

تعیین وضعیت تنش و تغییرات رژیم تکتونیکی در ساختارهای شکننده ارتفاعات چاه یوسف (شرق گناباد)

فرهاد زارعی^(۱)، فرزین قائمی^(۲) و فرخ قائمی^(۳)

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. کارشناس ارشد تکتونیک، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شعبه شمال خاور مشهد

تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۲۴

چکیده

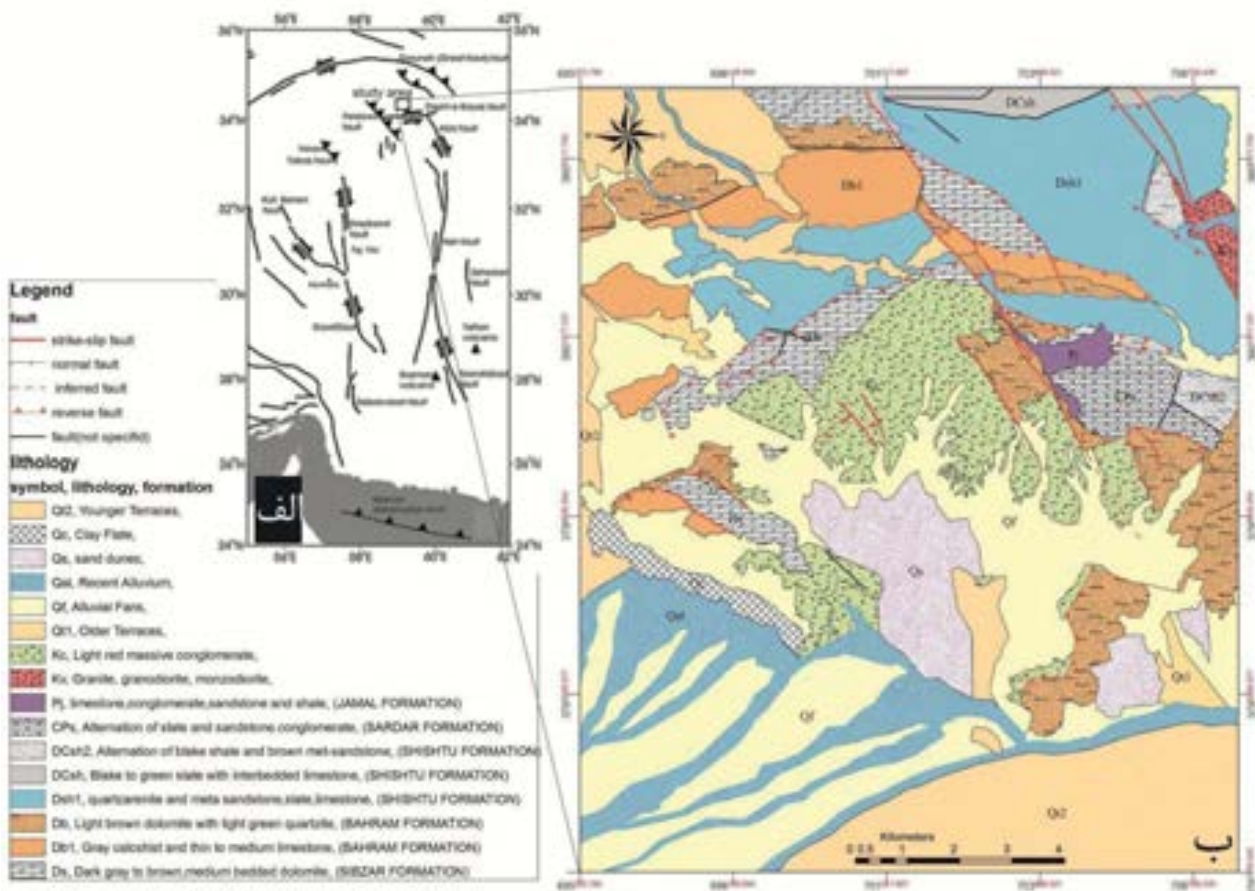
ارتفاعات چاه یوسف در خاور شهرستان گناباد بر اساس عناصر زمین‌ساختی مانند گسل‌ها و شکستگی‌ها شناسایی شد و سازوکار هر یک و ارتباط آن‌ها با رژیم زمین‌ساختی ایجادکننده مورد بررسی قرار گرفت و نقشه شکستگی‌های منطقه بر اساس داده‌های حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و برداشت‌های صحرایی به تصویر درآمد. گسل‌های مهم منطقه با استفاده از مشخصه‌های صفحه گسلی مانند خش لغزها، رگه‌های کششی و پله‌های تجمعی کانی‌ها شناسایی و به کمک آن‌ها سازوکار گسل‌ها مشخص گردید. در مجموع گسل‌های منطقه در سه راستای اصلی جهت‌یابی شدند: (۱) گسیلش معکوس در راستای $90-120^{\circ}$ N، (۲) گسل‌های راستا لغز راست‌گرد با راستای $140-160^{\circ}$ N و (۳) گسل‌های نرمال در راستای $15-30^{\circ}$ N هستند. بر مبنای داده‌های به دست آمده و با استفاده از برنامه رایانه‌ای به روش برگشتی، جهت‌گیری محورهای اصلی تنش (σ_1 ، σ_2 و σ_3) و نرخ اختلاف تنش‌های اصلی R در گستره مورد مطالعه تحلیل شد. نتایج حاصل، دو رژیم زمین‌ساختی متفاوت را در شکل‌گیری ساختارهای منطقه مشخص می‌کند: (۱) رژیم زمین‌ساختی فشارشی؛ راستای اعمال تنش بیشینه NNE-SSW که چین‌ها و گسل‌های معکوس را ایجاد کرده است و (۲) رژیم زمین‌ساختی برشی؛ راستای اعمال تنش فشاری NE-SW و تنش کششی در راستای NW-SE که گسل‌های راستالغز، نرمال، رگه‌ها و درزهای کششی را به وجود آورده است. بر این اساس جهت تنش بیشینه وارد بر منطقه NNE-SSW است که ناشی از برخورد مورب اواخر سنوزوئیک صفحات عربستان - اوراسیا است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی، تنش، روش برگشتی، گسل چاه یوسف.

مقدمه

لوت قرار می‌گیرد (نوگل سادات، ۱۳۷۲). Stocklin (1968) بلوک لوت را به‌عنوان یکی از نه زون ساختاری اصلی ایران مشخص نموده و همراه صفحه توران و عربستان تحت عنوان نواحی پایدار در نظر گرفته است. بلوک یادشده از غرب به گسل نایبند، کوه‌های چین‌خورده شتری و ایران مرکزی و از سمت شرق به گسل نهبندان و فلیش‌های شرق ایران محدود می‌شود. مرز شمالی بلوک لوت، گسل درونه و حد جنوبی آن گودال

ارتفاعات چاه یوسف در محدوده نقشه زمین‌شناسی نوده در خاور ایران و جنوب استان خراسان رضوی، در حداثی طول‌های جغرافیایی $59^{\circ}07' - 59^{\circ}16'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}14' - 34^{\circ}23'$ شمالی و در فاصله ۴۰ کیلومتری شرق شهرستان گناباد واقع شده است (شکل ۱). این منطقه با توجه به تقسیم‌بندی زمین‌ساختی ایران در ایالت ساختاری بلوک



شکل ۱. الف) گسلش فعال در شرق ایران و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. در جنوب عرض ۳۴ درجه شمالی تغییر شکل به صورت دو زون امتداد لغز راست گرد N-S است اما در شمال عرض ۳۴ درجه گسلش در راستای W-E و به صورت راستالغز چپ گرد است. (Walker and Jackson, 2002) ب) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه.

دینامیکی مورد بررسی قرار داد. با توجه به شواهد زمین ساختی موجود در منطقه از جمله تشکیل ساختارها با سازوکارهای متنوع (فشاری و برشی) و جهت گیری های متفاوت پهنه نسبت به جهت کلی تنش اصلی امکان تشکیل میدان های جزئی و متفاوت تنش در فرایند شکل گیری آن وجود داشته است. این شواهد فرض وجود فازهای مختلف تنش را در منطقه تحکیم می بخشد. بر این پایه با تفکیک فازها و بازسازی فرایند شکل گیری، می توان مشخص کرد که در طی این مسیر پیش رونده زمانی، مؤلفه های تنش چه تغییراتی را پذیرفته اند و چه تعداد فاز تنش بر منطقه اثر کرده تا سیستم زمین ساختی کنونی پدیدار شود. از سوی دیگر قطعاً بازسازی جهت گیری تنش جدید و دیرینه علاوه بر کمک به تحلیل مکانیزم های محلی، در شناسایی و تحلیل زمین ساخت ناحیه ای در مقیاس صفحه ای نیز بسیار مؤثر است (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹) و در این راستا می توان از نتایج به دست آمده، در تفسیرهای کلی بهره گرفت.

