

## تحلیل تنش دیرین در کوه‌های بزقوش، شمال غرب ایران

احد نوری مخوری<sup>(۱)</sup>، راضیه شریفی قطب‌آبادی<sup>(۲)</sup> و محسن مؤید<sup>(۳)</sup>

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

۲. کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۱

### چکیده

اطلاع از میدان تنش محلی در یک منطقه، در بررسی‌های ساختاری و عوامل موثر بر کینماتیک ساختارهای منطقه حائز اهمیت است. از این رو، در این پژوهش ضمن توضیح مبانی نظری اساسی روش وارون سازی تنش از صفحات گسل-خش لغزش، برداشت‌های صحرایی ناهمگن لغزش گسلی به‌عنوان داده‌های خام برای تعیین موقعیت میانگین محورهای اصلی تنش به‌منظور تحلیل وضعیت ژئودینامیک منطقه، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل از حل تنسور تنش تقلیل یافته داده‌های گسل-خش لغزش برداشت شده، نشانگر موقعیت‌های ۲۱/۱۵۶، ۶۴/۰۱۲ و ۱۴/۲۵۱ برای  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  است. نتایج حاصل از تحلیل این داده‌ها، نشان می‌دهد که هم‌خوانی قابل توجهی بین سوگیری محورهای اصلی تنش محاسبه شده و پیشینه مطالعات زمین‌ساختی منطقه، وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: تنش دیرین، خش لغزش، ساختار فراخاسته.

### مقدمه

از بعضی شاخص‌های کینماتیک روی صفحه گسلی برای تعیین جهت لغزش (Doblas, 1998)، بررسی‌های تنش در بسیاری از مناطق زمین ساختی صورت پذیرفته است. با تحلیل گسل‌ها و محاسبه تنسور تنش می‌توان پارامترهای تنش را تعیین کرد. تعیین این پارامترها دو کاربرد اساسی دارد: ۱- می‌توان الگوی تنش (مسیرهای تنش اصلی) را بازسازی کرد. ۲- مسیر حرکت (بردار لغزش) روی صفحات گسلی را مشخص کرده و موقعیت دیگر عوارض ساختاری مثل چین‌ها، دایک‌ها و ... را نیز می‌توان پیش‌بینی نمود (الیاسی و احمدیان، ۱۳۸۷).

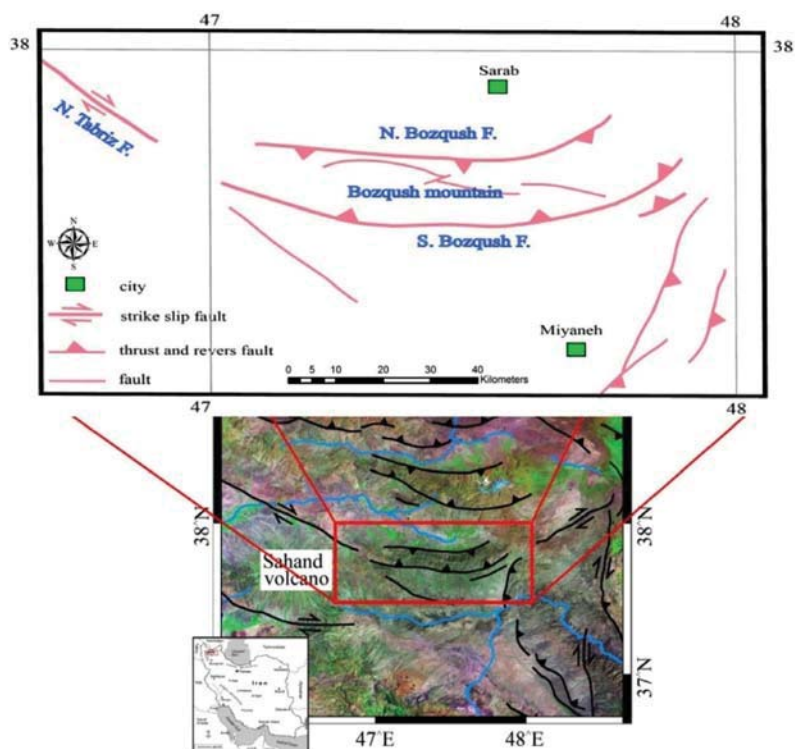
امروزه تحلیل داده‌های مربوط به گسل‌ها و سازوکار کانونی زلزله‌ها برای شناخت تنش‌های زمین ساختی گذشته و امروزی در نوزمین ساخت و لرزه‌زمین ساخت استفاده می‌شود (Delvaux and Sperner, 2003). اما از آنجاکه گسل‌های خش‌دار تمام مراحل دگرریختی را در طول دگرریختی پیش‌رونده ثبت می‌کنند، مناسب‌ترین عوارض برای برداشت و تحلیل تنش دیرین هستند، درحالی‌که تعیین میدان تنش امروزی غالباً بر اساس داده‌های لرزه‌زمین ساخت می‌باشد (Delvaux and Barth, 2010). براساس پیشنهاد Wallace (1951) و Bott (1959) (وجود توازی بین امتداد خش لغزش و حداکثر تنش برشی)، همچنین قابلیت استفاده

\* نویسنده مرتبط: ahadnouri.m@gmail.com

## موقعیت و خاستگاه زمین ساختی

بزقوش است. این گسل ادامه خطواره مغناطیسی منطبق بر گسل شمال تبریز است، لذا یک گسل پی‌سنگی است که ادامه گسل شمال تبریز می‌باشد (نوری، ۱۳۹۲). گسل جنوب بزقوش گسلی فشاری با شیب به سمت شمال است که باعث بالاراندگی چینه‌های قدیمی‌تر شمالی روی رسوبات پلیو کواترنر در جنوب بزقوش شده است. با در نظر گرفتن شیب گسل شمال بزقوش (به طرف جنوب) و سمت شیب گسل جنوب بزقوش (به طرف شمال)، طی عملکرد چنین سیستمی از گسل‌های معکوس، این رشته کوه یک ساختار فراخاسته در مقیاس بزرگ است (نوری، ۱۳۹۲؛ Djamour et al., 2011; Zamani and Masson, 2014). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

