



## بازسازی میدان تنش دیرین ائوسن-الیگوسن منطقه حرمک- قرقروک؛ سیستم گسل‌های امتدادلغز شرق ایران (گسل زاهدان)

شهریار کشتگر<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۲</sup>، علی محمدی نیا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای تکنونیک؛ دانشکده علوم پایه، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند

۲- استاد گروه زمین‌شناسی (تکتونیک)، دانشکده علوم پایه؛ گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

### چکیده

منطقه مورد مطالعه، در حاشیه غربی گسل امتدادلغز راستگرد زاهدان واقع در شرق پهنه زمیندرز سیستم رخنمون دارد. هدف این پژوهش، تعیین میدان تنش دیرین بر پایه مطالعه داده‌های لغزش گسلی ناهمگن و خطواره‌های لغزشی موجود در بلوک‌های آهکی ائوس-الیگوسن است. نتایج بدست آمده موقعیت روند و میل محورهای اصلی را  $\sigma_1 = 45/53$ ،  $\sigma_2 = 207/35$  و  $\sigma_3 = 303/09$  نشان می‌دهد. بر اساس روش "دووجهی راست" و "پهنه‌سازی چرخشی"، مقدار فاکتور شکل  $R' = R(\Phi) = 0.43$  بدست آمده است که این مقادیر بیانگر تاثیر همزمان مولفه‌های فشارش و برش ناحیه‌ای در پهنه چین خورده-رانده سیستم است. همراهی ساختارهای کششی نظیر بودیناژ و شکستگی‌های برشی و گسلش نرمال، حاکی از رخداد یک تنش کششی بیشینه محلی، با راستای  $N340$  است. این نتایج حاکی از رخداد یک دگرشکلی پیشرونده توأم با جابجایی چرخشی عناصر درونی این پهنه امتدادلغز راستگرد می‌باشد. راستای بیشینه تنش کششی محلی از زمان ائوسن تا کنون، حدود ۲۵ درجه دچار چرخش ساعتگرد شده است. قرار گرفتن منطقه قرقروک در محل یک "خم گسلی" در امتداد گسل امتدادلغز راستگرد زاهدان، می‌تواند عامل چرخش ساعتگرد محورهای اصلیتش باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش دیرین، ائوسن، گسل زاهدان، قرقروک، سیستم.



## Reconstruction of the Eocene-Oligocene Paleostress field in the Horamak-Gharqharok region; Strike-slip faults system in eastern Iran (Zahedan fault)

Keshtgar .Sh <sup>1</sup>; Khatib .M.M <sup>2</sup>; Mohammadinia .A <sup>3</sup>

1, 3 -Ph.D. student of tectonic, Faculty of Science, Department of Geology, University of Birjand, , Iran

2- Professor of Tectonic, Faculty of Science, Department of Geology, University of Birjand, , Iran

### Abstract

The study area is exposed in the western margin of the Zahedan dextral strike-slip fault in eastern part of Sistan suture zone. This study investigates the situation of paleo-stress field based on heterogeneous fault slip data and slip-lines in Eocene-Oligocene limestone blocks. The results show the position of the three axes  $\sigma_1=45/53$ ,  $\sigma_2=207/35$ ,  $\sigma_3=303/09$ . Based on the "right Dihedron" and "rotational optimization" methods,  $R'=R(\Phi)=0.43$ , which represents the simultaneous compressional -shear stress component in eastern Sistan fold and thrust belt. Accompaniment of tensional structures such as boudinage, shear fractures and Normal faulting, indicate local Tensional stress with N340 direction. This results, show the occurrence of a progressive deformational phases and rotational displacement of the internal elements in this right-lateral strike-slip fault. The local maximum tensional stress direction in this area, rotated clockwise direction, about  $25^\circ$  from Eocene to recent time. The location of Ghargharook area near the fault-bent, along the Zahedan dextral strike-slip fault, can be caused to clockwise rotation of principal stress axis.

**Keywords:** Paleostress, Eocene, Zahedan fault, Ghargharook, Sistan.

## مقدمه

ماگمایی و دگرگونی، این محققین شرق ایران را به ۵ واحد اصلی تقسیم نموده اند (Jentzer et al., 2017):

۱- بلوک لوت، ۲- بلوک افغان، که پی‌سنگ پرکامبرین-نئوپروتروزوئیک و سنگهای دگرگونی رخساره گرانولیت در آن رخنمون دارند. ۳- کمپلکس "نه" که شامل افیولیت و افیولیت ملائزها و رسوبات فلیشی کمی دگرگون شده به سن سنونین-ماستریشتین هستند. ۴- کمپلکس راتوک؛ که از سنگ‌های دگرگونی بشدت دگرشکل شده و بطور محلی تحت شرایط فشار بالا-دما پایین دگرگون شده، افیولیت ملائز و رسوبات دگرگونی سنونین تشکیل شده است. ۵- حوضه سفیدابه؛ که هر دو کمپلکس راتوک و نه را می‌پوشاند و از نهشته‌های مولاس و توریدایت تشکیل شده و بعنوان یک حوضه پیش قوس معرفی شده است.

در مورد زمان بسته شدن اقیانوس (آبراهه فرعی) تا کنون توافق نظری وجود نداشته است بطوری که برخی زمان برخورد لوت و افغان را ائوسن میانی (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) و برخی اواخر کرتاسه (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et. al., 2013) می‌دانند. ساکانی و همکاران (Saccani et al., 2013) معتقد به رخداد فرورانش بین اقیانوسی رو به شرق هستند و ارجمندزاده و همکاران (Arjmandzadeh et al., 2011) فرورانش را دوسویه به زیر بلوکهای لوت و افغان در نظر گرفته اند. اگرچه برخی محققین نیز اعتقادی به رخداد بازشدگی قاره ای در شرق ایران و فرورانش ندارند (خطیب، ۱۳۷۶؛ Bagheri, 2007). از جمله مطالعات ساختاری اخیر انجام شده در پهنه سیستان می‌توان به ، چرخش گسل‌های امتدادلغز در سیستان (Freund, 1970)، محاسبه گسلش فعال در ناحیه بیرجند (Walker and Khatib, 2006) ، ولکانیسم اواخر سنوزوئیک و محاسبه نرخ گسلش فعال در شرق ایران (Walker et al., 2009)؛

مطالعه دگرشکلی‌های درون مناطق برخوردی و همگرای فعال قاره‌ای منجر به شناخت دقیق تر از ماهیت رژیم‌های تششی حاکم در هر دوره خاص زمین‌شناسی خواهد شد. تنسورهای تنش دیرین یک تفسیر دینامیکی (جهت تنش) بمنظور آنالیز کینماتیک (حرکت) ساختارهای شکننده است. محاسبه جهت لغزش بر روی سطوح با استفاده از داده‌های گسلی پایه که در مطالعات صحرایی جمع‌آوری شده ، انجام می‌گیرد. برای مطالعه تنش دیرین با استفاده از برداشت گسل‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد ، اما همه آنها بر پایه فرضیات مشابهی استوار هستند از جمله: ۱- لغزش بر روی یک صفحه گسل و در جهت تنش برشی حل شده رخ داده باشد. ۲- گسل‌های خاص برهم کنش حرکتی بر روی یک گسل دیگر نداشته باشند و غیروابسته به سایر گسل‌ها باشند. ۳- بلوک‌های بهم پیوسته توسط گسل دچار چرخش نشده باشند. ۴- میدان تنش فعال کننده گسل بصورت وابسته به زمان (Time-dependent) و هموزن باشند. ۵- گسل‌ها روی سنگهایی برداشت شوند که دارای جنس و سن یکسان باشند یعنی رفتار رئولوژیک مشابهی را دارا باشند. تعداد برداشت‌ها در هر محدوده نباید کمتر از ۴ تا باشد. همچنین چون در برداشت‌های صحرایی همیشه کمی خطا وجود دارد، قبل از انجام تحلیل بایستی هر خش لغز دقیقاً روی صفحه برش قرار گیرد.

