



Research Article

Paleo-stress analysis of Koleh Sangi region- northern Zahedan- Sistan suture zone

Samin Safaee¹, Abdolreza Partabian^{*1} , Ali Asghar Moridi Farimani¹

1-Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 07 Jan 2023 Accepted: 26 Jun 2023

Extended Abstract

Introduction: Understanding regional tectonics and characterizing local processes greatly benefit from local measurements of paleo-stress direction. Mathematical techniques based on the inversion of fault slip data are one of the frequently used techniques for detecting the direction of the paleo-stress (Balansa et al., 2022; Zhang et al., 2020; Angelier 1994; Jentzer et al., 2017). The deformed area of Koleh-Sangi is situated structurally in the center of the Sistan Suture Zone, north of Zahedan. Sistan Suture Zone is a most intricate structural regions that several research have been conducted to comprehend the past deformation of this area. Given that the studied region has several faults and fractures, the orientation of paleo-tectonic stresses has mostly been dependent on the orientation of faults and the relative movement along them, and the results of structural analysis and paleo-stress investigations were ignored. Therefore, it is essential to conduct this research, and its findings may contribute to a better knowledge of the Sistan Suture Zone.

Materials and methods: A kinematic process results in slickenside and movement along the fault. For many years, structural investigations have employed the kinematic study index to identify several types of paleo-stress, including fault lines, shear zones, veins, and stylolites. The slickenside fault planes can be employed as movement or kinematic markers (Hancock 1985; Roberts 1996; Roberts and Michetti 2004). The range of structural components, such as slickenside, have been considered in the reconstruction techniques for paleo-stress. The four stress tensor parameters are based on the amount and direction of slide on the fault plane (Angelier, 1989; 1991). These parameters, which include the principal stress axes $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, are introduced in the form of the following equation with the title R, which is the same as the ratio of the magnitude of the stress ellipse. These parameters depend on the ratio of the magnitude of the intermediate stress σ_2 , the maximum σ_1 , and the minimum σ_3 principal stresses.

Results and Discussion: It was attempted to take the spatial features of faults and their related structures from four sites with varied ages of deformed rocks to calculate the paleo-stress parameters in the different area (areas A, B, C and D). According to the main goal of the article, it has been tried to take into account the early and late geological events. The properties of the fault planes, the slickenside, as well as the fault's Cross-cutting relationships and movement, were collected during the field surveys. The stress ratio (ϕ) has been fluctuating between 0.3 and 0.9 based on observations made and the interpretation of the data acquired in the MIM software from four areas with varying rock ages. The maximum and minimum trend and plunge of the computed axes were drawn on the contour diagram for each range to produce a specific pattern to estimate the orientation of the stress axes, and the most compatible planes for the axes were identified on the diagram.

Conclusion: 1. The earliest rock formations in the area, were impacted by a compressional phase that occurred at an N84°E. 2. The second phase of progressive deformation indicates the N59°E. 3. Its compressional direction has been determined to be N10°. This compressional direction is consistent with both the compressional trend determined by GPS (Vernant et al, 2004) and the trend obtained for the major faults in this region, (such as the Zahedan dextral strike-slip fault, the Nosratabad dextral strike-slip fault and reverse faults with a north-northwest strike (Berberian et al., 2000; Walker and Khatib, 2006). According to the available data and earlier investigations, this deformation phase occurred during or after the Eocene and has persisted up to the current day. 4. A transtension regime is visible in the youngest phase in Paleocene and Oligocene-Miocene outcrops. This phase may be brought on by normal faults along fold axes, on the hanging wall of thrust faults and associated with north-south strike-slip faults. The latest stage of deformation in the area may be explained by the presence of the Zahedan strike-slip fault, which has a significant amount of displacement throughout its length.

Keywords: Slickenside, Brittle deformation, Zahedan fault, Multiple inversion method.

Citation: Samin Safaee, Abdolreza Partabian, Ali Asghar Moridi Farimani (2023). Paleo-stress analysis of Koleh Sangi region- northern Zahedan- Sistan suture zone, *Res. Earth. Sci.* 14(4), (79-90) DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103528

* Corresponding author E-mail address: partabian_reza@science.usb.ac.ir



تحلیل تنش دیرینه در منطقه کوله سنگی، شمال زاهدان - پهنه زمین درز سیستان

ثمین صفایی^۱، عبدالرضا پرتابیان^{۱*}، علی اصغر مریدی فریمانی^۱

^۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

چکیده گسترده

مقدمه: اندازه‌گیری محلی جهت تنش دیرینه به‌طور قابل توجهی در توصیف سازوکارهای محلی و شناخت زمین‌ساخت در مقیاس ناحیه‌ای کمک می‌کند. یکی از روش‌های متداول برای تعیین جهت تنش دیرینه، روش‌های ریاضی مبتنی بر وارونسازی داده‌های لغزش گسل است (Balansa et al, 2017; Jentzer et al, 2017; Angelier, 1994; Zhang et al, 2020; et al, 2022). منطقه دگرشکل شده کوله سنگی در شمال زاهدان و از لحاظ ساختاری در قسمت میانی پهنه زمین درز سیستان واقع شده است. این پهنه یکی از پیچیده‌ترین پهنه‌های ساختاری ایران می‌باشد که تاکنون مطالعات متعددی جهت شناخت تاریخچه دگرشکلی آن صورت گرفته است. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه گسل‌های متعددی به همراه شکستگی‌های فراوانی وجود دارد و تاکنون جهت‌گیری نیروهای تکتونیکی دیرینه عمدتاً بر مبنای جهت‌گیری گسل‌ها و حرکت نسبی در امتداد آنها بدون در نظر گرفتن مطالعات دقیق ساختاری و تنش دیرینه صورت گرفته است، بنابراین انجام این تحقیق ضروری است و نتایج آن می‌تواند به شناخت بهتر پهنه زمین درز سیستان منجر شود.

مواد و روش‌ها: جابه‌جایی در امتداد گسل و ایجاد خش‌لغز یک فرآیند جنبش‌شناختی است. شاخص جنبش‌شناختی در مطالعات ساختاری برای سال‌های زیادی به منظور تشخیص ویژگی‌های تنش دیرینه یک محدوده، از صفحات گسل‌ها، پهنه‌های برشی، رگه‌ها و استیلولیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از صفحات گسلی که دارای خش‌لغز می‌باشند می‌توان به عنوان شاخص حرکتی یا جنبش‌شناختی به کار برد (Hancock, 2004; Roberts and Michetti, 1996; Roberts, 1985). در روش‌های بازسازی تنش دیرینه تنوع عناصر ساختاری چون خش‌لغزها را مورد توجه قرار داده‌اند. اندازه و جهت لغزش روی صفحه گسلی برای تعیین ۴ پارامتر تنسور تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Angelier, 1989, 1991). این پارامترها شامل محورهای اصلی تنش $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ، و بسته به نسبت بزرگی تنش اصلی حدواسط σ_2 و تنش‌های اصلی حداکثر σ_1 و حداقل σ_3 به صورت معادله زیر تحت عنوان R معرفی می‌شود که همان نسبت بزرگی بیضی تنش می‌باشد.