کوه‌های بزقوش در شمال غرب کشور در شمال شهر میانه و در جنوب شهر سراب قرار گرفته‌اند. گسل شمال بزقوش، این کوه‌ها را به طرف شمال، محدود می‌کند. ارتفاعات بزقوش در جنوب این گسل و دشت سراب در شمال آن واقع شده است. این گسل دارای امتداد کلی شرقی- غربی و شیب به سمت جنوب با عملکرد فشاری است و به سمت غرب مرز رسوبات پلیو کواترنر و میوسن را مشخص می‌کند. طی عملکرد این گسل بخش جنوبی آن نسبت به منطقه شمالی (دشت سراب) بالارانده شده است. به طرف جنوب نیز، این رشته کوه‌ها را گسل جنوب بزقوش محدود می‌کند. روند این گسل نیز همانند روند گسل شمال



شکل ۱. موقعیت و نقشه گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه

(et al., 1995, 1997). این ساختارهای شکننا (گسل‌های دارای خش لغزش و سطوح شکستگی دیگر) به عنوان معرف‌های جنبشی در بازسازی تنش دیرین بکار می‌روند (Delvaux and Sperner, 2003; Angelier, 1994; Dunne and Hancock, 1994). ولی در این میان تحلیل

## حل تنسور تنش با استفاده از داده‌های گسل-خش لغزش

ساختارهای مزوسکوپی (گسل و شکستگی) به عنوان معرف‌های دقیق جهت‌گیری تنش دیرین و واتنش مورد توجه هستند (Angelier, 1979, 1989, 1994; Delvaux and Sperner, 2003; Dunne and Hancock, 1994).

(Sperner, 2003). مقدار قابل قبول این زاویه در محاسبه تنسور تنش،  $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$  می باشد (Delvaux and Sperner, 2003). در بررسی سیستم‌های سطوح گسلی، هر چه دامنه تغییرات این زاویه محدودتر باشد و به حداقل مقدار ممکن (صفر) نزدیک‌تر شود، تنسور تنش واقعی کمترین اختلاف را با تنسور تنش واقعی خواهد داشت.

## روش مطالعه

در این پژوهش برای تحلیل سوگیری تنش‌های دیرین از روش (Delvaux and Sperner, 2003) استفاده شد. این روش بر پایه روش دووجهی راست بهبود یافته<sup>۱</sup> و بهینه‌سازی چرخشی<sup>۲</sup> استوار است. روش دووجهی راست بهبود یافته اجازه می‌دهد: ۱- نسبت شکلی تنش (R) محاسبه شود. ۲- شکستگی‌های کششی و فشاری به‌طور ترکیبی با داده‌های خش لغزش استفاده شوند. ۳- جدایش داخلی داده‌ها بر اساس محاسبه انحراف<sup>۵</sup> صورت گیرد (Delvaux and Sperner, 2003).

رژیم تنش اصلی یک منطقه با جهت‌گیری محورهای اصلی تنش و شکل بیضوی تنش مشخص می‌شود. تغییر موقعیت فضایی محورهای تنش نسبت به یکدیگر با ایجاد یک بیضوی همراه است. این بیضوی نمایانگر محدوده تاثیر مولفه‌های تنش است به همین دلیل کمی کردن بیان شکل بیضوی تنش معیار مناسبی برای نمایش تغییرات مقادیر سه محور نسبت به یکدیگر است. برای تعیین رژیم تنش‌های زمین ساختی از روش دووجهی راست استفاده شده است که یک روش گرافیکی است که برای تعیین میزان احتمال جهت‌گیری محورهای تنش استفاده می‌شود و مستقل از انتخاب صفحه گرهی است (Angelier and Mechler, 1977). تنسور تنش و مجموع داده‌های به‌دست‌آمده از روش دووجهی راست، نقطه شروع برای بهینه‌سازی چرخشی است. در طول بهینه‌سازی چرخشی، عملکردهای<sup>۶</sup>

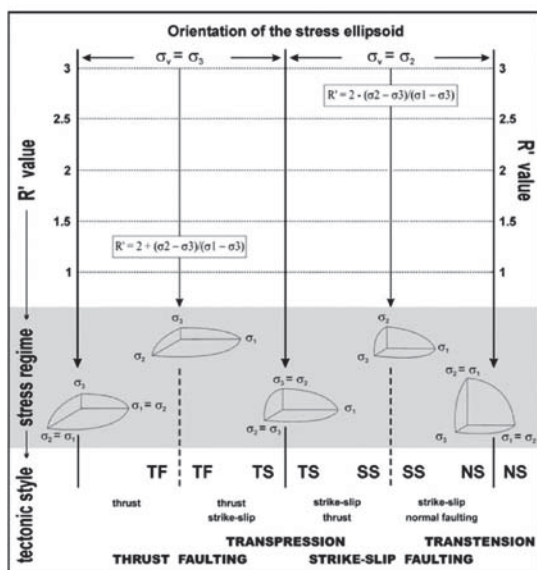
کیفی و کمی گسل‌ها کلید قابل اعتمادی را برای فهم توزیع و تکامل میدان‌های تنش دیرینه فراهم می‌کند.