تکتونیک شرق ایران پیچیدگی‌های زیادی دارد و آن را متأثر از وجود باریکه‌هایی از اقیانوس نئوتتیس در بین بلوک‌های قاره ای افغان در شرق و لوت در غرب می‌دانند (McCall, 1997) که اوایل کرتاسه باز شده است (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) بر اساس مطالعات چینه‌شناسی؛ ساختاری و سن سنجی سنگهای



تنش اصلی از زمان الیگو-میوسن تا کواترنر اشاره نموده، بطوری که نقش مهم جابجایی و چرخش عناصر ساختاری درون پهنه های یرشی امتدادلغز را طی دگرشکلی پیشرونده آشکار می سازد. (Jentzer et al., 2017)

هدف انجام این پژوهش بررسی تغییرات و بازسازی میدان تنش دیرین ائوسن-الیگوسن با استفاده از مشاهدات و برداشت های صحرایی گسل های دارای خش لغز در حاشیه شرقی لوت و مقایسه نتایج بدست آمده با سایر مطالعات انجام شده مناطق همجوار در پهنه سیستان می باشد.

## روش کار

با هدف تحلیل تنش دیرین، در کل محدوده مطالعاتی تعداد ۶۵ عدد خش لغز گسلی (برداشت ها شامل: امتداد و شیب صفحه گسل، زاویه ریک و جهت پلانژ خش لغز، تعیین نوع حرکت گسل) از بلوک های هموزن آهکی ائوسن برداشت شد و در نهایت تعداد ۵۳ گسل دارای خش لغز و پله مطمئن بمنظور پردازش انتخاب گردید. پس از تصحیح خطاهای صحرایی، کلیه داده های گسل ها (قبل و بعد از اعمال برگردان به حالت اولیه) پردازش شدند.

با توجه به اینکه خش لغزهای گسلی برداشت شده فقط مربوط به زمان ائوسن هستند در طی تاریخچه دگرشکلی منطقه، پدیده هایی نظیر چین خوردگی و چرخش لایه بندی رخ داده است. بنابراین لازم است قبل از تحلیل داده ها، عامل چرخش لایه اعمال گردد. بدین منظور بصورت دستی بر روی شبکه استریونت لایه بندی به صورت افقی درآید و همزمان بسته به میزان شیب لایه بندی در هر بخش از منطقه، ریک بردار لغزش به همان میزان به حالت اولیه برگردانده شود. سپس نقطه محل تقاطع صفحه گسل و لایه بندی با نقطه ریک بردار لغزش بدست آمده جدید بر روی یک دایره بزرگ قرار داده شود. در نهایت موقعیت اولیه

میدان تنش دیرین نئوژن در شمال زمیندرز سیستان (Jentzer et al., 2017)، مطالعه افیولیت ملانژهای کمپلکس راتوک (Angiboust et al., 2013)، سن سنجی دگرگونی های فشار بالا و فرآیندهای مخلوط شدگی تکتونیکی کمپلکس راتوک (Brocker et al., 2013)؛ معرفتی اوروکلاین شرق ایران (Bonnet et al., 2018)، تحلیل تنش دیرین در منطقه شیرشتر (سهیمی و همکاران، ۱۳۹۸) و تاریخچه تکتونو-ماگمایی کمپلکس ماهرود (کشتگر و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره نمود.

سامانه گسل های امتدادلغز شرق ایران بعنوان یکی از مناطق کلاسیک زمین شناسی ساختاری از قدیم مورد توجه زمین شناسان خارجی و داخلی بوده است که از جمله مهمترین مطالعات انجام شده می توان به "چرخش گسل های امتدادلغز سیستان، جنوب شرق ایران" اشاره نمود (Ferund, 1970).

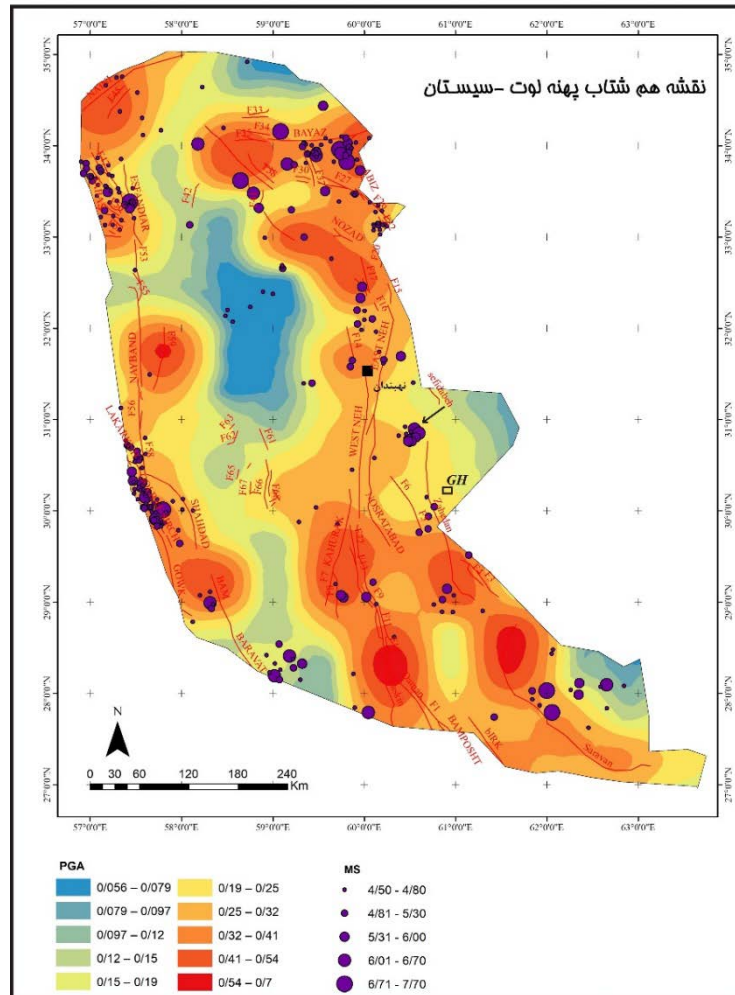
مطالعات انجام شده توسط (Freund, 1970) در شرق ایران حاکی از نحوه عملکرد و جهت یابی و چرخش گسل های امتدادلغز اصلی (با راستای N-S) و شکستگی های برشی فرعی می باشد. بر این اساس راستای تنش فشارشی اصلی در شرق ایران حدود N40 می باشد بطوری که جهت یابی گسل های امتدادلغز راستگرد از N173 تا N230 و قرارگیری گسل های امتدادلغز چپگرد از N270 تا N320 بدست آمده است. علاوه بر این محور چین هایی که توسط گسل های راستگرد بریده و جابجا شده اند بین N280 تا N330 و محور چین هایی که توسط گسل های چپگرد بریده و جابجا شده اند بین N018 تا N348 قرار گرفته اند (Freund, 1970). نتایج بدست آمده از مطالعات این پژوهش با نتایج مطالعات انجام شده توسط (Freund, 1970) سازگاری دارد. از سایر کارهای ساختاری انجام شده در شرق ایران می توان به چرخش محور فشارش بیشینه

ماسه‌سنگ، سیلتستون، کنگلومرا، مارن و آهک‌های نومولیت و آلئولین دار کرم رنگ، تشکیل شده‌اند. در بعضی نقاط، سکانسی از گدازه‌های آتشفشانی بازیک بصورت میان لایه در آنها وجود دارد که بر روی تصاویر ماهواره‌ای (شکل ۳) بخوبی قابل تشخیص است (سکانس ولکانو-سدیمت زیردریایی). بر اساس روابط صحرائی، بدلیل عدم وجود دگرگونی مجاورتی حرارتی در کنتاکت بین آهک‌های ائوسن و گدازه‌های الیگوسن، کنتاکت آنها تکتونیک و بصورت گسله است. مطالعات انجام شده توسط (باقری و بخشی، ۱۳۸۰) ماگمای مافیک نیمه عمیق-خروجی که از کوه لار تا حرمک-قرقروک، (باسن الیگو-میوسن) رخنمون دارند را از نوع لامپروفیرهای شوشونیتی دانسته و آن را مشابه بازالت‌های طغیان رودخانه‌ای (Colombia- river) می‌دانند.

