(پورفیروکلاست) در یک ماتریس ضعیف‌تر و روان می‌چرخد. تشکیل شامل تبلور مجدد ماده ماتریس اطراف است که پله‌های را ایجاد می‌کند که از پورفیروکلاست در جهت برش امتداد می‌یابند و به آن شکلی متمایز سیگما (σ) می‌دهند (Haji Hosseinlou, 2021). پورفیروکلاست‌های پوششی نوع σ، دارای دنباله در نزدیکی پورفیروکلاست و دارای دو وجه صفحه‌ای خمیده هستند که نسبت به هم ناقرینگی داخلی دارند. در دو سمت پورفیروکلاست‌ها، بال‌ها در ارتفاعی مختلف قرار می‌گیرند. این اختلاف ارتفاع پله‌ای شدن نامیده می‌شود.



شکل ۵- (a, b) پورفیروکلاست نوع σ از فلدسپار پتاسیم‌دار در ناحیه بروجرد- دورود و (c) پورفیروکلاست نوع σ از آندالوزیت در ناحیه بروجرد- دورود. سوی برش در تصاویر، راست‌گرد است. در تصاویر (a, b) برش موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگ‌وارگی میلونیتی می‌باشد.

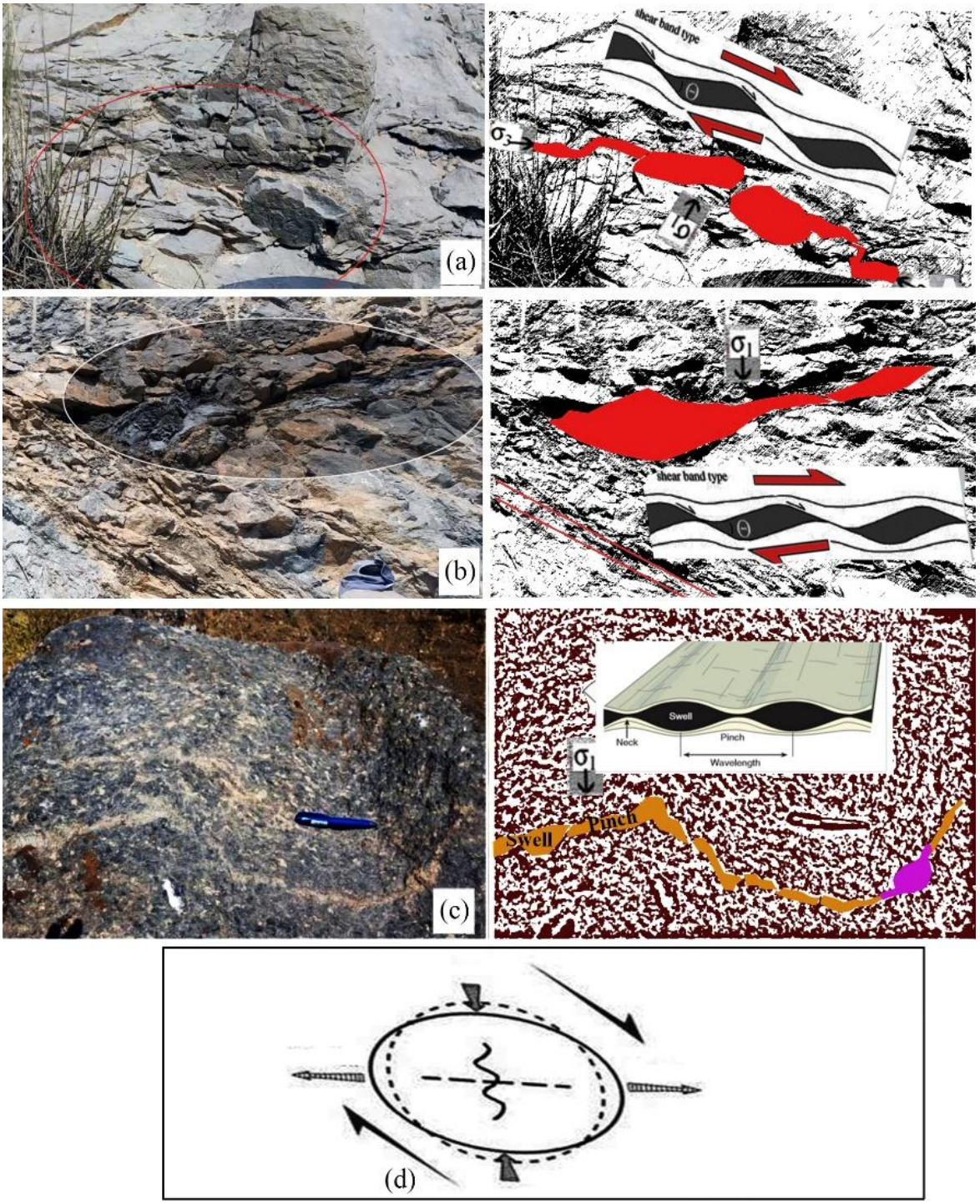
Fig 5. (a, b) σ-type K-feldspar porphyroclas in the Borujerd-Dorud area and (c) σ-type Porphyroclast of andalusite in the Borujerd-Dorud area. Shear sense in all photographs is dextral. Section (Figs. a, b) parallel to the stretching lineation and normal to the foliation.

۴-۲-۷- ساختار رگه‌های بودین شده و میکروبودیناژ در زون برشی بروجرد- دورود

بودیناژ، یک ساختار زمین‌شناسی است که در آن لایه‌های مقاوم کشیده شده و به بودین‌ها تقسیم می‌شوند، هم در مقیاس میکرو و هم در مقیاس ماکروسکوپی قابل مشاهده است. میکروبودیناژ به توسعه این ساختارها در مقیاس کوچک‌تر اشاره دارد که اغلب زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شود، در حالی که بودیناژ ماکروسکوپی در رخنمون‌ها و محیط‌های میدانی قابل مشاهده