نتایج: به منظور تعیین پارامترهای تنش دیرینه در منطقه مورد مطالعه سعی شد از چهار محدوده با سن سنگ‌های دگر شکل شده متفاوت (محدوده‌های A, B, C, D) مشخصات فضایی گسل‌ها و ساختارهای همراه آنها برداشت گردد. با توجه به هدف اصلی مقاله سعی شد در برداشت ساختارها تقدم و تاخر رویدادهای زمین‌شناسی مورد توجه قرار گیرد. در برداشت‌های صحرائی مشخصات صفحات گسلی، خش‌لغزها و سوی برش و حرکت گسلی در عملیات صحرائی برداشت گردید. براساس برداشت‌های صورت گرفته و آنالیز اطلاعات به دست آمده در نرم‌افزار از مناطق چهارگانه نسبت تنش (P) بین ۰/۳ تا ۰/۹ در تغییر بوده است. در هر محدوده به منظور دستیابی به یک الگوی مشخص به منظور برآورد جهت‌گیری محورهای تنش، آزیموت و میل محورهای بیشینه و کمینه محاسبه شده، بر روی دیاگرام کانتوری ترسیم و بهترین صفحه‌های سازگار برای محورها بر روی دیاگرام مشخص گردید.

نتیجه‌گیری: ۱. قدیمی‌ترین مرحله دگرشکلی، یک فاز فشارشی $N84^\circ E$ است که قدیمی‌ترین مجموعه‌های سنگی منطقه را تحت‌تأثیر قرار داده است. ۲. مرحله دوم دگرشکلی بیانگر جهت فشارش $N59^\circ E$ است. ۳. جوانترین فاز فشارشی $N10^\circ$ به دست آمده است. این جهت فشارش در تطابق با جهتی است که برای گسل‌های اصلی در این منطقه به دست آمده است (مثل گسل امتدادلغز راستگرد زاهدان و گسل امتداد لغز راستگرد نصرت‌آباد و گسل‌های معکوس با امتداد شمال-شمال غرب (Berberian et al, 2000; Walker and Khatib, 2006) و همچنین با جهت فشارش بدست آمده توسط GPS (Vernant et al, 2004) همخوانی دارد. ۴. جوانترین فاز یک رژیم تراکشی در رخنمون‌های پالئوسن و الیگوسن-میوسن را نشان می‌دهد. این فاز می‌تواند ناشی از گسل‌های نرمال در امتداد محور چین‌ها و همچنین در فرادایواره‌های گسل‌های تراستی و یا گسل‌های امتدادلغز شمالی جنوبی باشند. وجود گسل امتدادلغز زاهدان که جابه‌جایی بالایی در امتداد خود دارد می‌تواند آخرین فاز دگرشکلی در منطقه را توجیه کنند.

واژگان کلیدی: خش‌لغز، دگرشکلی شکنا، گسل زاهدان، وارونسازی چندگانه

استناد: ثمین صفایی، عبدالرضا پرتابیان، علی اصغر مریدی فریمانی (۱۴۰۲). تحلیل تنش دیرینه در منطقه کوله سنگی، پژوهشهای دانش زمین:

۱۴ (۴)، (۹۰-۷۹)، DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103528

مقدمه

اندازه‌گیری محلی جهت تنش دیرینه به‌طور قابل توجهی در توصیف سازوکارهای محلی و شناخت زمین‌ساخت در مقیاس ناحیه‌ای کمک می‌کند. یکی از روش‌های متداول برای تعیین جهت تنش دیرینه، روش‌های ریاضی مبتنی بر وارون‌سازی داده‌های لغزش در سطح گسل است. (Balansa et al, 2022; Zhang et al, 2020; Angelier) (Jentzer et al, 2017; Angelier, 1975; Carey and Brunier, 1974). از ویژگی‌های اصلی این روش، تعیین تنسور تنش با استفاده از جهت و نوع لغزش بر روی گسل‌های مرتبط در یک سامانه زمین‌ساختی چند فاز است که برای اولین بار توسط کری و برونیر (Carey and Brunier, 1974) به کار گرفته شد و سپس این روش توسط محققان دیگر تکامل و بهبود یافت (Angelier, 1975; Armijo and Cisternas, 1978; Etchecopar et al, 1981; Angelier, 1984; Reches, 1987). منطقه دگرشکل شده کوله سنگی در شمال زاهدان و از لحاظ ساختاری در قسمت میانی پهنه زمین درز سیستان واقع شده است. این پهنه یکی از پیچیده‌ترین پهنه‌های ساختاری ایران می‌باشد که تاکنون مطالعات متعددی جهت شناخت تاریخچه دگرشکلی آن صورت گرفته است (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al, 1983; Arjmandzadeh et al, 2011; Saccani et al, 2011; Zarrinkub et al, 2012; Bagheri Tirrul et al, 2020). تیروول و همکاران (Tirrul et al, 1983) پهنه زمین درز سیستان را به ۳ واحد مجزای (۱) کمپلکس رتوک، (۲) کمپلکس نه، (۳) حوضه سفیدابه که بر روی هر دو کمپلکس نه و رتوک قرار گرفته و شامل رسوبات مولاسی یا توریدایتی سنونین تا ائوسن می‌باشد تقسیم می‌کند. منطقه کوله‌سنگی در حوضه سفیدابه قرار دارد (Mohammadi et al, 2016). مطالعاتی که تاکنون در منطقه کوله سنگی صورت گرفته، غالباً مطالعات معدنی و اکتشافی بوده است. بررسی زمین‌شناسی نیز در قالب پایان‌نامه‌های کارشناسی‌ارشد صورت گرفته است. از بارزترین مطالعات زمین‌شناسی، بررسی لرزه‌خیزی گسل زاهدان توسط آقاشاهی اردستانی (۱۳۸۵) بوده است که با مقایسه مقدار کرنش با هندسه گسل اصلی، نتیجه گرفتند که گسل اصلی بیشتر از ۵۱ درصد دگرشکلی را به خود اختصاص داده است. کلانتری (۱۳۸۹) ارتباط حرکتی بین گسل سفیدابه و گسل زاهدان را با استفاده از روش فرکتال، مطالعه کردند. دیگر مطالعه زمین‌شناسی مربوط به