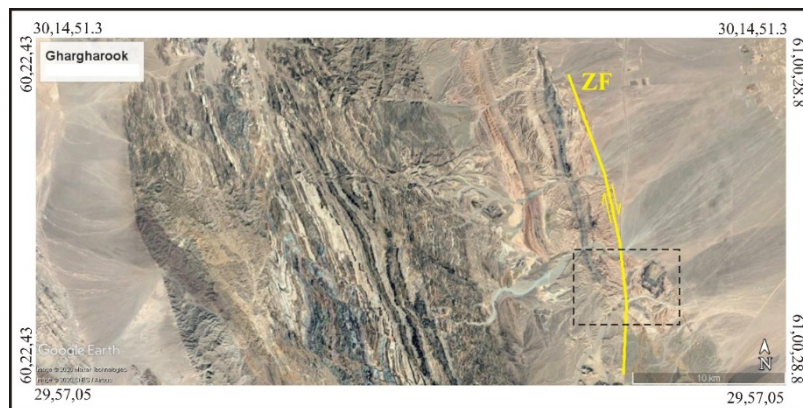
صفحات گسلی و نیز روند و میل خش لغزهای جدید بدست می‌آید. برای استفاده از نرم‌افزار win-tensor و Tectonics Fp مشخصات کلیه صفحات گسلی (قبل و بعد از اعمال چرخش) به صورت Dip و Dip-Dir تبدیل شدند.

### زمین شناسی منطقه

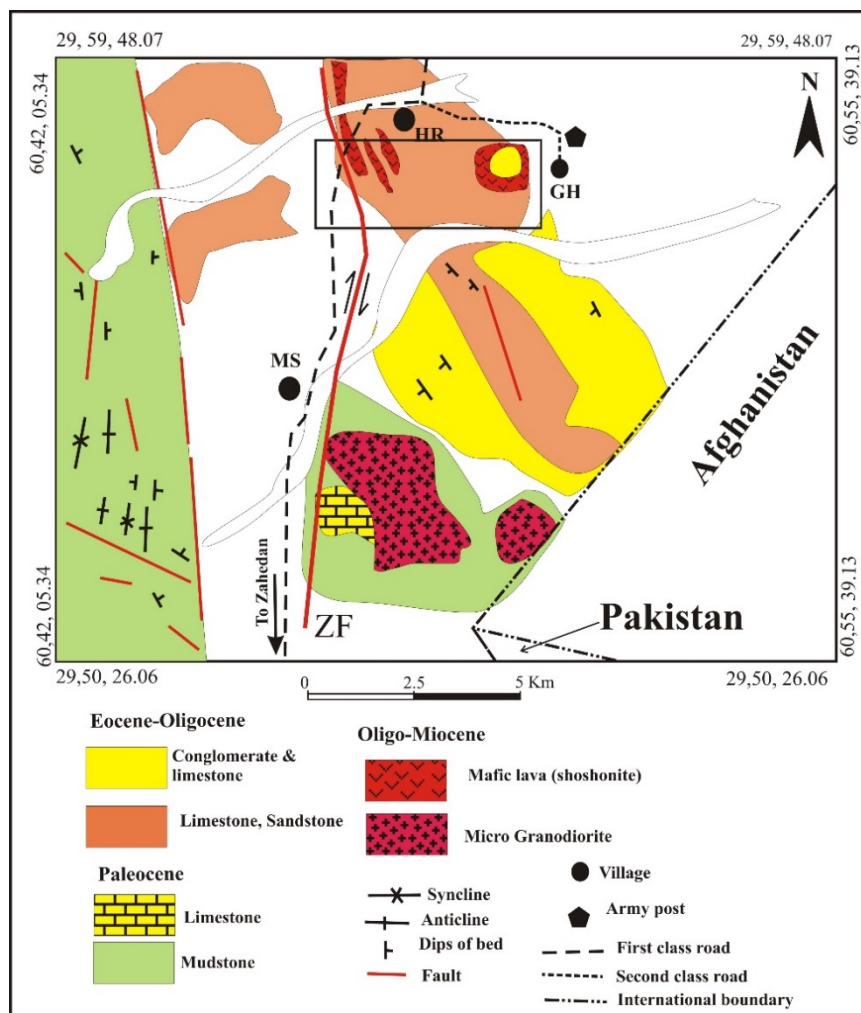
محدوده مورد مطالعه در استان سیستان و بلوچستان و در فاصله حدود ۵۳ کیلومتری شمال زاهدان قرار دارد در حاشیه شرقی پهنه چین خورده-رانده سیستان رخنمون دارد (شکل ۱ و ۲). این محدوده در نقشه چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ زاهدان (Behruzi, 1993) قرار می‌گیرد. در محدوده مورد مطالعه رسوبات فلیشی پالتوسن- ائوسن-الیگوسن، گسترده‌ترین واحد سنگی می‌باشند که از تناوب شیل،



شکل ۱: نقشه هم شتاب لرزه ای تهیه شده برای پهنه لوت-سیستان که پراکندگی کانونهای لرزه ای و موقعیت محدوده مورد مطالعه (کادر سیاه رنگ) در مرز شرقی پهنه چین خورده-رانده سیستان را نشان می دهد.



شکل ۲: تصویر ماهواره ای Google Earth شرق پهنه سیستان، رسوبات فلیشی ائوسن-الگوسن و ماگماتیسیم تیره رنگ شوشونیتی الیکو-میوسن در تصویر مشخص است؛ ZF: خم گسلی (Fault bent) ناشی از گسل زاهدان، کادر نقطه چین سیاه رنگ: محدوده مورد مطالعه.

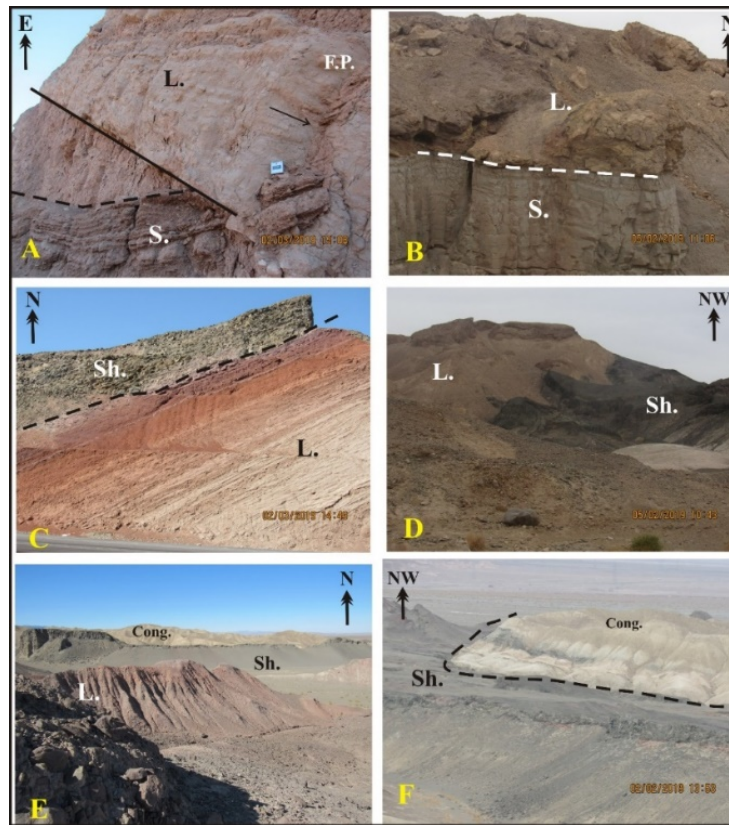


شکل ۳. نقشه‌ی زمین‌شناسی و ساختاری منطقه قرقروک، کادر روی نقشه، محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد، ZF: گسل زاهدان، GH: قرقروک، HR: حرمک.

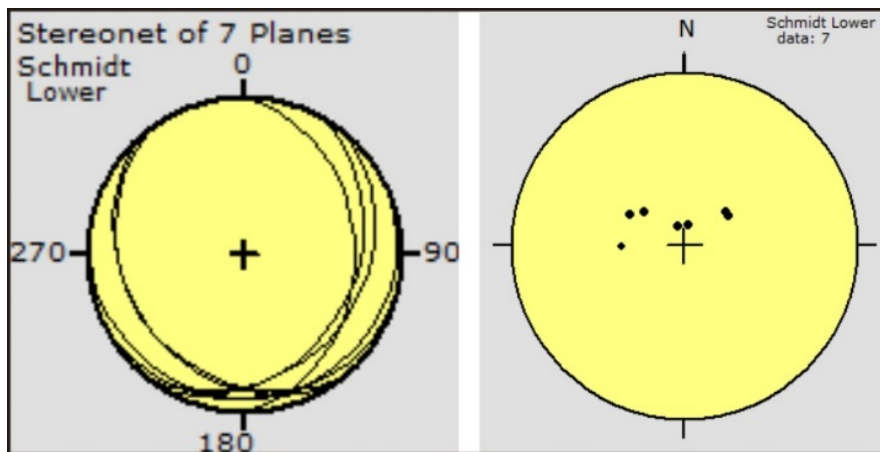
## بحث

تنش و جهات تنش‌های اصلی را بدست آوریم ( Yamaji et al., 2005 ). بر اساس مشاهدات صحرایی وضعیت لایه بندی و بالآمدگی رسوبات از کف رودخانه در منطقه قرقروک در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس برداشت‌های صحرایی بطور کلی لایه‌بندی رسوبات ماسه سنگ و کنگلومرای آهکی منطقه دارای دو روند متفاوت است و شیب آنها بین ۱۰ تا ۳۰ درجه متغیر می‌باشد (شکل ۵).