موقعیت زمین شناسی

ارتفاعات واقع در منطقه، کوه ها و تپه هایی با روندهایی متفاوت هستند که توسط دشت های گسترده و به نسبت همواری

جازموریان و مجموعه آتشفشانی شاهسواران است (Berberian, 1981).

گسل های فعال شمالی - جنوبی احاطه کننده دشت لوت در شمال عرض $N34^{\circ}$ از بین می روند، به طوری که ساختارهای غالب در شمال این عرض گسل های شرقی - غربی چپ گرد هستند (Ambraseys and Tchalenko, 1969; Berberian and Yeats, 1999; Walker et al., 2004). گسل های درونه و دشت بیاض با حرکت چپ گرد در راستای E-W که به ترتیب در شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه در این پژوهش می باشند با چرخش ساعت گرد حول یک محور قائم همساز با برش راست گرد N-S بین بخش های ایران مرکزی و افغانستان هستند (Jackson and Mckenzie, 1984; Walker and Jackson, 2004; Walker and khatib, 2006; Allen et al., 2006).

آقانباتی (۱۳۸۳) بلوک لوت را پویا می داند زیرا در سال های گذشته جایگاه زمین لرزه های مخرب و گسلش های مهمی بوده است. بررسی های ساختاری نشان می دهد که این بلوک از نئوژن به بعد همچنان پذیرای تنش هایی در راستای NE-SW بوده است، لذا در این پژوهش با توجه به ویژگی های شکننده محدوده و وجود سطوح شکستگی و برشی فراوان می توان منطقه را از نظر

گردید. در ادامه آشکارسازی بیشتر گسل‌ها از فیل‌ترهای بالا گذر^۱ استفاده شد و نیز خطواره‌های خروجی با مشاهدات صحرایی، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی انطباق داده شده و عوارض غیرساختاری خطی مانند آبراهه‌ها، جاده‌ها و غیره حذف گردید. مطالعه صورت گرفته در مجموع به ارائه نقشه ساختاری کامل‌تری از محدوده مورد مطالعه منجر گردید.

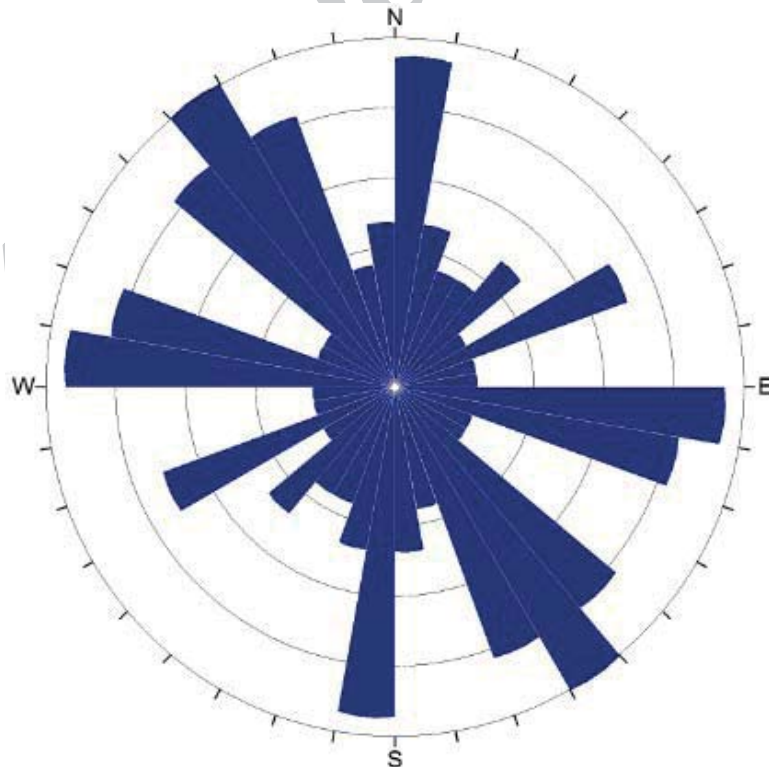
مشاهدات صحرایی

داده‌های لغزش گسل با روش اندازه‌گیری امتداد و شیب برای صفحه‌های گسلی و اندازه‌گیری میل و پلانز برای خوش‌لغزها جمع‌آوری شده است. داده‌های برداشت‌شده در ۱۳ ایستگاه دسته‌بندی شده‌اند. ۱۰۴ داده لغزش گسلی از لایه‌های قائم و نیمه قائم در سازندهای سیب‌زار، بهرام، شیشتو، سردر و جمال جمع‌آوری شد. در هر یک از این ۱۳ ایستگاه، کلیه اطلاعات موجود و برداشت‌های انجام‌شده، ابتدا به صورت کلی در یک استریوپلات پیاده شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که عمده گسل‌ها در سه راستای NW-SE، E-W و N-S بیشترین فراوانی را دارند. دسته داده‌ها در بیشتر ایستگاه‌ها به صورت ناهمگن دیده می‌شوند. این دسته‌ها معمولاً متعلق به دو یا چند وضعیت دیرینه تنش هستند که می‌توانند مربوط به رژیم کششی، فشارشی و یا راستالغز باشند.

در برخی ایستگاه‌ها گسل‌های برداشت شده دارای چندین جهت خطوط خوش‌لغز هستند (شکل ۳) که نشان‌دهنده تغییر

احاطه شده‌اند. واحدهای آهکی متعلق به پالئوزوئیک و مزوزوئیک به‌طور عمده صخره ساز بوده و حالت کوهستانی را در نقاط گوناگون پدید آورده‌اند. در مناطقی که سنگ‌آهک بر روی واحدهای نرم‌تر، همچون شیل، نهشته شده است، به دلیل فرسایش‌پذیری نابرابر، پرتگاه‌هایی ژرف با شیبی تند در همبری آن‌ها ایجاد شده است. با بررسی گسل‌های اصلی موجود در محدوده مورد مطالعه مشخص می‌شود که ساختارهای اصلی تکتونیکی شامل گسل‌های راستالغز و معکوس هستند که با حرکت خودریخت ساختاری منطقه را شکل می‌دهند. گسل‌های موجود در منطقه بیشتر واحدهای سنگی پالئوزوئیک به‌خصوص دونین تا پرمین (سازندهای سیب‌زار، بهرام، شیشتو، سردر و جمال) را تحت تأثیر قرار داده‌اند. با توجه به این‌که گسل‌ها واحدهای سنگی جوان‌تر را تحت تأثیر قرار نداده‌اند، نمی‌توان به‌طور قطع زمان گسلش را تعیین کرد اما شواهد ریخت زمین‌ساختی مانند آبراهه‌ها، مخروط افکنه‌ها و افزای‌های گسلی حاکی از تحرک و پویایی منطقه هستند. این منطقه از دیدگاه فعالیت‌های ساختاری فعال بوده و از توان لرزه‌خیزی به نسبت بالایی نیز برخوردار است (قائمی، ۱۳۸۹).

در این پژوهش نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای لندست سنجنده TM محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری گردید و به‌منظور تفکیک گسل‌های منطقه بر روی تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از نرم‌افزارهای سنجنش‌از دور (ENVI و Geomatica) ابتدا تصاویر با یک آرایه فیل‌تر میانگین ۵×۵ هموار و پردازش



شکل ۲. نمودار گل‌سرخ به‌دست‌آمده برای خطواره‌های مشخص‌شده در تصویر ماهواره‌ای.



شکل ۳. توالی دو رویداد زمین‌ساختی بر روی یک صفحه گسلی، نسل خط‌خس قدیمی با S_1 و جوان‌تر با S_2 نشان داده شده است.

صفحه از یک سامانه گسلی که در یک تنش مشخص به همه سامانه وارد شده است را در جهت‌های مختلف تعیین کرد، به تنسور تنش دست یافته‌ایم (عباسی و فرید، ۱۳۸۳).