روش‌های متفاوتی برای تحلیل تنسور تنش از داده‌های لغزش گسلی ناهمگن وجود دارد (مانند: Angelier, 1979; Yamaji, 2000; Reches, 1987; Nemcok and Lisle, 1995; Lisle, 1988; Delvaux and Sperner, 2003). هرچند به‌واسطه فرضیه‌هایی که این روش‌ها روی آنها بنا شده‌اند، در به‌کارگیری این روش‌ها و ارزیابی نتایج حاصله محدودیت‌های معینی وجود دارد (Naieto-Samaniego and Alaniz-Alvarez, 1997) اما فرضیه Wallace-Bott (Wallace, 1951, Bott, 1959) مبنای روش‌های وارون می‌باشد (Sato and Yamaji, 2006). هدف همه این روش‌ها پی بردن به تنش‌های اولیه از طریق به کمینه رساندن مقدار اختلاف بین جهت‌های لغزش مشاهده شده و جهت لغزش پیش‌بینی شده (زاویه عدم انطباق) است. به چنین تنسور تنشی که کمترین اختلاف با تنسور تنش واقعی را دارد تنسور تنش تقلیل یافته<sup>۴</sup> می‌گویند. این تنسور با چهار مولفه به تفسیر رژیم تنش لرزه‌زمین ساختی منطقه می‌پردازد. این چهار مولفه عبارتند از: جهت‌های سه محور اصلی تنش  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  (تنش‌های اصلی فشاری، خنثی و کششی) و شکل میدان تنش،  $R = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_2 - \sigma_3)$ . مهم‌ترین کار در تعیین تنسور تنش یک منطقه این است که تعیین شود برای یافتن تنسور تنش بهینه (تنسور تنش تقلیل یافته) چه فراسنجی مناسب است. بسیاری از پژوهش‌گران مانند Angelier (1974, 1979, 1984, 2002), Carey and Brunier (1974), Delvaux and Sperner (2003) پارامتر زاویه عدم انطباق را، زاویه بین جهت لغزش و حداکثر تنش برشی می‌خوانند. در این معیار فرض اصلی بر پایه فرضیه Wallace (1951) و Bott (1959) (لغزش در جهت حداکثر تنش برشی) استوار است. برای خش‌های لغزش با نوع<sup>۲</sup> حرکت مشخص، تغییرات زاویه عدم انطباق بین صفر تا  $180^\circ$  درجه می‌باشد (Angelier, 2002, Delvaux and Sperner, 2003). زمانی که نوع حرکت مشخص نباشد، فقط جهت‌گیری بردار لغزش تعریف شده است و دو جهت خلاف هم محتمل است. در این مورد بیشترین مقدار زاویه عدم انطباق  $90^\circ$  درجه است (Delvaux

1. Reduced stress tensor  
2. Sens  
3. Improved right dihedral method  
4. Rotational optimization  
5. Counting deviation  
6. Functions

## برداشت و تحلیل داده‌ها

موقعیت خطوط لغزش روی صفحه گسل، در واقع موقعیت حداکثر تنش برشی اعمال شده در اثر عملکرد یک تنسور تنش معلوم است و بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه‌های تنسور تنش تقلیل یافته محسوب می‌شود. کیفیت نتایج به‌دست‌آمده از وارون تنش به پارامترهایی مثل تعداد داده‌ها، انحراف لغزش (زاویه)، نوع داده و حتی تجربه فرد بستگی دارد (Delvaux and Sperner, 2003).



شکل ۲. رژیم‌های تنش، نوع گسل خوردگی و محدوده‌های تنش براساس اندیس رژیم تنش ( $R'$ ) و جهت‌گیری بیضوی تنش با تغییراتی از (Delvaux et al., 1997; Philip, 1987)

چینه‌شناسی این کوه‌ها را مجموعه‌ای از واحدهای سنگی آذرین که اغلب دارای سن ائوسن هستند، تشکیل می‌دهند. برای تشریح رژیم تنش، اقدام به برداشت‌های صحرایی گسل-خش لغزش از روی این چینه‌ها شد که برای این منظور، برداشت‌ها در محدوده ساختارهای زمین‌ساختی بارز منطقه صورت گرفت. اندازه‌گیری‌هایی که برای تحلیل سیستم تنش نیاز است شامل موقعیت صفحات گسلی (شیب و جهت شیب) و خش لغزهای مربوط به آن‌هاست (موقعیت خش لغزش). در تعیین تنسور تنش دیرین تعداد

1. Controlled grid search
2. Misfit function
3. Composite function
4. May reach
5. World stress map

متفاوت بر اساس طبیعت ساختار زمین‌ساختی استفاده شده، بهینه می‌شود (Al Khatib et al., 2010). اساس این روش جستجوی شبکه‌ای کنترل‌شده<sup>۱</sup> با بهینه‌سازی چرخشی دامنه عملکردهای عدم انطباق<sup>۲</sup> می‌باشد. برای عملکردهای عدم انطباق متفاوت، عملکرد مرکب<sup>۳</sup> ( $F5$ )، اجازه انجام هم‌زمان به حداقل رساندن زاویه عدم انطباق برای خش‌های لغزش، 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 می‌دهد. زمانی که از عملکرد مرکب استفاده می‌شود مقدار عملکرد مرکب ( $F5$ ) نشان می‌دهد که داده‌ها قابل مقایسه با تنسور تنش هستند یا نه. مقدار  $F5=0$  بهترین سازگاری را نشان می‌دهد و مقدار  $F5=20$  برای سازگاری نسبتاً خوب<sup>۴</sup> شکستگی‌های کششی و فشارشی و  $F5=22$  برای شکستگی‌های برشی استفاده می‌شود. میزان کیفیت نتایج به‌دست‌آمده نیز بر اساس تعریف در پروژه نقشه تنش جهانی<sup>۵</sup> (WSM) (Zobak, 1992; Sperner et al., 2003)

