



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

Tectonic evolution of the Saqqez – Baneh structural zone in relation with the Zagros collision

Mehdi Naghdi^{1*}, Esmail Shabani Borujeni², Iman Monsef³

1, 2, 3. Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Article info

Article history

Received: 3 November 2025

Accepted: 20 December 2025

Keywords:

Transverse structures, Main thrust, Sanandaj-Sirjan structural zone, Saqqez-Baneh structural zone, Zagros orogeny.



Abstract

The Zagros collision zone is the product of convergence between the Arabian and Eurasian plates and extends in a NW-SE direction. Within this framework, the Saqqez-Baneh structural zone—located in the northwestern part of the Zagros orogeny and forming part of the Sanandaj-Sirjan metamorphic-igneous belt—exhibits a NE-SW structural trend that is markedly different from the overall trend of the Zagros. Given that the tectonic evolution of this zone is closely linked to the developmental history of the Zagros orogeny, its investigation offers valuable insight into the continental deformation history of the region. Kinematic, geometric, and dynamic analyses of this zone have enabled the reconstruction of the paleo stress field and the orientation of the principal compressional and extensional axes responsible for the recorded deformation in the thrust belt. Based on the collected data and field observations, no clear evidence is found for vertical-axis rotations or for local stress-field perturbations around the thrust zone. Instead, the northern and southern sectors of the thrust belt—despite their nearly perpendicular trends—represent components of a pre-existing structure that formed under a homogeneous stress regime during thrust emplacement. Each segment expresses its own characteristic structural geometry and kinematics depending on its relationship to the shear zone. Structural data from different parts of the thrust belt indicate that while the northern segment functioned as a typical Zagros-style thrust, the southern segment operated as a lateral ramp, parallel to the Saqqez-Baneh structural trend, and accommodated left-lateral oblique-slip motion. The presence of this inherited structure facilitated westward propagation of the main thrust front and acted as a transverse structure during the structural evolution of the region. Accordingly, the Saqqez-Baneh structural zone—similar to the well-known Muteh-Laybid transverse trend—demonstrates that the tectonic processes associated with the opening and closure of the Neo-Tethys were unable to completely rework the southwestern margin of the Central Iranian microcontinent.

Introduction

The Saqqez–Baneh structural zone, located in the northwestern part of the Iranian plateau, occupies the northern margin of the Sanandaj–Sirjan metamorphic-igneous belt from a structural geology perspective. This belt itself is a consequence of the opening and subsequent subduction of the Neo-Tethys Ocean beneath the Iranian microcontinent (Davoudian et al., 2016; Agard et al., 2011). The Sanandaj–Sirjan zone runs roughly parallel to the general trend of the Zagros orogen, extending from

the west of Lake Urmia in the northwest to north of Bandar Abbas in the southeast, with a length of approximately 1,500 km and a width of 150–250 km, and is primarily composed of metamorphic rocks and intrusive bodies (Masoudi et al., 2011). Ghasemi and Talbot (2006) subdivide the Sanandaj–Sirjan zone into northern and southern segments, which exhibit distinct evolutionary histories. The rocks of the northern segment were deformed during the Late Cretaceous. According to Davoudian et al. (2016), the main metamorphic and

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108251>

*Corresponding author: Mehdi Naghdi; E-mail: mehdi_na@iasbs.ac.ir

How to cite this article: Naghdi, M., Shabani Borujeni, E., Monsef, E., 2025. Tectonic evolution of the Saqqez – Baneh structural zone in relation with the Zagros collision. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 517- 542. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108251>



deformational events in the central and southern parts of the Sanandaj–Sirjan zone occurred predominantly from the Lower Jurassic onwards, reflecting significant tectonic activity and structural transformations during this interval. The structural framework and tectono-magmatic processes of the Sanandaj–Sirjan zone have been closely linked to the evolution of the Zagros orogen, maintaining geometric and kinematic coherence with it over time. However, limited areas such as the Motah–Laibed complex (Aflaki et al., 2017) and the Saqqez–Baneh region, despite being part of the broader belt, exhibit distinct structural patterns. Previous studies published in *Journal of Earth Sciences* (Kharazmi University) have examined tectonic evolution and structural trends in the Sanandaj–Sirjan and Zagros domains, providing useful insights for understanding oblique convergence and basement reactivation in northwest Iran (Najari et al., 2024; Alipoor et al., 2021). In these regions, the structural trends are nearly perpendicular to the general orientation of both the Zagros and Sanandaj–Sirjan belts. The Motah–Laibed segment is interpreted as composed of ancient basement trends that have preserved structural autonomy during the Zagros orogenic evolution and have been reactivated at various times in accordance with the prevailing stress field (Aflaki et al., 2017). In contrast, regarding the structural–magmatic framework of the Saqqez–Baneh region, it remains unclear whether these deviations reflect inherited structures or resulted from deformation during the Zagros orogeny. Understanding the origin of this structural divergence is crucial for improving our knowledge of the Zagros orogen’s evolutionary history and for better explaining the tectono-magmatic processes that occurred in this part of the orogen. For example, if ancient structures controlled the geology of this region, what roles did they play during pre- and post-collisional processes? Conversely, if the trend rotation occurred during orogenic deformation, what were the controlling factors, and why are its effects observed only in this sector? Although answering these questions is challenging, the present study aims to elucidate the nature of this distinct structural pattern based on field

observations and structural data. We have selected a major thrust zone in the area as a key structural feature; this thrust initiates within the Saqqez–Baneh structural zone, continues through the Zagros segment, and exhibits a near-vertical curvature along its strike. Conducting structural measurements, including brittle and ductile deformation elements, followed by kinematic and dynamic analyses, has allowed reconstruction of movement patterns and possible changes in the geometry of this belt. This dataset enables a comprehensive assessment of the intrinsic nature of the Saqqez–Baneh structural zone.

Materials and Methods

The aim of this study is to identify the deformation history and movement pattern within the thrust zone between the Precambrian and Cretaceous units, which has been selected as a key structure for understanding the tectonic nature of the Saqqez–Baneh structural zone. This thrust zone exhibits a Zagros-type orientation (NW–SE) in its northern part, whereas in the southern part it becomes nearly perpendicular to that trend. The key question is whether the structural curvature observed along this thrust represents a primary geometric feature or a later deformation. If the curvature is an inherited or primary geometry, then the Saqqez–Baneh structural zone must have acted as a pre-existing structure that influenced the development of this geometry. In such a case, the differently oriented segments of the thrust would have operated under the same regional stress regime but through distinct kinematic mechanisms. Conversely, if the Saqqez–Baneh structural zone formed or was reactivated after the continental collision, significant structural rotations (around a vertical axis) should be observable in the geometry and kinematic characteristics of different segments of the main thrust. Reconstructing this deformation history requires establishing a chronological sequence of geometric and kinematic changes along the main thrust zone, enabling the identification of the corresponding stress field variations and deformation phases that have occurred since the initial development of the thrust.

Results and Discussion

In our observations, a different maximum compression direction was obtained at stations 5, 6, and 15. The stress responsible for deformation in these stations has produced minor folds (micro folds) that, based on the field evidence described for each station, are attributed to the oldest recognizable deformation stage in the area (Early Cretaceous). These three stations are structurally located outside the influence zone of the main thrust and their examined outcrops are also older in age. Based on this, it can be concluded that the structural features related to the general NW–SE compression (almost perpendicular to the common compression trend in the Zagros) must be associated with an older, previously unrecognized deformation phase. The effects of this ancient deformation can be observed in locations that have remained relatively undisturbed due to their distance from the main thrust zone. In contrast, near and above the main thrust, because of the over thrusting of Precambrian units onto the Cretaceous units during a younger deformation phase, the structural traces of the older set have been overprinted by those of the younger deformation related to thrusting. Thus, the dominant structural pattern observed today corresponds to the typical Zagros deformation seen and reported elsewhere. From this discussion, it can be inferred that the region had already undergone a general NW–SE compression prior to the main thrusting event, evidence of which is preserved in the above-mentioned three stations. Since these stations are located in the footwall block and away from the thrust, they preserve the older features, while in the upper parts of the thrust zone, the structures have been modified by deformation related to and following the thrusting event

Conclusions




The structural analysis of the Saqqez–Baneh zone demonstrates that NE–SW–trending basement structures predate the final closure of the Neo-Tethys and were repeatedly reactivated during subsequent tectonic phases.

Field evidence indicates that deformation occurred under a transpressional regime associated with oblique convergence, resulting in the development of thrusting combined with strike-slip components. The present-day geometry of the main thrust zone reflects cumulative deformation and structural inheritance from pre-existing basement fabrics. These findings highlight the fundamental role of inherited structures in controlling the tectonic evolution of the northern Sanandaj–Sirjan Zone.

References

- Aflaki, M., Shabanian, E., Davoodi, Z., Mohajjel, M., 2017. Reactivation versus reworking of the active continental margin during the Zagros collision: Mahallat–Muteh–Laybid complexes, Sanandaj–Sirjan zone, Iran. *Journal of Geodynamics* 107, 1-19.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148(5-6), 692-725.
- Alipoor, R., Mehrali Mansouri, M., Ghasemi, Z., 2022. Analysis of the effects of detachment levels, thrust and basement strike-slip faults on the geometry of the Naft anticline structure in the Lurestan sub-zone, West Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 8 (1), 75-96. (in Persian)
- Davoudian, A.R., Genser, J., Neubauer, F., Shabanian, N., 2016. ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj–Sirjan Zone, Iran: implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research* 37, 216-240.
- 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.
- Masoudi, F., Mahmoudi, S., Corfu, F., Mehrabi, B., Mohajjel, M., 2011. U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41(3), 238-249.
- Najari, M., Jahangiri, A., Anma, R., 2024. U -Pb dating and geodynamics of mafic bodies at the southern margin of Lake Urmia are evidence of Cretaceous magmatism in northwest Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10(1), 278 - 306. (in Persian)

CRediT authorship contribution statement

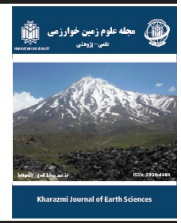
 Mehdi Naghdi	Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Project administration.
 Esmaeil Shabani Borujeni	Conceptualization, Methodology, Writing - Original Draft, Formal analysis, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.
 Iman Monsef	Conceptualization, Methodology, Writing - Original Draft, Formal analysis, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

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

فرگشت تکتونیکی پهنه ساختمانی سقز - بانه در پیوند با ناحیه برخوردی زاگرس

مهدی نقدی^{۱*}، اسماعیل شبانیان بروجنی^۲، ایمان منصف^۳

۱، ۲، ۳. دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹ واژه‌های کلیدی پهنه ساختمانی سنندج-سیرجان، پهنه سقز-بانه، راندگی اصلی، ساختارهای عرضی، کوهزاد زاگرس.	ناحیه برخوردی زاگرس حاصل همگرایی میان دو ورقه عربی و اوراسیا است، با روند شمال-غرب-جنوب شرق کشیده شده است. در این میان پهنه ساختمانی سقز-بانه، در شمال غرب کوهزاد زاگرس و بخشی از پهنه آذرین - دگرگونی سنندج-سیرجان، دارای روند ساختمانی شمال شرق-جنوب غرب است که بسیار متفاوت از روند عمومی زاگرس دیده می‌شود. با توجه به اینکه فرآیندهای تکتونیکی این ناحیه با تاریخچه تحول کوهزاد زاگرس گره خورده است، مطالعه آن به درک تاریخچه دگربرختی قاره‌ای در زاگرس کمک می‌کند. تحلیل جنبشی، هندسی و دینامیکی این پهنه، بازسازی وضعیت تنش دیرینه و جهت‌یابی محورهای فشردگی و کشیدگی مسبب دگربرختی‌های نگاشته شده در پهنه راندگی را ممکن کرده است. بر پایه این مجموعه داده و مشاهدات، نشان بارزی از چرخش‌های ساختمانی به دور محور شاقولی و تغییرات محلی ناشی از آن در میدان تنش پیرامون پهنه راندگی دیده نمی‌شود. در واقع، هر دو بخش شمالی و جنوبی پهنه راندگی، با روند نزدیک به عمود بر هم، بخشی از یک ساختار از-پیش-موجود هستند که در زمان جایگیری راندگی در یک وضعیت تنش همگن ایجاد شده‌اند. هر بخش از این پهنه، بسته به ارتباط آن با پهنه برش، هندسه و سازوکار ساختمانی منحصر به خود را بروز داده است. داده‌های ساختمانی از بخش‌های مختلف راندگی نشان می‌دهد که در زمان فعالیت بخش شمالی به عنوان یک راندگی زاگرسی، بخش جنوبی آن به صورت یک رمپ جانبی موازی با پهنه ساختمانی سقز-بانه و با سازوکار مورب‌لغز چپ‌بر حرکت کرده است. وجود این ساختار قدیمی باعث تسهیل پیشروی لبه راندگی اصلی به سمت غرب شده و در فرگشت ساختمانی منطقه به عنوان یک ساختار عرضی ایفای نقش می‌کرده است. بر این اساس، پهنه ساختمانی سقز-بانه، مشابه روند تکتونیکی شناخته شده موه-لابید، این واقعیت را نشان می‌دهد که تحولات حین باز و بسته شدن نتوتیس نتوانسته لبه جنوب غربی خردقاره ایران مرکزی را به طور کامل تغییر شکل دهد.