الگوی ثبت سطوح و خطوط در این تحقیق برای بررسی داده‌ها از طریق روش دووجهی راست^۲ (Angelier and Mechler, 1977) بر پایه میزان شیب و راستای شیب^۳ می‌باشد. به‌منظور تحلیل داده‌ها و تعیین آرایش محورهای تنش از راه روش وارون‌سازی ثبت داده‌ها با الگوی آزمون^۴ امتداد، مقدار و جهت شیب صورت پذیرفته است.

در این پژوهش برای دست‌یابی به تنسور تنش مناسب، داده‌های به‌دست‌آمده با برنامه رایانه‌ای win-tensor (Delvaux, 2006) پردازش شده‌اند. در این روش فرض بر این است که خش‌لغزهای روی صفحه گسلی جهت حداکثر نیروی برشی را نشان می‌دهد، پس در این صورت با برعکس کردن این پدیده می‌توان به جهت تنش دست یافت که مسبب صفحه گسلی و خش‌لغزهای آن شده است. لذا به این روش برای بازسازی جهت تنش‌های اصلی (σ_1 و σ_3) روش برگشتی^۵ گفته می‌شود. نکته مهمی که در این روش وجود دارد جهت تنش نیست بلکه وضعیت تنش است که بیانگر مقدار نسبی بزرگای سه تنش اصلی (بیشینه، میانی و کمینه) است که مقدار آن را بیضوی تنش (R) تعریف می‌کند (عباسی و بروجنی، ۱۳۸۴). شکل نسبی بیضوی تنش در این برنامه به‌صورت زیر تعریف شده است (عباسی و فرید، ۱۳۸۳):

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad 0 < R < 1$$

به‌علاوه رژیم استرس به‌عنوان تابعی از نسبت استرس (R) به‌صورت زیر متغیر است:

جهت لغزش در طی زمان است. این مطلب می‌تواند مربوط به تغییر در جهت محورهای اصلی تنش و یا تغییر در نسبت اختلاف تنش (R) و یا هر دوی آن‌ها باشد (Ramsay, 2000). با توجه به اهمیت شناخت فازهای دگرشکلی و نیز توجه به اهمیت این مطلب که در هر ایستگاه واحدهای سنگی می‌توانند تحت تنش‌های مختلفی قرار گیرند، سعی شده است که تا حد امکان در هنگام برداشت، داده‌ها بر اساس رویدادهای زمین‌ساختی دسته‌بندی شوند. سپس در مراحل بعدی برای تحلیل داده‌ها و پیشگیری از خطاهای ناشی از محاسبه موقعیت محورهای تنش مربوط به فازهای گوناگون و سامانه‌های مختلف شکستگی، داده‌های برداشت شده از هر ایستگاه پس از تفکیک از یکدیگر در نرم‌افزارهای رایانه‌ای مربوطه به‌طور جداگانه وارد شده‌اند.

روش تنش برگشتی

با توجه به ویژگی‌های شکننده محدوده و وجود سطوح شکستگی و برشی فراوان می‌توان از نظر دینامیکی، منطقه را مورد بررسی قرار داد؛ لذا تحلیل تنش می‌تواند کمک شایانی در پی بردن به نحوه تشکیل ساختارها باشد. شناسایی جهت تنش، بخشی از تحلیل دینامیکی است که بن‌مایه تحلیل جنبشی^۱ را تشکیل می‌دهد. محاسبه تنش در زمین‌شناسی ساختاری، بخش بزرگی از پژوهش‌های انجام شده در ساختارهای شکننده را شامل می‌شود. اطلاعات پایه برای انجام چنین کاری، استفاده از صفحه‌های گسلی و خط‌خس‌های مربوط است (Etchecoper et al., 1981; Angelier, 1979; Fry, 1999; Lisle, 1987). اندازه‌گیری این عناصر خطی و صفحه‌ای در یک پهنه گسلی، تنش‌های مسبب شکل‌گیری این ساختارها شناسایی می‌گردند (الیاسی و احمدیان، ۱۳۸۷). چنانچه بتوان نیروهای وارد بر هر

1. Kinematics
2. Right dihedral
3. Dip/Dip direction
4. Azimuth
5. Inversion

۱. سن واحدی که گسل‌ها آن را بریده‌اند. در این صورت سن گسله‌ای که واحد مشخصی را قطع کرده جوان‌تر از سن آن واحد در نظر گرفته می‌شود.

۲. بریده شدن یک صفحه گسلی توسط گسله‌ای دیگر. گسل‌های F2 و F3 توسط گسل راستالغز چاه یوسف بریده و به صورت راست گرد جابه‌جا شده‌اند (شکل ۴).

۳. توالی سنی خط‌خس‌ها و بریده شدن خط‌خس‌های روی یک صفحه گسلی توسط جنبش بعدی و ایجاد خط‌خس جدید. خط‌خس‌های S1 در شکل ۳ مربوط به گسلش راستالغز و نشان‌دهنده فعالیت جدیدتر نسبت به خط‌خس‌های S2 هستند.

۴. روش تفریقی؛ در این روش با توالی‌های رسوبی با سن‌های مشخص روبرو هستیم. چنانچه تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری در واحدهای مختلف به اندازه کافی باشد، مشاهده می‌شود که با جوان‌تر شدن سن واحد، تعداد رویدادهای زمین‌ساختی ثبت شده کاهش می‌یابد. در این صورت با حذف کردن رویدادهای جوان‌تر در واحد جوان از رویدادهای موجود در واحد متأخر می‌توان به توالی سنی رویدادها دست یافت (عباسی و شبانیان بروجنی، ۱۳۸۴).

از آنجاکه در محدوده چاه یوسف فعالیت زمین‌ساختی بعد از مراحل رسوب‌گذاری بر منطقه اعمال شده است، لذا تفکیک فازها به روش تفریقی مقدور نیست. براین اساس برای جداسازی رویدادهای زمین‌ساختی از روابط ذکر شده در بالا از سه روش اول بهره گرفته شده است.

تحلیل داده‌ها

مقصود از تنسور تنش، تعیین جهت محورهای اصلی تنش است که در یک پهنه گسلی با شرایط شکننده، سامانه‌ای از صفحات گسلی با راستا و شیب متفاوت و خط‌خس‌های مخصوص بر هر صفحه گسلی را تشکیل می‌دهد. برای شناخت و بررسی آرایش محورهای تنش در این پژوهش، برداشت‌های ساختاری به شیوه مستقیم صحرائی صورت پذیرفته‌اند. برداشت‌ها دربرگیرنده صفحات گسلی، سطوح لغزش گسلی مزدوج، سطوح گسلی موازی یا متقاطع نسبت به لایه‌بندی، درزهای کششی، سطوح لایه‌بندی و خش‌لغزها هستند. در هر ایستگاه ابتدا مشخصات صفحه گسلی برداشت شده و پس از تشخیص خطوط خش‌لغز و برداشت مشخصات آن‌ها، سوی لغزش مشخص شده است. در تشخیص سوی لغزش، معیارهای زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

۱- پله‌های تجمعی کانی‌ها؛ ۲- زبر یا صیقلی بودن صفحه لغزش؛ ۳- بازشدگی‌های کششی؛ ۴- شکستگی‌های ریدل.

کشش شعاعی^۱ (σ_1 عمودی، $0 < R < 0.25$)، کشش محض^۲ (σ_1 عمودی، $0.25 < R < 0.75$)، راستالغز کششی^۳ (σ_1 عمودی، $0.75 < R < 1$)، راستالغز محض^۴ (σ_2 عمودی، $0.25 > R > 0$)، راستالغز فشاری^۵ (σ_2 عمودی، $0 > R > 0.25$)، فشارش محض^۶ (σ_3 عمودی، $0.25 < R < 0.75$) و فشارش شعاعی^۷ (σ_3 عمودی، $0.75 < R < 1$) (Delvaux et al., 1997).

رژیم استرس توسط ماهیت محور عمودی استرس تعریف شده است:

۱) گسلش نرمال زمانی که σ_2 محور حداکثر تنش افقی است و σ_1 عمودی باشد.

۲) گسل امتدادلغز هنگامی که σ_1 محور حداکثر تنش افقی است و σ_2 عمودی باشد.