ارائه می‌شود که از  $A$  (بهترین) تا  $E$  (بدترین) متغیر است. دامنه رژیم‌های تنش نیز به‌صورت عددی به‌وسیله اندیس رژیم تنش ( $R'$ ) (Delvaux et al., 1997) بر اساس نسبت شکلی تنش و نوع رژیم تنش (Delvaux et al., 1997; Delvaux and Sperner, 2003) نشان داده می‌شود که برای مقایسه تنش‌های ناحیه‌ای مناسب است (Delvaux and Sperner, 2003):

- زمانی که  $\sigma_1$  قائم باشد (رژیم تنش کششی)،  $R'=R$
- زمانی که  $\sigma_2$  قائم باشد (رژیم تنش امتدادلغزی)،  $R'=2-R$
- زمانی که  $\sigma_3$  قائم باشد (رژیم تنش فشارشی)،  $R'=2+R$

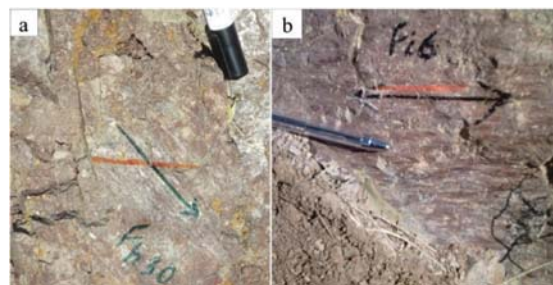
در شکل ۲ رژیم‌های تنش، نوع گسل خوردگی و محدوده‌های تنش براساس اندیس رژیم تنش ( $R'$ ) و جهت‌گیری بیضوی تنش نشان داده شده است.

در این روش تنسورهای تنش نیز با نمادهایی نمایش داده می‌شوند که نشانگر جهت‌گیری و بزرگای محور تنش افقی است و از طرف Guiraud et al. (1989) پیشنهاد شده و به‌وسیله Delvaux et al. (1997) اصلاح شده است.

پارامترها داده‌های خطادار از مجموعه داده‌ها حذف شد تا تاکید کمتری به این داده‌های خطادار (داده‌های با زاویه عدم انطباق و F5 بزرگ) شود و برآورد مطمئن تری از تنسور تنش به دست آید. سپس تنسور تنش مربوط به مجموعه‌ای از داده‌ها، به‌عنوان سیستم تنش غالب در منطقه در نظر گرفته شد که در آن مقادیر درصد داده‌های شرکت‌کننده در تنسور تنش، پارامتر زاویه عدم انطباق، پارامتر F5 و  $n/nt$ : تعداد داده‌های استفاده شده در تنسور تنش و  $nt$ : کل داده‌های به‌کاررفته در محاسبه) حالت بهینه دارند. با توجه به اینکه تعداد داده‌های گسل-خش لغزش فاکتور محدودکننده کیفیت تنسور تنش هستند (Macheyeki, 2008)، برای تنسورهای تنش با زاویه‌های عدم انطباق و F5 مشابه، درصد داده‌های شرکت‌کننده در تنسور تنش و  $n/nt$  پارامترهای اصلی در انتخاب تنسور تنش بهینه می‌باشند. نتایج این تحلیل در شکل ۶ و جدول ۱ آورده شده است.

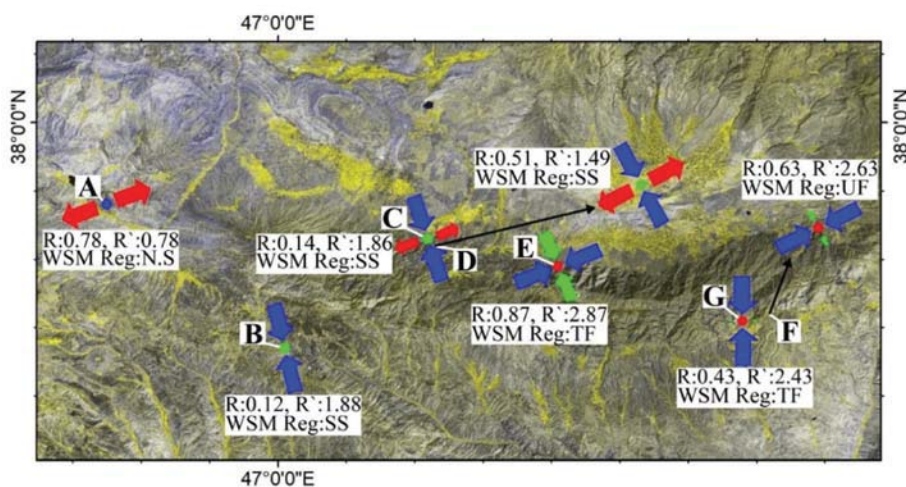
نتایج تحلیل وارون تنش به روش Delvaux and Sperner (2003) از روی خش لغزش برداشت شده صحرائی در منطقه مورد مطالعه، نشانگر غالب بودن رژیم تنش زمین‌ساخت امتدادلغز (SS) در منطقه بر اساس تعریف انواع رژیم‌های تنش در پروژه نقشه تنش جهانی است. این تحلیل نشانگر اعمال تنش فشارشی افقی با راستای تقریبی NNW-SSE و تنش کششی افقی با راستای تقریبی ENE-WSW در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۷).