در روش تحلیل تنش دیرین بر اساس لایه‌های کج شده، فرض بر این است که تنش دیرین عامل گسلش، روی لایه‌های چین خورده یکنواخت اثر می‌کند بطوری که مجموعه گسل‌هایی را داریم که قبل تا همزمان با چین خوردگی تشکیل شده‌اند. بنابراین با انجام برگردان کج-شدگی ها می‌توانیم نسبت فاکتور شکل، شکل بیضوی



شکل ۴: (A) مرز گسله (خط ممتد) بین ماسه سنگ های ائوسن (S) و آهک های الیگوسن (L) غرب قرقروک، (خط چین لایه بندی ماسه سنگ و علامت F.P. سطح یک گسل امتداد لغز چپ گرد را نشام میدهد.؛ B) توالی رسوبی جنوب قرقروک، مرز بین ماسه سنگ های ائوسن (S) و آهک های الیگوسن (L) جنوب منطقه،؛ C) - کنتاکت بین گدازه های مافیک (Sh.) و ماسه سنگ های آهکی (L)؛ D) روانه گدازه های مافیک خروجی الیگوسن (Sh.) قرقروک که بر روی سطح شیب آهک- های ائوسن (L) جریان یافته اند، E) کنتاکت گسلی کنگلومرای آهکی ائوسن-الیگوسن و ماگمای مافیک شوشونیتی (Sh.) قرار گرفته، ماسه سنگ های آهکی (L) . F) چین خوردگی بزرگ مقیاس همزمان کنگلومرای ائوسن-الیگوسن و گدازه- های شوشونیتی الیگو-میوسن .



شکل ۵: وضعیت لایه بندی در رسوبات ائوسن - الیگوسن منطقه قرقروک.

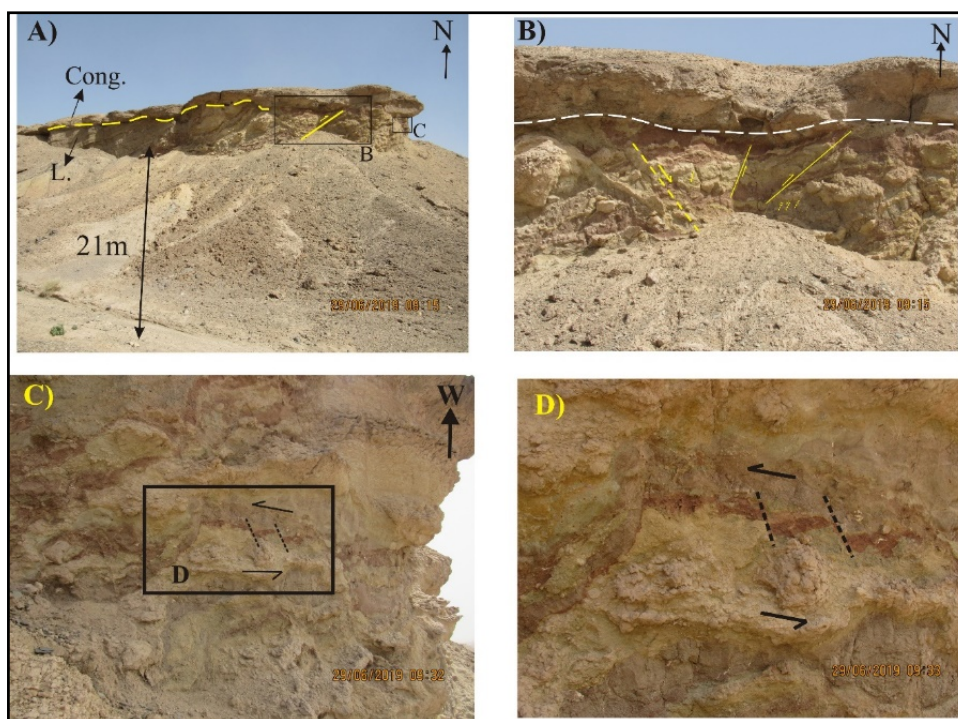




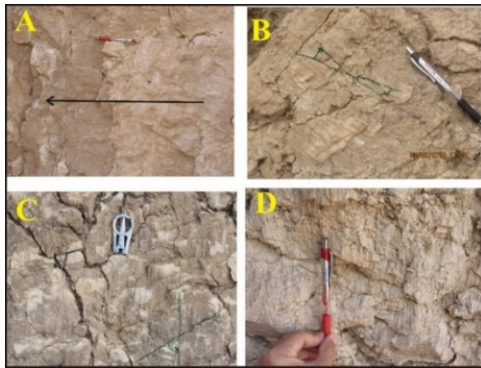
### عناصر ساختاری مرتبط با پهنه‌های برشی

درجه نسبت به راستای برش اصلی ایجاد می‌شوند (شکستگی‌های نوع T). شکستگی‌های برشی (Shear fracture) با محور بیشینه تنش اصلی ( $\sigma_1$ ) زاویه حدود ۳۰ درجه دارند و محور کوچکترین تنش اصلی ( $\sigma_3$ ) عمود بر آن است. بر اساس مشاهدات صحرائی در منطقه مورد مطالعه، هر دو نوع ساختارهای فشرده‌گی و کشیدگی وجود دارد بطوری که شکستگی‌های نوع برشی با مشخصات N90 (شکل ۶) و گسلش معکوس با مشخصات N10E/31SE در آهک‌های دارای لایه بندی با مشخصات N75E/25 SE (شکل ۷) در جنوب محدوده قرقروک با هم وجود دارند. وجود این ساختارها در پهنه برخوردی سیستم نقش مهم گسلش امتدادلغز را در رخداد دگرشکلی‌های پیشرونده و برخاستگی منطقه تأیید می‌کند.

توزیع و میزان دگرریختی در قسمت‌های مختلف پهنه‌های برشی متفاوت است که حاصل تغییر در نسبت برش ساده به برش محض می‌باشد. با توجه به اینکه در این پهنه‌ها، چرخش عناصر ساختاری و تغییر در الگوهای تنش رخ می‌دهد، بازسازی تنش دیرین در این پهنه‌ها می‌بایست با دقت زیاد انجام گیرد تا بتوان به تفسیر ساختاری صحیح دست یافت. در رژیم تکتونیکی برش ساده ساختارهای فشرده‌گی نظیر گسلش معکوس و راندگی، چین‌خوردگی به موازات محور کوچک بیضوی تنش و ساختارهای کشیدگی مانند گسلش نرمال و شکستگی‌های کششی به موازات محور بزرگ بیضوی تنش جهت‌گیری خواهند داشت. فضا‌های شکستگی‌های کششی و رگه‌ها با زاویه ۴۵



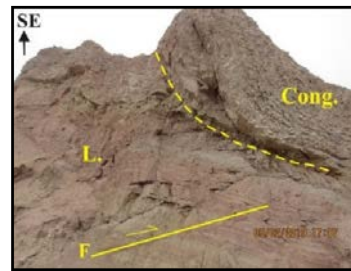
شکل ۶: A) بالا آمدگی و گسلش کنگلومرای نوژن (Cong) و آهک ائوسن-الیگوسن (L) و دگرشیبی زاویه دار بین آنها (خط چین) در جنوب منطقه، علامت F. سطح بلوک گسلی بالاآمده معکوس مزدوج را نشان می‌دهد. کادرها نشانگر محدوده‌های بزرگ شده در تصاویر بعدی هستند؛ B) بلوک گسلی بالاآمده معکوس مزدوج جنوب منطقه؛ C) شکستگی‌های برشی بودین شده در آهک‌های ائوسن، کادر روی عکس نشانگر محدوده نشان داده شده در تصویر بعدی است؛ D) تصویر بزرگ شده از عکس C که بودیناژ و گسلش را در پهنه برشی نشان می‌دهد.