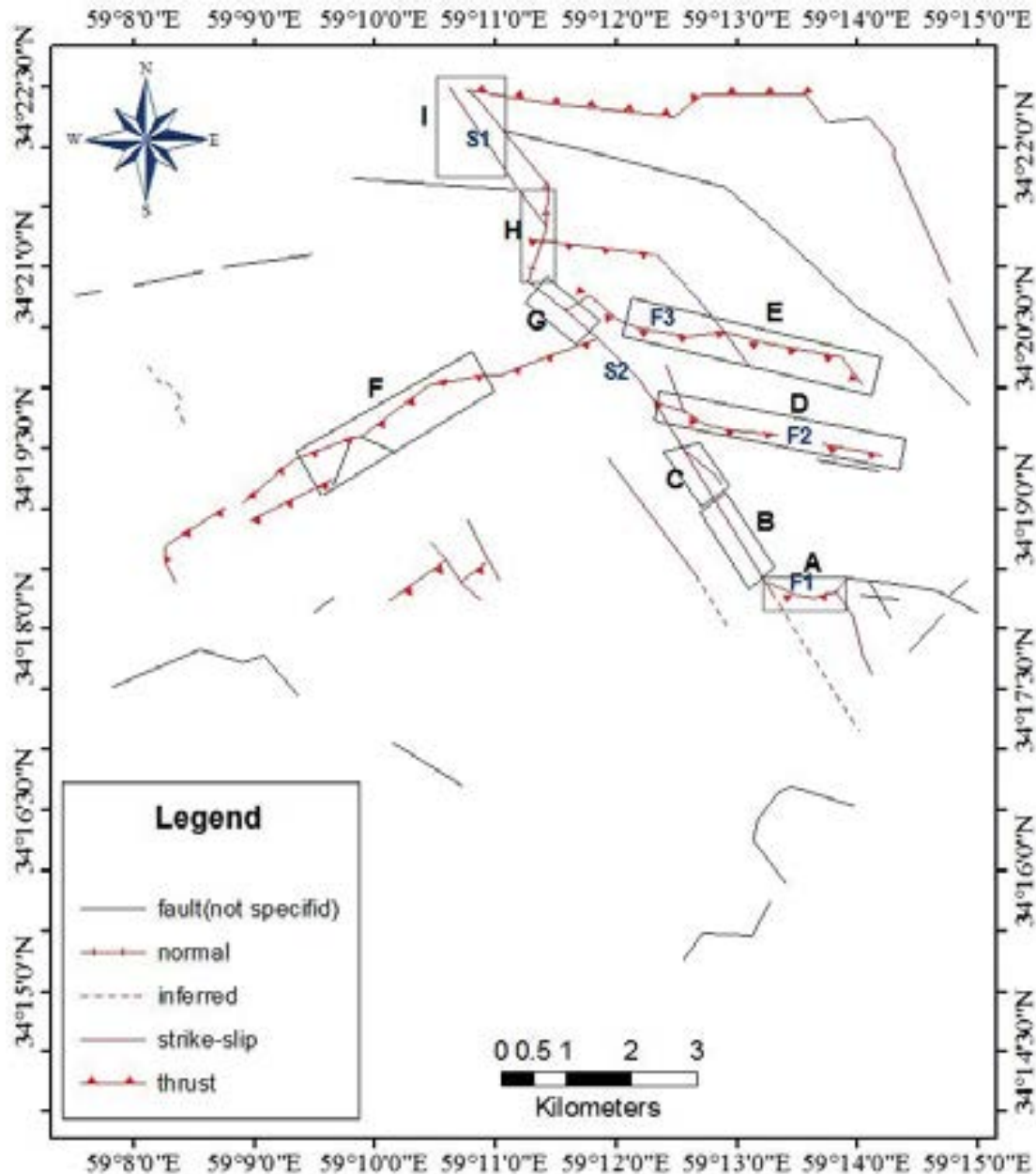
۳) گسلش رانده/معکوس σ_1 محور حداکثر تنش افقی و σ_3 عمودی است (Al khatib et al., 2010).

با توجه به روش برگشتی و دسته‌بندی داده‌ها، اطلاعات حاصل از هر ایستگاه تحلیل شده‌اند. گاهی دسته داده‌های موجود در هر ایستگاه گاه متعلق به دو یا چند وضعیت تنش بوده که مربوط به رژیم کششی، فشارشی یا راستالغز هستند. از این رو در هر ایستگاه دو یا چند استریوپلات از استریوپلات کلی مشتق شده است. در این پژوهش ایستگاه‌ها با توجه به موقعیت محلی دسته‌بندی و بررسی شده‌اند.

جداسازی رویدادهای زمین‌ساختی

شناسایی سن رویدادهای زمین‌ساختی، بر پایه اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی و خش‌لغزهای آن‌ها دشوار است، از این رو بازخوانی رویدادهای کهن، کلیدی برای شناسایی مراحل مختلف و سیر تحول و تکامل آن‌ها از گذشته (تنش دیرینه) تاکنون (تنش نو زمین‌ساختی) به شمار می‌رود. این دشواری با افزایش سن واحد افزایش پیدا می‌کند، برای مثال می‌توان در یک رخنمون سنگی کهن تعداد بی‌شماری از صفحه‌های گسلی و خط‌خس‌های آن‌ها را اندازه‌گیری کرد (شکل ۳). آنچه در این اندازه‌گیری‌ها مشخص نمی‌شود این واقعیت است که کدام یک از اندازه‌گیری‌ها متعلق به یک رویداد زمین‌ساختی خاص است و یا اینکه این صفحه‌های گسلی طی یک رویداد و یا چندین رویداد زمین‌ساختی تشکیل شده‌اند (عباسی و شبانیان بروجنی، ۱۳۸۴). از آنجاکه نمی‌توان سن خش‌لغزهای گسلی را مشخص کرد، باید اطمینان کامل داشت که اندازه‌گیری‌های انجام شده مربوط به رویداد زمین‌ساختی مشخص است. برای جداسازی رویدادهای مختلف زمین‌ساختی و تعیین سن تنسور تنش از روابط زیر بهره گرفته شد:

1. Radial extension
2. Pure extension
3. Transtension
4. Pure strike-slip
5. Transpression
6. Pure compression
7. Radial compression



شکل ۴. نقشه ساختاری منطقه مور مطالعه. (ایستگاه‌ها با کادرهای مشکی مشخص شده‌اند).

نتایج به‌دست‌آمده از هر ایستگاه به‌صورت زیر خلاصه‌شده است:

منطقه A: خش‌لغزهای اندازه‌گیری شده بر روی سطوح گسلی در واحدهای دولومیتی سازند بهرام در این ایستگاه، راندگی با مؤلفه امتدادی کوچک چپ‌گرد را نشان می‌دهند. مشخصات تنسور تنش به‌دست‌آمده به‌صورت زیر است: محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) ۰/۱۸۲، محور تنش اصلی میانه (σ_2) ۱۴/۲۷۲، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) ۷۶/۰۹۱ و نرخ تنش $R=1$ است. تنسور تنش رژیم زمین‌ساختی فشارش شعاعی را نشان می‌دهد.

منطقه B: اندازه‌گیری‌های انجام شده در این ایستگاه شامل مشخصات سطح گسل، درزهای کششی و شکستگی‌های مزدوج است. تنسور تنش محاسبه‌شده برای این ایستگاه به‌صورت زیر

با توجه به معیارهای مشاهده شده و اصول تشخیص سوی لغزش (Angelier, 1994; Doblas, 1998) نوع حرکت و جهت جابه‌جایی صورت گرفته روی هر صفحه تعیین شده است.

منطقه (هر منطقه دربرگیرنده چند ایستگاه) بر روی سطوح گسلی مورد مطالعه قرار گرفت که در آن ۱۰۴ داده لغزش گسل در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. منطقه C توسط ۲ ایستگاه (a و b)، منطقه D توسط ۳ ایستگاه (a، b و c)، منطقه I توسط ۲ ایستگاه (a و b) نشان داده شده است، در سایر بخش‌ها هر منطقه توسط یک ایستگاه مشخص شده است (شکل ۴). نام همه ایستگاه‌های اندازه‌گیری نام‌برده در این مبحث و ویژگی‌های میدان تنش محاسبه شده در آن‌ها، در جدول ۱ و شکل ۱۱ آورده شده است.

است: محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $28/068$ ، محور تنش اصلی میانه (σ_2) $60/271$ ، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) $10/163$ و نرخ تنش $R=0/68$ است. این تنسور تنش، رژیم زمین‌ساختی راستالغز محض را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). گسل اصلی چاه یوسف با امتداد غالب $N150^\circ$ با ۹ کیلومتر طول و حدود ۹۰۰ متر جدایش امتدادی راست‌گرد در این محدوده قرار می‌گیرد. در بیشتر رخنمون‌ها، آهک و دولومیت نازک لایه سازند بهرام و واحدهای آواری-کربناته سازند جمال در مجاورت کنگلومرای کرتاسه قرار می‌گیرند (شکل ۵).