مولفه‌های محاسبه شده بر پایه تنسور تنش تقلیل یافته تعیین می‌شود، لذا تعداد نمونه‌ها از نظر ریاضی نباید از چهار کمتر باشد (Angelier, 1990). برای تشریح دقیق تر محورهای تنش‌های زمین‌ساختی، داده‌های صحرائی اندازه‌گیری شده توسط نوری (۱۳۹۲) با داده‌های برداشت شده شریفی (۱۳۸۹) تلفیق شد. نمونه‌ای از تصاویر صحرائی گسل-خش اندازه‌گیری شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

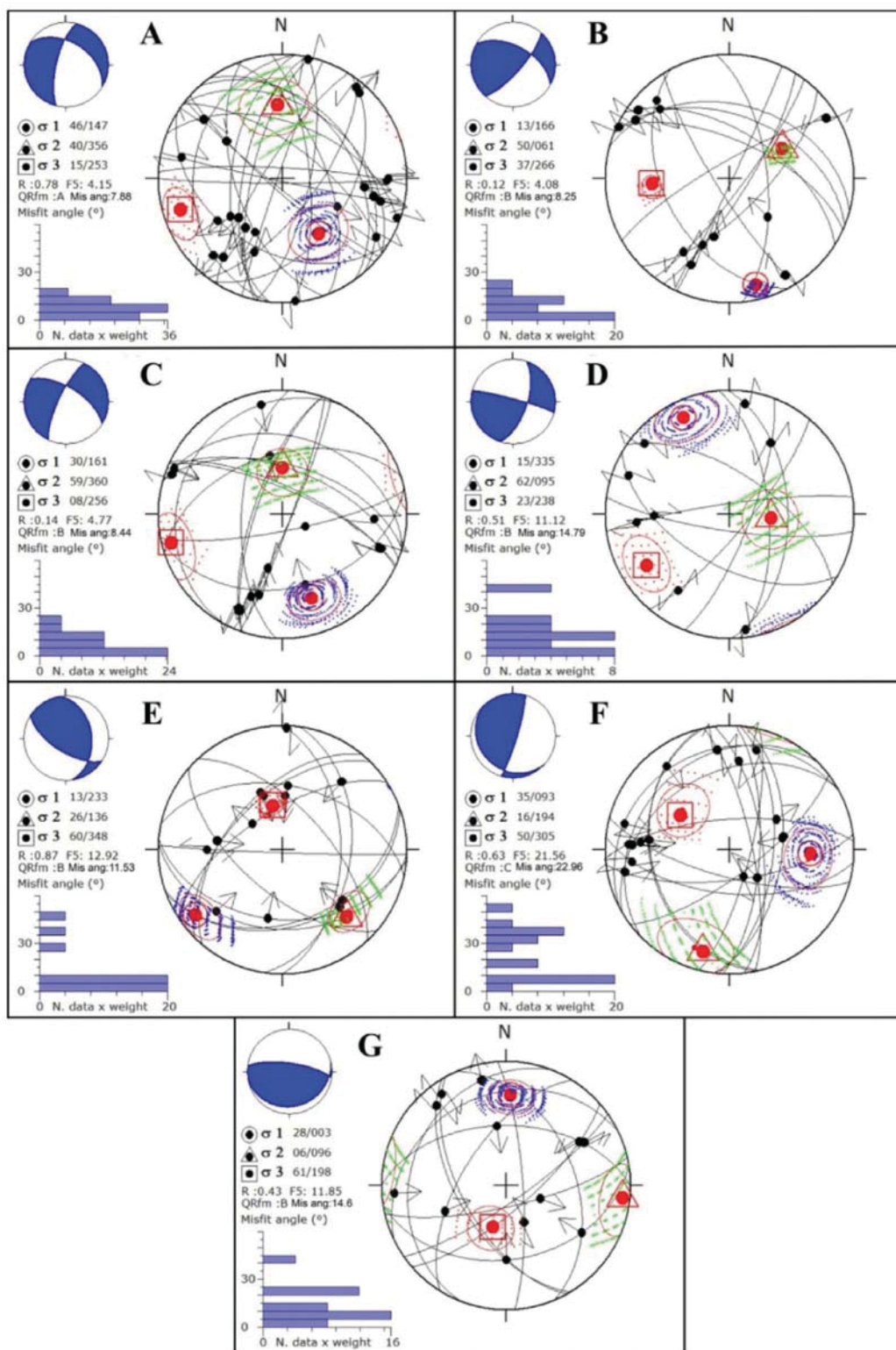


شکل ۳. نمونه‌ای از تصاویر صحرائی اندازه‌گیری شده گسل-خش. موقعیت صفحه و خش در هر یک از صفحات a و b به ترتیب عبارتند از: a: 56/211, 32/146 و b: 72/270, 00/360

ابتدا داده‌های مربوط به هر ایستگاه بعد از فرآوری و رفع خطاهای موجود (حذف داده‌های با زاویه عدم انطباق بزرگ) به‌طور جداگانه مورد تحلیل قرار گرفت (شکل‌های ۴ و ۵). سپس برای تعیین سیستم تنش غالب منطقه، مجموع داده‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. برای رسیدن به این سیستم تنش، ابتدا با توجه به زاویه عدم انطباق و پارامتر F5، داده‌ها چندین بار مورد تحلیل قرار گرفتند و با توجه به همین