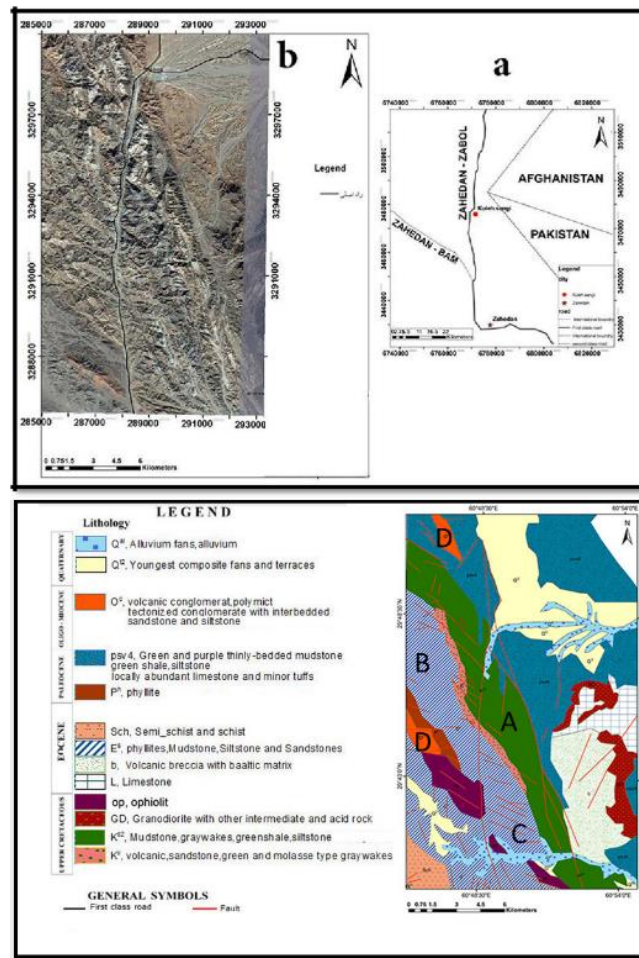
بررسی دگرشکلی در کنگلومراهای منطقه موجود در منطقه (شیرازی، ۱۳۹۱) است. در این مطالعه، چهار فاز دگرشکلی تعریف شده است: فرورانش پوسته اقیانوسی تئیس جوان، راندگی و جایگزینی برش‌های افیولیتی، دگرشکلی شکننده و در نهایت عملکرد سامانه گسله زاهدان که احتمالاً نتیجه فشارش صفحه عربی به سمت ایران بوده است. بررسی‌های اولیه در منطقه مورد مطالعه حکایت از فعالیت دگرشکلی شکنا به صورت توسعه گسل‌ها و عملکرد فازهای مختلف تنشی با سازوکار و روند متفاوت در منطقه دارد که از شواهد آن وجود صفحات گسلی با حداقل دو دسته خش لغز می‌باشد. خش‌لغزهای متفاوت در صفحه یک گسل نشانگر تغییر جهت تنش در طی زمان و فعالیت متفاوت گسل در طی دوران دگرشکلی می‌باشد و تاکید می‌کند که گسل در یک راستای ثابت و مشخصی فعالیت نداشته است. این مسئله می‌تواند مربوط به تغییر در جهت محورهای اصلی تنش یا تغییر در نسبت اختلاف تنش و یا هر دو باشد (Ramsay, 2000; Shan et al, 2003). با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه گسل‌های متعددی به همراه شکستگی‌های فراوانی وجود دارد و تاکنون جهت گیری نیروهای زمین‌ساختی دیرینه عمدتاً بر مبنای جهت‌گیری گسل‌ها و حرکت نسبی در امتداد آنها بدون در نظر گرفتن مطالعات دقیق ساختاری و تنش دیرینه صورت گرفته است، بنابراین انجام این تحقیق ضروری است و نتایج آن می‌تواند به شناخت بهتر پهنه زمین درز سیستان منجر شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده جغرافیایی با طول $12^{\circ}0' E$ تا $60^{\circ}35' E$ و عرض $29^{\circ}30' N$ تا $29^{\circ}59' N$ در شمال استان سیستان و بلوچستان ۶۰ کیلومتری شمال زاهدان، در منطقه کوله‌سنگی (شکل ۱) قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه از لحاظ زمین‌ساختی به شدت گسل خورده و از ساختارهای بارز در منطقه می‌توان به گسل زاهدان اشاره کرد که، از شرق منطقه عبور می‌کند. از نظر چینه‌شناسی، واحدهای منطقه شامل واحدهای کرتاسه فوقانی تا کواترنر می‌باشند. گسترش جغرافیایی واحدها به‌طور کلی دارای روند تقریبی شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. با توجه

آذرین، دگرگونی، رسوبی و همچنین مجموعه‌های افیولیتی می‌باشد (شکل ۱).

به نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ زاهدان (جمشیدی و همکاران، ۱۳۷۴)، واحدهای زمین‌شناسی شامل: واحدهای



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی (a)، تصویر ماهواره‌ای (b) و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. حروف لاتین بزرگ معرف مناطق مختلف مورد مطالعه می‌باشد.

پارامتر تنسور تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Angelier, 1989, 1991). این پارامترها شامل محورهای اصلی تنش $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ و بسته به نسبت بزرگی تنش اصلی حدواسط σ_2 و تنش‌های اصلی حداکثر σ_1 و حداقل σ_3 به صورت معادله زیر تحت عنوان R معرفی می‌شود که همان نسبت بزرگی بیضی تنش می‌باشد:

رابطه (۱)

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_2} \quad (0 \leq R \leq 1)$$

بر این اساس ۳ رژیم زمین‌ساختی اصلی را می‌توان معرفی کرد: σ_1 عمودی: رژیم تکتونیکی کششی. σ_2 عمودی: رژیم امتدادلغز. σ_3 عمودی: رژیم فشارشی. ترفشارش (Transpression) نوعی دگرشکلی در سامانه زمین ساخت

مواد و روش‌ها

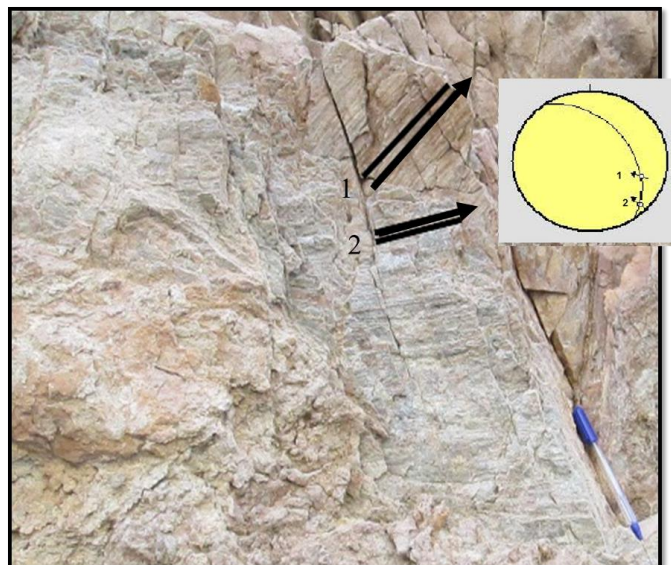
جابه‌جایی در امتداد گسل و ایجاد خش‌لغز یک فرآیند جنبش‌شناختی است. شاخص جنبش‌شناختی در مطالعات ساختاری برای سال‌های زیادی به منظور تشخیص ویژگی‌های تنش دیرینه یک محدوده، از صفحات گسل‌ها، پهنه‌های برشی، رگه‌ها و استیلولیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از صفحات گسلی که دارای خش‌لغز می‌باشند می‌توان به عنوان شاخص حرکتی یا جنبش‌شناختی استفاده نمود (Hancock, 1985; Roberts, 1996; Roberts and Michetti, 2004). در روش‌های بازسازی تنش دیرینه تنوع عناصر ساختاری چون خش‌لغزها را مورد توجه قرار داده‌اند. اندازه و جهت لغزش روی صفحه گسلی برای تعیین ۴