منطقه C: سطوح گسلی در این ایستگاه، دو راستای عمده را نشان می‌دهند، (a) روند سطوح گسلی NW-SE هست که شیب و راستای آن حرکت امتدادلغز راست‌گرد را به‌صورت غالب نشان می‌دهد. تنسور تنش استنباط شده از این اندازه‌گیری‌ها به‌صورت: محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $38/036$ ، محور تنش اصلی میانه (σ_2) $51/227$ ، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) $05/130$ و نرخ تنش $R=0/77$ است. داده‌ها رژیم زمین‌ساختی راستالغز کششی را نشان می‌دهند. (b) سطوح گسلی راستای N-S می‌باشند که آثار خش‌لغز را به‌خوبی در خود حفظ کرده‌اند و حاکی از جوان‌تر بودن این راستا نسبت به سطوح گسلی پیشین می‌باشد. راستای محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $71/245$ ، محور تنش اصلی میانه (σ_2) $19/065$ ، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) $03/156$ ، نرخ تنش $R=0/71$ و رژیم زمین‌ساختی کششی را نشان می‌دهند.

منطقه D: در این محدوده سطوح گسلی سه راستا با سازوکار متفاوت را نشان می‌دهند: (a) خش‌لغزهای مشاهده‌شده گسلش معکوس با مؤلفه امتدادی چپ‌گرد را نشان می‌دهند. علاوه بر آن رانده شدن سازند بهرام بر روی سازند شیشتو نیز دلیلی بر حرکت معکوس این گسل است (شکل ۶. الف و ب). راستای محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $12/251$ ، محور تنش اصلی میانه

منطقه E: اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی این گسل در چهار نقطه صورت گرفته است. در این اندازه‌گیری‌ها، صفحه‌های گسلی موجود در واحدهای دونین میانی-بالایی (سازند بهرام) و کربونیفر زیرین (سازند شیشتو) بررسی شده‌اند، آثار لغزش به‌وضوح گسلش معکوس با مؤلفه امتدادی چپ لغز و نتایج به‌دست‌آمده سازوکار فشاری را نشان می‌دهند.

منطقه F: داده‌های به‌دست‌آمده از این ایستگاه، گسلش معکوس را در راستای ENE-WSW با شیب به سمت جنوب شرق را نشان می‌دهد. در قسمت غربی گسل به‌صورت دو گسل معکوس موازی هم دیده می‌شود که سنگ‌آهک‌های سازند شیشتو را بر روی دولومیت‌های متوسط لایه سازند سیب‌زار رانده است. نتایج حاکی از رژیم زمین‌ساختی فشاری برای این ایستگاه می‌باشد (شکل ۷).

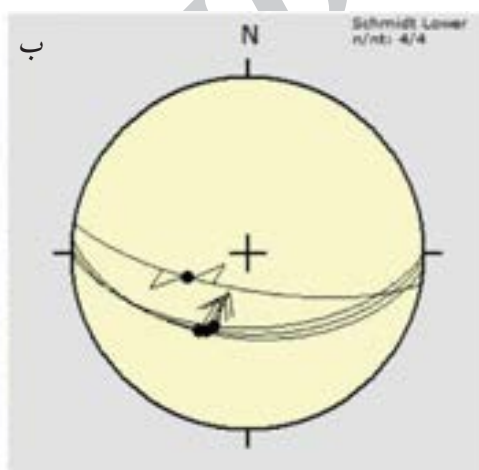
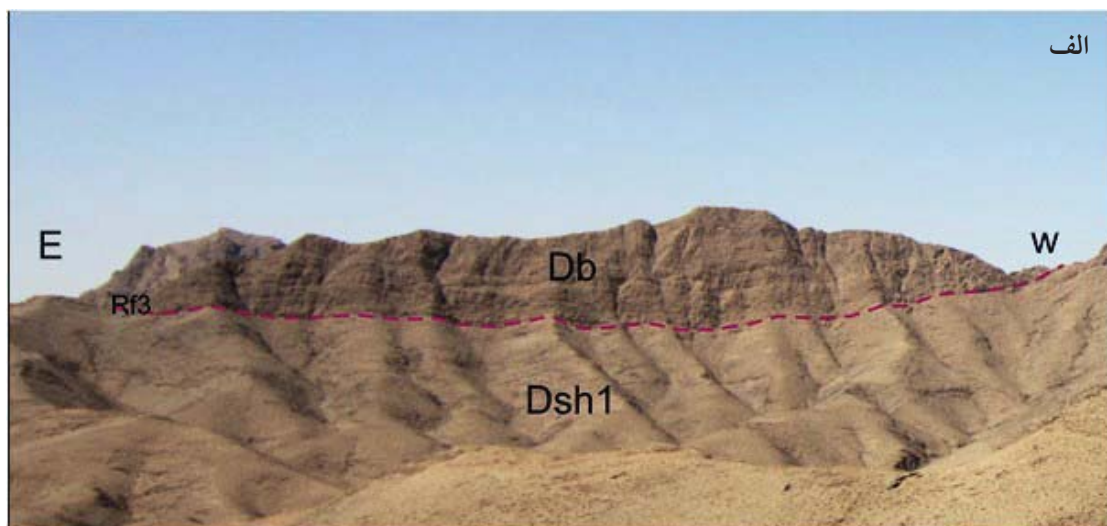
منطقه G: راستای شکستگی‌های اصلی در این منطقه NW-SE است. مشخصات برداشت شده از صفحات گسل، خش‌لغزها و ساختارهای کششی (ساختارهای پرمانند) گسلش راستالغز راست‌گرد با مؤلفه شیبی نرمال را نشان می‌دهند (شکل ۸. ج). راستای تنش‌های اصلی (σ_1) 0 ، (σ_2) 0 ، (σ_3) به ترتیب $28/068$ ، $60/271$ ، $10/163$ ، نرخ تنش $R=0/73$ و رژیم زمین‌ساختی،

منطقه C: سطوح گسلی در این ایستگاه، دو راستای عمده را نشان می‌دهند، (a) روند سطوح گسلی NW-SE هست که شیب و راستای آن حرکت امتدادلغز راست‌گرد را به‌صورت غالب نشان می‌دهد. تنسور تنش استنباط شده از این اندازه‌گیری‌ها به‌صورت: محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $38/036$ ، محور تنش اصلی میانه (σ_2) $51/227$ ، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) $05/130$ و نرخ تنش $R=0/77$ است. داده‌ها رژیم زمین‌ساختی راستالغز کششی را نشان می‌دهند. (b) سطوح گسلی راستای N-S می‌باشند که آثار خش‌لغز را به‌خوبی در خود حفظ کرده‌اند و حاکی از جوان‌تر بودن این راستا نسبت به سطوح گسلی پیشین می‌باشد. راستای محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $71/245$ ، محور تنش اصلی میانه (σ_2) $19/065$ ، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) $03/156$ ، نرخ تنش $R=0/71$ و رژیم زمین‌ساختی کششی را نشان می‌دهند.

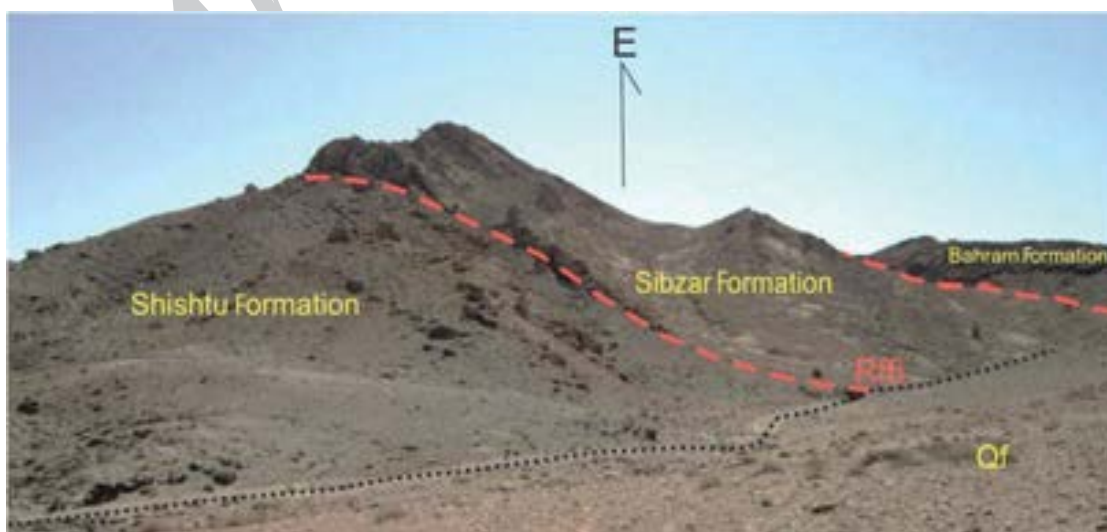
منطقه D: در این محدوده سطوح گسلی سه راستا با سازوکار متفاوت را نشان می‌دهند: (a) خش‌لغزهای مشاهده‌شده گسلش معکوس با مؤلفه امتدادی چپ‌گرد را نشان می‌دهند. علاوه بر آن رانده شدن سازند بهرام بر روی سازند شیشتو نیز دلیلی بر حرکت معکوس این گسل است (شکل ۶. الف و ب). راستای محور تنش اصلی بیشینه (σ_1) $12/251$ ، محور تنش اصلی میانه