شکل ۹: تصاویری از انواع گسل‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه با پله و خش لغزهای گسلی. (A) گسل امتدادلغز راستگرد (B) گسل امتدادلغز چپگرد با مولفه شیبی (C) گسل معکوس قائم (D) گسل نرمال قائم.

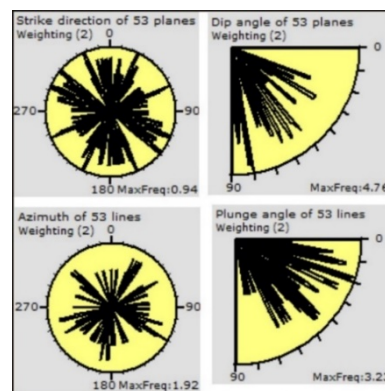
### روش‌های تعیین موقعیت محورهای اصلی تنش

اطلاعات گسل‌های برداشت شده در جداول ۱ (قبل از اعمال برگردان به حالت اولیه) و ۲ (بعد از اعمال برگردان به حالت اولیه) نشان داده شده است. روش دو وجهی راست (R.dihedron) برای تعیین میزان احتمال جهت‌گیری محورهای اصلی تنش کاربرد دارد. مزیت این روش این است که می‌توان فاکتور شکل میدان تنش (R) محاسبه شود، بطور همزمان با هم شکستگی‌های کششی و فشارشی با داده‌های خش لغز مورد استفاده قرار گیرد. در روش بهینه‌سازی چرخشی (R.optim.) عملکردهای مختلف بر اساس ماهیت ساختار زمین ساختی استفاده شده، بهینه‌سازی می‌شود. عملکرد مرکب (F5) اجازه انجام همزمان به حداقل رساندن زاویه عدم انطباق برای خش لغزها، به حداکثر رساندن تنش برشی برای صفحات گسلی و شکستگی‌های برشی، به حداقل رساندن تنش نرمال برای شکستگی‌های کششی و به حداکثر رساندن تنش نرمال برای شکستگی‌های فشارشی و استیلولیت را فراهم می‌سازد. در واقع مقدار عملکرد مرکب (F5) نشان می‌دهد که آیا داده‌های ما قابل مقایسه با تنسور تنش هستند یا خیر.



شکل ۷: گسلش راندگی (معکوس) در آهک‌های ائوسن، جنوب منطقه (N10E/31SE). L: آهک ائوسن، Cong: کنگلومرای الیگوسن.

در محدوده مورد مطالعه هر سه نوع گسل نرمال، معکوس و امتدادلغز در منطقه وجود دارد اما بلحاظ آماری و برترتیب، تعداد گسل‌های نرمال و امتدادلغز بیشتر می‌باشد (شکل ۸). در این شکل نمودار گلسرخی مربوط به صفحات گسلی و خش لغزها صفحات گسلی برداشت شده از منطقه، نیز نشان داده شده اند. از مهمترین نکاتی که در مورد گسل‌های نرمال و معکوس در منطقه قرقروک وجود دارد، این است که شیب شکستگی‌ها در نمودارهای گلسرخی اکثراً بالاتر از ۴۵ درجه است. دلیل شیب غیرعادی و زیاد صفحات گسل‌های نرمال و معکوس (۸۰ تا ۹۰ درجه) (شکل‌های C-۹ و D-۹) را می‌توان به عامل چرخش بلوک‌های گسلی آهکی در حین رخداد یک دگرشکلی پیشرونده در مجاورت گسل امتدادلغز زاهدان نسبت داد.



شکل ۸: نمودار گلسرخی برای کلیه گسل‌های منطقه قرقروک در نیمکره پایین شبکه اشمیت؛



قرار گرفته است، مطابقت دارد. موقعیت روند/میل محورهای اصلی تنش به همراه مقادیر بدست آمده برای نسبت تفاضلی تنش ها یا همان فاکتور شکل میدان (R)، در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می-شود انطباق خوبی بین نتایج حاصل از دو روش دو وجهی راست (R.dihedron) و روش بهینه‌سازی چرخشی (R.optim.) بدست آمده است.

نتایج بدست آمده توسط هر دو روش انطباق قابل قبولی با هم دارند و رخداد یک رژیم تنش کششی-برشی محلی (نه ناحیه ای) با راستای حدود N340 (قبل از اعمال چرخش داده‌ها)، تا حدود N315 (بعد از اعمال چرخش داده‌ها) از زمان ائوسن را نشان می دهد (شکل های ۱۰ و ۱۱). این راستای تنش با نوع رژیم زمین ساختی پهنه سیستان و اینکه منطقه مورد مطالعه در کنار ساختار "خم گسلی" (Fault bent) امتدادلغز راستگرد زاهدان با راستای N-S

جدول ۱: مشخصات گسل‌های برداشت شده از منطقه (قبل از اعمال برگردان به حالت اولیه)؛ علائم: Strike/Dip=امتداد و شیب صفحه گسل، Azimut/Dip=آزیموت و شیب صفحه گسل، Dip Direction=جهت شیب صفحه گسل، Dip=مقدار شیب صفحه گسل، Azim./R.=آزیموت روند خش لغز، Plunge/R.=مقدار میل خش لغز، Sence=جهت حرکت و نوع گسل، Rake=زاویه ریک خش لغز، GPS-موقعیت جغرافیایی برداشت شده.

ID	Strike/Dip	Azimuth/Dip	DipDirection	Dip	Azim./R.	Plunge/R.	Sence	Rake	GPS
F1	N80E/90	80/90	170	90	80	0	D	0	166E
F2	N75W/60NE	285/60NE	15	60	318	40	S	50N	
F3	E-W/40S	90/40S	180	40	198	40	N	76S	
F4	N25E/80SE	25/80SE	25	80	92	90	S	85N	168E
F43	N70E/40NW	70/40NW	340	40	282	24	S	40S	193E
F11	N20W/82NE	340/82NE	70	82	94	90	N	85S	174NE
F12	N40E/44NW	40/44NW	310	44	5	30	D	40N	175NE
F13	N15W/70NE	345/70NE	75	70	74	70	N	90	
F15	N75W/77SW	285/77SW	195	77	194	78	N	90	
F16	N15W/70SW	345/70SW	255	70	346	0	S	0	177NE
F17	N70E/60NW	70/60NW	340	60	340	60	X	90	
F18	N20W/40NE	340/40NE	70	40	70	40	N	90	
F19	N30E/80SE	30/80SE	120	80	30	0	D	0	178NE
F20	N65E/60SE	65/60SE	155	60	88	33	S	40N	181W
F21	N35E/90	35/90	125	90	125	90	I	90	
F24	N30W/70NE	330/70NE	60	70	332	0	N	0	
F25	N30E/45SE	30/45SE	120	45	60	26	D	40N	185W
F26	N60W/63NE	300/63NE	30	63	108	20	D	20S	
F27	N24W/80SW	336/80SW	246	80	338	6	D		
F28	N53w/55NE	307/55NE	37	55	320	20	S	24N	185W
F30	N65E/35SE	65/35SE	155	35	208	23	N	58S	
F31	N25W/60SW	335/60SW	65	60	60	60	I	75N	
F32	N70W/65NE	290/65SE	20	65	102	16	S	18S	188W
F33	N55W/53SW	305/53SW	305	53	255	40	N	72N	
F34	E-W/60N	90/60N	0	60	80	18	S	20N	
F37	N5E/70SE	05/70SE	95	70	160	50	D	54S	188W
F38	N30W/43SW	330/43SW	240	43	234	44	N	86S	