گرفته است، می‌توان به وجود صفحات گسلی با دو دسته خش‌لغز متفاوت که نشان دهنده دو حرکت متفاوت طی تاریخ دگرشکلی در امتداد آنها بوده است اشاره کرد (شکل ۲). به‌طور مثال در این شکل دسته خش‌لغز شماره ۲ بر روی دسته خش‌لغز شماره ۱ اعمال شده و از آن جوانتر است. در برداشتهای صحرایی مشخصات صفحات گسلی، خش‌لغزها و سوی برش و حرکت گسلی در عملیات صحرایی برداشت گردید که عبارت است از: محدوده A، در این محدوده شیل و ماسه‌سنگ‌های کرتاسه فوقانی وجود دارند و توسعه گسل‌های و خش‌لغزهای مربوطه به خوبی در آن مشاهده می‌شود (شکل ۲ و ۳). محدوده B، در رخنمون‌های این محدوده ماسه‌سنگ و آهک‌های ائوسن فوقانی مشاهده می‌شود که اغلب گسل‌ها سازوکار معکوس با مولفه امتدادلغز را نشان می‌دهند (شکل ۴). محدوده C، در این محدوده رخنمون‌های با سن ائوسن میانی-فوقانی که اغلب تحت‌تاثیر گسل‌های معکوس با مولفه امتدادلغز قرار گرفته‌اند مشاهده شد (شکل ۵). در محدوده D رخنمون‌های با جنس ماسه‌سنگ، شیل، آهک و فیلیت با سن پالئوسن و کنگلومراهای الیگو-میوسن رخنمون دارند که تحت‌تاثیر گسل‌های عمدتاً امتدادلغز با مولفه نرمال قرار گرفته‌اند (شکل ۶).

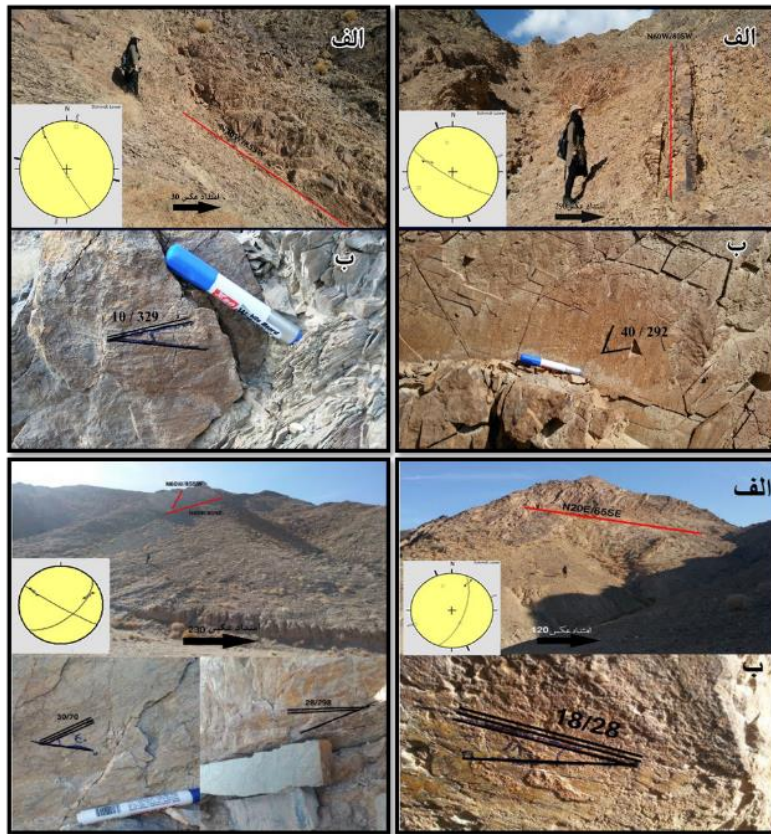
فشارشی است که گسل‌ها عمدتاً اریب لغز هستند که نشان دهنده عملکرد همزمان مولفه‌های شیب‌لغز فشاری و امتدادلغز بر روی سطح گسل در طی دگرشکلی می‌باشد. در این حالت رژیم زمین‌ساخت دارای مولفه فشارش (σ_3 عمودی، R کوچک) و امتدادلغز (σ_2 عمود، R کوچک) است. تراکشن (Transtension) نوعی دگرشکلی در سامانه زمین‌ساخت کششی است که گسل‌ها عمدتاً اریب لغز و نشان دهنده عملکرد همزمان مولفه‌های شیب‌لغز کششی و امتدادلغز بر روی سطح گسل در طی دگرشکلی می‌باشد. در این حالت هم مولفه کشش (σ_1 عمود، R بزرگ) و مولفه امتدادلغز (σ_2 عمود، R بزرگ) عمل کرده است (Angelier, 1994).

مطالعه ساختاری گسل‌ها و خش‌لغزها

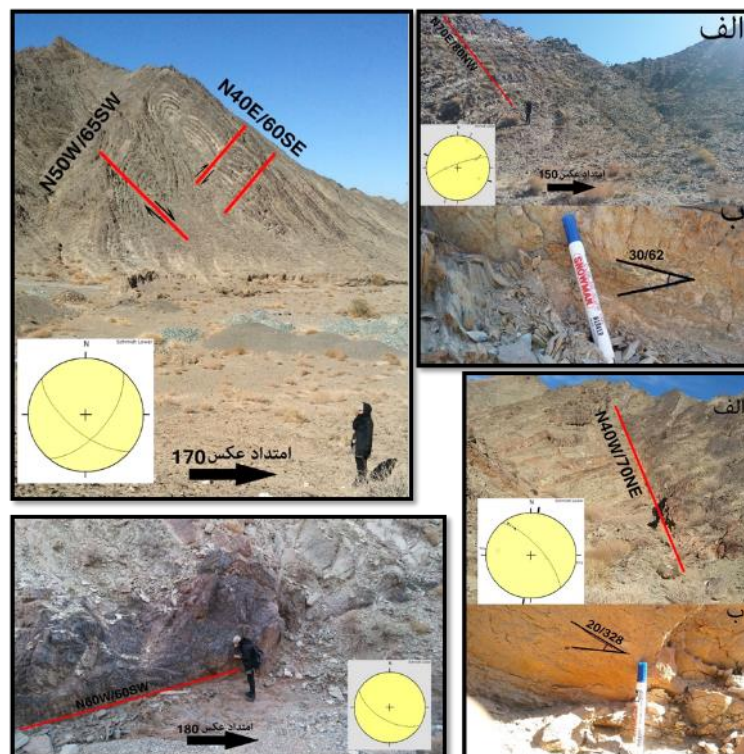
به منظور تعیین پارامترهای تنش دیرینه در منطقه مورد مطالعه سعی شد مشخصات فضایی گسل‌ها و ساختارهای همراه آنها از چهار محدوده متشکل از سنگ‌های دگرشکل شده با سن متفاوت (محدوده‌های A، B، C و D) برداشت گردد (شکل ۱). با توجه به هدف اصلی مقاله سعی شد در برداشت ساختارها تقدم و تاخر رویدادهای زمین‌شناختی مورد توجه قرار گیرد. از جمله ویژگی بارز در منطقه مورد مطالعه که برای تقدم و تاخر رویدادها مورد استفاده قرار