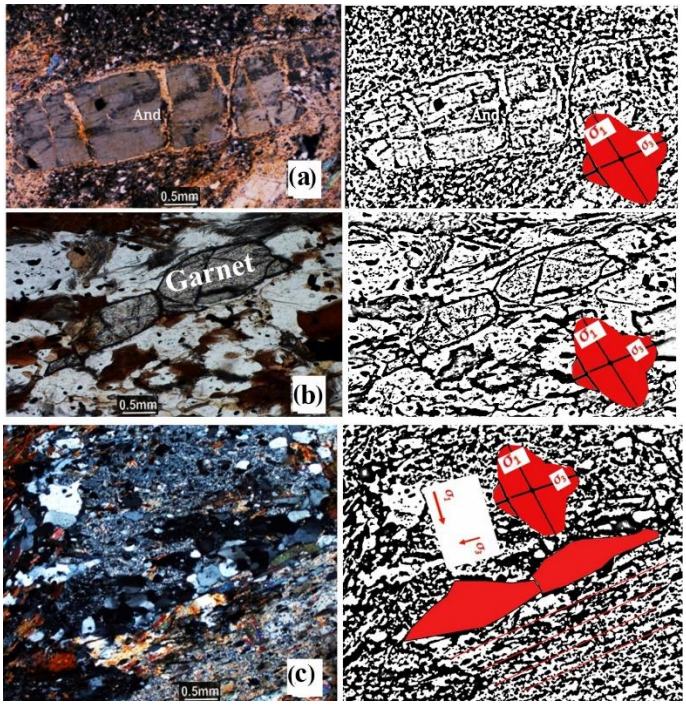
است. شکل‌گیری بودین‌ها تحت تأثیر عواملی مانند اختلاف مقاومت بین لایه‌ها، نوع تغییر شکل و خواص سنگ‌های اطراف است. در ناحیه بروجرد- دورود ساختار بودین اغلب در رگه‌های کوارتز فلدسپاتی منطقه دیده می شود. به طوری که آن رگه‌ها بر اثر نیروهای کششی به صورت تکه‌های منقطع و دنبال هم در آمده‌اند. در بعضی بخش‌ها چین‌خوردگی و بودین با هم دیده می‌شوند یا حتی یک یال چین موازی، به صورت بودین در آمده است. راستای کشیدگی بودین نیز راستای شمال‌شرق- جنوب-غرب بوده و با خط‌وارگی ناشی از کشیدگی کانی‌ها منطبق است. هم چنین با سطح محوری چین‌های هم شیب، موازی می‌باشد. محور بزرگ این گونه از بودین‌ها در زون برشی بروجرد- دورود در جهت شیب برگ‌وارگی منطقه است (شکل ۶). در زون برشی بروجرد- دورود حضور بودین چین‌خورده و بر هم‌سوار شده را می‌توان به وسیله تغییرشکلی‌های با برش ساده و محض توجیه نمود در این شکل لایه‌های مقاوم کوارتز-فلدسپاتی از هم جدا نشده‌اند لایه‌های کوارتز - فلدسپاتی ضخیم و نازک شده‌اند و ایجاد ساخت فرورفته و برجسته را کرده‌اند (شکل ۶c). وجود بودین‌های چین‌خورده در زون برشی بروجرد نشان‌گر عملکرد متوالی یک مرحله کششی و به دنبال آن یک مرحله فشارشی است (شکل ۶d). کشیدگی در سنگ منجر به تشکیل بودین‌ها و فشار بعدی در آن منجر به چین‌خوردن بودین‌های اولیه و لغزش آن‌ها بر روی یکدیگر می‌شود. با آن که این ساختار می‌تواند حاصل از تغییر سیستم اصلی تنش باشد، در عین حال می‌تواند نتیجه یک تغییرشکلی پیش‌رونده برش ساده نیز باشد. در پیش‌روی یک تغییرشکلی با برش ساده بسیاری از ساختارهایی که قبلاً در حال کشش بوده‌اند در مراحل نهایی تحت تأثیر فشارش قرار می‌گیرند (شکل ۶d). از ساختارهای دیگر ناحیه بروجرد- دورود می توان به ساختار میکروبودیناژ اشاره کرد. بودیناژهایی که در اثر کشش در کانی‌های کشیده و در مقیاس میکروسکوپی به وجود می‌آیند به میکروبودیناژ موسومند (Haji Hosseinlou, 2019).

ساخت‌های به وجود آمده در بخش‌های گردن این بودیناژها بسیار شبیه سایه‌های واتنشی و رگه‌های کششی است. میکروبودیناژها به وسیله مجموعه کانی‌هایی که در گردن آن‌ها رشد می‌کنند می‌توانند نشان دهنده شرایط دگرگونی، هنگام تغییرشکلی باشند. در بعضی مواقع، رشد دانه‌ها هنگام تشکیل میکروبودیناژ، باعث به وجود آمدن حالت ناحیه‌بندی در بلورها می‌شود. مطالعه این نواحی نیز می‌تواند در تعیین تغییرات شرایط دگرگونی هنگام تغییرشکلی پیش‌رونده بسیار مؤثر باشند. از میکروبودیناژها می‌توان به عنوان مقیاسی برای اندازه-گیری مقدار واتنش استفاده کرد (Passchier and Trouw, 2005). شکل ۷a,b, c تصویر از میکرو بودیناژهای ناحیه بروجرد- دورود را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان به میکروبودیناژهای کانی آندالوزیت، کانی گارنت و کانی کوارتز اشاره کرد. در ناحیه بروجرد- دورود، اگر بودین‌ها در جهت شیب برگ‌وارگی باشد در زون‌های برشی امتدادلغز و اگر بودین‌ها در جهت موازی با روند برگ‌وارگی‌ها میلونیتی باشد در زون‌های برشی معکوس تشکیل می‌شوند. به طور شماتیک در شکل ۸ موقعیت این دو بودین نسبت به برگ‌وارگی نشان داده شده است. با توجه به نمودار گل سرخی شکل ۸ در منطقه بروجرد-دورود، روند بودین‌ها در جهت شمال غرب- جنوب شرق و شمال شرق – جنوب‌غرب می‌باشد. بودیناژ موازی برگ‌وارگی معمولاً در سنگ‌های شدیداً برگ‌وارگی شده تشکیل می‌شود. انواع مختلفی از بودیناژها در این منطقه مرتبط با زون برشی ناحیه بروجرد- دورود وجود دارد. این بودین‌ها جزء بودین‌های باند برشی (Sherar band)، که توسط بودیناژ با لغزش A به صورت مخروطی شکل یا لوزی‌گرد تشکیل می‌شوند (Goscombe et al., 2004). در این منطقه بودیناژ به صورت واتنش غیر هم‌محور با امتداد N۵۵۰W تشکیل شده است. مطالعات ساختاری نشان می‌دهد هندسه ساختارهای بودین برگ‌وارگی بستگی به جهت‌یافتگی شگستگی‌های اولیه و رشد شکستگی‌ها در طول تغییرشکل بیشتر دارد. با توجه به امتداد این بودیناژها در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود الگو تقارن مونوکلینیک را نشان می‌دهند. در منطقه مورد پژوهش امتداد کلی بودین‌های موازی برگ‌وارگی‌های امتداد گسل دورود می-باشد، پس این ساختارها در اثر حرکات برشی رخ داده و در طول گسل دورود ایجاد شده‌اند.



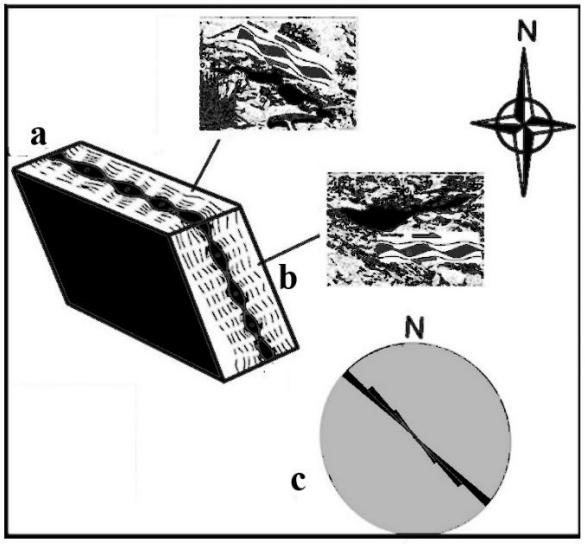
شکل ۶- (a) ساختار بودین در رگه‌های منطقه، محور بودین در جهت شیب برگ‌وارگی است، (b) بودین‌های ناقص در رگه‌های گرانیتوئیدهای منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. محور بودین در جهت امتداد برگ‌وارگی است، (c) بودین‌های ناقص چین‌خورده رگه‌های کوارتز- فلدسپاتی در منطقه بروجرد. محور بودین در جهت شیب برگ‌وارگی است و (d) در بیضوی واتنش، در جهت فشارش به بیضوی، ساختارهای چین‌خورده و موازی با محور بزرگ بیضوی واتنش ساختارهای کششی مانند بودیناژ ایجاد می شود.

Fig 6. (a) Boudin structure in the veins of the area, the boudin axis is in the direction of the foliation dip. (b) Incomplete boudins are observed in the granitoid veins of the studied area. The boudin axis is in the direction of the foliation strike. (c) Folded incomplete boudins of quartz-feldspar veins in the Borujerd area. The boudin axis is in the direction of the foliation dip and (d) In a strain ellipse, in the direction of compression to the ellipse, folded structures and structures parallel to the major axis of the strain ellipse, such as boudinage, are formed.



شکل ۷- (a) رگه آندالوزیت بودیناژ شده در زون برشی بروجرد- دورود، (b) گارنت بودیناژ شده در داخل هورنفلس، در زون برشی بروجرد- دورود و (c) کشیدگی در طول برگ‌وارگی و ایجاد میکروبودیناژ نامتقارن در پورفیروکلاست‌های کوارتز در گرانیت میلونیتی در ناحیه بروجرد- دورود. برش موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگ‌وارگی میلونیتی.