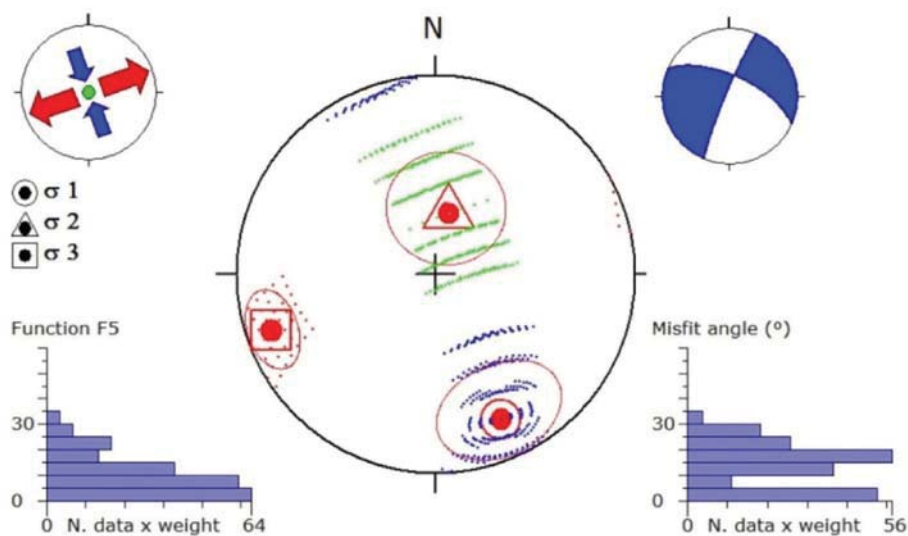
شکل ۴. نتایج وارون تنش در هر ایستگاه. پیکان‌ها نشانگر جهت‌گیری و بزرگای محور تنش افقی است، رنگ آبی مربوط به تنش فشارشی، رنگ سبز مربوط به تنش امتدادلغزی و رنگ قرمز مربوط به تنش کششی. R: نسبت شکلی تنش، R': اندیس رژیم تنش و WSM Reg نشانگر رژیم تنش براساس تعریف در پروژه نقشه تنش جهانی (در مورد نوع رژیم تنش به شکل شماره ۲ مراجعه شود)



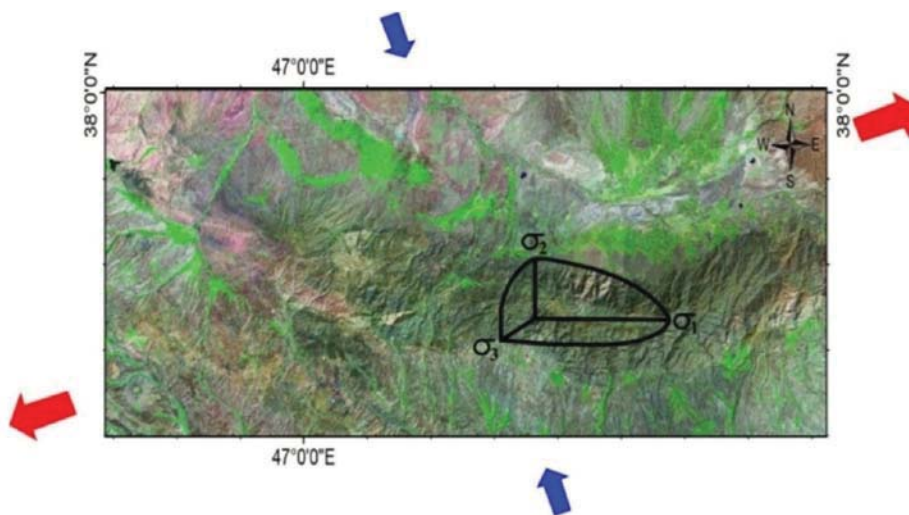
شکل ۵. تصاویر استریوگرافیک و نتایج تحلیل تنسور تنش در هر ایستگاه.  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به ترتیب نشانگر محورهای اصلی تنش فشارشی، خنثی و کششی. R: نسبت شکلی تنش، F5: عملکرد مرکب، QRfm: میزان کیفیت بر اساس تعریف در نقشه تنش جهانی، Mis ang: زاویه عدم انطباق و نمودار نشانگر هیستوگرام مربوط به زاویه عدم انطباق است

جدول ۱. نتایج تحلیل تنش. n/nt: n: تعداد داده‌های استفاده شده در تفسیر تنش و nt: کل داده‌های به‌کاررفته در محاسبه، used data: درصد داده‌های شرکت‌کننده در تفسیر تنش و  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به ترتیب نشانگر موقعیت محورهای اصلی تنش فشارشی، خنثی و کششی هستند که موقعیت آنها به‌صورت میل (دو رقم) و روند (سه رقم) نشان داده شده. R: نسبت شکلی تنش، R': اندیس رژیم تنش، Misfit angle: زاویه عدم انطباق، F5: عملکرد مرکب، QRFm: میزان کیفیت بر اساس تعریف در نقشه جهانی رژیم تنش، WSM Reg: رژیم تنش بر اساس تعریف در پروژه نقشه جهانی تنش

| n/nt | used data | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | R   | <R  | Misfit angle | F5   | QRFm | WSM Reg |
|------|-----------|------------|------------|------------|-----|-----|--------------|------|------|---------|
| 0.55 | 55.2%     | 21/156     | 64/012     | 14/251     | 0.8 | 1.2 | 14.16        | 9.76 | B    | SS      |



شکل ۶. نتیجه تحلیل استریوگرافیک تفسیر تنش برای کل داده‌ها



شکل ۷. جهت‌گیری افقی محورهای تنش فشارشی و کششی و بیضوی مربوط به رژیم تنش غالب در منطقه. پیکان‌ها نشانگر جهت‌گیری و بزرگای محور تنش افقی هستند، پیکان آبی مربوط به محور فشارش و پیکان قرمز رنگ مربوط به محور کشش