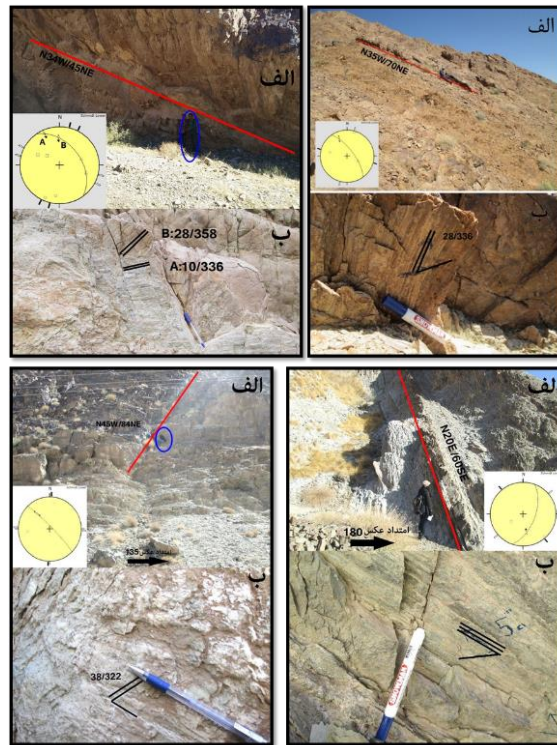
شکل ۲: صفحه گسل با دو دسته خش‌لغز نشان دهنده دو مرحله فعالیت متفاوت، خش‌لغزهای شماره ۲ جوانتر هستند.



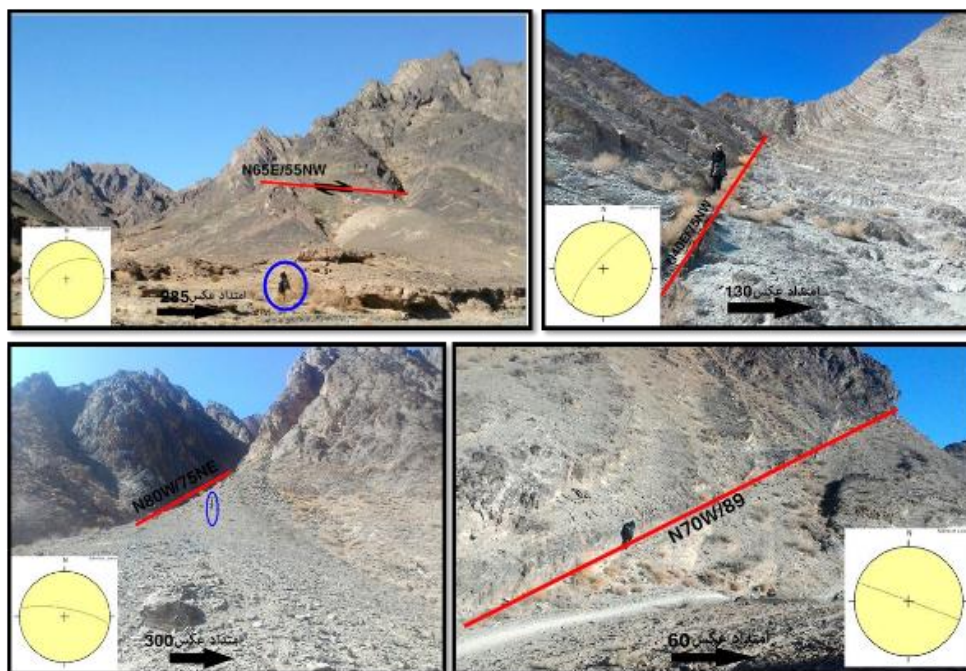
شکل ۳: تعدادی از گسل‌ها و خش‌لغزهای مربوطه برداشت شده از منطقه A. مشخصات صفحه گسلی و جهت لغزش بر روی عکس و تصویر استریوگراف مربوطه مشخص شده است.



شکل ۴: تعدادی از گسل‌ها و خش‌لغزهای مربوطه برداشت شده از منطقه B. مشخصات صفحه گسلی و جهت لغزش بر روی عکس و تصویر استریوگراف مربوطه مشخص شده است.



شکل ۵: تعدادی از گسل‌ها و خش‌لغزهای مربوطه برداشت شده از منطقه C. مشخصات صفحه گسلی و جهت لغزش بر روی عکس و تصویر استریوگراف مربوطه مشخص شده است. شکل بالا سمت چپ نشان دهنده دو دسته خش لغز می‌باشد.



شکل ۶: تعدادی از گسل‌ها و خش‌لغزهای مربوطه برداشت شده از منطقه D. مشخصات صفحه گسلی و جهت لغزش بر روی عکس و تصویر استریوگراف مربوطه مشخص شده است.

پردازش داده‌ها

به منظور بررسی تنش دیرینه در منطقه مورد مطالعه از روش وارون‌سازی چندگانه^۱ استفاده شد. این روش،

تغییریافته روش وارون‌سازی مستقیم^۲ (Angelier, 1984) است. این روش با فرض این واقعیت که خش‌لغزها به عنوان بردار جابجایی بر روی صفحه گسلی معرف امتداد تنش