Fig 7. (a) Boudinaged andalusite vein in the Boroujerd-Doroud shear zone, (b) Boudinaged garnet within hornfels, in the Boroujerd-Doroud shear zone and (c) Elongation along foliation and formation of asymmetric microboudinage in quartz porphyroclasts in mylonitic granite in the Boroujerd-Doroud area.. Section parallel to the stretching lineation and normal to the foliation.



شکل ۸- موقعیت شماتیک دو نوع بودین نسبت به برگ‌وارگی. (a) محور بزرگ بودین در جهت شیب برگ‌وارگی است. بودین‌های در جهت شیب برگ‌وارگی در زون‌های برشی امتدادلغز، (b) بودین‌های در جهت موازی با امتداد برگوارگی‌های میلونیتی در زون‌های برشی معکوس تشکیل می‌شوند (Ten Grotenhuis et al, 2003) و (c) دیاگرام گل سرخی روند بودین‌ها در ناحیه بروجرد- دورود را نشان می‌دهند.

Fig 14. Schematic position of two types of boudins relative to foliation. (a) The boudin long axis is in the direction of the foliation dip, Boudins in the direction of the foliation dip form in strike-slip shear zones, (b) Boudins form parallel to the mylonitic foliation strikes in reverse shear zones (Ten Grotenhuis et al, 2003) and (c) The rose diagrams show of boudin trends in the Borujerd-Dorud area.

۴-۲-۸- ساختار S-C در زون برشی بروجرد- دورود

این ساختارها در زون برشی بروجرد- دورود به خوبی هم در نمونه‌های دستی و هم مقاطع نازک جهت‌دار مشاهده می‌شوند. صفحات C در امتداد خطوارگی کششی و صفحات S با زاویه‌ی کوچک‌تر از $^{\circ}$ ۴۵ نسبت به آن‌ها مشاهده می‌شوند. در زون‌های برشی شکل‌پذیر سه نوع برگ‌وارگی معمول است (۱) برگ‌وارگی مایل، (۲) باندهای برشی نوع C و (۳) باندهای برشی نوع 'C. نوارهای برشی نوع C در فابریک S-C موازی کناره‌های زون برشی است و نسبتاً مستقیم و ادامه‌دار می‌باشد (Haji Hosseinlou, 2015). بر عکس نوع 'C، فابریک S-C در میلونیت‌هایی که برگ‌وارگی در آن‌ها ضعیف بوده و درصد کمی میکا دارند گسترش می‌یابد. این فابریک بیشتر در زون‌های برشی با درجه متوسط معمول بوده و به خصوص در گرانیت‌های تغییرشکل یافته دیده می‌شود.

در حالی که فابریک نوارهای برشی نوع C در اطراف پورفیروکلاست‌های فلدسپار دور می‌زنند (شکل 9b). نوارهای برشی نوع C در محل‌هایی با وجود تنش تقسیم شونده بالا هسته‌بندی شده و در کنار پورفیروکلاست‌های فلدسپار تولید و گسترش یافته و به هم متصل می‌شوند. اگر تجمع دانه‌ها در دنباله و بال پورفیروکلاست‌ها جنسی مشابه و یکسان با خود پورفیروکلاست نداشته باشد به نام سایه‌های واتنشی و کل ساختار به نام پورفیروکلاست دارای سایه‌های واتنشی خوانده می‌شود (Passchier and Trouw, 2005) (شکل 9b). این ساختارها در مقیاس مزوسکوپی و میکروسکوپی در گرانیتوئید-های میلونیتی (شکل 9b)، شیست‌ها و متابازیت‌ها، گابرو میلونیتی ناحیه مورد مطالعه مشاهده می‌گردد. در سطح برگ-وارگی میلونیتی این سنگ‌ها، پورفیروکلاست‌های پوششی فلدسپات و بلورهای ماهی‌گون جهت برش بالا به سمت شمال-شرق را نشان می‌دهند که حرکات برشی راست‌گرد را در ناحیه مورد پژوهش تأیید می‌کند (شکل 9a, b).

۴-۲-۹- هندسه برگ‌وارگی و خطوارگی در زون برشی ناحیه بروجرد

برگ‌وارگی S1:

این حالت اولین برگ‌وارگی قابل تشخیص در ناحیه است که به صورت موازی با لایه‌بندی ترکیبی So مشاهده می‌شود و به نظر می‌رسد که از چین‌های خوابیده نسل اول به وجود آمده است و در بیشتر موارد به دلیل عملکرد برگ‌وارگی های بعدی اثرات آن از بین رفته است. این برگ‌وارگی به صورت یک کلیواژ اسلیتی در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با رخساره درجه پایین شیست‌سبز مشاهده می‌شود و به وسیله جهت‌یافتگی کوارتز، سریسیت، کلریت و بیوتیت نمایان می‌شود (شکل 9d).

برگ‌وارگی S2:

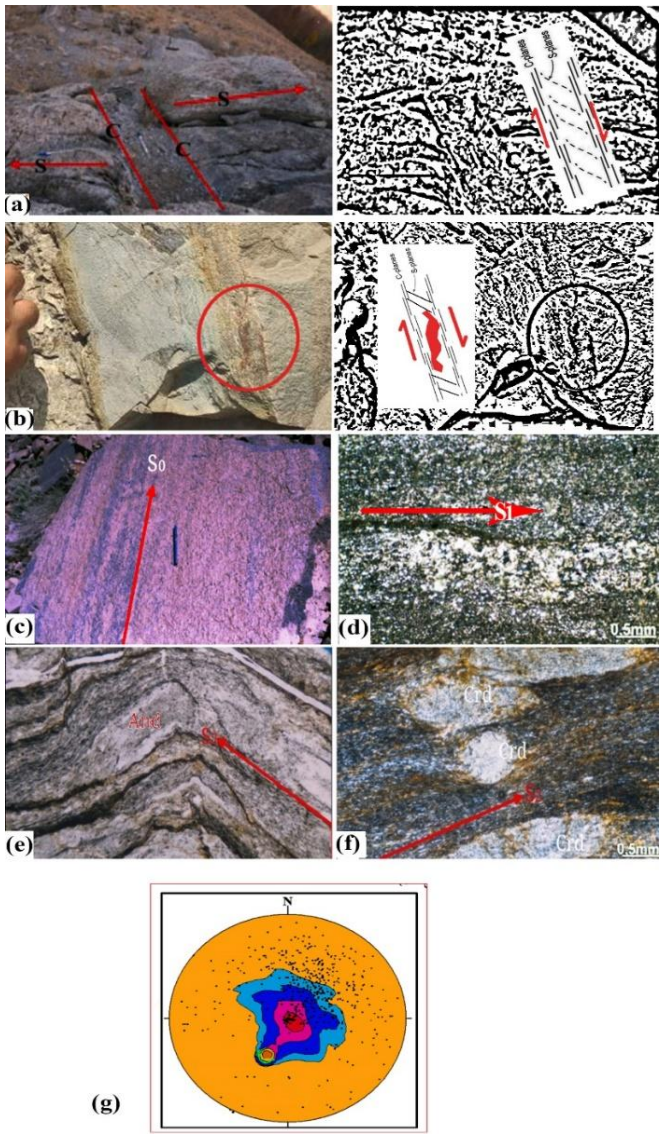
برگ‌وارگی مرحله دوم در کل ناحیه بروجرد عمومیت دارد که در اکثر سنگ‌های منطقه بروجرد به صورت برگ‌وارگی اصلی مشاهده می‌شود. برگ‌وارگی مرحله دوم در اثر چین‌خوردگی برگ‌وارگی‌های S0 (شکل 9c) وS1 ایجاد شده است و موازی سطح محوری چین‌های نسل دوم است که در پهلوهای این چین‌ها کاملاً موازی با S1 دیده می‌شود ولی در منطقه لولای آن‌ها، چین‌خوردگی برگ‌وارگی S1 و برگ‌وارگی S2 در سطح محوری چین‌ها قابل مشاهده است. برگ‌وارگی S2 در حقیقت یک کلیواژ خمیده است که بر روی کلیواژ اسلیتی گسترش یافته است که در برخی نقاط به یک برگ‌وارگی انفصالی تبدیل شده است و در شیست‌های لکه‌دار با جهت یافتگی مسکوویت و بیوتیت ظاهر می‌شود (شکل 9e, f).