## بحث و نتیجه‌گیری

با تحلیل تنش بر پایه سطوح گسلی واجد خش لغزش در منطقه مورد مطالعه، وضعیت تنش دیرین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل نشانگر غالب بودن حرکات امتدادلغزی در منطقه است. این نتیجه در مقایسه با حرکات غالب و ساختارهای فشاری این کوه‌ها می‌تواند متأثر از برداشت‌هایی باشد که در محدوده حرکات امتدادلغزی انتقال یافته گسل شمال تبریز به شمال این کوه‌ها باشد که از مطالعات GPS (Djamour et al., 2011) حاصل شده است. با آنکه مطالعات لرزه‌شناسی دیرین و مورفولوژیکی نشانگر حرکات امتدادلغز راست‌گرد در شرق دریاچه (برکه) قوری گوئل (Solaymani Azad et al., 2015) است ولی نتایج تحلیل داده‌های صحرایی ایستگاه A که در شرق قوری گوئل واقع شده، به‌جای حرکات امتدادلغزی، کشش هم‌سو با کشش میدان تنش کلی را نشان می‌دهد. جهت فشارش مشاهده شده با راستای تقریبی NNW-SSE و ساختار فراخاسته این کوه‌ها (نوری، ۱۳۹۲، Djamour et al., 2011، Zamani and Masson, 2014) و گسل‌های معکوس فعال محدودکننده شمالی (با شیب به سمت جنوب) و جنوبی (با شیب به سمت شمال) این قابل توجه است. به‌علاوه نتایج تحلیل تنش دیرین در این کوه‌ها همانند نتایج تحقیقات Zamani and Masson (2013)، کشش مشاهده شده با روند N-S حاصل از مطالعات GPS (Djamour et al., 2011) در این کوه‌ها را نشان نمی‌دهد. ولی در تحلیل تنش دیرین از خش‌های لغزش روی صفحات گسلی، باید توجه کرد که با ایجاد یک واقعه گسلش، صفحات با جهت‌یابی‌های مختلف، همگی تحت تأثیر یک میدان تنش و با یک تنسور معلوم خواهند لغزید (Lisle, 1989). از طرفی دیگر تنش‌های همگن<sup>۱</sup> تأثیری روی مقدار و موقعیت تنش برشی حداکثر نداشته و روی شکل میدان تنش نیز بی‌تأثیر هستند (Angelier, 1989) اما الگوی گسل خوردگی می‌تواند به‌وسیله حوادث دگرشکل‌ی بعدی پیچیده شود. لذا در وارون‌سازی داده‌های گسل-خش لغزش تنسور تنش همگن نادر است. (Delvaux and Sperner, 2003) بنابراین تنسور تنش تقلیل یافته از تنسور تنش واقعی مقداری انحراف خواهد داشت (Delvaux and Sperner, 2003). از طرفی دیگر

در مورد میدان تنش محاسبه شده از داده‌های گسل-خش لغزش با روش‌های وارون باید توجه داشت:

تمام روش‌های وارون برای به دست آوردن جهت مؤثر اعمال تنش و میدان تنش از روی اثرات خش‌لغزهای صفحات گسلی، دارای پیش‌فرض‌های پایه یکسانی هستند. این پیش‌فرض‌ها عبارتند از:

۱. لغزش بر روی سطح گسل‌ها در جهت حداکثر تنش برشی اتفاق می‌افتد. این پیش‌فرض مستلزم آن است که ناهماهنگی‌های موضعی (شامل اندرکنش با گسل‌های دیگر) که ممکن است مانع لغزش آزاد بر روی سطح هر گسل شوند، وجود نداشته باشد.
۲. داده‌ها چه از نظر زمانی و چه از نظر مکانی، نشانگر یک میدان تنش یکنواخت هستند. این امر مستلزم آن است که هیچ دگرریختی پس از لغزش در ناحیه رخ نداده باشد تا سبب تغییر وضعیت گسل‌ها گردد.
۳. حرکت یک گسل مستقل از صفحات گسلی دیگر است و اثری بر سمت لغزش صفحات گسلی دیگر ندارد. این مستلزم آن است که جابجایی در پهنه‌های گسلی تأثیری در حرکت گسل‌های دیگر نداشته باشند.
۴. بلوک‌های محدود شده با گسل، چرخش نمی‌کنند.

و لذا علت ناهماهنگی تنش در این منطقه و مقدار نه‌چندان زیاد درصد داده‌های شرکت‌کننده در تنسور تنش به‌دست‌آمده (۵۵/۲ درصد) می‌تواند به عواملی ارتباط داشته باشد که عبارتند از:

ساختار فراخاسته کوه‌های بزقوش می‌تواند بر روی چرخش صفحات گسلی آن بسیار مؤثر باشد. به‌علاوه وجود پدیده‌های محلی (Djamour et al., 2011) و آهنگ بالآمدگی متفاوت در قسمت‌های مختلف این رشته کوه که تا به امروز مطالعه نشده است در صورت وجود، می‌تواند چرخش‌های متفاوتی را ایجاد کند. عامل دیگری که می‌تواند مسبب چرخش صفحات گسلی شود، قرارگیری این کوه‌ها در ادامه جنوب شرقی گسل شمال تبریز (با حرکات راستالغزی راست‌گرد با مولفه معکوس) و ادامه جنوب غربی گسل میانه - اردبیل (با حرکات غالب راستالغزی راست‌گرد) است که می‌تواند چرخش در صفحات گسلی را متفاوت و مضاعف کند. یکی دیگر از عوامل چرخش صفحات گسلی،



in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophysical Journal International*, 103(2), 363-376.

- Angelier, J., 1994. Paleostress determinations. In: Hancock, P.L. (Ed.), *Continental Deformation*. Pergamon Press, Tarrytown, NY, 53-100.