F39	N35E/62SE	35/62SE	125	62	204	20	S	23S	199W
F40	N10W/68NE	350/68NE	80	68	120	60	I	70S	
F41	N-S/74W	00/74NW	270	74	218	68	X	72S	
F42	N10E/31SE	10/31SE	100	31	10	0	X	0	
F50	N50E/62NW	50/62NW	320	62	300	60	S	80N	
F51	N-S/55W	00/55W	270	55	338	30	N	38N	
F52	N35E/73SE	40/73SE	125	73	144	72	D	86S	
F53	N75W/85SW	285/85SW	195	85	234	83	N	86N	
F54	E-W/40S	90/40S	180	40	192	40	S	80S	
F5	N15W/55NE	345/55NE	75	55	4	22	S	28N	
F6	N15E/65SE	15/65SE	105	65	180	24	D	28S	
F7	N60W/55SW	300/55SW	210	55	210	55	N	90	
F8	E-W/40N	90/40N	0	40	24	38	I	70N	
F9	N45E/20SE	45/20SE	135	20	192	10	I	34S	
F60	N55W/90	305/90	215	90	306	20	I	20N	257 S
F61	N80W/90	280/90	280	90	10	12	D	66S	258 S
F63	N-S/ 80 E	00/80E	90	80	0	0	D	0	259 S
F64	N-S/55 E	00/55E	90	55	83	55	I	64N	260 S
F65	E-W/ 35 N	90/35N	0	35	38	29	I	65N	261 S
F66	N65E/65NW	65/65NW	335	65	328	65	I	87S	
F67	N70E/05 NW	70/05NW	340	5	28	4	N	40N	
F68	N70W/ 65SW	290/65SW	200	65	188	65	N	86S	
F69	N65W/ 80NE	295/80NE	35	80	80	35	N	90	
F70	N30W/32SW	330/32SW	240	32	210	30	D	65S	
F71	N30E/60NW	30/60NW	300	60	260	52	N	66S	

جدول ۲: مشخصات گسل‌های برداشت شده از منطقه (بعد از اعمال برگردان به حالت اولیه).

Dip Direction = جهت شیب صفحه گسل، Dip = مقدار شیب صفحه گسل، Azim./R. = آزیموت روند خش لغز،

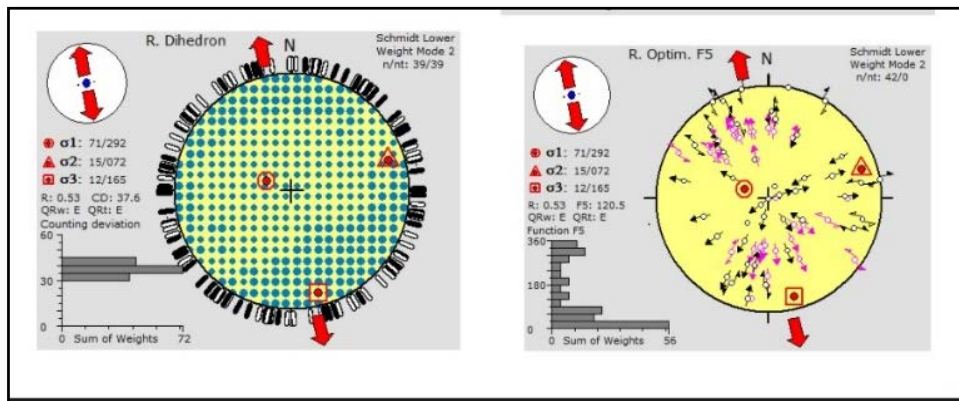
Plunge/R. = مقدار میل خش لغز، Sence = جهت حرکت و نوع گسل، Rake = زاویه ریک خش لغز،

Restoration = برگردان به حالت اولیه، Bedding = امتداد و شیب لایه بندی رسوبی، GPS - موقعیت جغرافیایی .

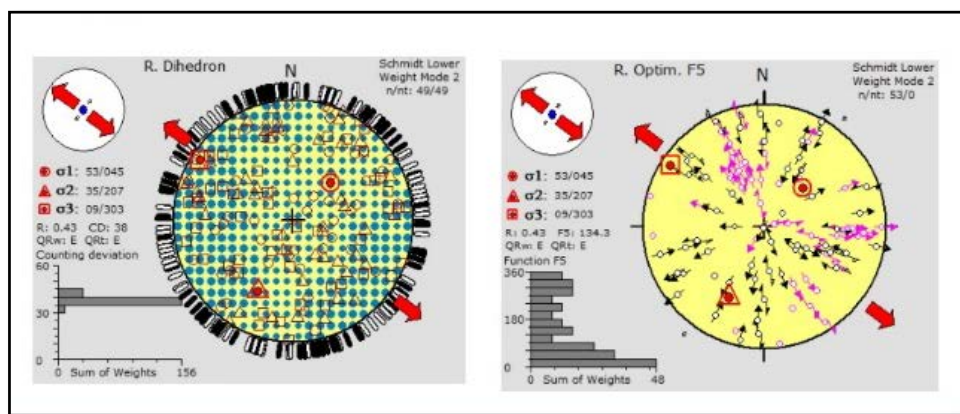
ID	Dip Direction	Dip	Azim./R.	Plunge/R.	Sence	Rake"	Restoration.	Bedding	GPS
F1	350	85	80	30	D	30N	N80E/85NW	N-S / 30 W	166E
F2	30	60	310	18	S	18N	N60W/60NE		
F3	150	50	69	11	N	60S	N60E/50SE		
F4	298	72	270	70	S	80S	N28E/72NW		
F43	200	20	254	10	S	35N	N70W/20SW		
F5	74	65	352	34	S	38N	N16W/65NE		
F6	102	56	182	12	D	16S	N12E/56SE	N80W/10SW	257- S
F7	216	45	214	45	N	84S	N54W/45SW		
F8	15	48	22	48	I	80S	N75W/48NE		
F9	108	40	192	6	I	7S	N18E/40SE		
F60	218	80	304	26	D	25N	N52W/80SW		



<b>F61</b>	194	80	127	64	S	66S	N76W/80SW	N80W/10SW	258-S
<b>F63</b>	85	70	356	10	D	10N	N05W/ 70 E		259-S
<b>F64</b>	80	55	33	44	I	76N	N10W/55 NE		260-S
<b>F65</b>	0	50	34	44	I	66N	E-W/50 N		261-S
<b>F66</b>	343	62	316	58	I	78S	N73E/62NW		
<b>F67</b>	4	25	24	22	N	70S	N86W/25NE		
<b>F68</b>	204	55	190	54	N	82S	N66W/ 55SW		
<b>F69</b>	295	90	130	86	N	86S	N65W/ 90		
<b>F70</b>	255	25	208	20	D	46S	N15W/25SW		
<b>F71</b>	305	64	246	48	N	54S	N35E/64NW		
<b>F11</b>	64	70	118	58	N	62S	N26W/70NE		174-NNE
<b>F12</b>	336	50	28	38	D	52N	N66E/50NW	N40E/25SE	
<b>F13</b>	63	55	100	38	N	66S	N27W/55NE		175-NNE
<b>F15</b>	204	65	160	56	N	66S	N66W/65SW		
<b>F16</b>	260	80	346	18	S	20N	N10W/80SW		
<b>F17</b>	336	86	54	75	X	76N	N66E/86NW		
<b>F18</b>	38	30	82	22	N	48S	N52W/30NE		177-NNE 178-NNE
<b>F19</b>	114	60	44	4	D	6N	N24E/60SE		
<b>F20</b>	170	20	100	6	S	22N	N80E/20SE		
<b>F21</b>	122	65	120	64	I	87S	N32E/65SE		
<b>F25</b>	100	60	58	52	N	66N	N10E/60SE		181-W
<b>F26</b>	34	85	120	32	N	32S	N60W/85NE		
<b>F27</b>	246	80	335	6	D	06N	N24W/80SW		
<b>F28</b>	40	80	314	18	D	18N	N50W/80NE		
<b>F29</b>	60	90	60	90	S	25N	N60E/90		
<b>F30</b>	154	40	232	10	N	15S	N64E/40SE		
<b>F31</b>	270	34	254	38	I	85N	N20W/34SW	N35W/25SW	
<b>F32</b>	22	83	110	30	S	30S	N68W/83NE		185-W
<b>F33</b>	200	30	240	25	N	54N	N70W/30SW		
<b>F34</b>	12	78	92	40	S	40S	N78W/78NE		
<b>F37</b>	90	90	180	40	D	40S	00/90		
<b>F38</b>	248	20	242	22	N	86S	N22W/20SW		188-W
<b>F39</b>	114	30	30	2	S	05N	N24E/30SE		
<b>F40</b>	257	86	170	60	I	60S	N13W/86SW		
<b>F41</b>	278	55	225	42	X	55S	N08E/55NW		
<b>F42</b>	84	50	8	16	X	22N	N06W/50NE		
<b>F49</b>	65	90	155	79	S	25N	N65E/80SE		
<b>F50</b>	320	60	290	54	N	72S	N50E/60NW		
<b>F51</b>	285	40	310	36	D	60N	N15E/40NW	199-W	
<b>F52</b>	120	84	194	62	N	62S	N30E/84SE		
<b>F53</b>	190	68	258	43	S	38N	N80W/68SW		
<b>F54</b>	146	30	184	24	I	56S	N56E/30SE		



شکل ۱۰: نتایج تحلیل تنشور تنش برای گسل های منطقه قرقروک "قبل" از اعمال برگردان به حالت اولیه (Restoration)



شکل ۱۱: نتایج تحلیل تنشور تنش برای گسل های منطقه قرقروک "بعد" از اعمال برگردان به حالت اولیه (Restoration)

جدول ۳: مشخصات محورهای اصلی تنش قبل و بعد از اعمال چرخش داده‌ها بر اساس داده‌های روش R.Dih.