مقدمه

ارومیه با راستای جنوب شرقی تا شمال بندرعباس با طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر ادامه می‌یابد و به طور اصلی از سنگ‌های دگرگونی و توده‌های نفوذی تشکیل شده است (Masoudi et al., 2011). قاسمی و تالبوت (Ghasemi and Talbot, 2006) پهنه سنندج - سیرجان را به دو بخش شمالی و جنوبی جدا می‌کنند که نحوه تکوین آن‌ها متفاوت از هم است. سنگ‌های بخش شمالی آن در اواخر کرتاسه دگرشکل شده‌اند. مطابق تحقیقات داویدیان و همکاران (Davoudian et al., 2016) حوادث اصلی دگرگونی متامورفیک و

پهنه ساختمانی سقز-بانه در شمال غربی فلات ایران از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی، در حاشیه شمالی پهنه آذرین-دگرگونی سنندج-سیرجان واقع شده (Aghanabati, 2004؛ شکل ۱) که خود ناشی از باز شدن و فروانش اقیانوس نتوتیس زیر لبه خرد قاره ایران مرکزی است (Agard et al., 2011 ; Davoudian et al., 2016). پهنه سنندج - سیرجان موازی با روند عمومی زاگرس، از غرب دریاچه

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108251>

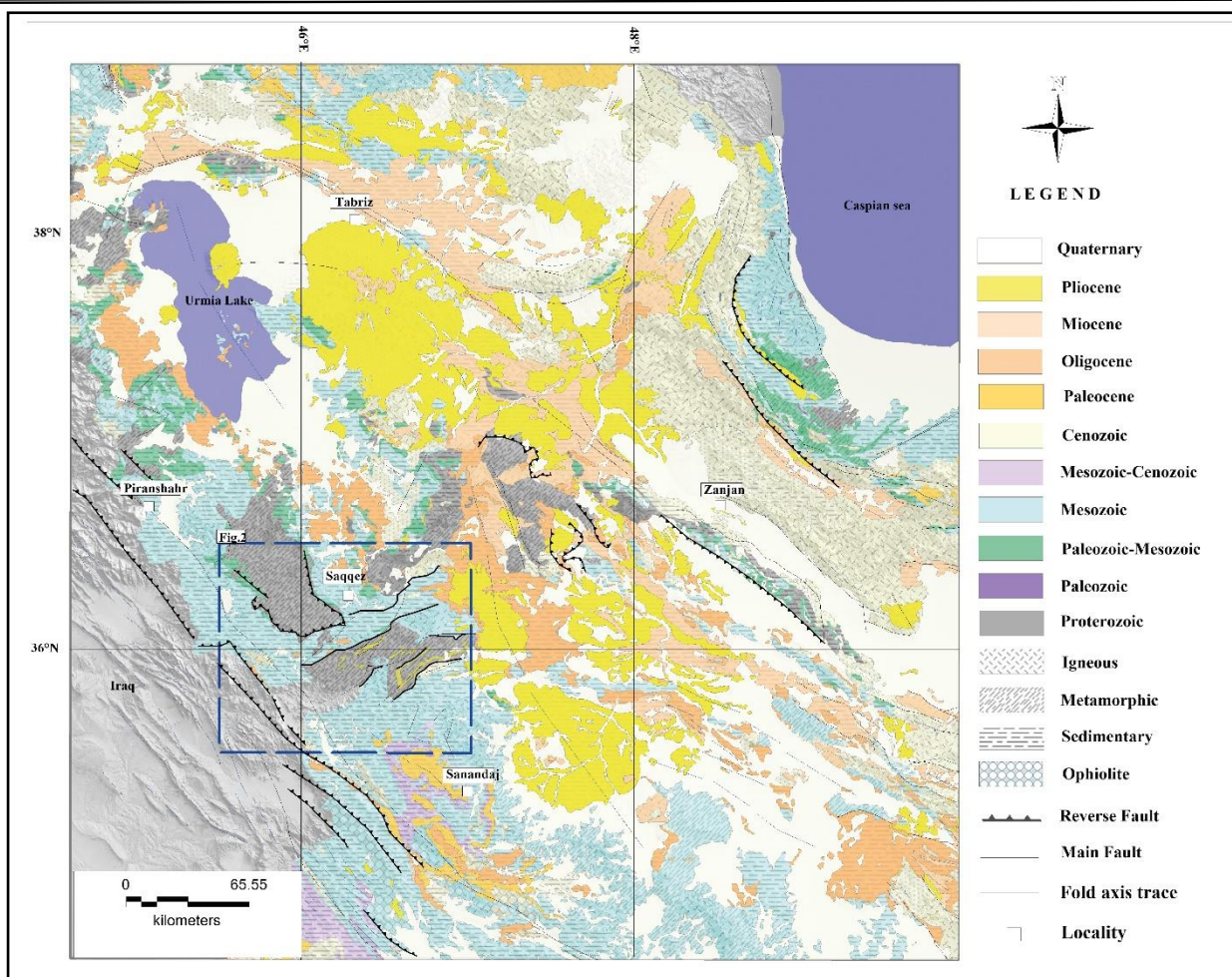
*نویسنده مسئول: مهدی نقدی mehdi_na@iasbs.ac.ir

استناد به این مقاله: مهدی نقدی، م، شبانیان بروجنی، ا، منصف، ا. (۱۴۰۴). فرگشت تکتونیکی پهنه ساختمانی سقز - بانه در پیوند با ناحیه برخوردی زاگرس. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۵۱۷ تا ۵۴۲. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108251>



راه را برای توضیح بهتر فرآیندهای تکتونیکی- ماگمایی رخ داده در این بخش از کوهزاد هموارتر خواهد کرد. برای مثال، اگر ساختارهای کهن، زمین‌شناسی این منطقه را کنترل می‌کرده‌اند، نقش آن‌ها در فرآیندهای پیش و پس از برخورد چه بوده است؟ یا اگر این تغییر روند هنگام فرآیند دگرریختی رخ داده است، عامل آن چیست و چرا آثار آن تنها در این بخش از کوهزاد دیده می‌شود؟ هرچند پاسخ به همه این پرسش‌ها کار ساده‌ای نیست، این پژوهش بر آن است تا با استناد به مشاهدات و داده‌های تکتونیکی و ساختاری برداشت شده به توضیح ماهیت این الگوی متفاوت ساختاری بپردازد. ما یک پهنه راندگی اصلی را در منطقه به عنوان ساختاری کلیدی برگزیده‌ایم؛ این راندگی از پهنه ساختاری سقز- بانه آغاز شده، در بخش زاگرسی منطقه ادامه دارد و در راستای خود خمیدگی نزدیک به قائم نشان می‌دهد. انجام اندازه‌گیری‌های ساختاری شامل عناصر دگرریختی شکننده و شکل‌پذیر، و سپس تحلیل جنبشی (سینماتیک) و دینامیک آن‌ها، بازسازی الگوی حرکات و تغییرات احتمالی در هندسه این پهنه را ممکن ساخته است. این مجموعه اطلاعات به ما کمک کرده تا با استناد به آن‌ها ماهیت وجودی پهنه ساختاری سقز- بانه را بررسی کنیم.

دگرشکلی در بخش مرکزی و جنوبی پهنه سنندج- سیرجان عمدتاً از ژوراسیک زیرین به بعد رخ داده و نشان دهنده فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات ساختاری مهم در این بازه زمانی است. الگوی ساختاری و فرآیندهای تکتونیکی- ماگمایی پهنه سنندج - سیرجان در پیوند نزدیک با فرگشت کوهزاد زاگرس بوده و در طول زمان هماهنگی هندسی و جنبشی خود را با آن حفظ کرده است. با این حال، بخش‌هایی محدود مانند مجموعه موه- لایبید افلاکی و همکاران (Aflaki et al., 2017) و سقز- بانه، با وجود قرار داشتن درون این پهنه، دارای الگوی ساختاری متفاوتی هستند. طوری که روند ساختاری این دو بخش به طور کامل عمود بر روند عمومی زاگرس و سنندج - سیرجان است. بخش موه - لایبید در قالب روندهای پی‌سنگی کهن تفسیر شده است که در طی فرآیند تکامل کوهزاد زاگرس، استقلال ساختاری خود را حفظ کرده‌اند و در زمان‌های مختلف، مطابق با میدان تنش حاکم، باز فعال شده‌اند (Aflaki et al., 2017). اما درباره مجموعه ساختاری- ماگمایی سقز- بانه، هنوز مشخص نیست که آیا این اختلاف مربوط به وجود ساختارهای موروثی است یا در طی دگرریختی کوهزاد زاگرس رخ داده است؟ رسیدن به چرایی این اختلاف به بهبود درک ما از تاریخچه فرگشت کوهزاد زاگرس خواهد انجامید و



شکل ۱- نقشه عمومی زمین‌شناسی ترسیم شده از شمال غرب ایران برگرفته از نقشه ۱:۱,۰۰۰,۰۰۰ (Afaghi et al., 1978). چهارگوش آبی رنگ محدوده سقز-بانه و خطوط مشکی مرزهای پهنه ساختاری سقز-بانه را نشان می‌دهند.

Fig. 1. General geological map of northwestern Iran modified after the 1:1,000,000 geological map by (Afaghi et al., 1978). The blue rectangle indicates the Saqqez-Baneh area, and the black lines represent the boundaries of the Saqqez-Baneh structural zone.

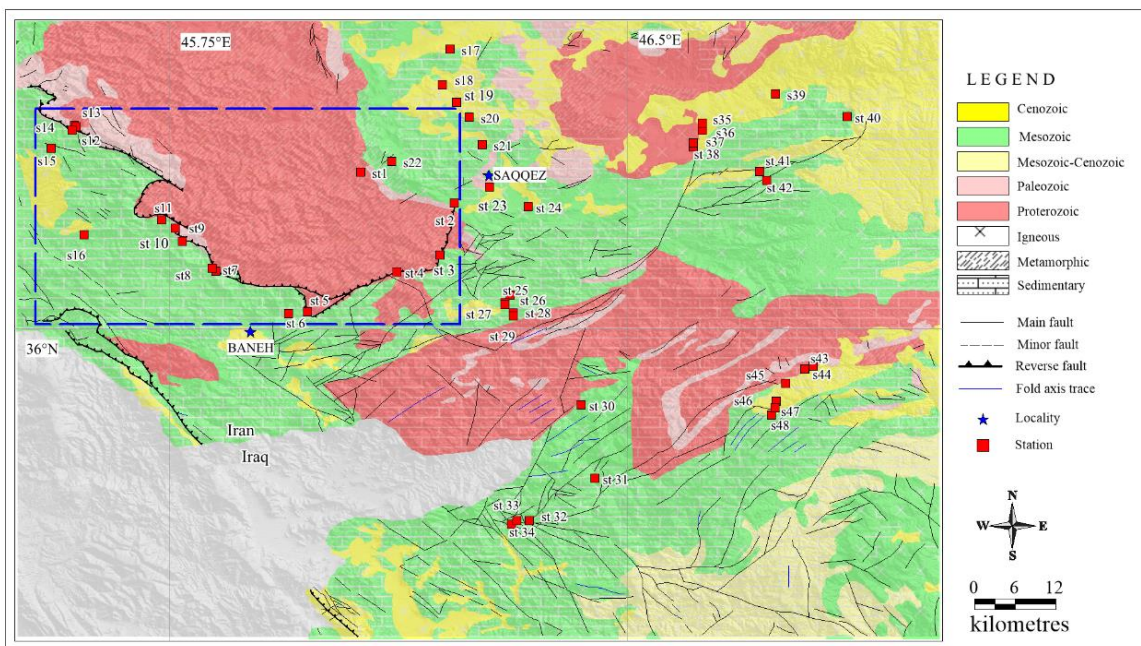
برای وقوع این فرایندها پیش از این زمان (تریاس) وجود ندارد. کهن‌ترین واحدهای گستره شامل، سنگ‌های دگرگونی با پروتولیت با سن پرکامبرین است که با سازندها و واحدهای رسوبی و آذرین جوان‌تر پوشیده شده‌اند. این سنگ‌ها شامل گنیس، نهشته‌های شیلی، ماسه‌سنگ‌های سازند کهر، آهک‌های ستبرلایه پرمین، ماسه‌سنگ‌های نازک لایه ژوراسیک، توده‌های دیوریتی کرتاسه و گابروی-گرانیتی ائوسن است که روندهای کشیده شرقی-غربی دارند. در این میان سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین بلندی‌ها و مناطق دارای توپوگرافی

زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه سقز - بانه در بخش شمال غربی پهنه دگرگونی سنندج - سیرجان است که خود از دیدگاه زمین‌ساختی و ماگمایی، برهه‌های مختلف کوهزایی را در قالب فعالیت‌های ماگمایی، دگرگونی و دگرریختی تجربه کرده است. نتایج مطالعات داودیان و همکاران (Davoudian et al., 2016) نشان می‌دهد که آغاز فرورانش نفوتتیس و رویدادهای دگرگونی فشار بالای مرتبط در پهنه سنندج - سیرجان تنها از اواخر ژوراسیک زیرین قابل استناد است و شواهد قابل قبولی

پهنه ساختاری سقز - بانه از ترکیب سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، واحدهای رسوبی و آذرین مزوزوئیک - سنوزوئیک شکل گرفته و روند کلی ساختارها عمدتاً شرقی - غربی است. بخش پرکامبرین شامل سنگ‌های دگرگونی با منشأ آذرین و رسوبی است؛ این واحدها فازهای کوهزایی پالئوزوئیک تا کرتاسه را تجربه کرده و با توپوگرافی مرتفع و ساختارهای پیچیده‌ای نظیر چین‌خوردگی و بلوک‌های راندگی همراه هستند. در مقابل، واحدهای رسوبی و آذرین کرتاسه تا الیگومیوسن، همان‌گونه که در مطالعات قلی‌پور و همکاران (Gholipour et al., 2021) گزارش شده است، پس از فازهای دگرگونی اصلی دگرگونی منطقه‌ای نهشته شده‌اند یا به صورت توده‌های نفوذی و ماگمایی جوان‌تر جایگیری شده‌اند، از این رو این واحدها آثار دگرگونی منطقه‌ای را نشان نمی‌دهند. به بیان دیگر، دگرگونی شدید محدود به واحدهای پرکامبرین است و واحدهای جوان‌تر به دلیل توالی زمانی متفاوت، دست‌نخورده باقی مانده‌اند، که مطابق با داده‌های U-Pb، ژئوشیمی و ایزوتوپی Sr-Nd ارائه شده در مقاله مذکور است.