شکل ۵. نمایی از گسل امتدادلغز چاه یوسف به همراه استریونوت صفحات گسلی برداشت شده. Db عضو دولومیتی سازند بهرام، Kc کنگلومرای کرتاسه و Qf مخروط افکنه‌های کوتاه‌ترین.



شکل ۶. الف) نحوه عمل کرد گسل RF3 در منطقه، (Db عضو دولومیتی سازند بهرام، Dsh1 شیشتو ۱ می باشد)، ب. آثار لغزش روی سطح گسل (زاویه ریک حدود ۷۵ درجه) و تصویر استریو گرافیک گسل RF3 با جهت لغزش این گسل.



شکل ۷. گسل RF6 در امتداد خود واحدهای دولومیتی سازند سیبزار را بر روی سنگ آهک های سازند شیشتو رانده است.



شکل ۸. الف و ب) نمونه‌هایی از سطوح گسلی و خش‌لغزهای مربوط به آن‌ها در منطقه D، ج) شکستگی‌های کششی پرمانند بر سطح گسل در ایستگاه G، د) ایستگاه H رگه‌های کششی در جهت NE-SW عمود بر ۵۳.

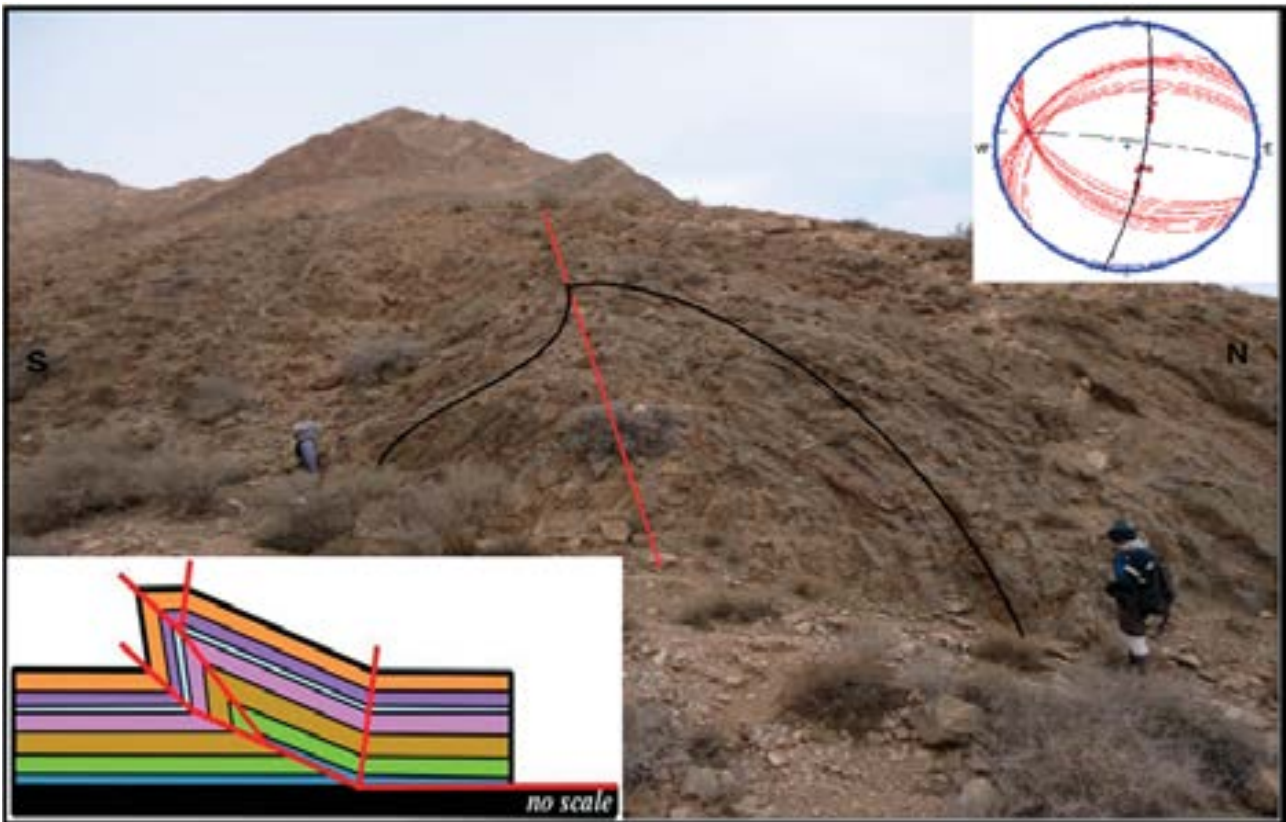
تراکشی^۱ یا تنش بیشینه شمال غرب را پیشنهاد می‌کند. در واقع این قلمت زون تخریب پیوندی^۲ گسل‌های راستالغز محسوب می‌شود (شکل‌های ۴ و ۸ د) که دو قطعه گسله S1 و S2 در رژیم زمین‌ساختی تراکشی توسط گسلش نرمال به هم متصل

راستالغز کششی محاسبه شده است. منطقه H: صفحه‌های گسلی در این محدوده در راستای NNE-SSW اندازه‌گیری شده‌اند. سازوکار این گسل‌ها نرمال با مؤلفه راستالغز چپ‌گرد است (شکل ۹) که یک رژیم زمین‌ساختی



شکل ۹. گسل‌های نرمال پله مانند. این گسل‌ها شیب‌لغز نرمال با مؤلفه امتدادی چپ‌گرد هستند.

1. Transtension
2. Link Damage Zone



شکل ۱۰. چین مرتبط با گسلش از نوع چین انتشار گسلی متأثر از عملکرد گسل های معکوس شرقی - غربی منطقه مورد مطالعه. شکل پایین سمت چپ به صورت شماتیک عملکرد گسل در چین خوردگی منطقه را نشان می دهد.

فشاری در همه گسل های معکوس منطقه یکی بوده است، می توان گفت که چین خوردگی منطقه در اثر فشارش NE-SW بوده است.