Pre-rotation				After-rotation			
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	R	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	R
71/292	15/72	12/165	0.53	53/45	35/207	09/303	0.43



### شاخص شکل بیضوی تنش ( $R'$ )

برای  $R'=2$  امتدادلغز فشاری ،  $R'=2.5$  برای فشاری محض تعیین شده است. مقادیر محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه در جدول ۴ خلاصه شده است. بر این اساس مقدار  $R'=0.43$  مشابه مقدار بدست آمده برای  $R$  می باشد ( $R=R'$ ) و آن را تایید می نماید.

این شاخص عددی تابعی از موقعیت محورهای اصلی تنش و شکلی از بیضوی تنش است که توسط (Delvaux, 1997) بصورت زیر تعریف شده است :

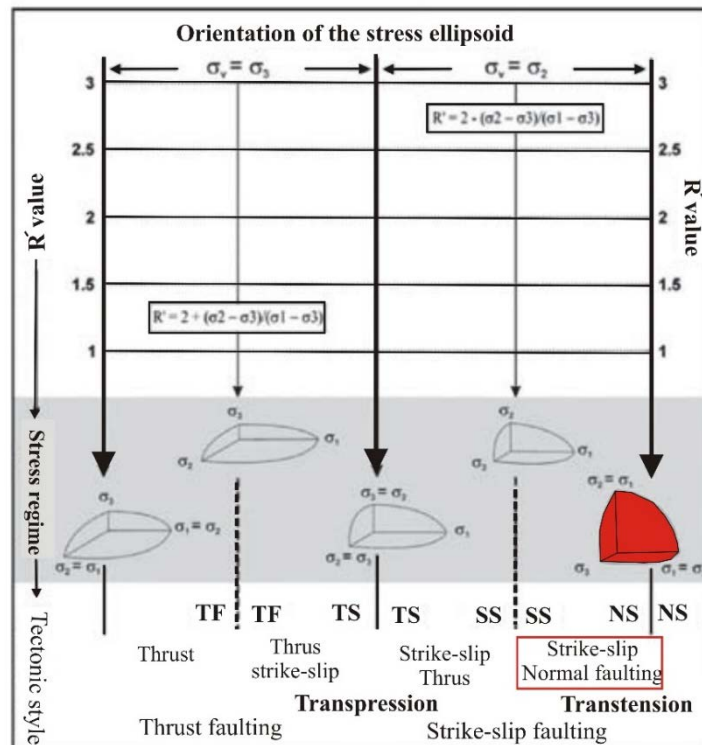
در نتیجه با مقایسه مشاهدات صحرایی و تحلیل استریوگراف ها، وقوع رژیم زمین ساختی امتدادلغز کششی (بصورت محلی نه ناحیه ای) در این بخش از پهنه سیستان برای منطقه قرقروک قابل اثبات است (شکل ۱۲).

الف- اگر  $\sigma_1$  قائم باشد (رژیم تنش کششی):  $R=$   
 ب- اگر  $\sigma_2$  قائم باشد (رژیم تنش امتدادلغز):  $R'$   
 ج- اگر  $\sigma_3$  قائم باشد (رژیم تنش فشاری):  $R'=2-R$   
 $R'=2+R$

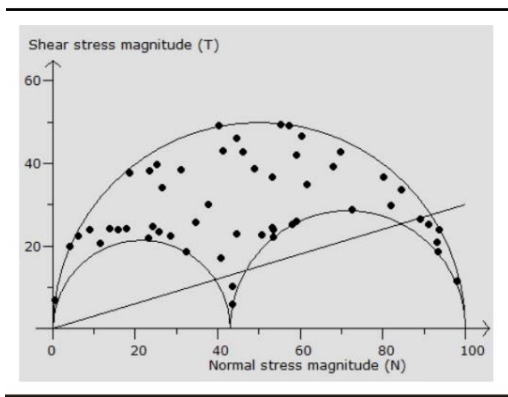
مقادیر عددی  $R'=0.5$  برای کشش محض ،  $R'=1$  برای کشش امتدادلغز ،  $R'=1.5$  برای امتدادلغز محض ،

جدول ۴: پارامترهای محاسبه شده و نوع رژیم تکتونیکی (محلی) بدست آمده از داده‌های منطقه قرقروک

Pre-rotation							
R	R'	R'- Index	n/nt	SHmax	SHmin	Reg.	Tectonic regime
0.53	0.53	$R=R'$	42/0	78	168	NF	Tensional
After-rotation							
0.43	0.43	$R=R'$	53/0	37	74	NF	Tensional



شکل ۱۲: نمودار تعیین رژیم های تنش، نوع گسلش بر اساس اندیس رژیم تنش ( $R'$ ) و جهت یابی بیضوی تنش در منطقه مورد مطالعه (قرمز رنگ) که یک رژیم امتدادلغز با مولفه کششی غالب را نشان می دهد؛ با تغییرات اقتباس از (Delavaux, 1997).



شکل ۱۳- دایره مور سه بعدی برای گسل های منطقه مورد مطالعه که رژیم امتدادلغز (wrench) را نشان می دهد.

### دایره مور

برای بررسی وضعیت قرارگیری محورهای تنش و بدست آوردن رژیم تنش حاکم و فاکتور شکل ( $R$ ) می توان از نمودار موهر نیز استفاده نمود. برای رسم دایره

موهر از پردازش داده های گسلی منطقه قرقروک توسط نرم افزار 8 wintensor بهره گرفته شد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بر این اساس رژیم زمین ساختی امتدادلغز (Wrench) برای کل داده های محدوده مورد مطالعه بدست آمده است.

### نتایج

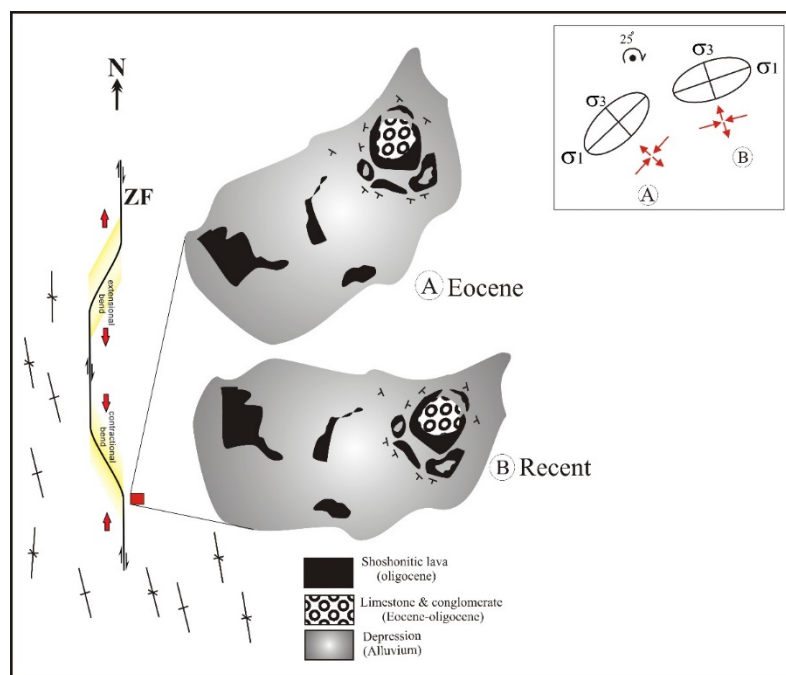
نتایج حاصل از تحلیل تنش دیرین در آهک های ائوسن منطقه قرقروک واقع در پهنه چین خورده-رانده سیستان حاکی از غالب بودن حرکات امتدادلغز در شرق ایران است.