- Angelier, J.T. and Mechler, P., 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisables en tectonique et en seismologie: la methode des dièdres droits. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(6), 1309-1318.

- Bott, M.H.P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96(02), 109-117.

- Carey, E. and Brunier, B., 1974. Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *CR Acad. Sci. Paris*, 279(D), 891-894.

- Delvaux, D. and Barth, A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. *Tectonophysics*, 482(1), 105-128.

- Delvaux, D. and Sperner, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society, London, Special Publications*, 212(1), 75-100.

- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Melnikov, A. and Ermikov, V., 1995. Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. *Tectonophysics*, 252(1-4), 61-101.

- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. and San'kov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectono-*

موقعیت صفحه گسل در میدان تنش است. در شرایط یکسان بسته به موقعیت صفحه گسل نسبت به محورهای اصلی تنش، میزان چرخش گسل‌ها متفاوت خواهد بود. این عوامل نشان می‌دهد که دگرشکلی در بخش‌های مختلف کوه‌های بزقوش می‌تواند متفاوت باشد و لازم است این دگرشکلی در بخش‌های مختلف این کوه‌ها مطالعه شود. به نظر (Djamour et al., 2011) دگرشکلی امروزی کوه‌های بزقوش خیلی پیچیده‌تر از یک ساختار برخاسته در نتیجه ساختار دم‌اسبی<sup>۲</sup> و یا تغییر جهت‌گیری گسل‌هاست و برای ارزیابی بهتر دگرشکلی‌های محلی در کوه‌های بزقوش ایجاد یک شبکه فشرده GPS لازم است.

## منابع

- الیاسی، م. و احمدیان، س.، ۱۳۸۷. آرایش هندسی مسیرهای  $\sigma_1$  در گستره کن-کرج (بخش جنوبی البرز مرکزی) بر پایه وارون سازی چندمرحله‌ای. فصلنامه علوم زمین، ۶۷، ۱۴۹-۱۴۰.

- شریفی، ق.، ر.، ۱۳۸۹. بررسی ساختارهای تکتونیک شمال گسل تبریز-زنجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۸.

- نوری، م.، ا.، ۱۳۹۲. مطالعه ساختار و ساینموتکتونیک گسل شمال تبریز (فاصله بستان‌آباد تا مرند) و برآورد تنش‌های زمین ساختی مرتبه سوم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۲۶.

- Al Katib, N., Ataallah, M. and Diabat, A., 2010. Paleostress Analysis of the Cretaceous Rocks in Northern Jordan. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 3(1), 25-36.

- Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56(3-4), 17-T26.

- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835-5848.

- Angelier, J., 1989. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 11(1-2), 37-50.

- Angelier, J., 1990. Inversion of field data

1. Uplift

2. Horsetail

physics, 282(1-4), 1-38.

- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H.R. and Tavakoli, F., 2011. NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1), 27-34.
- Doblas, M., 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295(1), 187-197.
- Dunne, W.M. and Hancock, P.L., 1994. Palaeostress analysis of small-scale brittle structures. *Continental deformation*, 5, 101-120.
- Guiraud, M., Laborde, O. and Philip, H., 1989. Characterization of various types of deformation and their corresponding deviatoric stress tensors using microfault analysis. *Tectonophysics*, 170(3-4), 289-316.
- Jacques, A., 2002. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV—a new method free of choice among nodal planes. *Geophysical Journal International*, 150(3), 588-609.
- Lisle, R.J., 1988. ROMSA: a BASIC program for paleostress analysis using fault-striation data. *Computers and Geosciences*, 14(2), 255-259.
- Lisle, R.J., 1989. Paleostress analysis from sheared dike sets. *Geological Society of America Bulletin*, 101(7), 968-972.
- Macheyeiki, A.S., Delvaux, D., De Bastist, M. and Mruma, A., 2008. Fault kinematics and tectonic stress in the seismically active Man-yara-Dodoma Rift segment in Central Tanzania—Implications for the East African Rift. *Journal of African Earth Sciences*, 51(4), 163-188.
- Nemcok, M., 1995. A stress inversion procedure for polyphase fault/slip data sets. *Journal of Structural Geology*, 17(10), 1445-1453.
- Nieto-Samaniego, A.F. and Alaniz-Alvarez, S.A., 1997. Origin and tectonic interpretation of multiple fault patterns. *Tectonophysics*, 270(3-4), 197-206.
- Philip, H., 1987. Plio-Quaternary evolution of the stress field in Mediterranean zones of subduction and collision. *Annales Geophysicae*, 301-320.
- Reches, Z.E., 1987. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics*, 6(6), 849-861.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2006. Uniform distribution of points on a hypersphere for improving the resolution of stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, 28(6), 972-979.
- Soleymani Azad, S., Philip, H., Dominguez, S., Hessami, K., Shahpasandzadeh, M., Foroutan, M., Tabassi, H. and Lamothé, M., 2015. Paleoseismological and morphological evidence of slip rate variations along the North Tabriz fault (NW Iran). *Tectonophysics*, 640, 20-38.
- Sperner, B., Müller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J. and Fuchs, K., 2003. Tectonic stress in the Earth's crust: Advances in the World Stress Map project. *Geological Society, London, Special Publications*, 212(1), 101-116.
- Wallace, R.E., 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Geology*, 59(2), 118-130.
- Yamaji, A., 2000. The multiple inverse method applied to meso-scale faults in mid-Quaternary fore-arc sediments near the triple trench junction off central Japan. *Journal of Structural Geology*, 22(4), 429-440.
- Zamani, B. and Masson, F., 2014. Recent tectonics of East (Iranian) Azerbaijan from stress state reconstructions. *Tectonophysics*, 611, 61-82.
- Zoback, M.L., 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11703-11728.