خشن را تشکیل داده‌اند. در ادامه توالی‌های سنگی، قرارگیری رسوبات آواری ژوراسیک روی نهشته‌های دولومیتی چین‌خورده تریاس قرار گرفته است و دگرگونی ضعیف در آن‌ها آثار جنبش‌های خشکی‌زایی و کوهزایی سیمیرین پیشین و پسین را نشان می‌دهد. در جنوب گستره، مجموعه سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی شامل فیلیت، گنیس، سنگ‌های آتشفشانی اسیدی، دولومیت و سنگ‌های آهکی بلورین برونزد دارند. سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه بالایی با شیل و ماسه‌سنگ میان لایه‌ای همراه است. در پهنه ساختاری سقز - بانه تکاپوی کرتاسه معادل فاز لارامین سبب چین‌خوردگی و دگرگونی شیست‌های سبز شده است. سنگ آهک‌های الیگومیوسن با ناپیوستگی زاویه‌دار غالباً روی واحدهای کرتاسه شمالی و شمال‌شرقی رخنمون دارند. ساختارهای اصلی شامل گسله‌ها و تاقدیس‌ها عمدتاً هم‌راستا با مرزهای اصلی پهنه و واحدهای زمین‌شناسی در چهارگوش نقشه‌های سنندج، تکاب و مهاباد گسترش زیادی دارند (Babakhani et al., 2003). (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ترسیم شده محدوده سقز- بانه (Nogol-Sadat ; Alavi et al., 1976; Zahedi and Hajian, 1985; Eftekharnjad, 1973 and Houshmandzadeh, 1993) پس از تغییر و ساده‌سازی. چهارگوش آبی رنگ محدوده راندگی اصلی منطقه سقز- بانه را نشان می‌دهد که به عنوان ساختار کلیدی در این پژوهش برگزیده شده است.

Fig. 2. Geological map of the Saqqez-Baneh area modified and simplified after (Eftekhari, 1973; Zahedi and Hajian, 1985; Alavi et al., 1976; Nogol-Sadat and Houshmandzadeh, 1993). The blue rectangle indicates the main thrust of the Saqqez-Baneh region, selected as a key structure in this study.

استناد به ستون چینه‌شناختی منطقه یا اطلاعات سن نسبی موجود، گردآوری شد تا با در کنار هم گذاشتن آن‌ها، بخشی از تاریخچه تغییرات تکتونیکی منطقه آشکار شود. این مجموعه داده با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط گوناگون (اف‌کالک و دیپس) پردازش شد. نتایج پردازش دسته داده‌های مختلف، با استناد به مشاهدات میدانی در منطقه و توالی سن نسبی یا مطلق رخنمون‌های مطالعه شده تحلیل شد و پس از تطابق آثار مرتبط با هر رویداد مشخص تکتونیکی، خلاصه‌ای از رویدادهای شناسایی شده در این مرحله ارائه شد.

روش وارون‌سازی داده‌های لغزش گسله‌ها و تعیین محورهای تنش

وارون‌سازی داده‌های گسلی (صفحه گسله و بردار لغزش آن) روشی کارآمد و جدید، با قدمتی کمتر از نیم قرن (Angelier, 1979, 1984; Carey, 1979; Carey and Brunier, 1974) برای تعیین تنسور تنش کاهش یافته است. وضعیت خش لغزش روی یک صفحه گسله (روند و میل خش لغزش و سوی برش) به موقعیت فضایی صفحه گسله نسبت به محورهای اصلی تنش $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$ و شکل میدان تنش $(R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1))$ بستگی دارد (Ritz and Taboda, 1993; Angelier, 1979). روش‌های وارون‌سازی تنش بر پایه کاهش زاویه ناهمخوانی میان خش لغزش محاسبه شده (τ) و برداشت شده (S) بر روی سطوح گسله استوارند (Angelier, 1979, 1984, 1990; Carey, 1979; Carey and Brunier, 1974). تعداد و دقت برداشت‌های میدانی نقش بسزایی در افزایش کیفیت تنسور تنش محاسبه شده دارند. از سوی دیگر، هرچه گستره مورد مطالعه پیچیدگی کمتری داشته باشد و توالی سنی لایه‌های سنگی پهنه کامل‌تر باشد، تعیین تنسور تنش ساده‌تر و کیفیت آن بهتر خواهد بود. به همین سبب، در برداشت‌های میدانی که به منظور بررسی تنش دیرین انجام

بیان مسئله و فرضیه‌های پژوهش

هدف از این مطالعه، شناسایی تاریخچه حرکت و دگرریختی در پهنه راندگی میان پرکامبرین و کرتاسه (شکل ۲) است که به عنوان یک ساختار کلیدی برای درک ماهیت وجودی پهنه ساختمانی سقز-بانه برگزیده شده است. این راندگی در بخش شمالی به صورت زاگرسی (روند شمال غرب- جنوب شرقی) است و در بخش جنوبی عمود بر آن است. نکته کلیدی اینجاست که اگر خمیدگی ساختمانی در این پهنه راندگی یک هندسه اولیه باشد، پس پهنه ساختمانی سقز-بانه به عنوان یک ساختار از پیش موجود در شکل‌گیری این هندسه نقش داشته است. در این صورت، روندهای متفاوت این راندگی باید در یک رژیم تنش منطقه‌ای همگن، سازوکارهای متفاوت داشته باشند. اما اگر پهنه ساختمانی سقز-بانه پس از برخورد تشکیل یا باز فعال شده باشد، باید آثار چرخش‌های ساختمانی قابل توجه (به دور محور شاقولی) در هندسه و سازوکار بخش‌های مختلف راندگی اصلی دیده شود. بازسازی این تاریخچه مستلزم ایجاد یک سری زمانی از هندسه و حرکات پهنه راندگی اصلی است تا بتوان تغییرات تنش زمین‌شناسی و دگرریختی مرتبط با آن را از زمان تشکیل راندگی شناسایی کرد.

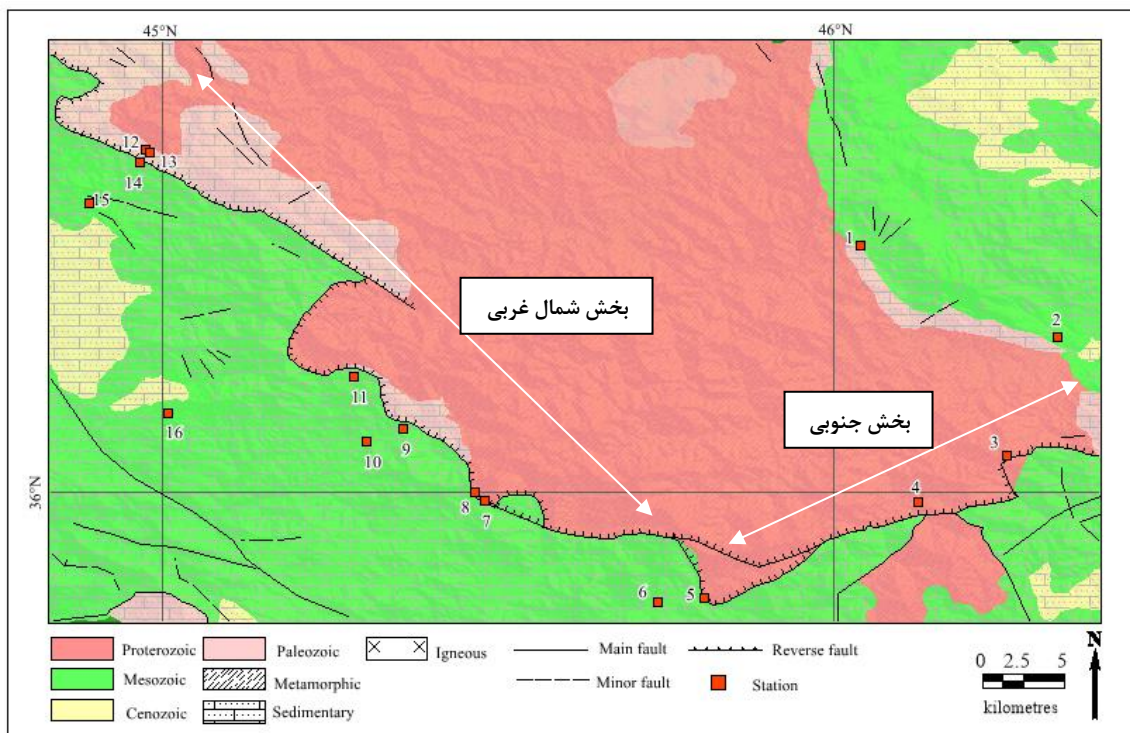
مواد و روش‌های پژوهش

این پژوهش در شانزده ایستگاه برداشت و طی دو مرحله بازدید میدانی، ساختار تکتونیکی و روابط چینه‌شناختی منطقه مورد بررسی قرار گرفت، داده‌های ساختمانی در نقاط کلیدی ستون سنگ‌چینه‌ای اندازه‌گیری شد و روابط ساختمانی میان راندگی اصلی و عناصر ساختمانی-چینه‌شناختی نیز ارزیابی گردید. در این راه، مجموعه‌ای از داده‌ها، اطلاعات و مشاهدات ساختمانی شامل هندسه لایه‌بندی در نزدیکی پهنه گسله و دور از آن، داده‌های لغزش گسله، ساخت‌ها و ساختارهای نشانگر سازوکار دگرریختی در زمان‌های مختلف (برگوارگی‌ها و خطوارگی‌ها، محور ریزچین‌ها و...)، با تفکیک زمانی و با

جزئیات و شناخت منابع اصلی این روش به بخش روش‌شناسی ارائه شده در کار بنی‌آدم و همکاران (Baniadam et al., 2019) مراجعه شود.

شکل (۳)، نقشه ناحیه کلیدی از راندگی اصلی منطقه را نشان می‌دهد که در آن ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده بر اساس موقعیت ساختمانی از شرق به غرب مجموعه راندگی چیده شده است که هر دو بخش عمود برهم راندگی را شامل می‌شود. در این مطالعه، نتایج حاصل از ۶ ایستگاه منتخب از مجموع شانزده ایستگاه برداشت شده ارائه شده است؛ با این وجود، روش پردازش و تحلیل داده‌ها در همه ایستگاه‌ها مشابه بوده و اطلاعات تفصیلی ایستگاه‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است. بخشی از نتایج با توجه به تکرارپذیری و حجم اطلاعات موجود به طور قطعی تفسیر شده است. در ادامه چندین ایستگاه کلیدی برگزیده شرح داده می‌شود.

می‌شود، علاوه بر برداشت داده‌های گسلی و شناسایی نسل‌های لغزش دیرین (بر روی سطوح گسله با بیش از یک نسل خش لغزش)، به شواهد زمین‌شناسی و ساختمانی دیگر نیز از جمله روابط بریده‌شدگی سطوح گسله، موقعیت لایه‌بندی، سن واحدهای سنگی گسلیده، توالی رخدادهای دگرریختی گسترده، پیوند ساختمانی میان رگه‌ها، درزه‌ها و محور چین‌ها هم باید توجه شود. برای تعیین یک تنسور تنش از نظر محاسباتی، دست کم به چهار داده لغزش گسله با جهت‌یافتگی متفاوت نیاز است. اگر این تعداد کمتر از ۴ عدد باشد، بر پایه روابط ریاضی به کار رفته در محاسبات، تنسور تنش به دست نخواهد آمد و تنها برآوردی از جهت‌یابی محورهای اصلی تنش به دست می‌آید؛ این قاعده برای همه نرم‌افزارهای محاسبه تنش به روش وارون‌سازی (از روش‌های ترسیمی هیچگاه تنسور به دست نمی‌آید)، برقرار است. برای درک



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی ترسیم و تصحیح شده از راندگی اصلی منطقه بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه (Eftekharnajad, 1973) و بررسی‌های دفتری و میدانی انجام شده در این پژوهش. ایستگاه‌های برداشت با مربع‌های کوچک شماره‌گذاری شده نشان داده شده است.

Fig. 3. Geological map redrawn and corrected for the main thrust of the area based on the geological maps of the region (Eftekharnjad, 1973) and the office and field investigations carried out in this study. Sampling stations are shown and numbered with small squares.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های برداشت و نتایج تحلیل تنش و کرنش به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها.

Table 1. Information related to the sampling stations and the results of stress and strain analyses obtained from the measured data at the stations.