برش نقش داشته‌اند گرچه در محدوده مورد مطالعه، بطور محلی، نقش مولفه کششی موثرتر و غالب‌تر می‌باشد. تحلیل تنش دیرین در نهایت موجب شناسایی یک فاز تنش کششی غالب با راستای حدود N340 (قبل از اعمال چرخش داده‌ها)، تا حدود N315 (بعد از اعمال چرخش داده‌ها) از زمان ائوسن را نشان می‌دهد. بنابراین بنظر می‌رسد عناصر ساختاری و موقعیت اولیه محوره‌های اصلی تنش درون این پهنه برشی راستگرد، طی رخداد یک دگرشکلی پیشرونده دچار چرخش شده‌اند بطوری که راستای تنش کششی قائم "محلی"، از زمان ائوس تا کنون حدود ۲۵ درجه دچار چرخش ساعتگرد شده است و دلیل آنرا می‌توان قرار گرفتن منطقه قرقروک در محل یک ساختار "خم گسلی" در امتداد گسل امتدادلغز راستگرد زاهدان دانست.

مدل پیشنهادی و نقشه ساختاری محوره‌های تنش دیرین ائوسن-الیگوسن منطقه قرقروک در شکل ۱۴ ارائه شده است.

با توجه به رژیم زمین ساخت فشارشی ناحیه ای (حدود N40) ناشی از برخورد بلوک‌های لوت و افغان در زمان ائوسن میانی-بالایی در شرق ایران، و فعال بودن گسل‌های امتدادلغز اصلی شمالی-جنوبی نظیر گسل‌های زاهدان و نهبندان در شرق لوت و گسل هریرود در شرق ایران، تحلیل تنش دیرین از پیچیدگی‌هایی برخوردار است که می‌بایست مدنظر قرار گیرد. از جمله این که الگوی گسل خوردگی منطقه ممکن است توسط حوادث دگرشکلی بعدی تحت تاثیر قرار گیرد و بسته به موقعیت صفحه گسل نسبت به میدان تنش، فراخاست متفاوت و چرخش بلوک‌های گسلی در بخش‌های مختلف پهنه‌های برشی شود. بر اساس این پژوهش، مقدار مولفه شکل میدان  $R=0.43$  ( $\Phi$ ) و موقعیت روند و میل محوره‌های اصلی  $\sigma_1=45/53$ ،  $\sigma_2=207/35$  و  $\sigma_3=303/09$  و با استفاده از روش "دووجهی راست" و همچنین روش "بهینه‌سازی چرخشی"، مقدار فاکتور شکل  $R(\Phi)=0.43$  بدست آمده است. این امر نمایانگر محیط زمین ساختی امتدادلغزی است که در آن هم مولفه فشارش و هم مولفه



شکل ۱۴: مدل ساختاری پیشنهادی سیستم فشارشی-برشی ناحیه ای و کشش محلی غالب منطقه قرقروک، جهت یابی بیضوی تنش و چرخش محور اصلی تنش به مقدار ۲۵ درجه از زمان ائوسن (A) تا عهد حاضر (B)؛ کادر قرمز رنگ: موقعیت منطقه قرقروک کنار خم گسلی (Fault bent) زاهدان، ZF: گسل زاهدان.

2011. Two-asymmetric subduction: implications for tectonomagmatic and metallogenic evolution of the Lut Block, eastern Iran, *J. of Economic Geology*, 1, 1-14.

Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J. C. M., Omrani, J., & Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic "mélange" Eastern Iran, *Lithos*, 156, 139-158.

Bonnet, G., Agard, P., Angiboust, S., Monie, P., Jentzer, M., Omrani, J. & Fournier, M., 2018. Tectonic slicing and mixing processes along the subduction interface: The Sistan example (Eastern Iran), *Lithos*, 310, 269-287.

Bagheri, S. The exotic Paleo-Tethys terrane in central Iran: newgeological data from Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam areas, 2007. Ph.D.

Bagheri, S. & Damangol, S.H., 2020. The eastern Iranian Orocline . *Earth –Science Review*, 210, 1- 43.

Bagheri, S., Aref Nejad, M. & Yabaloui, M., 2009. Tectonic history of the Lut Block in Nehbandan area, Eastern Iran, *Swiss geological Meeting, Neuchatel, Tectonic Session*.thesis, University of Lausanne, Lausanne, Switzerland.

Behruzi, A., 1993. Geological map of Zahedan (1:250, 000). Geological survey of Iran , Tehran.

Bröcker, M., Rad, G. F., Burgess, R., Theunissen, S., Paderin, I., Rodionov, N., & Salimi, Z., 2013. New age constraints for the geodynamic evolution of the Sistan Suture Zone, eastern Iran. *Lithos*, 170, 17-34.

Camp, V.E. & Griffis, R.J., 1982. character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *lithos*, 15, 221- 239.

Delavaux, D, Moeys, R., Stapel, G., Pettit, V., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. & Sankov, V., 1997. paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part 2. *Tectonophysics*, 282, 1-4, 1- 38.

Freund, R., 1970. Rotation of strike-slip faults in Sistan, southeast Iran: *Journal of Geology*, 78, 188-200.

## سپاسگزاری

نویسندگان این پژوهش بر خود لازم می دانند از جناب سرهنگ جواد رفیعی فرماندهی محترم هنگ مرزی زاهدان (گروهان مرزی قرقروک) و نیز جناب سرهنگ حسین نوری مختار (رییس دفتر تحقیقات کاربردی مرزبانی استان سیستان و بلوچستان) بابت انجام هماهنگی های لازم و نیز همراهی در منطقه قرقروک، صمیمانه قدردانی نمایند.

همچنین از آقای دکتر ساسان باقری، عضو هیات علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان بابت در اختیار قراردادن مطالعات انجام شده قبلی شان در منطقه مورد مطالعه سپاسگزاریم.

## منابع

باقری، س.، بخشی، م.، ۱۳۸۰. ماگماتیسم لامپروفیریک شوشونیتی در منطقه زمیندز سیستان- شرق ایران، بیستیمین گردهمایی علوم زمین ، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

خطیب، م.م.، ۱۳۷۶. هندسه پایانه گسلهای امتدادلغز با نگرشی ویژه بر گسلهای خاور ایران؛ رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی.

سهیمی، ا.، موسوی، م.، خطیب، م. م.، ۱۳۹۸. تحلیل تنش دیرینه در منطقه شیرشتر (یکی از شاخه های شمالی گسل نهندان)، فصلنامه زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۹، ۳، ۳۱۵-۳۰۰.

کشتگر، ش.، باقری، س.، بومری، ۱۳۹۸. جایگاه تکتونیکی کمپلکس ولکانو- پلوتونیک ماهیرو: نگرشی متفاوت بر تاریخچه ژئودینامیکی شرق ایران. فصلنامه علوم زمین، ۱۱۳، ۱۴۴-۱۳۱.

Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M. & Homam, S.M.,

- Walker R. T. & Khatib, M. M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran., *Tectonics*, 35, 1-17.
- Walker, R.T., Gans, P., Allen, M.B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N. & Zarrinkoub, M., 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 177(2), 783-805.
- Yamaji, A., Tomita, S. & Otsubo, M., 2005. Bedding tilt test for paleostress analysis, *Journal of Structural Geology*, 27, 1, 161-170.
- Zarrinkoub, M.H., Chung, S.-L., Chiu, H.-Y., Mohammadi, S. S., Khatib, M.M., & Lin, I.-J., 2010. Zircon U–Pb age and geochemical constraints from the northern Sistan suture zone on the Neotethyan magmatic and tectonic evolution in eastern Iran., *GSA conference on “tectonic crossroads: evolving orogens in Eurasia-Africa-Arabia”*, Oct. 4-8, Ankara, Turkey.
- Zarrinkoub, M.H., Pang, K.N., Chung, S.L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y. & Lee, H.Y. 2012. Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos*, 154, 392-40.
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M. M. & Whitechurch, H. 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics*, 36(2), 321-339.
- McCall, G. J. H., 1997. The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(6), 517-531.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Yang, H.M., Chu, C.H., Lee, H.Y. & Lo, C.H. 2012. Age geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chemical geology*, 306-307, 40-53.
- Saccani, E., Delavari, M., Beccaluva, L. & 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*, 117, 209-228.
- Tirrul R, Bell L.R. & Griffis R.J., Camp, V.E. 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran. *Geological Society of American Bulltein*, 94, 134-150.