در زون برشی ناحیه بروجرد، با توجه به برداشت‌ها و اندازه-گیری‌های صحرایی امتداد اصلی برگ‌وارگی‌های میلونیتی در دو امتداد اصلی شمال‌غرب- جنوب‌شرق (NW-SE) و شمال‌شرق-جنوب‌غرب (NE-SW) است. برگ‌وارگی میلونیتی در امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق (NW-SE)، تقریباً با امتداد N50°W و بیشتر به سمت شمال شرق شیب دارند. برگ‌وارگی میلونیتی در امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غرب (NW-SE) بیشتر به سمت جنوب شرق شیب دارند. در بخش‌های شمال زون برشی بروجرد، برگ‌وارگی میلونیتی بیشتر به سمت جنوب شرق شیب دارد و در بخش‌های جنوبی زون برشی بروجرد برگ‌وارگی میلونیتی بیشتر به سمت شمال شرق شیب نشان می‌دهند. با رسم نمودارهای استریوگرافی از برگ‌وارگی‌های S1، S2 و برگ-وارگی میلونیتی (Cm) منطقه می‌توان نتیجه گرفت که برگ-وارگی‌های میلونیتی با برگ‌وارگی‌های S1 زاویه‌ای حدود ۱۲ تا ۱۵ درجه می‌سازد و برگ‌وارگی‌های میلونیتی بر روی برگ-وارگی‌های S1 و S2 چاپ شده است (شکل 9g). با توجه به

تحلیل نمودارهای استریونت جهت‌گیری برگ‌وارگی میلونیتی و خطوارگی کششی شکل 9g و شکل ۲۰، برگ‌وارگی میلونیتی اصلی دارای راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق و جهت شیب برگ‌وارگی میلونیتی شمال‌شرق است. خطواره کششی (شکل ۱۰b, c) راستای شمال‌غرب- جنوب‌شرق و در راستای برگ-وارگی میلونیتی است. با توجه به شواهد صحرایی و اطلاعات حاصل از مقاطع میکروسکوپی به نظر می‌رسد که زون برشی با شیب کم به طور مجدد تحت تأثیر دگرشکلی قرار گرفته و چین خورده است و به خاطر این چین خوردگی نوع حرکت زون برشی در برخی مناطق حرکت عادی و در مناطق دیگر حرکت راندگی را نشان می‌دهد.

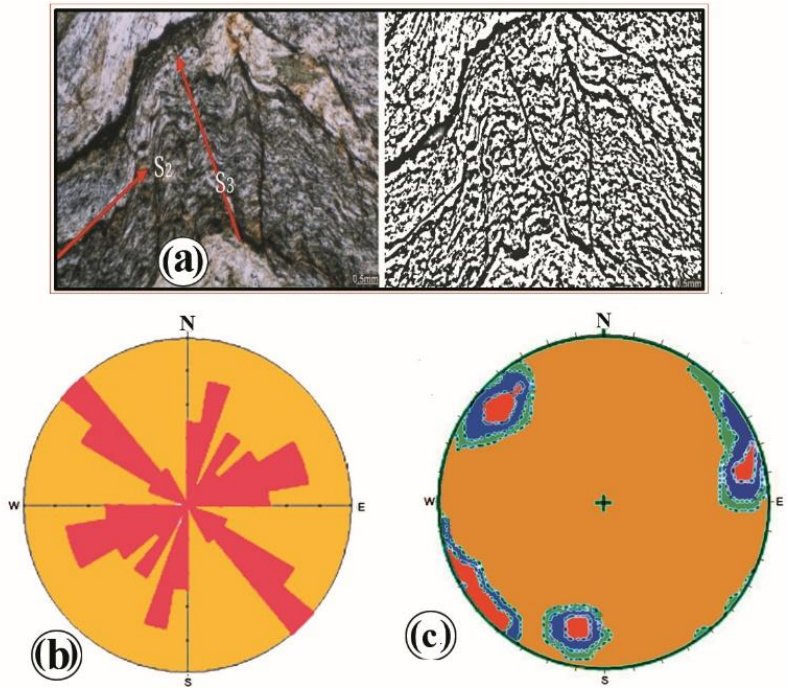
برگ‌وارگی S3:

در ناحیه بروجرد، برگ‌وارگی فوق به صورت یک کلیواژ خمیده دیده می‌شود و در اثر چین‌خوردگی ضعیف برگ‌وارگی S2 حاصل شده است (شکل ۱۹). خطوارگی‌های کششی در رخنمون‌های میلونیتی از دیگر ساختارهای مهم در زون برشی بروجرد می‌باشد. انواع متنوعی از خطوارگی‌های کششی در زون برشی بروجرد در طول تغییرشکلی شکل‌پذیر تشکیل شده است که شامل خطوارگی‌های کششی در میلونیت‌ها، محور طویل بیضوی دانه‌های کوارتز- فلدسپات، روبان‌های کوارتز- فلدسپات و خطوط لولای



شکل ۹- (a) باند برشی S-C در گرانیتوئید بروجرد، (b) باند برشی S-C در شیست‌های بروجرد، نوع و سوی برش در ناحیه بروجرد راست‌گرد می‌باشد، (c) برگ‌وارگی S0 در زون برشی بروجرد، (d) برگ‌وارگی S1 در زون برشی بروجرد، (e) و (f) برگ‌وارگی S2 در رخنمون‌های زون برشی بروجرد – دورود و (g) جهت یافتگی برگ‌وارگی‌های S2، S1 و برگ‌وارگی میلونیتی (Cm) در زون برشی بروجرد- دورود

Fig 9. (a) S-C shear band in the Boroujerd granitoid, (b) S-C shear band in the Boroujerd schist, dextral shear sense. (c) S0 foliation in Boroujerd shear zone, (d) S1 foliation in Boroujerd shear zone, (e) and (f) S2 foliation in Boroujerd-Doroud shear zone in outcropes and (g) Orientation of S1, S2 foliations and mylonitic foliation (Cm) in Boroujerd-Doroud shear zone



شکل ۱۰- (a) برگ‌وارگی S2 و S3 در زون برشی ناحیه بروجرد، (b) دیاگرام گل‌سرخی از جهات خطوارگی‌های کششی در منطقه مورد مطالعه و (c) تصویر استریوگرافی از خطوارگی‌های کششی در بروجرد - دورود