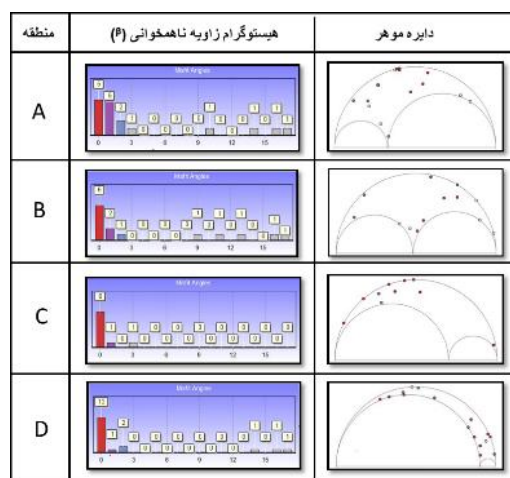
از تعداد راه‌حل‌ها در شبکه نقطه‌ای برای دسته داده‌های ظاهر شده در استریونت (Yamaji et al, 2005) که در $e=0$ تمامی راه‌حل‌ها رسم می‌شود. اما با افزایش مقدار e تعداد راه‌حل‌ها کاهش یافته و میدان‌های تنش ظاهر می‌گردد. در این مرحله برای برآورد تنسور تنش کاهش یافته و مسیر لغزش تئوری، اطلاعات وارد شده خوشه‌بندی می‌شوند. بررسی اولیه خوشه‌ها و زیر دسته‌های به دست آمده نشانگر اعمال فازهای تکتونیکی متفاوت بر روی صفحات گسلی، با مشخصات فضایی مشابه ولی لغزش‌های متفاوت در طی تاریخچه دگرشکلی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. زوایای ناهمخوانی در هر خوشه با محاسبه و مقایسه داده‌های لغزش هیستوگرام، رسم گردید. در این روش به دلیل عدم تبعیت از منحنی گوسی، زوایای ناهمخوانی بیشتر از ۳۰ مورد قبول نیستند (عبادی و دیگران ۱۳۹۴). بنابراین بهینه‌ترین نتیجه براساس زاویه ناهمخوانی کمتر و نسبت بالای تنش نرمال- برشی (دایره موهر) مشخص گردید (شکل ۷). همه اطلاعات استخراج شده لغزش گسلی بر روی نیمکره پایینی، پروژه هم‌مساحت پلات شده‌اند (شکل ۸a). در این شکل استریوگرام سمت چپ و راست به ترتیب نشان دهنده محورهای σ_1 و σ_3 می‌باشند. نسبت تنش (ϕ) در شکل ۸a با طیف رنگی متفاوت نشان داده شده به صورتی که، رنگ بنفش ($\phi=0$) تنش انحرافی فشاری ($\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$)، رنگ سبز تنش انحرافی صفحه‌ای (به صورتی که σ_2 میانگین الگوریتم بین σ_1 و σ_3 است) می‌باشد و رنگ قرمز ($\phi=1$) تنش انحرافی کششی ($\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$) را نشان می‌دهد.

برشی بیشینه می‌باشند، می‌تواند به عنوان مبنایی برای محاسبه امتداد این تنش‌ها با استفاده از اطلاعات برداشت شده از گسل‌های با امتداد و سازو و کار متفاوت به کار رود. بنابراین علاوه بر به دست آوردن تعداد دسته‌های همگن‌تر از گسل‌های با سازوکار و امتداد متفاوت، بهترین تنسور تنش برای یک گروه از گسل‌ها با حداقل جمع زوایای ناهم- خوانی β (کمتر از ۳۰ درجه) و نسبت تنش نرمال- برشی امکان‌پذیر می‌شود. هر تنسور تنش کاهش یافته به دست آمده دارای محورهای تنش اصلی σ_1 ، σ_2 و σ_3 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) و نسبت اختلاف تنش $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ می‌باشد. در این روش، بر مبنای میدان‌های تنش فعال کننده گسل‌ها، آنها را به زیر مجموعه‌های کوچکتر تقسیم و تعداد راه‌حل‌ها از رابطه ۲ به دست می‌آید (Yamaji, 2000).

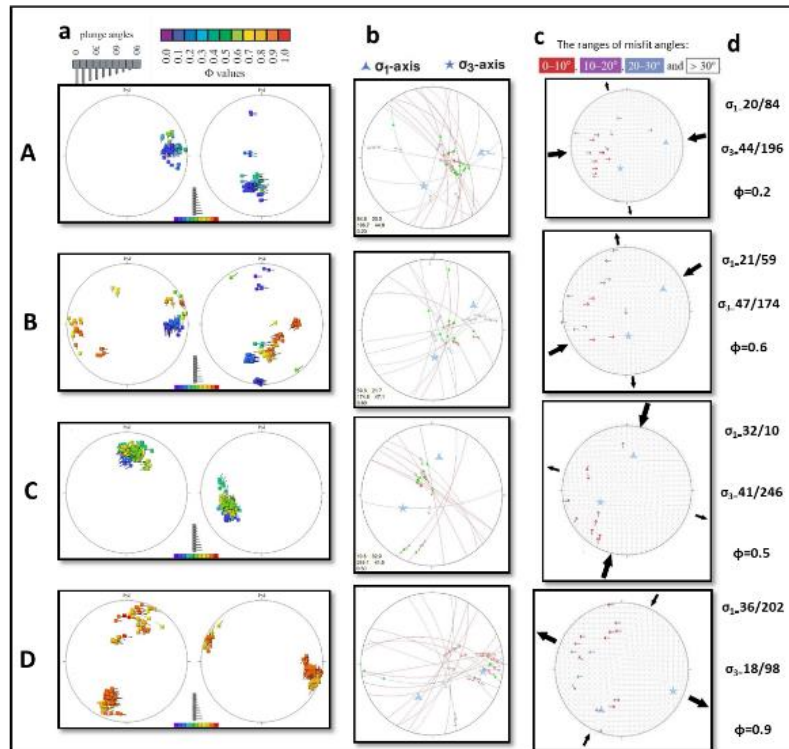
رابطه ۲

$$C_{k=N!/(K!(N-K))}$$

N تعداد کل لغزش‌های گسلی و K زیر دسته‌های ایجاد شده برای وارون‌سازی بوده که بین ۳ تا ۸ متغیر می‌باشد. با افزایش K ، خوشه‌ها کمتر اما زمان محاسبه طولانی‌تر می‌گردد. در محاسبات انجام گرفته، به دلیل قابل تفکیک بودن دسته‌ها و زمان پردازش کمتر از $K=5$ انتخاب گردید (عبادی و دیگران ۱۳۹۴). پس از تصحیح و پردازش داده‌های صحرائی، در نرم افزار MIM، محاسبه تنسور تنش به روش جست‌وجوی شبکه‌ای صورت می‌گیرد، به طوری که در محاسبه تنسور تنش، تنش‌هایی که بیشترین هماهنگی را با داده‌ها دارند، انتخاب می‌شود. در نرم افزار MIM فاکتور افزایشی β بین ۰ تا ۹۹ می‌تواند متغیر باشد که عبارت است



شکل ۷: هیستوگرام زاویه ناهمخوانی (فاصله بین مسیر لغزش مشاهده شده و پیش‌بینی شده است که بین ۰ تا ۱۸۰ درجه در حال تغییر می‌باشد و مقادیر کمتر از ۳۰ درجه قابل قبول است) به همراه دایره موهر که تنش برشی و نرمال را برای هر منطقه برداشت نمایش می‌دهد.