Site	Longitude (°E)	Latitude (°N)	1							2		Lithology	Formation Age		
			Stress axis (trend/plunge)							Nt	Regim			Strain axis	
			σ_1	σ_2	σ_3	R	N	Q	Con.					Ext.	
1	46.10874	36.27126										N135	10	Phyllite	Cretaceous
2	46.21135	36.20338	206/0	116/0	296/90	-	4	CF	6	-		N110	4	Andesite and tuff	Cretaceous
3	46.17703	36.12275										N120	12	Schist	Precambrian
4	46.11713	36.09126	205/0	115/0	312/90	-	3	CF	3	-				Amphibolite Gneiss	Precambrian
5	45.97105	36.02605										N124	3	Phyllite	Precambrian
6	45.94004	36.02312										N135	8	Phyllite	Precambrian
7	45.82152	36.09203	053/25	223/64	321/4	0.395	10	B	12	S		N059	2	Phyllite	Cretaceous
8	45.81517	36.09734										N051	10	Phyllite	Cretaceous
9	45.76674	36.14073	049/13	141/7	259/76	0.705	7	B	12	C				Limestone	Precambrian
10	45.74011	36.13350										N055	8	Phyllite	Cretaceous
11	45.73299	36.17654											8	Phyllite	Precambrian
12	45.59047	36.33028	029/23	297/5	196/67	0.256	8	C	9	C				Limestone	Cretaceous
13	45.59358	36.32826	224/9	134/0	041/81	0.352	3	B	8	C				Phyllite	Precambrian
13*	45.59358	36.32826	114/90	292/0	22/0	-	4	CF	8	-				Phyllite	Precambrian
14	45.58687	36.32191										N062	4	Phyllite	Cretaceous
15	45.55296	36.29353	072/15	289/72	165/10	0.615	3	B	12	S				Diorite	Cretaceous
16	45.60627	36.15145										N120	12	Phyllite	Cretaceous

یادداشت: محورهای اصلی تنش انحرافی شامل σ_1 (فشارشی)، σ_2 (میانی) و σ_3 (کششی) هستند. نسبت تنش $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ شاخصی خطی برای بیان بزرگی نسبی تنش‌ها است. N: تعداد داده‌های هر ایستگاه؛ Rm: رژیم تنش (C: فشارشی، T: کششی، S: امتدادلغز، TP: فشارشی-امتدادلغز)؛ Q: کیفیت داده‌ها (A: خوب، B: متوسط، C: ضعیف، CF: مقید شده به یک محور تنش شاقولی)؛ Con: جهت فشردگی؛ Ext: جهت کشیدگی. تمام زاویه‌ها بر حسب درجه هستند. نشان "*" تنها ایستگاهی است که دو تنسور تنش متفاوت برای داده‌ها محاسبه شده است.

Note: The principal axes of the deviatoric stress are σ_1 (compressional), σ_2 (intermediate), and σ_3 (tensional). The stress ratio $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ is a linear index expressing the relative magnitude of the principal stresses. N: Number of data used in the calculations; Nt: Total number of data in each station; Rm: Stress regime (C: compressional, T: tensional, S: strike-slip, TP: transpressional-strike-slip); Q: Data quality (A: good, B: moderate, C: poor, CF: constrained to one vertical stress axis); Con: Compression direction; Ext: Extension direction. All angles are given in degrees. The asterisk (*) denotes the only station where two different stress tensors were calculated for the data.

مشاهدات و اندازه‌گیری‌های ساختاری

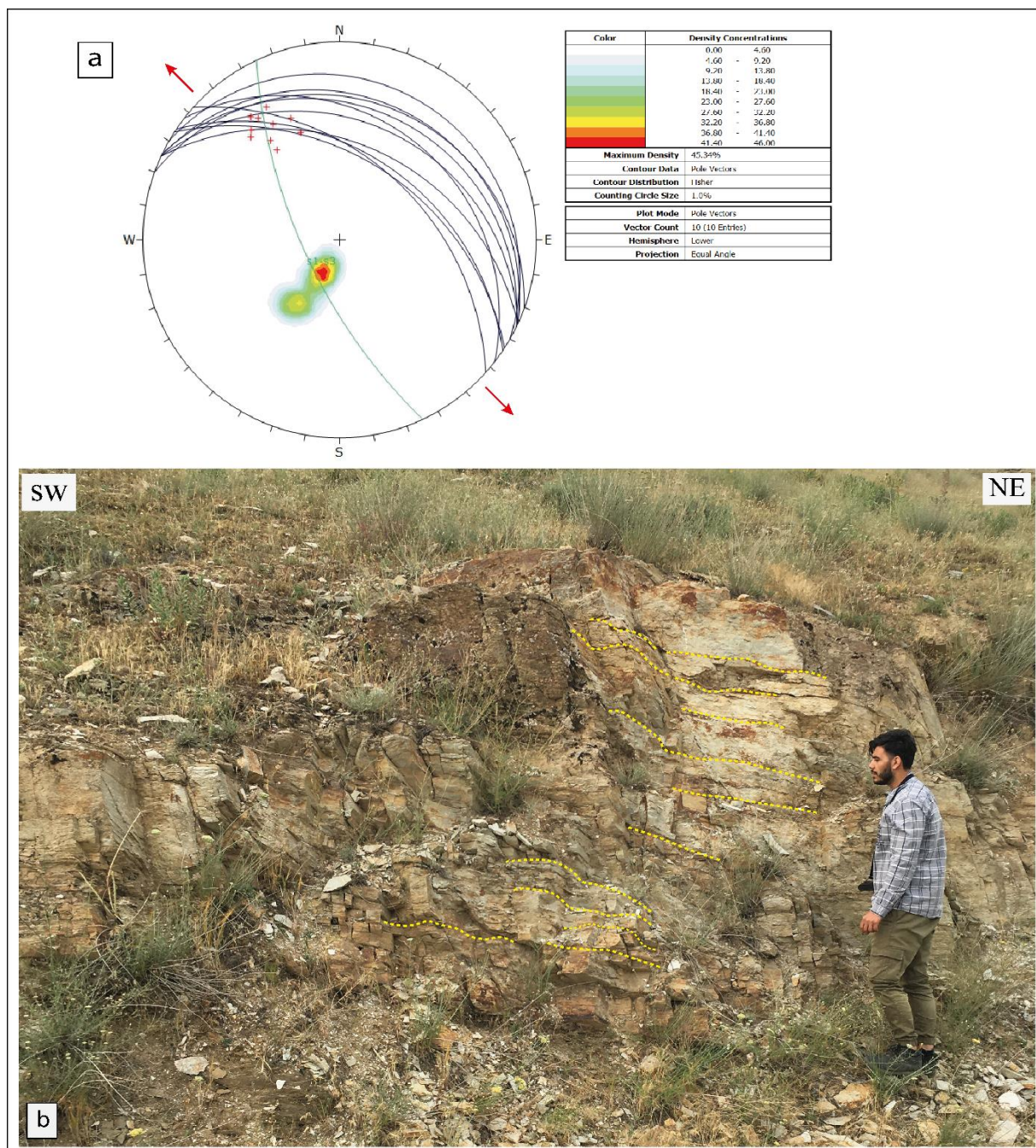
ایستگاه ۱/۱۶

است. در این ایستگاه سطوح تورق (شیستوزیته) به همراه خطواره‌های کشیدگی روی سطوح تورق برداشت شد. پردازش این داده‌ها نشان می‌دهد (شکل ۴-ا) که روند شیستوزیته به طور غالب شمال‌غرب-جنوب‌شرقی با شیب نزدیک به ۴۵ درجه رو به شمال‌شرق است (کمان‌های مشکی‌رنگ در شکل ۴-ا). بازسازی اولیه صفحه حامل

ایستگاه اول در واحدهای دگرگونی کرتاسه با رخساره غالب فیلیت بررسی شد (شکل ۴-ب). منظور از مطالعه رخنمون در این ایستگاه، بازسازی جهت فشارش عمومی مسبب ریزساختارها در این نقطه بوده

به صورت شمال غرب- جنوب شرق نشان می‌دهد. به دلیل شیب یک سویه بر گوارگی در اینجا، تعیین زاویه میل محور فشردگی ممکن نیست اما روند کلی شمال شرق- جنوب غربی (۳۰ تا ۴۰ درجه شرقی) را برای آن می‌توان تعیین کرد.

محورهای فشردگی و کشیدگی بیشینه (S_1, S_3)، کمان سبز رنگ) با پیاده کردن خطواره‌های کشیدگی و رسم صفحه‌های عمود بر آنها امکان پذیر است. این مجموعه خطواره‌گی از نوع خطواره کانیاپی است و جهت کشیدگی را همانطور که با پیکان‌های قرمز مشخص شده است،



شکل ۴- a) تصویر نیمکره پایینی شبکه اشمیت از مجموع داده‌های برداشت شده در ایستگاه ۱، شامل صفحات برگوارگی ایجاد شده در رخنمون دگرگونی فیلیت (کمان‌های بزرگ مشکی)، خطوارگی‌های ناشی از کشیدگی روی شیستوزیتی (بعلاوه‌های قرمز) و قطب برگوارگی‌ها. نقاط قرمز تصویر خطوارگی است و تمرکز قطب برگوارگی با کانتورهای رنگی نشان داده شده است. کمان بزرگ قرمز از قطب برگوارگی و تمرکز خطواره‌های کشیدگی می‌گذرد. پیکان‌های قرمز روند محور کشیدگی را نشان می‌دهد. b) رخنمون فیلیت‌های دگرگون شده در ایستگاه ۱، خط‌چین‌های زرد رنگ صفحات برگوارگی است که روی آن اندازه‌گیری شده است.

Fig. 4. a) Lower hemisphere of the Schmidt stereonet of the compiled data from station 1, including foliation planes developed in the phyllitic metamorphic outcrop (large black arcs), extensional lineation's on schistosity (red plus symbols), and foliation poles. Red points represent lineation measurements, and foliation pole concentrations are shown with color contours. The large red arc passes through the foliation poles and the concentration of extensional lineation. Red arrows indicate the trend of the stretching axis. b) Outcrop of the metamorphosed phyllites at station 1, with yellow dashed lines indicating the measured foliation planes.

برداشت داده‌های لغزش گسله در این ایستگاه، یک دسته سطوح تورق

ایستگاه ۲/۱۶

(شیستوزیته) به همراه خطواره به منظور بازسازی جهت فشردگی

عمومی برداشت و پردازش شد (شکل ۵- b). روند شیستوزیته به طور

غالب شمال غرب- جنوب شرقی با شیب نزدیک به ۴۵ درجه رو به

شمال شرق است (کمان‌های مشکی رنگ در شکل ۵- b). با کنار هم

گذاشتن اطلاعات و با توجه به هندسه به دست آمده از این مجموعه

ساختاری جهت حدودی N290 (شمال شرقی- جنوب غربی) به عنوان

روند عمومی کشیدگی به دست می‌آید. در این ایستگاه نیز به دلیل

شیب یک‌سویه برگوارگی، تعیین زاویه میل محور فشردگی ممکن

نیست اما روند کلی شمال شرق- جنوب غربی (حدود ۳۰ درجه شرقی)

را برای آن می‌توان تعیین کرد.

در این ایستگاه که در واحدهای آذرین حد واسط خرد شده و

گسلیده به سن کرتاسه در همبری با واحدهای دگرگون شده است،

صفحه‌های گسلی اندازه‌گیری شد (شکل ۵- a). پس از پردازش

داده‌های لغزش گسله (شکل ۵- c) مشاهده شد یک دسته گسله تقریباً

ترافشارشی راست‌بر با روند شمال- شمال شرقی تا جنوب- جنوب غربی

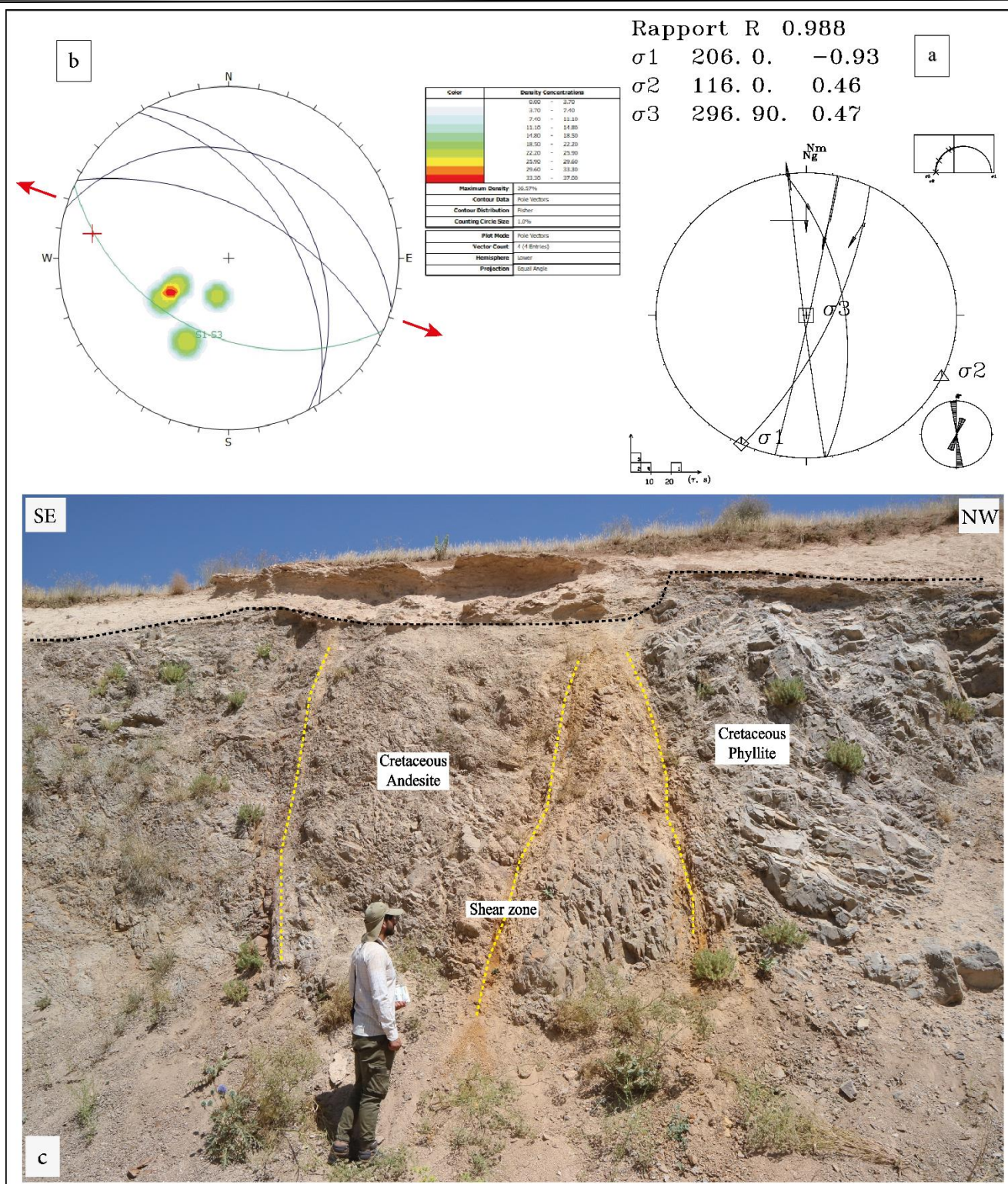
مجموعه شیستوزیتی را بریده و به طور مشخص از آن جوان‌تر است. در