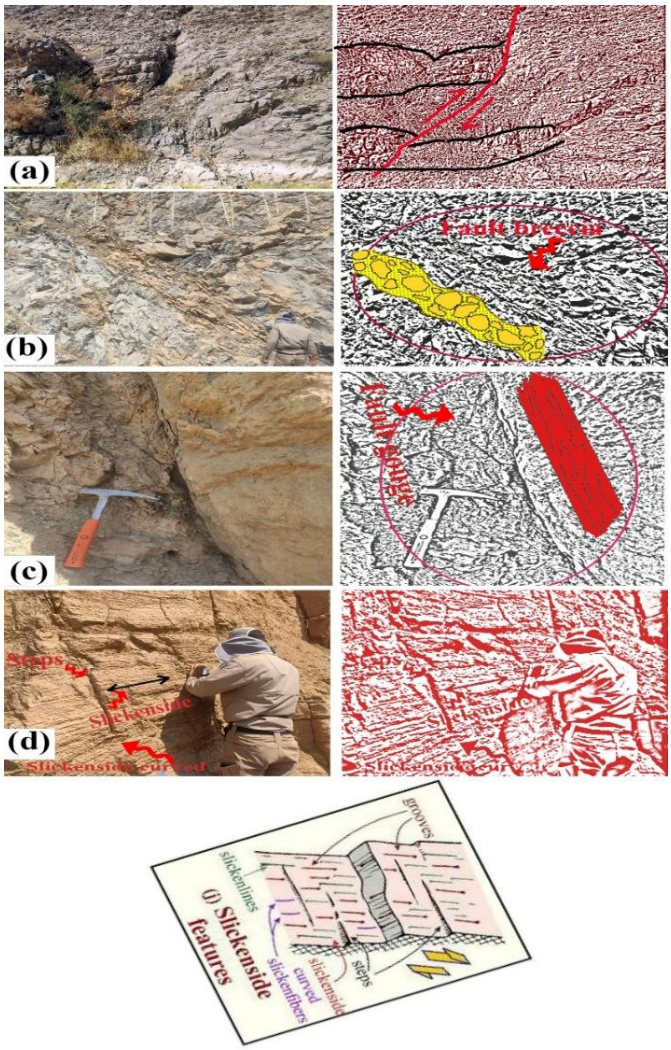
Fig 10. (a) S2 and S3 foliation in Boroujerd- Doroud shear zone, (b) Rose diagram of the stretching lineation directions in the study area and (c) Orientation of the stretching lineation within the Boroujerd- Doroud shear zones

۵- نتایج

بررسی‌های سنگ‌شناسی در زون برشی بروجرد- دورود نشان می‌دهد که درجه دگرگونی سنگ‌های این منطقه در حد رخساره شیست‌سبز و آمفیبولیت فوقانی و دما در حدود ۳۰۰ و بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد از طرف دیگر حضور آندالوزیت و نبود کیانیت در این سنگ‌ها حاکی از دگرگونی در فشارهای کم‌تر از ۴ کیلوبار می‌باشد. با توجه به اطلاعات حاصله از مطالعات ساختاری و ریزساختاری ناحیه بروجرد- دورود مشخص می‌گردد که ساختارهای حاصله در این ناحیه هم از نوع دمای بالا و هم از نوع دمای پایین می‌باشند پس در این ناحیه اغلب دگرشکلی‌ها در حالت جامد و دمای بالا اتفاق افتاده است. به طوری که از مهم‌ترین ساختارهای دمای بالا می‌توان به خمش ماکل در پلاژیوکلازها، ساختارهای پورفیروکلاستی نامتقارن σ در بسیاری از آلکالی فلدسپارها، بدون چین‌خوردگی سنگ‌های درون‌گیر اشاره‌گیر کرد. از مهم‌ترین ساختارهای دمای پایین در این منطقه می‌توان پورفیروکلاست‌های قطعه-قطعه شده فلدسپات در میلونیت‌های منطقه (Trouw et al., 2010)، خرد شدن دینامیکی فلدسپار و کوارتز، خاموشی موجی در کوارتز و غیره اشاره کرد. شواهد حرکت در زون‌های برشی شامل شواهد ساختاری و ریزساختاری است که نشان‌دهنده جابه‌جایی و تغییرشکل سنگ‌ها در اثر تنش‌های برشی هستند. این شواهد می‌توانند در مقیاس‌های مختلف، از میکروسکوپی تا مزوسکوپی، مشاهده شوند و به شناسایی نوع، جهت و میزان حرکت در زون‌های برشی کمک کنند. شواهد حرکت در زون برشی بروجرد- دورود عبارتند از:

۵-۱- شواهد حرکت معکوس زون برشی در ناحیه بروجرد- دورود

در زون‌های برشی بروجرد- دورود، محور بودین‌های که در جهت امتداد برگ‌وارگی است (شکل ۶b)، گسل‌های راندگی (شکل ۱۱a) خش و گوژ گسلی (شکل ۱۱b,c, d) و چین‌های کشیده از نوع S شکل (شکل ۲c, e) در زون‌های برشی معکوس تشکیل می‌شوند.



شکل ۱۱- (a) گسل راندگی در ناحیه مورد مطالعه، (b) برش گسلی، (c) گوژ گسلی در زون برشی ناحیه بروجرد- دورود و (d) خش گسلی مربوط به گسل دورود در زون برشی بروجرد- دورود، خش گسلی در این منطقه جهت حرکت راست‌گرد را نشان می‌دهد.

Fig 11. (a) Thrust fault at study area, (b) Fault breccia in the Borujerd-Dorud shear zone, (c) Fault gouge and (d) Fault striations related to the Dorud fault in the Borujerd-Dorud shear zone. The fault striations in this area indicate dextral movement.

۵-۲- شواهد حرکت امتدادلغز زون برشی در ناحیه بروجرد- دورود

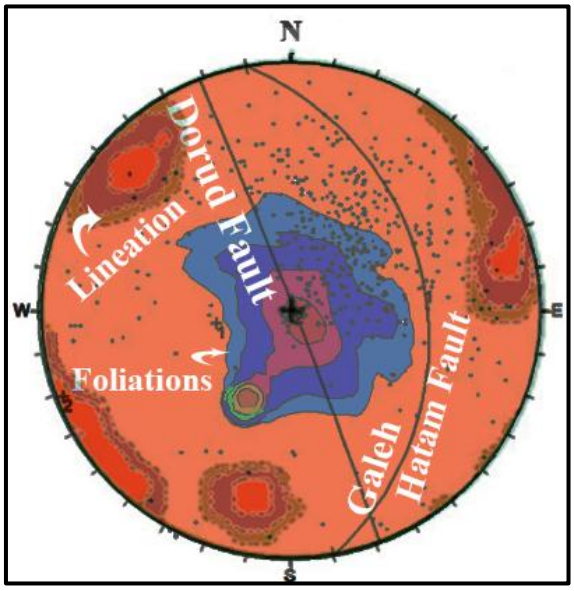
در زون‌های برشی بروجرد- دورود، محور بودین‌های که در جهت شیب برگ‌وارگی است (شکل ۶a)، چین‌های کشیده از نوع Z (شکل ۲d) در زون‌های برشی امتدادلغز تشکیل می‌شوند.

۵-۳- شواهد حرکت توأم امتدادلغز و شیب‌لغز در ناحیه بروجرد- دورود

نشانگرهای سمت و سوی برش همانند: باندهای برشی S-C (شکل‌های ۹a, b و ۱۰a, b, c)، چین‌های گسلی (شکل ۴a)، انواع بلورهای ماهی‌گون (شکل ۳e, f, g) و پورفیروکلاست‌های

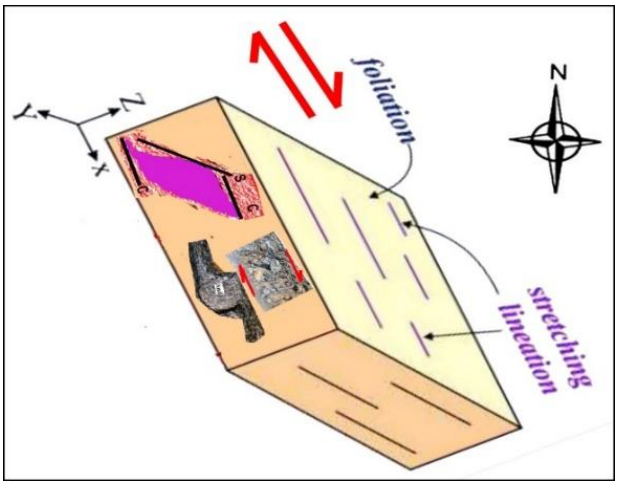
گوشته‌ای (شکل ۱۱a, b, c) نشانگر آنند که تغییرات شکل‌پذیر حرکات توأم امتدادلغز و شیب‌لغز را نشان می‌دهند. در زون برشی بروجرد- دورود، برگ‌وارگی‌های میلونیتی (برگ‌وارگی کششی) شیب‌لغز دارای شیب زیادتری هستند ولی برگ‌وارگی-های میلونیتی امتدادلغز دارای شیب به نسبت کم‌تری می‌باشند.