شکل ۸: a: تصویر استریوگرام داده‌های گسلی به همراه موقعیت خش‌لغزها، b: داده‌های لغزش گسل در نیمکره پایینی، پروژه هم مساحت، سر پیکان قطب صفحه و دنباله‌ها مسیر لغزش گسل را نشان می‌دهد. محورهای σ_1 و σ_3 به ترتیب در استریوگرام سمت چپ و راست ترسیم گردیده است. c: دیاگرام تانژانت-خطواره داده‌های لغزش به همراه جهات تنش بیشینه و کمینه، d: پلانژ و آزیموت تنش بیشینه و کمینه و نسبت تنش را بیان می‌کند.

بحث و نتایج

با مشخصات 21/059 و تنش کمینه $\sigma_3=47/174$ می‌باشد که تنش بیشینه در جهت شمال شرق - جنوب غرب و تنش کمینه در جهت شمال غرب- جنوب شرق نمایان گردیده است. نسبت تنش برابر با 0.6 و رژیم تکتونیکی مانند ایستگاه قبل به صورت فشارشی می‌باشد. محدوده C، تشکیل شده از سنگ‌های با سن ائوسن میانی- فوقانی که اغلب گسل‌های معکوس با مولفه امتدادلغز را نشان می‌دهند. رژیم تنش مربوطه، عمدتاً به صورت فشارش است. σ_1 با مشخصات 32/010 در جهت شمال شرق- جنوب غرب جهت‌گیری نموده، و تنش کمینه با مشخصات 41/246 به سمت شمال غرب نمایان گردیده است. نسبت تنش در این محدوده برابر با 0.5 است ($\phi=0.5$). در محدوده D تعدادی رخنمون در ماسه‌سنگ، شیل و آهک‌های، فیلیت‌های پالئوسن و کنگلومراهای الیگو-میوسن وجود دارد. گسل‌های مشاهده شده عمدتاً امتدادلغز است و رژیم تنش مربوطه محاسبه شده توسط نرم‌افزار MIM، یک رژیم تراکششی می‌باشد. نسبت تنش برابر با 0.9 است. در این محدوده $\sigma_1=36/202$ در جهت جنوب غرب و $\sigma_3=18/97$

براساس برداشت‌های صورت گرفته و آنالیز اطلاعات به دست آمده در نرم افزار از مناطق چهارگانه با سنگ‌های با سن متفاوت، نسبت تنش (ϕ) بین 0.3 تا 0.9 در تغییر بوده است. در هر محدوده به منظور دستیابی به یک الگوی مشخص به منظور برآورد جهت‌گیری محورهای تنش، آزیموت و میل محورهای بیشینه و کمینه محاسبه شده، بر روی دیاگرام کانتوری ترسیم و بهترین صفحه‌های سازگار برای محورها بر روی دیاگرام مشخص گردید (شکل ۷، b، c و d). اطلاعات به دست آمده عبارت است از: محدوده A، در این محدوده که عمدتاً شیل و ماسه‌سنگ‌های کرتاسه فوقانی وجود رخنمون دارد تنش‌های اصلی دارای وضعیت فضایی $\sigma_1=20/084$ و $\sigma_3=44/196$ می‌باشند و به عبارتی در جهت شمال شرق- جنوب غرب قرار گرفته است و نسبت تنش برابر با 0.2 است که نشان دهنده یک رژیم تکتونیکی به صورت فشارشی است. محدوده B، تشکیل شده از ماسه‌سنگ و آهک‌های ائوسن فوقانی، که اغلب گسل‌های معکوس با مولفه امتدادلغز را نشان می‌دهند. σ_1

میوسن فوقانی تا پلیوسن فوقانی را تعیین نمودند و به یک چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت حداقل ۶۰ درجه در ۵ تا ۱۰ میلیون سال گذشته با جهت اصلی کوتاه‌شدگی (S1)، از ۹۰ درجه شمالی در اواسط میوسن پایانی، تا ۶۰ درجه شمالی در پلیوسن پایانی، و ۲۵ درجه شمالی در پلیوکواترنری را برای شمال پهنه زمین درز در نظر گرفتند. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در بخش میانی پهنه زمین درز سیستان قرار دارد، مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات جنتزر (Jentzer et al, 2017) در قسمت شمالی این پهنه یکسری شباهت‌هایی را نشان می‌دهد. یکی دیگر از شباهت‌های اساسی این دو مطالعه چرخش خلاف عقربه‌های ساعت جهت کوتاه‌شدگی اصلی (S1) است که در ارتباط با همگرایی صفحه عربستان-اوراسیا است. به این ترتیب که با فشارش صفحه عربستان به اوراسیا و در پی حرکت فراری رو به غرب بلوک افغان در ائوسن منطقه زمین درز سیستان دچار تغییر شکل می‌شود و در نتیجه این تغییر شکل در منطقه گسل‌های امتدادلغز و معکوسی شکل گرفته‌اند که با چرخش سنگ پی این گسل‌ها در منطقه دچار چرخش می‌شوند (Bagheri and Damanigol, 2020). لذا این چرخش باعث تغییر زاویه گسل‌ها نسبت به تنش‌های اصلی شده و منجر به حرکت متفاوت در امتداد آنها می‌گردد. مرحله آخر دگرشکلی نیز همخوانی مناسبی با مطالعات کشتگر و دیگران (۱۳۹۹) دارد. ایشان با بررسی سطوح گسلی موجود در سنگ‌های آهکی ائوسن-الیگوسن و تحلیل تنش دیرین به یک فاز کششی و تراکشی با یک امتداد کشش شمال غرب-جنوب شرق اشاره کرده‌اند و آن را به تاثیر گسل راست لغز زاهدان با امتداد شمالی-جنوبی در منطقه نسبت داده‌اند. لذا آخرین فاز دگرشکلی در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به تاثیر گسل زاهدان به عنوان یک گسل فعال با جابجایی زیاد که از قسمت شرق منطقه مورد مطالعه عبور کرده است نسبت داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

به سمت جنوب شرق نمایان شده است. با استفاده از محور تنش، نسبت ϕ و تقدم و تاخر خش‌لغزهای سطوح گسلی فازهای دگرشکلی، از قدیم به جدید از یکدیگر تفکیک گردید. این اطلاعات ۴ مرحله دگرشکلی به شرح زیر را برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌دهد:

(۱) قدیمی‌ترین مرحله دگرشکلی، یک فاز فشارشی با روند $N84^{\circ}E$ است که قدیمی‌ترین مجموعه‌های سنگی منطقه را تحت تاثیر قرار داده است.

(۲) مرحله دوم دگرشکلی بیانگر جهت فشارش $N59^{\circ}E$ است.

(۳) جوانترین فاز فشارشی روند $N10^{\circ}E$ را نشان می‌دهد. این جهت فشارش در تطابق با جهتی است که برای گسل‌های اصلی در این منطقه به دست آمده است (مثل گسل امتدادلغز راستگرد زاهدان و گسل امتداد لغز راستگرد نصرت‌آباد و گسل‌های معکوس با امتداد شمال-شمال غرب (Berberian et al, 2000; Walker and Khatib, 2006) و همچنین با جهت فشارش به دست آمده توسط GPS (Vernant et al, 2004) همخوانی دارد. در واقع این دگرشکلی همزمان یا بعد از ائوسن اتفاق افتاده و بر طبق شواهد موجود و مطالعات قبلی تا عهد حاضر ادامه دارد.