میان داده‌های لغزش گسله اندازه‌گیری شده، یک صفحه گسله شرقی-

غربی با سازوکار غالب فشاری نیز اندازه‌گیری شد که با دسته گسله‌های

راست‌الغز بریده شده و از آن‌ها کهن‌تر است (به نتیجه پردازش ایستگاه

۴ رجوع شود). این صفحه راندگی هم‌راستای برگوارگی است. علاوه بر



شکل ۵- a) شبکه استریوگراف پردازش شده از داده‌های صفحات گسلی ناحیه برشی واحدهای آندزیتی (کمان‌های مشکی صفحات گسلی را نشان می‌دهد که پیکان‌های مشکی جهت خوش‌لغز مکانیکی است. دایره مور بیانگر رابطه تنش نرمال و برشی است، نمودار میس‌فیت با مقدار R نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌ها

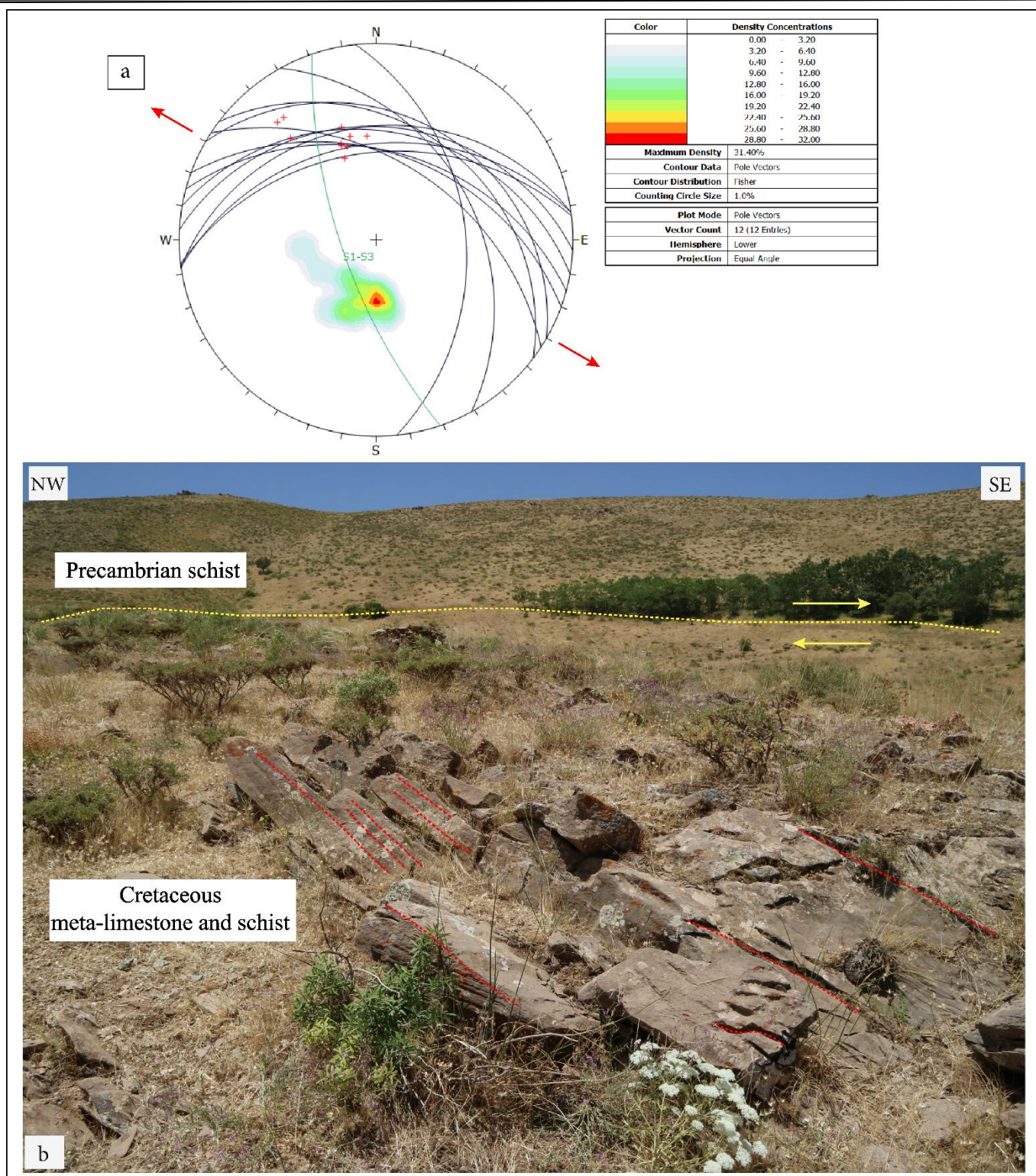
با رژیم تنش‌ی است، رز دیاگرام جهت‌گیری شکستگی‌ها است. (b) تصویر نیمکره پایینی شبکه اشیمیت از مجموع داده‌های برداشت شده در ایستگاه ۲، شامل صفحات برگوارگی ایجاد شده در رخنمون دگرگونی فیلیت (کمان‌های بزرگ مشکی)، خطوارگی‌های ناشی از کشیدگی روی شیستوزیتی (علائم بعلاوه قرمز) و قطب برگوارگی‌ها. نقاط قرمز تصویر خطوارگی است و تمرکز قطب برگوارگی با کانتورهای رنگی نشان داده شده است. کمان بزرگ قرمز از قطب برگوارگی و تمرکز خطواره‌های کشیدگی می‌گذرد. پیکان‌های قرمز روند محور کشیدگی را نشان می‌دهد. (c) تصویر رخنمون ناحیه برشی، سمت راست واحد دگرگونی فیلیت و سمت چپ واحدهای آندزیتی گسلیده به سن کرتاسه است.

Fig. 5. a) Processed stereonet of fault-plane data from the shear zone of andesitic units. Black arcs represent fault planes, and black arrows indicate the direction of mechanical slicken lines. The Mohr circle illustrates the relationship between normal and shear stresses. The misfit diagram with the R-value indicates the degree of fit between the data and the stress regime. The rose diagram shows the fracture orientations. b) Lower hemisphere Schmidt stereonet of compiled data from station 2, including foliation planes developed in the phyllitic metamorphic outcrop (large black arcs), extensional lineation's on schistosity (red plus symbols), and foliation poles. Red points represent lineation measurements, and foliation pole concentrations are shown with color contours. The large red arc passes through the foliation poles and the concentration of extensional lineation. Red arrows indicate the trend of the stretching axis. c) Outcrop view of the shear zone, with the phyllitic metamorphic unit on the right and faulted Cretaceous andesitic units on the left.

فشرده‌گی و کشیدگی مسبب این تورق انجام شد. پس از پردازش داده‌های برداشت شده، مشاهده شد که روند شیستوزیته غالباً دسته‌ای به صورت شرقی- غربی با شیب متوسط ۴۵ درجه به سمت شمال و دسته‌ای دیگر دارای روند شمال غرب - جنوب شرقی با شیب نزدیک به ۴۵ درجه رو به شمال شرق است (کمان‌های مشکی‌رنگ در شکل ۶-ا) و تجمع داده‌های خطوارگی (بعلاوه‌های قرمز رنگ در شکل ۶-ا) در شمال غرب این مجموعه ساختمانی جهت حدودی N300 (شمال غرب - جنوب شرق) را به عنوان روند عمومی کشیدگی نشان می‌دهد.

ایستگاه ۳/۱۶

ایستگاه سوم بر روی شیست‌های دگرگون شده به سن پرمیبرین است که در این ایستگاه، بر روی واحدهای آهکی کرتاسه رانده شده‌اند (شکل ۶-ب). در این ایستگاه کلیدی که بر روی دیواره جنوبی راندگی اصلی منطقه قرار دارد، به دلیل مشاهده نکردن صفحات گسله، اندازه‌گیری ما محدود بر اندازه‌گیری سطوح تورق (شیستوزیته) به همراه خطواره‌های کشیدگی روی آن‌ها به منظور تعیین روند عمومی



شکل ۶- (a) تصویر نیمکره پایینی شبکه اشمیت از مجموع داده‌های برداشت شده در ایستگاه ۳، شامل صفحات برگوارگی ایجاد شده در رخنمون دگرگونی شیستی (کمان‌های بزرگ مشکی)، خطوارگی‌های ناشی از کشیدگی روی شیستوزیتی (بعلاوه‌های قرمز) و قطب برگوارگی‌ها. نقاط قرمز تصویر خطوارگی است و تمرکز

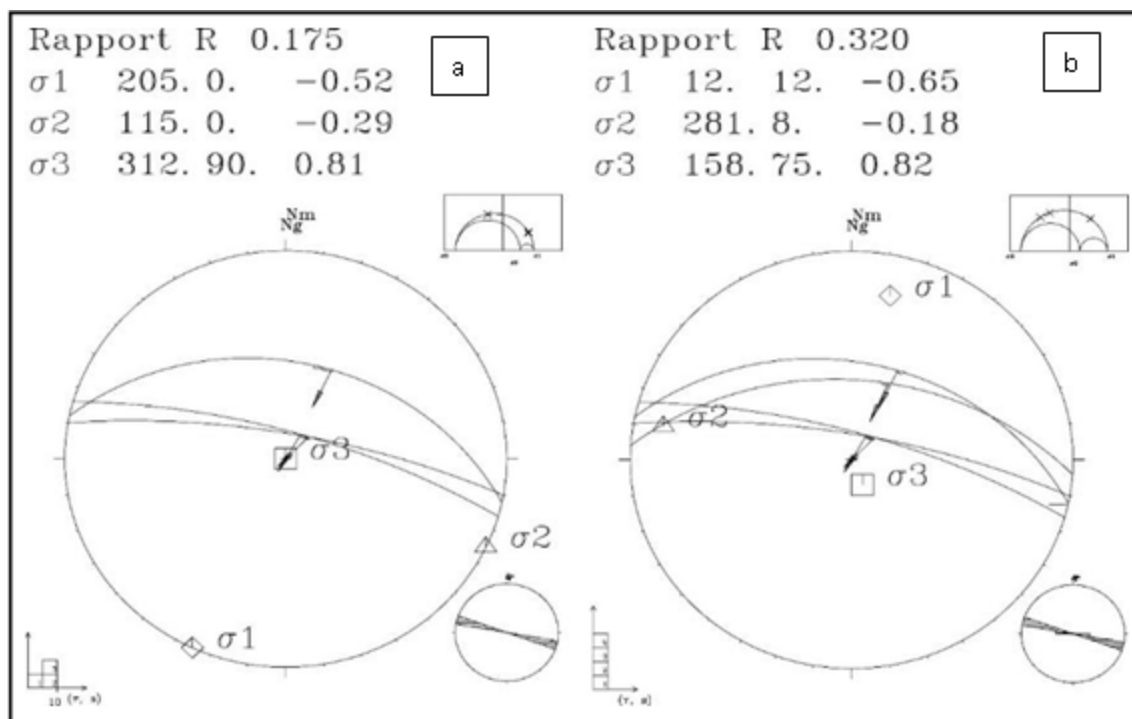
قطب برگواری با کانتورهای رنگی نشان داده شده است. کمان بزرگ قرمز از قطب برگواری و تمرکز خطواره‌های کشیدگی می‌گذرد. پیکان‌های قرمز روند محور کشیدگی را نشان می‌دهد. (b) تصویر ایستگاه ۳ که خط زرد توالی راندگی است و شیست‌های پرکامبرین بر روی واحدهای آهکی و شیستی کرتاسه رانده شده است و خط چین قرمز صفحات برگواری اندازه‌گیری شده است.

Fig. 6. a) Lower hemisphere of the Schmidt stereonet of the compiled data from station 3, including foliation planes developed in the schistose metamorphic outcrop (large black arcs), extensional lineation's on schistosity (red plus symbols), and foliation poles. Red points represent lineation measurements, and foliation pole concentrations are shown with color contours. The large red arc passes through the foliation poles and the concentration of extensional lineation. Red arrows indicate the trend of the stretching axis. b) Outcrop view at station 3 showing the thrust sequence (yellow line), where Precambrian schists are thrust over limestone and Cretaceous schist units. Red dashed lines indicate the measured foliation planes.