شواهد جنبشی فراوانی از عملکرد تنش‌های برشی و فشارشی در این منطقه دیده می‌شود که همه‌ی آن‌ها نشان دهنده عملکرد یک زون برشی با برگ‌وارگی میلونیتی با شیب ملایم به سمت شمال شرق و خطوارگی کششی به سمت شمال شرق با مکانسیم امتدادلغز راست‌گرد در این ناحیه است. موازی بودن روند بیشتر خطوارگی‌های کششی با محور چین‌های بزرگ مقیاس نسل دوم، ثابت می‌کند که میلونیتی شدن اصلی همزمان با دگرشکلی دوم (D2) رخ داده است. در حالت کلی شدت دگرشکلی در زون برشی بروجرد- دورود از شمال غرب به جنوب شرق و هم چنین از غرب به شرق کاهش محسوس و چشم‌گیری نشان می‌دهد که بی ارتباط با گستردگی زون‌های برشی و گسل‌های دورود و قلعه حاتم در مناطق غرب و شمال غرب منطقه نیست (شکل۱۲). Mohajjel و Fergusson (۲۰۰۰) در مطالعه ناحیه ژان، در غرب ایران مدل ترافشارشی مایل راست‌گرد را مطرح نمودند. ناحیه ژان بخشی از کمربند دگرگونی سنندج ـ سیرجان است. در بخش جنوبی زون دگرگونی سنندج ـ سیرجان ترافشارشی با خروج جانبی مواد در بخش شمالی سنندجـ سیرجان (منطقه ازنا)، ترافشارش در کرتاسه پسین گزارش شده است. در سال‌های اخیر بسیاری از حاشیه‌های همگرایی جهان توسط مدل ترافشارشی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. Mohajjel و Fergusson (۲۰۰۱) حرکات راست‌گرد در گسل‌های قطع کننده زون ارومیه- دختر (گسل-هایی با راستای شمالی- جنوبی) را نشان دهنده وقوع ترافشارشی مایل می‌داند. آنان همچنین تمام گسل‌های دارای راستای شمالی- جنوبی بین گسل چمن و زون جوش‌خورده زاگرس را که دارای حرکت راست‌گرد هستند مرتبط با ترافشارشی مایل بین صفحه ایران و آفرو- عربی می‌داند. Rasoulzadeh و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه چالدران، مدل امتدادلغز-فشارشی مایل راست‌گرد را پیشنهاد شده است. طبق مطالعات آنان مشاهده ساختارها و ریزساختارهای نشان‌گر برش معکوس و امتدادلغز راست‌گرد با همدیگر با بیان گر وقوع توزیع در این منطقه است. در ناحیه بروجرد- دورود، مطالعات ساختاری و ریزساختاری صورت گرفته نشان دهنده دو دسته ساختار اصلی در این منطقه می باشند. (۱) دسته اول ساختارهای مرتبط با حرکات برشی راست‌گرد و (۲) دسته دوم در ارتباط با حرکات راندگی به وقوع پیوسته در این ناحیه است. حرکات برشی راست‌گرد توسط مؤلفه امتدادلغز ترافشارشی مایل ایجاد گردیده‌اند و حرکات راندگی توسط مؤلفه فشارش ترافشارشی مایل به وجود آمده‌اند. با توجه به مطالعات ساختاری و ریزساختاری صورت گرفته در زون برشی ناحیه بروجرد-دورود می‌توان مدل ترافشارشی مایل ارائه شده توسط Jones و همکاران (۲۰۰۴) را که در آن اشکالات مدل Sandersone و Marchini (۱۹۸۴) برطرف گردیده است را برای ناحیه بروجرد- دورود نیز در نظر گرفت. وجود نشان‌گرهای نوع برش شکل‌پذیر (شکل ۱۳) با سوی راست‌گرد نظیر باندهای برشی C-S، چین‌های گسلی، انواع ساختارهای ماهی‌گون، پورفیروکلاست‌های پوششی و ساختارهای حاصل از کشش نشانگر آن است که زون برشی ناحیه بروجرد- دورود در طی دگرشکلی در تکتونیک ترافشارش راست‌گرد به وجود آمده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۲- جهت‌یافتگی برگ‌وارگی و خطوارگی کششی با گسل‌های دورود و قلعه‌حاتم در زون‌های برشی بروجرد- دورود

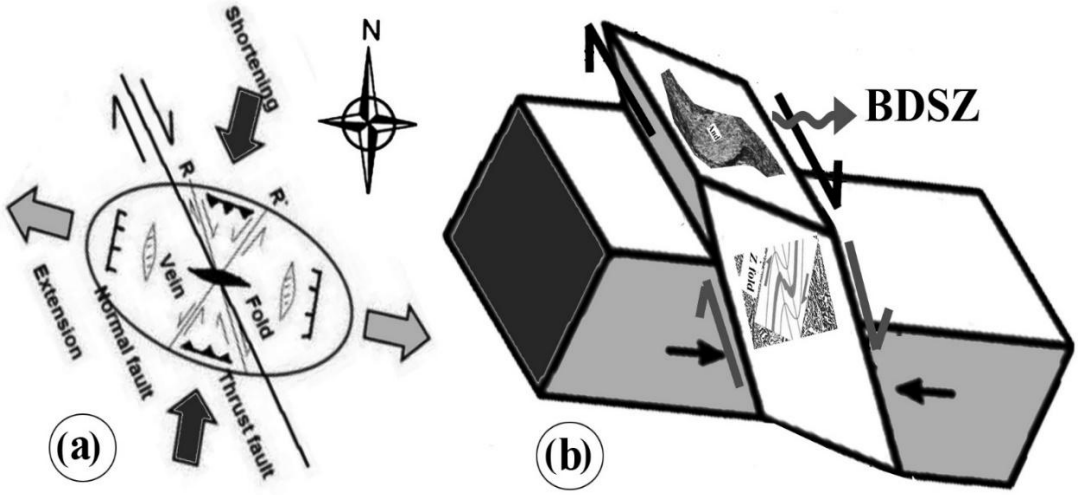
Fig 12. Orientation of the foliation and of the stretching lineation with Doroud and Galeh Hatam within the Boroujerd-Doroud shear zones



شکل ۱۳- مدل شماتیک نشان‌گرهای نوع برش شکل‌پذیر در زون‌های برشی بروجرد- دورود

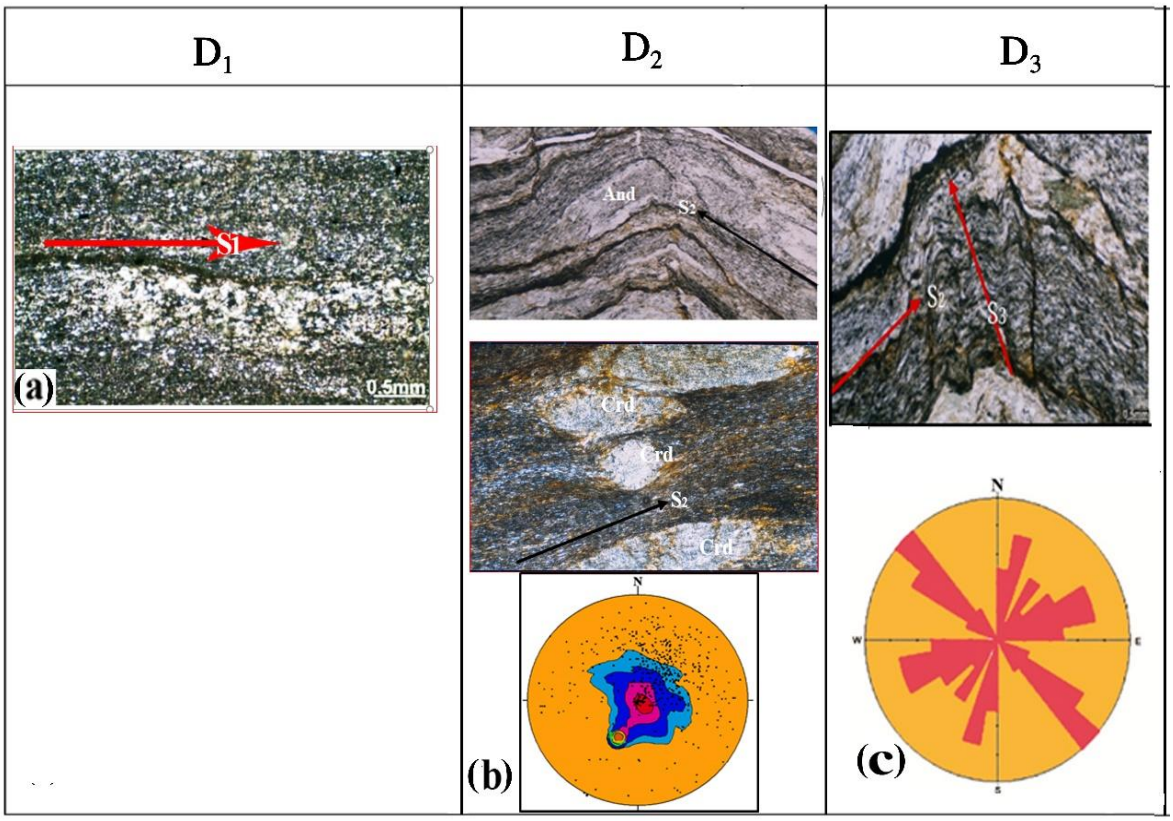
Fig 13. Schematic model ductile shear sense within the Boroujerd- Doroud shear zones