بحث

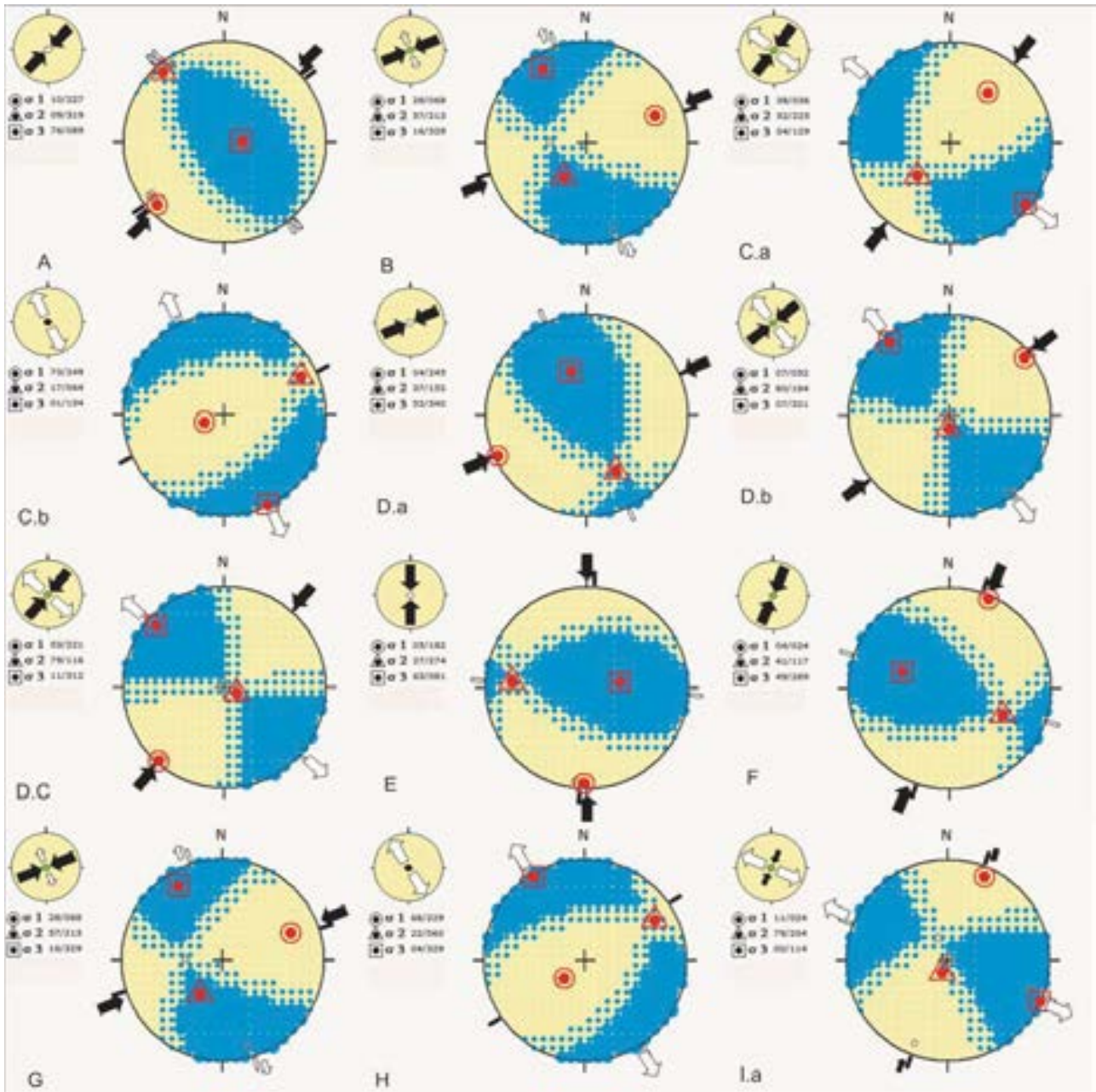
با توجه به نتایج حاصل از برداشت های صحرائی، پردازش تصاویر ماهواره ای و تحلیل های رایانه ای در نهایت سه دسته گسل با مشخصات زیر معرفی می شوند:

تنسورهای تنش متعلق به شش ایستگاه B، C، a، D، b، D، c، I، a و G رژیم امتدادلغز (امتدادلغز محض یا امتدادلغز کششی) را به صورت غالب نشان می دهند. در این ایستگاه ها جهت اعمال تنش فشاری NE-SW و جهت اعمال تنش کششی عمدتاً NW-SE می باشد و تنش های σ_1 و σ_3 تقریباً افقی و تنش σ_2 تقریباً قائم است. نتایج به دست آمده گسلش راستالغز راست گرد را در راستای NW-SE نشان می دهد. گسل اصلی چاه یوسف با امتداد غالب N150 درجه و با حدود 900 متر جدایش امتدادی راست گرد در این محدوده قرار می گیرد (جدول ۱ و شکل ۱۱). در چهار ایستگاه A، D، a، E و F رژیم زمین ساختی به طور عمده فشارشی است و حاکی از گسلش معکوس در راستای WNW-ESE است، تنش اصلی σ_3 تقریباً نزدیک به قائم و تنش های σ_1 و σ_2 تقریباً افقی هستند راستای اعمال فشارش

می شوند (Kim et al., 2004). تنسور تنش به صورت: محور تنش اصلی (σ_1) 63/232، محور تنش اصلی میانه (σ_2) 27/057، محور تنش اصلی کمینه (σ_3) 2/326 و نرخ تنش $R=0/67$ محاسبه شده است.

منطقه I: در این منطقه عمده ساختمان های مشاهده شده به صورت چین و گسل های راستالغز می باشد که در دو ایستگاه شناسایی شد و به صورت مجزا بررسی گردید. (a) قطعه s_1 از گسل چاه یوسف است که رژیم زمین ساختی راستالغز راست گرد را نشان می دهد. موقعیت محورهای اصلی تنش به صورت (σ_1) 13/202؛ (σ_2) 72/337؛ (σ_3) 13/109 و نرخ تنش $R=0/38$ محاسبه شد. (b) در این ایستگاه یک تاقدیس مشاهده شده است که پهلوی جنوب غربی به مراتب پرشیب تر از پهلوی شمال شرقی آن است، بر این اساس یک تاقدیس نامتقارن است (شکل ۱۰).

محور چین در جهت N80W حدود 12° میل دارد. سطح محوری تاقدیس در راستای N80W و شیبی حدود 80° در جهت شمال شرق دارد. همچنین با مطالعه و مقایسه آن با مدل های هندسی ارائه شده برای چین های مرتبط با گسل (Jamison, 1987) حکایت از آن دارد که این تاقدیس یک چین مرتبط با گسلش از نوع چین انتشار گسلی^۱ متأثر از عملکرد گسل های معکوس شرقی - غربی منطقه مورد مطالعه است. از آنجاکه جهت تنش



شکل ۱۱. نتایج تنش برگشتی در ایستگاه‌های مختلف. موقعیت σ_1 ، σ_2 و σ_3 در هر استریو پلات به ترتیب با \blacksquare ، \blacksquare و \blacksquare مشخص شده است و جهت نهایی کشش یا فشارش با پیکان‌های توپر نشان داده شده است. ایستگاه‌های I.a و B, C.a, D.b, D.c, G رژیم زمین‌ساختی راست‌لغز (امتدادلغز محض یا امتدادلغز کششی)، ایستگاه‌های A, D.a, E رژیم زمین‌ساختی فشارشی و دو ایستگاه C.b و H حاکی از وجود رژیم زمین‌ساختی کششی می‌باشند.

H حاکی از وجود یک رژیم زمین‌ساخت کششی در راستای NW-SE است که در مرحله‌ای جدیدتر از گسلش راست‌لغز بر منطقه اعمال شده است و آثار لغزش گسلش نرمال را در راستای NE-SW نشان می‌دهند.

نوع شکستگی‌های منطقه نشان می‌دهد که تنش‌های وارد بر منطقه دارای دو مؤلفه برشی و فشارشی است. مؤلفه برشی باعث حرکت امتدادی راست‌لغز و گسلش نرمال در زون برشی اصلی منطقه شده است و مؤلفه فشارشی چین‌خوردگی و گسل‌های معکوس را ایجاد کرده است. خطیب (۱۳۶۸) با تحلیل ساختاری

می‌باشد. گسل‌های F2، F1 و F3 در این راستا قرار دارند که همگی به سمت جنوب شیب دارند و عامل رانده شدن سازند قدیمی بهرام بر روی واحدهای جوان‌تر سازند شیشتو و سردر هستند. حرکت این گسل‌ها باعث ایجاد کوتاه شدگی در پوسته و بالاآمدگی محلی شده است. Jackson و Walker (2004) معتقدند که حرکت در راستای مؤلفه قائم در پهنه‌های گسلی E-W در حفاصل زیر پهنه سیستان و لوت باعث گسلش معکوس شده است. بررسی ساختمان‌های مشاهده‌شده در دو ایستگاه C.b و

جدول ۱. نتایج تنسور تنش در ایستگاه‌های مختلف.