بیشینه فشارش (σ_1) شمال شرقی - جنوب غربی (۲۵ درجه شرقی) را برای این ایستگاه نشان می‌دهد. در ادامه پردازش داده‌های این ایستگاه، داده لغزش گسله شرقی - غربی اندازه‌گیری شده در ایستگاه ۲ نیز به پردازش افزوده شد (شکل ۷-b). این داده از نظر ماهیتی و سازوکار با صفحه گسله‌های فشاری این ایستگاه همخوانی کامل نشان می‌دهد. مجموع این پردازش محور فشارش بیشینه افقی تنش مسبب این حرکات را به صورت شمال شرقی - جنوب غربی به دست می‌دهد.

ایستگاه ۴/۱۶

این ایستگاه از لحاظ موقعیت ساختمانی در نزدیکی مرز دیواره جنوبی راندگی قرار دارد، که واحدهای آهک دگرگونی پرکامبرین و واحدهای رسوبی کرتاسه در مجاورت هم قرار گرفته‌اند. در این ایستگاه مهم، اندازه‌گیری صفحات گسلی به منظور تعیین جهت تنش مسبب این راندگی انجام شد. همان‌گونه که در شکل (۷-a) مشخص است، یک دسته گسله شرقی - غربی با مؤلفه فشارشی دیده می‌شود که



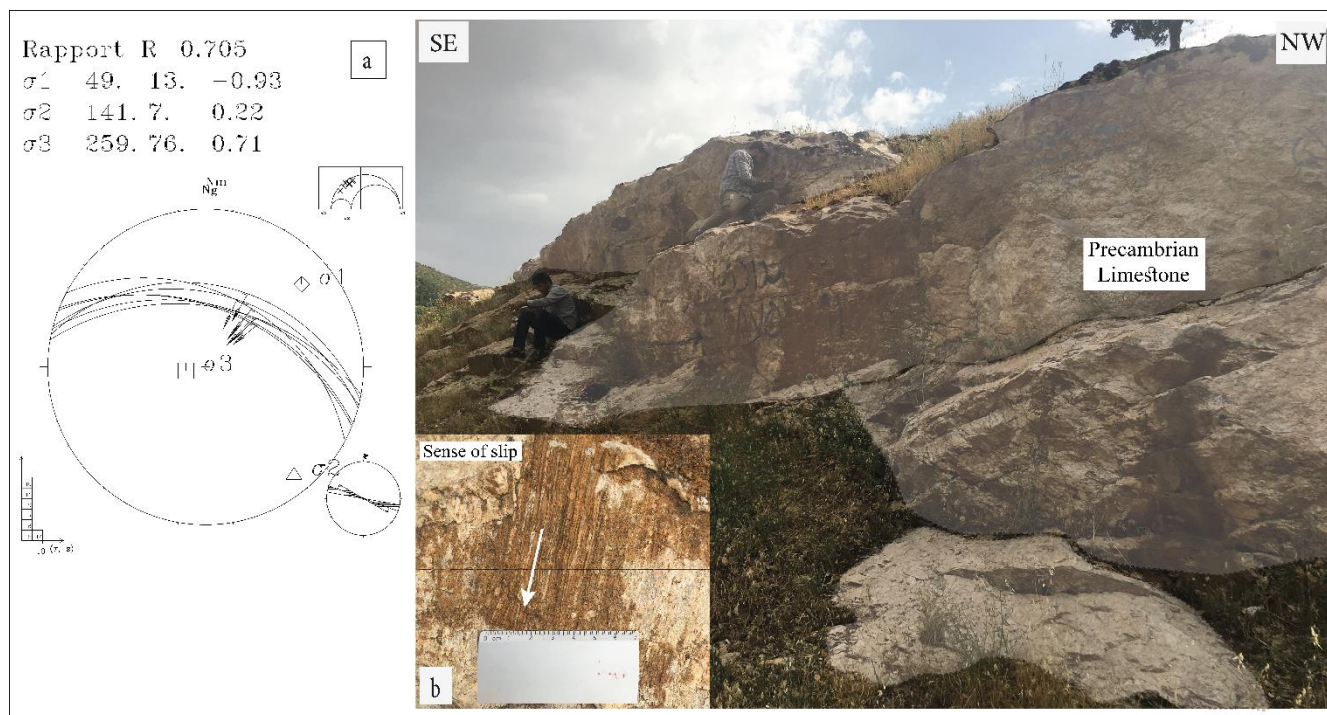
شکل ۷-a) شبکه استریوگراف پردازش شده از داده‌های صفحات گسلی واحدهای رسوبی کرتاسه (کمان‌های مشکی صفحات گسلی را نشان می‌دهد که پیکان‌های مشکی جهت خش لغز مکانیکی است. دایره مور بیانگر رابطه تنش نرمال و برشی است، نمودار میس‌فیت با مقدار R نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌ها با رژیم تنشی است، رز دیاگرام جهت‌گیری شکستگی‌ها است. (b) شبکه استریوگراف پردازش شده ایستگاه‌های ۲ و ۴ است.

Fig. 7. a) Processed stereonet of fault-plane data from the Cretaceous sedimentary units. Black arcs represent fault planes, and black arrows indicate the direction of mechanical slicken lines. The Mohr circle illustrates the relationship between normal and shear stresses. The misfit diagram with the R-value indicates the degree of consistency between the data and the stress regime. The rose diagram shows the fracture orientations. b) Processed stereonet of fault-plane data from stations 2 and 4.

همانطور که مشاهده می‌شود (شکل ۸-ا) یک دسته گسله فشارشی با روند شرقی - غربی دیده شد که بیشینه فشارش (σ_1) شمال شرقی - جنوب غربی را برای این ایستگاه نشان می‌دهد. نکته جالب در این ایستگاه تشابه هندسه و سازوکار داده‌های ساختاری اندازه‌گیری شده با ایستگاه‌هایی است که در دیواره جنوبی و حتی شرقی این راندگی بررسی کرده‌ایم.

ایستگاه ۹/۱۶

ایستگاه نهم از لحاظ موقعیت ساختاری در قسمت جنوبی دیواره غربی راندگی اصلی منطقه قرار دارد. این ایستگاه از واحدهای آهکی به سن پرکامبرین تشکیل شده است. اندازه‌گیری در این ایستگاه، از صفحات بزرگ گسلی به طول چندین متر که دارای شیب زیاد بودند (شکل ۸-ب) انجام گرفت. پس از پردازش داده‌های این ایستگاه،



شکل ۸-ا) شبکه استریوگراف پردازش شده از داده‌های صفحات گسلی واحدهای آهکی پرکامبرین (کمان‌های مشکی صفحات گسلی را نشان می‌دهد که پیکان‌های مشکی جهت خش لغز مکانیکی است. دایره مور بیانگر رابطه تنش نرمال و برشی است، نمودار میس‌فیت با مقدار R نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌ها با رژیم تنش است، رز دیاگرام جهت‌گیری شکستگی‌ها است). b) تصویر صفحات گسلی با شیب زیاد در واحدهای آهکی ایستگاه ۹، همراه با خش لغز مکانیکی که جهت بازشدگی آن نسبت به خط افق هستند.

Fig. 8. a) Processed stereonet of fault-plane data from the Precambrian limestone units. Black arcs represent fault planes, and black arrows indicate the direction of mechanical slicken lines. The Mohr circle illustrates the relationship between normal and shear stresses. The misfit diagram with the R-value indicates the degree of fit between the data and the stress regime. The rose diagram shows the fracture orientations. b) Photograph of steeply dipping fault planes within the limestone units at station 9, showing mechanical slicken lines whose opening direction is oriented relative to the horizontal.

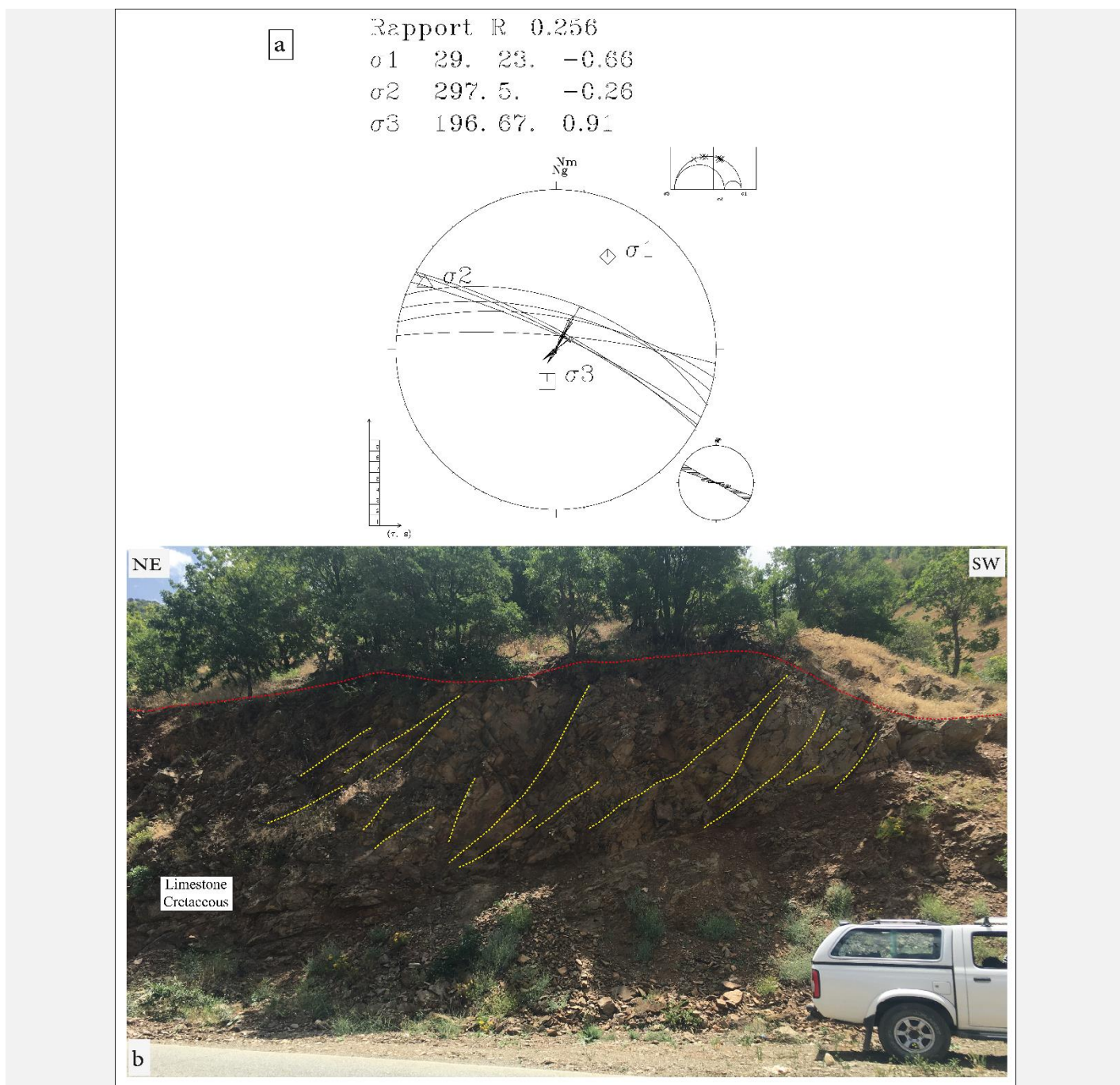
این ایستگاه در بخش شمالی دیواره غربی راندگی اصلی منطقه واقع

ایستگاه ۱۲/۱۶

شده است، اندازه‌گیری‌های ساختاری بر روی صفحات گسلی موجود در

که بیانگر تکرار روندهای ساختاری مشابه در سطح منطقه است. تحلیل دینامیکی داده‌ها نشان می‌دهد که جهت بیشینه فشارش (σ_1) در این ایستگاه به سمت شمال شرقی - جنوب غربی بوده و این امر مؤید وجود یک رژیم تنش فشارشی غالب در این بخش از راندگی است (شکل ۹-ا).

واحدهای سنگی آهکی با سن پرکامبرین انجام گرفت (شکل ۹-ب). نتایج حاصل از برداشت‌های میدانی نشان می‌دهد که این صفحات گسلی عمدتاً دارای امتداد شرقی - غربی بوده و با مؤلفه فشاری مشخص همراه است. نکته قابل توجه در این ایستگاه، تطابق جهت و نوع این گسله‌ها با گسله‌های فشاری مشاهده شده در ایستگاه‌های پیشین است،



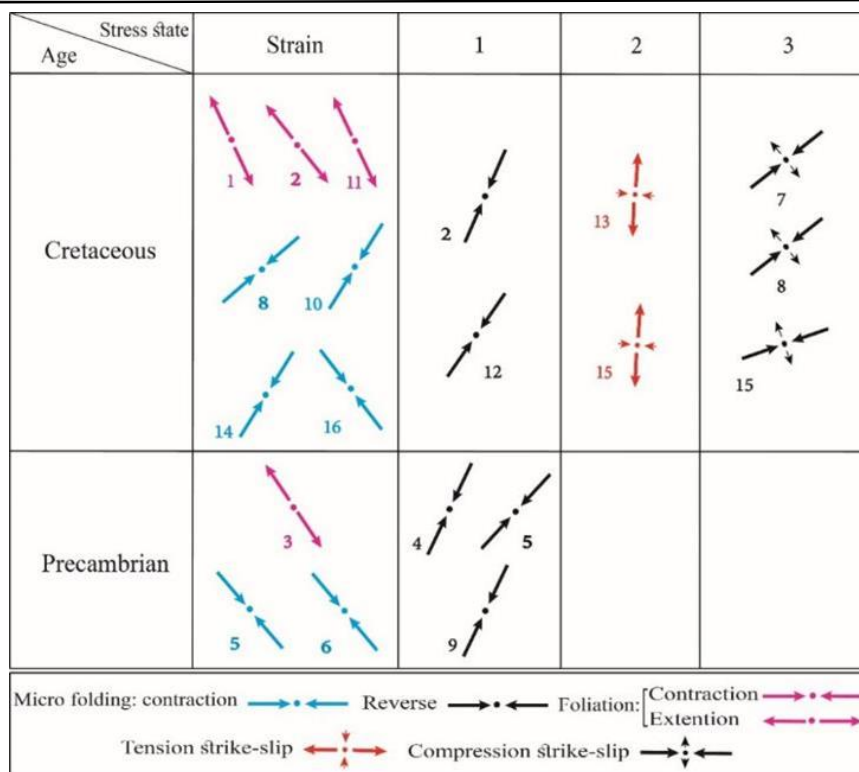
شکل ۹- a) شبکه استریوگراف پردازش شده از داده‌های صفحات گسلی واحدهای آهکی پرکامبرین (کمان‌های مشکی صفحات گسلی را نشان می‌دهد که پیکان‌های مشکی جهت خش‌لغز مکانیکی است. دایره مور بیانگر رابطه تنش نرمال و برشی است، نمودار میس‌فیت با مقدار R نشان‌دهنده انطباق مناسب داده‌ها با رژیم تنشی است، رز دیاگرام جهت‌گیری شکستگی‌ها است.) b) تصویر رخنمون صفحات گسلی اندازه‌گیری شده ایستگاه ۱۲، خط‌چین‌های زرد رنگ صفحات گسله پرشیب که اندازه‌گیری شده‌اند را نشان می‌دهند.

Fig. 9. a) Processed stereonet of fault-plane data from the Precambrian limestone units. Black arcs represent fault planes, and black arrows indicate the direction of mechanical slicken lines. The Mohr circle illustrates the relationship between normal and shear stresses. The misfit diagram with the R-value indicates the degree of consistency between the data and the stress regime. The rose diagram shows the fracture orientations. b) Outcrop view of the measured fault planes at station 12. Yellow dashed lines mark the steeply dipping fault planes that were measured.

پالئوسن؛ ستون ۲ در شکل ۱۰) و ساختارهای این فاز تکتونیکی با جوان‌ترین حرکات راستالغز بریده و رونوشت شده‌اند (ستون ۳ در شکل ۱۰). از سوی دیگر، بررسی شواهد و ساخت‌های دگرریختی شکل‌پذیر (ریزچین‌ها، شیستوزیتی و...) افزون بر آثار حرکات تکتونیکی یاد شده، آثار به جای مانده از فازهای دگرریختی کهن‌تر را نمایان کرده است (ستون کرنش در شکل ۱۰). بر این اساس، کهن‌ترین فاز دگرریختی قابل شناسایی در منطقه در قالب آثار به جای مانده از یک فشردگی گسترده با روند بیشینه فشردگی شمال‌غربی را نشان می‌دهد که مسبب ایجاد چرخش لابه‌ها و ایجاد ریزچین‌ها حول راستای غالب شمال‌شرق-جنوب‌غربی بوده است. این شواهد بیانگر یک مرحله فشارش اولیه است که در سنگ‌های پرکامبرین نگاشته شده و به احتمال قوی با حرکات کرتاسه پیشین در مزوزوئیک مرتبط باشد (شکل ۱۰).

تفسیر مشاهدات و نتیجه‌گیری

در بررسی دگرریختی‌های منطقه سقز-بانه، شواهد متعددی از چند نسل فعالیت ساختاری قابل مشاهده است که بیانگر تاریخچه‌ای چند مرحله‌ای از زمین‌ساخت فشارشی و کششی در این ناحیه است (شکل ۱۰). نتایج تحلیل تنش منطقه گویای کارسازی سه رژیم تنش متفاوت است که در سنگ‌های کرتاسه ثبت شده‌اند و آثار آن در سنگ‌های کرتاسه و قدیم‌تر قابل اندازه‌گیری است. به این معنی که همه این سه فاز گسلش متوالی پس از تشکیل این سنگ‌ها رخ داده‌اند. کهن‌ترین آن‌ها مسبب یک سیستم راندگی همخوان با روند بیشینه فشارش شمال‌شرقی است (ستون شماره ۱ در شکل ۱۰). سپس یک فاز کششی این ساختارهای کهن را متأثر کرده (به احتمال کرتاسه پسین-

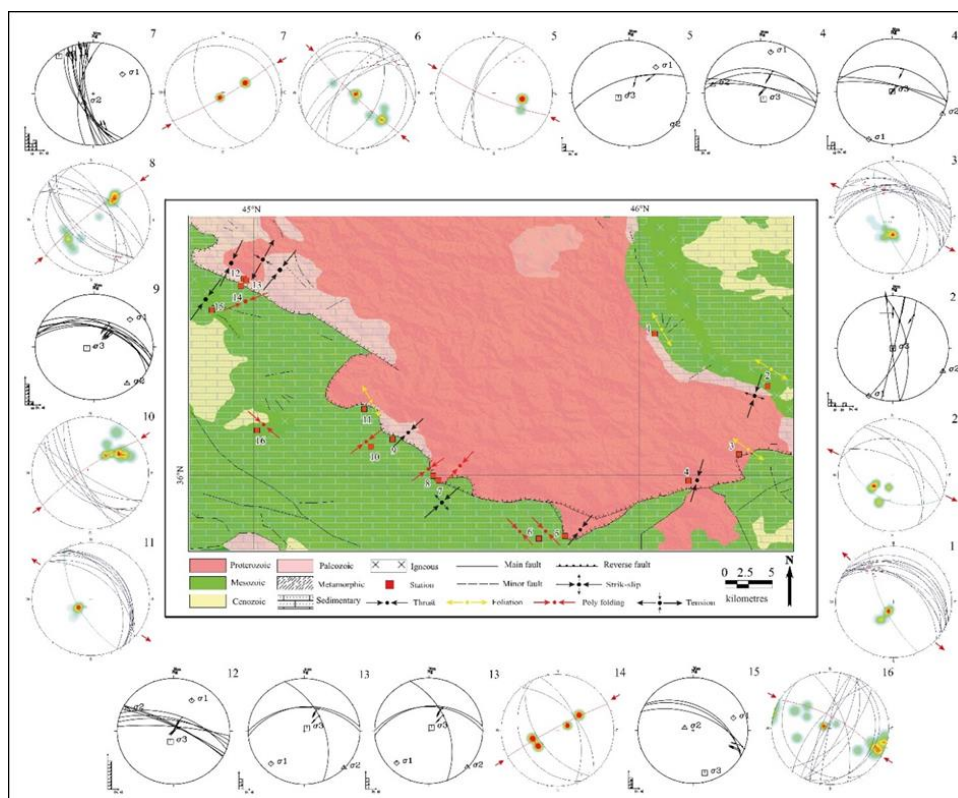


شکل ۱۰- تاریخچه رخدادهای زمین‌ساختی در منطقه سقز- بانه. بردارها به ترتیب شامل بردارهای آبی رنگ: محور فشردگی به دست آمده از ریزچین‌ها؛ بردارهای مشکی: فشارش محض به دست آمده از راندگی‌ها؛ بردارهای صورتی: جهت فشردگی مسبب ایجاد شیستوزیته؛ بردارهای قرمز: جهت کشش اصلی مسبب امتدادلغزهای کششی؛ جفت بردارهای مشکی: بیشینه فشارش مسبب امتدادلغزهای فشارشی هستند. ستون‌های ۱، ۲ و ۳ جهت محورهای اصلی تنش بیشینه یا کمینه را در فازهای مختلف نشان می‌دهد.

Fig. 10. Tectonic evolution history of the Saqqez–Baneh region. The arrows represent, respectively: blue arrows — compression axes obtained from minor folds; black arrows — pure compression derived from thrust faults; pink arrows — compression direction responsible for the development of schistosity; red arrows — principal extension direction responsible for tensional strike-slip faults; paired black arrows — maximum compression responsible for transpressional strike-slip faults. Columns 1, 2, and 3 indicate the orientations of the principal maximum or minimum stress axes during different tectonic phases.

نشان می‌دهند که مستقل از روند ساختاری دیده می‌شود. این الگوی همگن ساختاری با وجود روندهای مختلف پهنه راندگی بیانگر یک میدان دگرریختی اولیه یکسان است که بر سرتاسر مجموعه ساختاری حاکم بوده است. در این میدان همگن، نشانی از چرخش‌های ساختاری قابل توجه که گویای تأثیر خمش‌ها و پیچش‌های ساختاری باشد، دیده نمی‌شود.

مجموعه مشاهدات ما مربوط به بیشینه فشارش شمال شرقی مسبب سیستم راندگی اصلی (ستون شماره ۱ در شکل ۱۰) که داده‌های آن در ایستگاه‌ها و جایگاه‌های مختلف (در امتداد راندگی و دور از آن؛ شکل ۱۱) اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد فارغ از موقعیت ایستگاه‌ها، شواهد هم‌ارز شامل راندگی، جهت فشردگی مسبب راندگی، عناصر ساختاری خطی و صفحه‌ای مرتبط و... همگی یک میدان تنش دیرینه همگن را



شکل ۱۱- نقشه زمین‌شناسی ترسیم و تصحیح شده از راندگی اصلی منطقه به همراه میدان تنش حاصل از تحلیل داده‌های جنبشی مربوط به کهن‌ترین نسل حرکات نگاشته شده در پهنه راندگی اصلی. اطلاعات هندسی تنسورهای تنش حل شده/ نمودارهای استریوگرافیک تحلیل ساخت‌های شکل‌پذیر مربوط به هر ایستگاه با شماره همان ایستگاه در اطراف نقشه نشان داده شده است. جفت پیکان‌های همگرا روند فشارش بیشینه/کوتاه‌شدگی و پیکان‌های واگرا روند فشارش کمینه/کشیدگی را نشان می‌دهد.

Fig. 11. Geological map redrawn and corrected for the main thrust of the area, along with the stress field derived from kinematic data analysis of the oldest generation of movements recorded in the main thrust zone. Geometric information of resolved stress tensors/stereographic plots of deformable structures at each station are shown around the map with the corresponding station numbers. Converging arrow pairs indicate the trend of maximum compression/shortening, while diverging arrows indicate the trend of minimum compression/extension.

کرده است که با استناد به آن می‌توان بخش مهمی از تاریخچه دگرریختی منطقه را توضیح داد. در واقع، شکل‌گیری این ساختار راندگی خمیده (شکل ۳) به دو صورت قابل توضیح است. در حالت

تحلیل مجموعه مشاهدات میدانی و اندازه‌گیری‌های انجام شده در شانزده ایستگاه در بخش‌های مختلف راندگی اصلی اطلاعاتی را فراهم

است. پس اگر در هر قسمت از این دیواره‌ها اندازه‌گیری کنیم، شاهد جهت بیشینه تنش فشارشی شمال‌شرق - جنوب‌غربی خواهیم بود که بر بخش‌های شمالی و جنوبی راندگی اصلی اثر کرده و آن را با سازوکارهای متفاوت اما متناسب با میدان تنش دیرینه به فعالیت واداشته است.

نکته قابل توجه دیگر در مشاهدات ما جهت فشارش بیشینه متفاوتی است که در ایستگاه‌های پنجم، ششم و پانزدهم به دست آمده است. تنش مسبب دگرریختی در این ایستگاه‌ها ریزچین‌هایی ایجاد کرده است که با استناد به شواهد میدانی ذکر شده در هر ایستگاه، به قدیمی‌ترین برهه دگرریختی قابل تشخیص در منطقه (کرتاسه پیشین) مربوط می‌شوند. این سه ایستگاه از لحاظ موقعیت ساختاری بیرون از پهنه تأثیر راندگی اصلی قرار دارند و رخنمون‌های بررسی شده در آن‌ها از لحاظ سنی نیز قدیمی‌تر هستند. با این استناد می‌توان نتیجه گرفت که آثار ساختاری مربوط به فشارش عمومی با جهت شمال‌غرب - جنوب‌شرقی (کم و بیش عمود بر روند فشارش معمول در زاگرس) باید مرتبط با یک برهه دگرریختی کهن‌تری باشد که تاکنون ناشناخته مانده است. آثار این دگرریختی کهن نیز در جاهایی دیده می‌شود که به دلیل دوری از پهنه راندگی اصلی هنوز دست نخورده برجا مانده‌اند. در حالی که در نزدیکی و بالای پهنه راندگی به دلیل رخداد راندگی واحدهای پرکامبرین بر روی واحدهای کرتاسه در فاز دگرریختی جوان‌تر، آثار ساختاری این مجموعه کهن با آثار دگرریختی جوان‌تر مرتبط با راندگی رونوشت شده است و آنچه به عنوان اثر ساختاری غالب دیده می‌شود همان چیزی است که به عنوان دگرریختی معمول زاگرس در جاهای دیگر نیز دیده و گزارش شده است. از این مبحث می‌توان نتیجه گرفت که این منطقه پیش از راندگی نیز درگیر یک فشارش عمومی شمال‌غرب - جنوب‌شرقی بوده که شواهد آن در سه ایستگاه فوق دیده می‌شود. این سه ایستگاه چون در بلوک فرودپیواره و دور از راندگی قرار دارند آثار قدیم را نشان می‌دهد و در بخش‌های بالایی که خود راندگی است مجموعه آثاری هست که دستخوش تغییرات مرتبط با زمان راندگی و پس از آن شده است.