از این که ساختارها و ریزساختارهای نشان‌گر برش معکوس و امتدادلغز راست‌گرد در این زون با همدیگر مشاهده می‌شوند بیان‌گر وقوع تفکیک در این زون است. این موضوع مشخص می‌کند که نیروهای تکتونیکی مایل نسبت به زون دگرشکلی ناحیه بروجرد در اثر تکتونیک ترافشارش بین صفحه عربی با زون زاگرس رویداده است پس تحلیل ساختاری و ریزساختاری زون برشی بروجرد- درود نشان می‌دهد که دگرشکلی در ناحیه بروجرد- دورود تحت الگوی ترافشارش مایل راست‌گرد توسعه یافته است. بررسی مطالعات ناحیه مورد مطالعه سه فاز دگرشکلی را می‌توان تشخیص داد. در اولین مرحله دگرشکلی ناحیه (D1) ، نیروهای تنش‌های افقی همراه با فازهای حرارتی سبب دگرگون شدن سنگ‌ها گردیده و چین‌های نسل اول را در گستره تشکیل می‌دهند. آثار این دگرگونی به صورت لایه‌بندی و تشکیل برگ‌وارگی نسل اول و آثار دگرشکلی دوم (D2) به صورت تشکیل برگ‌وارگی نسل دوم و زون برشی شکل‌پذیر در ناحیه دیده می‌شود. برگ‌وارگی‌های میلونیتی در زون برشی که در نسل دوم تشکیل شده است، در دگرشکلی نسل سوم (D3) دچار چین‌خوردگی شده‌اند. مهم‌ترین دگرشکلی در ناحیه بروجرد دگرشکلی دوم است و دگرشکلی سوم سبب چین-خوردن برگ‌وارگی میلونیتی می‌شود (جدول ۱ و شکل ۱۵).



شکل ۱۴- (a) ساخت‌های پدید آمده تحت سامانه ترافشارشی راست‌گرد در زون برشی بروجرد- دورود، چینهای کششی و راستای گسل‌های راندگی موازی محور بزرگ و شکستگی‌های کششی و راستای گسل‌های نرمال موازی با محور کوچک بیضوی واتنش نهایی افقی جهت‌گیری می‌شوند و (b) رژیم ترافشارش مایل راست‌گرد در زون برشی بروجرد- دورود

Fig 14. (a) Structures formed under the dextral transpressional system in the Borujerd-Dorud shear zone (BDSZ) and (b) dextral oblique transpressional regime in the Borujerd-Dorud shear zone (BDSZ)



شکل ۱۵- خلاصه‌ای از ساختارهای اندازه‌گیری شده (تصاویر استریوگرافیک) و مشاهده شده در صحرا، (a) مرحله‌ی دگرشکلی D1، ساختارهای ایجاد شده در این مرحله‌ی دگرشکلی، خطوارگی‌های کشیدگی نسل اول و برگ‌وارگی‌های S1 می‌باشد، (b) مرحله‌ی دگرشکلی D2، ساختارهای رخ داده در این مرحله‌ی دگرشکلی، خطوارگی‌های کشیدگی نسل دوم، برگ‌وارگی‌های میلونیتی نسل دوم S2، چین‌های کششی نوع Z و S ، چین‌های نیامی می‌باشد و (c) مرحله‌ی دگرشکلی D3، از ساختارهای ایجاد شده در این مرحله‌ی دگرشکلی، می‌توان بودین‌های موازی با برگ‌وارگی و برگ‌وارگی‌های چین‌خورده نسل سوم S3 نام برد.

Fig 15. summary of measured (stereographic images) and observed structures in the field, (a) D1 deformation phase, structures formed during this deformation phase are first-generation stretching lineations and S1 foliations, (b) D2 deformation phase, structures occurring during this deformation phase are second-generation stretching lineations, second-generation mylonitic S2 foliations, Z and S type drag folds, and sheath folds and (c) D3 deformation phase, structures formed during this deformation phase include foliation-parallel boudins and third-generation folded S3 foliations.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به شواهد نمایش داده شده در منطقه مورد مطالعه و بحث‌های انجام شده در ارتباط با آن‌ها، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- شواهد جنبشی فراوانی از عملکرد تنش‌های برشی و فشارشی در این منطقه دیده می‌شود که همه‌ی آن‌ها نشان دهنده عملکرد یک زون برشی با برگ‌وارگی میلونیتی با شیب ملایم به سمت شمال شرق و خطوارگی کششی به سمت شمال شرق با مکانسیم امتدادلغز راست‌گرد در این ناحیه است. موازی بودن روند بیشتر خطوارگی‌های کششی با محور چین‌های بزرگ مقیاس نسل دوم، ثابت می‌کند که میلونیتی شدن اصلی همزمان با دگرشکلی دوم (D2) رخ داده است. در حالت کلی شدت دگرشکلی در زون برشی بروجرد- دورود از شمال غرب به جنوب شرق و هم چنین از غرب به شرق کاهش محسوس و چشم‌گیری نشان می‌دهد که بی ارتباط با گستردگی زون‌های برشی و گسل‌های دورود و قلعه حاتم در مناطق غرب و شمال غرب منطقه نیست.

جدول ۱- رویدادهای دگرشکلی در منطقه بروجرد – دورود (Ahmadi Khalaji, 2006)

Table.1. Deformation events in the Borujerd-Dorud area (Ahmadi Khalaji, 2006)

Time	Sedimentation	Magmatism	Metamorphism	Deformation
Quaternary	Alluvium			
Upper Cretaceous-Paleogene	Shale and marl	Dolerite dykes pegmatites in masses	Retrograde metamorphism	D3 (Third deformation)
Lower Cretaceous	Arbitulin lime, Shale, Sandy dolomite, Sandy lime, Red sandstone	Granitoid masses Pegmatites in aureole metamorphism	Spotted schists and hornfels (contact metamorphism)	D2 (Second deformation)
Jurassic	Shale and sandstone		Slate-phyllite (regional metamorphism)	D1 (First deformation)
Triassic	Lime Quartz sandstone Sedimentary-volcanic complex	Tuff, Ignimbrite, Lava (dacite - rhyolite, rhyodacite)	Marble-Slate Metavolcanic	

۲-زون برشی ناحیه بروجرد- دورود از سه مرحله‌ی دگرشکلی متأثر شده است (D1-D3). مرحله‌ی دگرشکلی اول و دوم به صورت شکل‌پذیر پیش‌رونده و مرحله‌ی دگرشکل سوم به صورت شکننده- شکل‌پذیر عمل کرده است.