(۴) جوانترین فاز دگرشکلی، یک رژیم تراکشی در رخنمون‌های پائوسن و الیگوسن-میوسن را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

وارون‌سازی داده‌های جنبش‌شناختی گسل‌ها در واحدهای مختلف با سن متفاوت تغییراتی را در رژیم تنش این محدوده نشان می‌دهد. از نشانه‌های این تغییر، چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت جهت کوتاه‌شدگی اصلی از $N84E$ به $N59E$ درجه در سنگ‌های قدیمی‌تر و سپس $N10E$ درجه در رخنمون‌های جوانتر است. این تغییرات به خوبی در تغییر جهت لغزش بر روی گسل‌های تراستی با مولفه امتداد لغز با دسته خش‌لغزهای متفاوت دیده می‌شود. این نتایج را می‌توان با نتایج به دست آمده توسط جنتزر (Jentzer et al, 2017) برای شمال پهنه زمین درز سیستان مقایسه کرد. جنتزر جهت تنش‌های اصلی (آزیموت S1)، پلیوسن فوقانی تا عهد حاضر، میوسن و

پانویس

1-Method(MIM)
2-Direct inverse method

3-Enhance factor(e)

(References) منابع

- Aghashahi Ardestani, S., 2005. Earthquake and seismicity of Zahedan fault and its effect on the area of Zahedan city, master's thesis, University of Sistan and Baluchistan, 239 p (in Persian).
- Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction, in: Hancock P.L. (Ed.), Continental deformation, Pergamon Press Ltd, Oxford, p. 53-100.
- Angelier, J., 1989. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *J. Struct. Geol.*, v. 11, p. 37-50.
- Angelier, J., 1991. Inversion directe et recherche 4-D: comparaison physique et mathématique de deux méthodes de détermination des tenseurs des paleocontraintes en tectonique défailles. *C.R. Acad. Sci., Paris*, v. 312(B), p. 1213-1218.
- Angelier, J., 1975. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites failles: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques. *CR Acad. Sci.*, v. 281, p. 1805-1808.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 1978-2012, v. 89(B7), p. 5835-5848.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 1978-2012, v. 89(B7), p. 5835-5848.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. and Homam, S.M., 2011. Two sided Asymmetric Subduction: new hypothesis for the tectonomagmatic and metallogenic setting of the Lut Block, Eastern Iran, *Journal of Economic Geology*, v. 3(1), p. 1-14.
- Armijo, R. and Cisternas, A., 1978. Un problème inverse en microtectonique cassante, *CR Acad. Sci. Paris*, v. 287(D), p. 595-598.
- Bagheri, S. and Gol, S.D., 2020. The eastern Iranian orocline, *Earth-Science Reviews*, v. 210, p. 103322.
- Balansa, J., Espurt, N., Hippolyte, J.C., Philip, J. and Caritg, S., 2022. Structural evolution of the superimposed Provençal and Subalpine fold-thrust belts (SE France), *Earth-Science Reviews*, v. 227, p. 103972.
- Camp, V.E. and Griffis, R.J., 1982. genesis and tectonic Setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, Eastern Iran, *lithos*, v. 3, p. 221-329.
- Carey, E. and Brunier, B., 1974. Analyse theorique et numerique d'un modèle mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles., *Conte Rendu Académie Sci. Paris*, v. 279(D), p. 891-894.
- Ebadi, L., Alavi, S.A. and Ghasemi, M., 2014. Paleostress analysis of the Mansour Abad area (southwest of Rafsanjan - Kerman province) by multiple inversion method. *Iranian Journal of Geology*, v. 9(35), p. 43-59 (in Persian).
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis, *J. Struct. Geol.*, v. 3(1), p. 51-65.
- Freund, R., 1970. Rotation of stricke slip faults in Sistan, Southeast Iran, *J. Geol.*, v. 78, p. 188-200.
- Hancock, P.L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice, *Journal of structural geology*, v. 7(3-4), p. 437-457.
- Jamshidi, S., Afsharianzadeh, A.M. and Dehaghi, F., 1994. Geological map 1:250000 of Zahedan, Publications of the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (in Persian).
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M.M. and Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics, *Tectonics*, v. 36(2), p. 321-339.
- Kalantari, M., 2009. Movement relationship between Sefidaba fault and Zahedan fault using morpho-structural indicators and geo-structural seismic data, master's thesis, University of Sistan and Baluchistan, 114 p (in Persian).
- Keshtgar, S., Khatib, M. and Mohammadnia, A., 2020. Reconstruction of the Eocene-Oligocene Paleostress field in the Horamak-Gharqharok region; Strike-slip faults system in eastern Iran (Zahedan fault), *Tectonics*, v. 4(14), p. 60-79 (in Persian).
- Mohammadi, A., Burg, J.P., Bouilhol, P. and Ruh, J., 2016. U-Pb geochronology and geochemistry of Zahedan and Shah Kuh plutons, southeast Iran: Implication for closure

- of the South Sistan suture zone: *Lithos*, v. 248, p. 293-308, doi: 10.1016/j.lithos.2016.02.003.
- Ramsay, J.G. and Lisle, R.J., 2000- The Techniques of Modern Structural Geology, v. 3, Fault slip Analysis and Stress Tensor Calculations, Academic Press, p. 758-810.
- Reches, Z.E., 1987. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition., *Tectonics*, v. 6(6), p. 849-861.
- Roberts, G.P. and Michetti, A.M., 2004. Spatial and temporal variations in growth rates along active normal fault systems: an example from Lazio-Abruzzo, central Italy. *Journal of Structural Geology*, v. 26, p. 683-686.
- Roberts, G.P., 1996. Variation in fault-slip directions along active and segmented normal fault systems, *Journal of Structural Geology*, v. 18, p. 835-845.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. and Amini, S., 2011. Petrological and geochemical constraints on the origin of the Nehbandan ophiolitic complex (eastern Iran): Implication for the evolution of the Sistan Ocean, *Lithos*.
- Shan, Y., Suen, H. and Lin, G., 2003. Separation of polyphase fault/slip data: an objective-function algorithm based on hard division, *Journal of Structural Geology*, v. 25(6), p. 829-840.
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, p. 134-150.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2005. MIM Veiver, Version 4.10. Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto.
- Yamaji, A., 2000. The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data, *Journal of Structural Geology*, v. 22(4), p. 441-452.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H. Y. and Lee, H.Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran, *Lithos*, v. 154, p. 392-405.
- Zhang, B., Liu, S., Lin, C., Shen, W. and Li, X., 2020. Reconstruction of the stress regime in the Jiaolai Basin, East Asian margin, as decoded from fault-slip analysis, *Journal of Structural Geology*, v. 141, p. 104190.