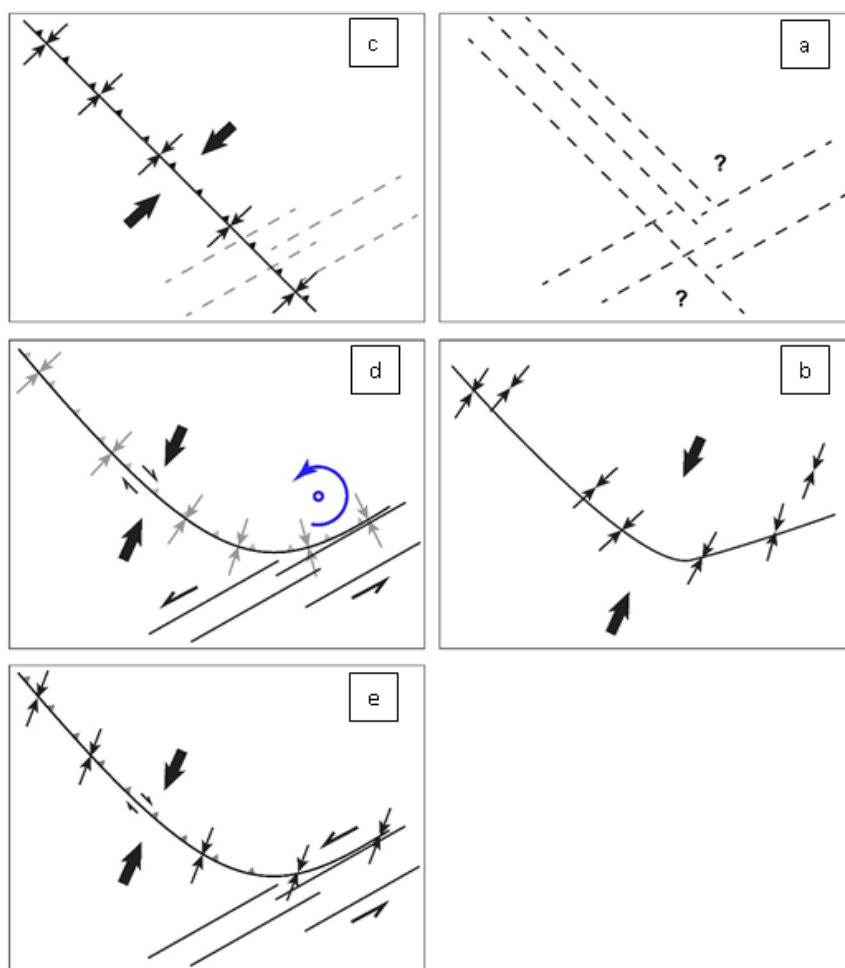
نخست (سناریو ۱؛ شکل ۱۲-c و ۱۲-d) می‌توان فرض کرد که این راندگی هم‌راستای کوهزاد زاگرس ایجاد شده باشد و پس از آن، در برهه‌های دگرریختی جوان‌تر چرخیده باشد. به این معنی که پس از تشکیل راندگی اصلی، فعال شدن پهنه گسلی شمال‌شرق - جنوب‌غربی سقز - بانه (عمود بر پهنه زاگرس) در یک فاز دگرریختی جوان‌تر سبب جابه‌جایی جانبی راندگی و ایجاد چرخش پادساعت در روند آن به دور محور شاقولی در پیرامون پهنه برش شده باشد. در این حالت، باید پذیرفت که پهنه برشی سقز - بانه، پس از برخورد فعال شده باشد و ساختارهای پیشین را تغییر دهد. در حالت دوم (سناریو ۲؛ شکل ۱۲-e)، این احتمال هست که پهنه برشی در زمان برخورد نیز فعال بوده باشد و به عنوان یک حد مرزی، گسترش و هندسه پهنه راندگی مربوط به برخورد را کنترل کند. در این حالت انتظار می‌رود که پهنه راندگی بزرگ در نواحی دور از این ساختار حد مرزی از روند عمومی زاگرس پیروی کند و در نزدیکی آن، تغییر روند و سازوکار بدهد. نتیجه نهایی این دو سناریو از نظر ظاهری مشابه هم خواهد بود. با این تفاوت که در حالت اول همه پهنه راندگی در فاز نخست دگرریختی، یکنواخت عمل خواهد کرد و سپس در فاز دوم، مجموعه ساختاری مرتبط با آن دچار چرخش ساختاری خواهد شد. اما در حالت دوم، انتظار بر این است که هر بخش از این پهنه، بسته به ارتباط آن با پهنه برش، هندسه و سازوکار ساختاری منحصر به خود را بروز دهد؛ در حالی که همه این مجموعه در تأثیر یک رژیم تکتونیکی همگن فعال و ایجاد شده باشد.

نتایج تحلیل اندازه‌گیری‌های ما در سرتاسر دیواره جنوبی این راندگی (شکل ۱۱ و ۱۲-e) روند بیشینه فشارش به دست آمده را به صورت شمال‌شرق - جنوب‌غربی نشان می‌دهد. این الگو شباهت و همخوانی بسیار خوبی با مدلی دارد که در سناریو ۲ (شکل ۱۲-e) پیش‌بینی شده است. با توجه به این تشابه الگوی ساختاری و میدان تنش دیرینه در هر دو حالت مشاهده و مدل پیشنهادی، می‌توان نتیجه گرفت بخش جنوبی این مجموعه راندگی یک ساختار از پیش موجود بوده است و برخلاف بخش شمالی که موازی روند زاگرس به غرب رانده شده، در قالب یک ساختار عرضی (رمپ جانبی؟) عمل کرده

مختلف باز فعال شده و الگوی ساختاری منطقه تأثیرشان را در کنترل خود گرفته‌اند.

افزون بر این، مقایسه یافته‌ها با مدل باباحمدی و همکاران (Babaahmadi et al., 2021) نشان می‌دهد که الگوهای ساختاری و گرایش‌های تنشی بازسازی شده در منطقه سقز - بانه، با تفسیر آن‌ها از فرورانش اریب (oblique subduction) تئیس جوان به زیر ایران و پیامدهای دگرریختی ناشی از آن، همخوانی کامل دارد. بر اساس مدل باباحمدی و همکاران (Babaahmadi et al., 2021) این فرورانش اریب موجب شکل‌گیری رژیم ترفشارشی در پهنه سنندج - سیرجان شده است؛ رژیمی که در آن برش امتدادلغز راست‌بر همراه با فشارش همزمان، الگوی غالب دگرریختی را ایجاد کرده است. شواهد ساختاری این پژوهش شامل جهت‌گیری ساختارهای اصلی، چرخش ریزچین‌ها و مؤلفه‌های امتدادلغز نشان می‌دهد که پهنه سقز - بانه نیز در پاسخ به همین میدان تنش ترفشارشی، رفتار مشابهی ثبت کرده است. در نتیجه، ساختارهای پی‌سنگی با امتداد NE-SW در این ناحیه طی چندین مرحله تکتونیکی باز فعال شده‌اند و هندسه کنونی آن‌ها بازتاب همین الگوی تنش ترکیبی است.

در پایان، تطابق نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج افلاکی و همکاران (Aflaki et al., 2017) درباره تاریخچه فرگشت پهنه موه- لایبید نشان می‌دهد که لبه خرد ورقه ایران مرکزی پیش از بسته شدن تئیس جوان و برخورد دو لبه قاره، با ساختارهای عرضی شمال‌شرق- جنوب‌غربی بریده شده بوده است. این ساختارهای پی‌سنگی کهن ممکن است از زمان باز شدن اقیانوس تئیس جوان در حرکات و فرآیندهای تکتونیکی مختلف نقش بازی کرده باشند و متناسب با میدان تنش دیرینه هر زمان، نقش متفاوتی ایفا کرده باشند. نتایج ما نشان می‌دهد که پهنه ساختاری سقز- بانه دست‌کم از اواخر بسته شدن اقیانوس (کرتاسه) تا به امروز به عنوان یک پهنه ساختاری حد مرزی، حرکات تکتونیکی و الگوی ساختاری منطقه را کنترل کرده است. این مشاهدات در همخوانی کامل با نظر افلاکی و همکاران (Aflaki et al., 2017) مبنی بر این واقعیت است که فرآیندهای سترگ ناشی از زایش و نابودی تئیس جوان نتوانسته است ساختار پی‌سنگی لبه خرد قاره ایران مرکزی را (دست‌کم در برخی مناطق) به طور کامل تغییر دهد، بلکه برخی ساختارهای بزرگ ایران مرکزی در فازهای تکتونیکی



شکل ۱۲- مدل تکتونیکی پیشنهادی برای پهنه سقز- بانه در پیوند با ناحیه برخوردی زاگرس. (a) پیش فرض روندهای تکتونیکی موجود پیش از برخورد. (b) جهت محورهای تنش فشارشی بیشینه که در این پژوهش تعیین شده است. (c) وضعیت نخستین ساختارها در سناریوی اول در زمان آغاز دگرریختی. (d) وضعیت نهایی ساختارها در سناریو دوم پس از حرکات تکتونیکی مسبب باز فعال شدن روند ساختاری سقز- بانه که منجر به چرخش‌های ساختاری در نیمه جنوبی پهنه راندگی شده است. چرخش ساختارها، چرخش محورهای تنش مسبب این ساختارها را نیز به همراه داشته است. (e) وضعیت نهایی ساختارهای منطقه در سناریوی دوم. پهنه ساختاری سقز- بانه به عنوان یک روند تکتونیکی حد مرزی از پیش موجود، در زمان تشکیل راندگی کارساز شده و با کنترل الگوی ساختاری، سبب تشکیل مجموعه راندگی با هندسه خمیده شده است. بخش شمالی این مجموعه در قالب راندگی نزدیک به محض و بخش جنوبی آن در قالب یک پهنه ترفشاری فعالیت کرده است. در این سناریو (همخوان با مشاهدات ما در شکل ۱۲- e) نشانی از چرخش ساختاری پس از تشکیل مجموعه دیده نمی‌شود.

Fig. 12. Proposed tectonic model for the Saqqez-Baneh zone in relation to the Zagros collision area. a) Presumed existing tectonic trends prior to the collision. b) Orientation of maximum compressional stress axes determined in this study. c) Initial configuration of structures in Scenario 1 at the onset of deformation. d) Final configuration of structures in Scenario 2 after tectonic movements responsible for reactivating the Saqqez-Baneh structural trend, leading to structural rotations in the southern part of the thrust zone. The rotation of structures also involved rotation of the stress axes responsible for these structures. e) Final state of the regional structures in Scenario 2. The Saqqez-Baneh structural zone, as a pre-existing boundary tectonic trend, became active during thrust formation and, by controlling the structural pattern, led to the development of a curved thrust complex. The northern part of this complex functioned as a nearly pure thrust, while the southern part operated as a transpressional zone. In this scenario (consistent with our observations in Figure 12-e), no evidence of structural rotation after the formation of the complex is observed.

References

- Afaghi, A., Salek, M.M., Moazemi, J., 1978. Geological Map of Iran, Sheet No. North-West Iran, Scale 1:1,000,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Aflaki, M., Shabaniyan, E., Davoodi, Z., Mohajjel, M., 2017. Reactivation versus reworking of the active continental margin during the Zagros collision: Mahallat–Muteh–Laybid complexes, Sanandaj–Sirjan zone, Iran. *Journal of Geodynamics* 107, 1-19.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148(5-6), 692-725.
- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 640 p. (in Persian)
- Alavi, M., Amidi, M., Bolourchi, M.H., Aghanabati, A., 1976. Geological Map of Takab, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 56(3-4), T17-T26.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89(B7), 5835-5848.
- Angelier, J., 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress—III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International* 103(2), 363-376.
- Babaahmadi, A., Davoudian, A.R., Mohajjel, M., 2021. Transpression in the Sanandaj-Sirjan zone (Zagros Orogen, Iran) during the Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from the north Shahrekord shear zone. *Journal of Structural Geology* 149, 104387.
- Babakhani, A., Hariri, A., Farjandi, F., 2003. Geological Map and Explanatory Text of Saqqez Sheet, Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Baniadam, F., Shabaniyan, E., Bellier, O., 2019. The kinematics of the Dasht-e Bayaz earthquake fault during Pliocene-Quaternary: Implications for the tectonics of eastern Central Iran. *Tectonophysics* 772, 228218.
- Carey, E., Brunier, B., 1974. Analyse theorique et rumerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences, Serie D: Sciences Naturelles* 279(11), 891-894.
- Carey, E., 1979. Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev Géogr Phys Géol Dyn* 21(1).
- Davoudian, A.R., Genser, J., Neubauer, F., Shabaniyan, N., 2016. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj–Sirjan Zone, Iran: implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research* 37, 216-240.
- Eftekharnjad, J., 1973. Geological Map of Mahabad Quadrangle, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- 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.
- Gholipour, S., Azizi, H., Masoudi, F., Asahara, Y., Tsuboi, M., 2021. Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd isotope ratios for early cretaceous magmatic rocks, southern Saqqez, northwestern Iran. *Geochemistry* 81(1), 125687.
- Masoudi, F., Mahmoudi, S., Corfu, F., Mehrabi, B., Mohajjel, M., 2011. U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41(3), 238-249.
- Nogol-Sadat, M.A., Houshmandzadeh, A., 1993. Geological Map of Baneh–Marivan, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Ritz, J.F., Taboada, A., 1993. Revolution stress ellipsoids in brittle tectonics resulting from an uncritical use. *Bulletin de la Société Géologique de France* 64(4), 519-531.
- Zahedi, M., Hajian, J., 1985. Geological Map of Sanandaj, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)