۳- راستای کلی ساختارها از قبیل برگ‌وارگی میلونیتی، چین‌ها، گسل‌های دورود و قلعه‌حاتم شمال‌غرب- جنوب شرق است که نشان‌دهنده‌ی حداکثر کوتاه‌شدگی شمال‌شرق- جنوب‌غرب می‌باشد. برگ‌وارگی‌های میلونیتی مشاهده‌شده در این زون، اغلب دارای راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق هستند و با شیب متوسط تا زیاد به سمت شمال‌شرق متمایل‌اند. همچنین، خطوارگی‌های میلونیتی عمدتاً روند شمال-شمال‌شرق تا شمال را نشان می‌دهند و میزان میل آنها کم تا متوسط می‌باشد.

۴- با توجه به مطالعات میکروسکوپی نیز در خصوص نمونه های گردآوری شده از مناطق برشی راندگی ها می توان تأثیر مؤلفه راستالغز راست گرد را برای تمام راندگی ها استنباط نمود.

گسل خوردگی های نرمال و امتدادلغز نیز در ارتباط با مؤلفه راستالغز راست گرد است. ۵- ساختارهای نشانگر نوع برش شکل‌پذیر نظیر باندهای برشی C-S، چین‌های گسلی، انواع ساختارهای ماهی‌گون و پورفیروکلاست‌های گوشته‌ای نشانگر آن است که زون برشی ناحیه بروجرد- دورود در طی دگرشکلی در تکتونیک ترافشارش راست‌گرد به وجود آمده است. از این که ساختارها و ریزساختارهای نشان‌گر برش معکوس و امتدادلغز راست‌گرد در این زون با همدیگر مشاهده می‌شوند بیانگر وقوع تقسیم‌شدگی در این زون است. این موضوع مشخص می‌کند که نیروهای تکتونیکی مایل نسبت به زون دگرشکلی منطقه بروجرد- دورود در اثر تکتونیک همگرا بین صفحه عربی و زون زاگرس رویداده است.

۶- مراجع

Ahmadi Khalaji, A., 1999. Petrological and petrofabric study of intrusive bodies and contact metamorphism in the Borujerd area. M.Sc thesis. University of Tehran, Tehran.

Ahmadi Khalaji, A., 2006. Petrology of the Boroujerd Granitoid Mass. PhD Thesis. University of Tehran, Tehran.

Ahmadi Khalaji, A., Esmaeili, D., Valizadeh, M., 2006. The Source and tectonic characteristics of the Boroujerd granitoid mass (western Iran). Journal of Earth Sciences 15 (60), 10-15.

Ahmadi Khalaji, A., Esmaeily, D., Valizadeh, MV., Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. Journal of Asian Earth Sciences 29 (5-6), 859-877.https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.06.005

Alsob, GI., Condon, DJ., 2025. Shear zone folds: Structural analysis and interpretation. Journal of Structural Geology 201,105544. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2025.105544.

Ceccato, A., Goncalves, P., Menegon, L., 2022. On the petrology and microstructures of small-scale ductile shear zones in granitoid rocks: an overview. Journal of Structural Geology 161, 104667. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104667.

Jones, R., Holdsworth, RE., Clegg, P., McCaffrey, K., Tavarnelli, E., 2004. Inclined transpression. Journal of Structural Geology 26, 1531-1548.

Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). Journal of Asian Earth Sciences 26 (6), 683-693.

Haji Hosseinlou, H., 2003. Structural Analysis of Eqhlid Fault Shear Zone, southwest of Iran. M.Sc Thesis. University of Shiraz, Shiraz.

Haji Hosseinlou H., 2015. Kinematics of Transpressional Deformation Zones in the Urmia Fault Zone, Northwest Iran. Journal of Earth Sciences 7, 59-67.

Haji Hosseinlou H., 2020. Badalabad Shear Zone Structures Study at North Khoy. Kharazmi Journal Earth Sciences 7 (1), 59-67. https://doi/10.52547/gnf.6.1.83.

Haji Hosseinlou, H., 2021. Petrofabric analysis of the Chaharsoton-Deshwan fault area, northwest Salmas. Advanced Applied Geology 11(3), 514-535. https:// doi/10.22055/aag.2020.33165.2112.

Haji Hosseinlou H., 2019. Deformational phases introducing in the Gheris shear zone, northwestern Khoy. Tectonics Journal 3(10), 68-80. https://doi/10.22077/jt.2020.1435.

Haji Hosseinlou, H., Solgi, A., Mohajjel, M., Pourkermani, M., 2015. Deformation partitioning in response inclined transpression collision of Arabian plate with west Alborz-to azarbayjan block, the Khoy shear zone. Geoscience 24, 181-196. https:// doi/ 10.22071/gsj.2015.43398.

Haj Malaali, A., Hosseini, M., Farhadian, MB., Sedaghat, A., 1991. Borujerd Geological Map at 1:100,000 Scale. Geological Survey and Mineral Exploration Organization of Iran Publications, 5757.

Lisle, RJ., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. Journal of Structural Geology 50, 35–43. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.08.002.

Mohammadzadeh, A., Ahmadi Khalaji, A., Yeganehfar, H., Tahmasbi, Z., 2024. Geochemistry mineral chemistry, and tectonic setting of the metabasites in the SE of Boroujerd, Sanandaj–Sirjan zone. Advanced Applied Geology 13(4), 1118-1136. https:// doi/10.22055/aag.2023.43384.2359

Mfa, PD., Kolawole, K., Kgosidintsi, B., Ajala, R., Shemang, E., 2025. Long-lived seismic instability of a large intraplate brittle shear zone revealed by distributed slip zones and paleoseismic frictional melt,

eastern Botswana. Journal of Structural Geology 191(4), 105324. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105324.

Mohajjel, M., 1378. Structural evidence of dextral transpressional convergence in the Sanandaj-Sirjan Zone from collision (Late Cretaceous) to the present. Abstracts of the 18th Earth Sciences Symposium. p. 746-749.

Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2001. Reply to discussion of dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. Journal of Structural Geology 23, 2035-2036.

Mohajjel, M., Fergusson, CL., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. Journal of Structural Geology 22, 1125-1139.

Passchier, C.W., Trouw, R AJ., 2005. Microtectonis, Springer, Berlin Heidelberg, p. 366.

Rasoulzadeh, S., Solgi, A., Haji Hosseinlou, H., Maleki, Z., 2022. Dextral Transpressional Deformation along the Chaldiran Shear Zone, Northwest Iran. Advanced Applied Geology 12, 31-57. https://doi/10.22055/aag.2021.34977.2163

Sanderson, DJ., Marchini, WRD., 1984. Transpression. Journal of Structural Geology 6, 449-458.

Sepahvand, M., Yaminifard, F., Tatar, M., Abbassi, M., 2012. Aftershocks study of the 2006 Silakhur earthquake (Zagros, Iran): Seismological evidences for a pull-apart basin along the Main Recent Fault, Doroud segments. Journal Seismology 16, 233–251.

Srivastava, CD., Lisle, RJ., Vandycke, S., 1995. Shear zones as a new type of palaeostress indicator. Journal of Structural Geology 17, 663-676.

Ten Grotenhuis, S.M., Trouw, R. A.J., Passchier, CW., 2003. Evolution of mica fish in mylonitic rocks. Tectonophysics 372, 1-21. https://doi/ 10.1016/S0040-1951(03)00231-2.

Tchalenko, J., Braud, J., 1974. Seismicity and structure of the Zagros (I fault between 33 and 35º N, Phil. Philosophical Transactions of the Royal Society London 277, 1-25.

Trouw, R. A.J., Passchier, C. W., Wiersma, D.J., 2010. Atlas of mylonites and related microstructures, Springer Science and Business Media, Science, p. 322.

Twiss, R.J., Moores, EM., 2007. Structural geology, New York: Freeman, W. H. Freeman, p. 736.