ردیف	ایستگاه	فاز	σ _۱	σ _۲	σ _۳	بیضوی تنش	رژیم زمین ساختی	واحد سنگی	سن واحد
۱	A	۱	۱۰/۲۲۷	۹/۳۱۹	۷۶/۰۸۹	۰/۵	فشاری	عضو کرینانه سازند جمال	پرمین
۲	B	۲	۲۸/۰۶۸	۶۰/۲۷۱	۱۰/۱۶۳	۰/۶۸	راستالغز	عضو کرینانه سازند جمال	پرمین
۳	C. a	۲	۳۸/۰۳۶	۵۱/۲۲۷	۰۵/۱۳۰	۰/۷۷	راستالغز کشتی	عضو کرینانه سازند جمال	پرمین
	C. b	۲	۷۳/۲۴۹	۱۷/۰۶۴	۰۱/۱۵۴	۰/۷۱	کشتی	عضو کرینانه سازند جمال	پرمین
۴	D. a	۱	۱۲/۲۵۱	۳۴/۱۵۲	۵۲/۳۴۰	۰/۴	فشاری	عضو آهکی سازند بهرام	دونین
	D. b	۲	۰۶/۰۵۱	۸۳/۲۵۴	۰۳/۱۴۲	۰/۸۸	راستالغز کشتی	عضو آهکی سازند بهرام	دونین
	D. C	۲	۰۸/۲۲۱	۸۰/۰۷۹	۰۶/۳۱۲	۰/۵۷	راستالغز	عضو آهکی سازند بهرام	دونین
۵	E	۱	۰۸/۱۸۷	۲۸/۲۸۱	۶۳/۰۸۲	۰/۵	فشاری	آهک ودولومیت بهرام	دونین
۶	F	۱	۰۲/۰۲۱	۴۱/۱۱۲	۴۹/۲۹۰	۱	فشاری	دولومیت سیب زار	دونین زیرین
۷	G	۲	۲۸/۰۶۸	۶۰/۲۷۱	۱۰/۱۶۳	۰/۷۳	راستالغز کشتی	تناوب لایه های شیل، ماسه و آهک سازند شیشو	دونین فوقانی، کربونیفر زیرین
۸	H	۲	۶۳/۲۳۲	۲۷/۰۵۷	۰۲/۳۲۶	۰/۶۷	کشتی	آهک ودولومیت بهرام	دونین
۹	I. a	۲	۱۳/۲۰۲	۷۲/۳۳۷	۱۳/۱۰۹	۰/۳۸	راستالغز	سنگ آهک سازند سردر	پرمین زیرین

کوه‌های جنوب بیرجند یک روند شرقی- غربی منطبق بر گسل‌های چپ‌گرد و یک روند شمال غرب - جنوب شرق منطبق بر گسل‌های فشاری و یک پهنه برشی را معرفی کرده است.

کوه‌های جنوب بیرجند یک روند شرقی- غربی منطبق بر گسل‌های چپ‌گرد و یک روند شمال غرب - جنوب شرق منطبق بر گسل‌های فشاری و یک پهنه برشی را معرفی کرده است.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش از راهنمایی و حمایت بی‌دریغ بسیاری از اساتید، همکاران و دوستان بهره گرفته شده است که از آن جمله لازم است از آقایان مهندس شیخ، مهندس اکبری و کارکنان سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی شمال شرق تشکر نمایم. از دیگر افرادی که به گونه‌ای در انجام این پژوهش نقش داشته‌اند و ما را در زمینه‌های گوناگون کمک نموده‌اند سپاسگزاریم.

منابع

- آقا نباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- الیاسی، م. و احمدیان، س.، ۱۳۸۷. آرایش هندسی مسیرهای (S1) در گستره کن-کرج (بخش جنوبی البرز مرکزی) بر پایه وارون‌سازی چند مرحله‌ای. فصلنامه علوم زمین سازمان زمین‌شناسی کشور، ۶۷، ۱۴۹-۱۴۰.
- خطیب، م.م.، ۱۳۶۸. تحلیل ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۸۸.
- عباسی، م. و فرید، ی.، ۱۳۸۳. مقدمه‌ای بر تعیین وضعیت تنش به کمک روش برگشتی صفحه‌های گسلی و خط‌خس‌های مربوطه. فصل‌نامه علوم زمین سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۴، ۲-۹.

نتیجه‌گیری

از نتایج بالا می‌توان استنباط کرد که منطقه مورد مطالعه حداقل تحت دو رژیم زمین‌ساختی متفاوت قرار گرفته است که به ترتیب زمان از قدیم به جدید در زیر عنوان شده‌اند: رژیم زمین‌ساختی فشاری؛ راستای اعمال تنش بیشینه NE-SW و ساختمان‌های ایجاد شده شامل چین و گسل‌های معکوس شرقی- غربی با مؤلفه امتدادی چپ‌لغز هستند. رژیم زمین‌ساختی برشی؛ راستای اعمال تنش فشاری NE-SW و کشش در راستای NW-SE بوده است. تحت این رژیم زمین‌ساختی در منطقه دو سیستم گسلی ایجاد شده است، سری اول گسل‌های راستالغز راست‌گرد در راستای N150 درجه (مانند گسل راستالغز چاه یوسف) و سری دوم گسل‌های نرمال در راستای NE-SW که در محل هم‌پوشانی قطعات گسل امتدادلغز چاه یوسف می‌باشند که تقریباً عمود بر راستای کشش قرار دارند و جوان‌تر از سری اول می‌باشند. مطالعه ساختارهای شکننده در شمال بلوک لوت اشاره به مطابقت منطقه با برخورد صفحات عربستان- اوراسیا دارد. بر این اساس جهت حداکثر تنش وارد بر منطقه NNE-SSW است که ناشی از حرکت صفحه عربستان به سمت صفحه ایران است. در طی مزوزوئیک با آغاز بسته شدن نئوتتیس رژیم تکتونیکی

- K., Miroshnichenko, A., Ruzchich, V. and San'kov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1-38.
- Doblas, M., 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295, 187-197.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis, *Structural Geology*, 3, 51-65.
- Fry, N., 1999. Striated faults: visual appreciation of their constriction on possible paleostress tensor. *Structural Geology*, 21, 7-21.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysics*, 77, 185 - 264.
- Jamison, W.R., 1987. Geometric analysis of fold development in overthrust terrains. *Journal of Structural Geology*, 9, 207-219.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P. and Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Lisle, R.J., 1987. Principal stress orientation from faults. An additional constraint, *Annual. Tectonic*, 1, 155-158.
- Ramsay, J.G., and Lisle, R.J., 2000. The techniques of modern structural geology, fault slip analysis and Stress tensor calculations. *Academic Press*, 3, 758-810.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review - American Association Petroleum, *Petrology, bulletin*, 52, 1229-1258.
- Walker, R. and Jackson, J., 2004. Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, *Tectonics*, 23, T C5010.
- Walker, R. and Khatib, M.M., 2006. Active faulting in the Birjand region of NE Iran. *Tectonics*, 25, TC4016.
- Walker, R. Jackson, J. and Baker, C., 2004. Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophysics*, 157, 265-282.
- عباسی، م.ر. و شبانیان بروجنی، آ.، ۱۳۸۴. تعیین وضعیت تنش به روش برگشتی از صفحه‌های گسلی لبه جنوبی البرز مرکزی. فصلنامه علوم زمین، ۵۵، ۱۷-۲.
- قائمی، ف.، ۱۳۸۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ نوده. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- موسوی، م.، علوی، آ. و خطیب، م.، ۱۳۸۹. تفکیک فازهای تنش دیرین به روش برگشتی از صفحه‌های گسلی در منطقه جنوب بیرجند. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، ۳۸-۲۷.
- نوگل سادات، م.، ۱۳۷۲. نگرشی بر لرزه‌خیزی و لرزه زمین‌ساخت ایران. دوازدهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- Al Khatib, N., Atallah, M., and Diabat, A., 2010. Paleostress analysis of the cretaceous rocks in Northern Jordan. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 3, 25-36.
- Allen, M.B., Walker, R., Jackson, J., Blanc, E.J.P., Talebian, M. and Ghassemi, M., 2006. Contrasting styles of convergence in the Arabia-Eurasia collision: Why escape tectonics does not occur in Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 409, 579-589.
- Ambraseys, N.N., and Tchalenko, J.S., 1969. The Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake of August 31, 1968: A field report. *Seismological Bulletin*, 59, 1751-1792.
- Angelier, J., 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction In: Hancock, P. *Continental Deformation*, Pergamon Press Ltd, Chapter 4, 53-100.
- Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56, 17-26.
- Angelier, J., and Mechler, P., 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalment utilisable en tectonique et en seismologie, la methode des diedres droits, *Bulletin de Societe Geologique de France*, 19, 1309-1318.
- Berberian, M., and Yeats. R.S., 1999. Patterns historical earthquake rupture in the Iranian. *Seismological Bulletin*, 89, 120-139.
- Berberian, M. and King, G.C., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210-265.
- Delvaux, D., 2006. WINTENSOR, VERSIO 1.3.75, Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Belgium Dept, Geology - Mineralogy.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi,