

وارون سازی تنش با استفاده از نتایج تفسیر داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها

محسن غلامی درگاهی^{۱*}، شاهرخ پوربیرانوند^۲، مهدی تلخابلو^۱

۱. دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین

۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۱۱ پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

چکیده

اطلاع از میدان تنش و تحولات مکانی و زمانی آن، در شاخه‌های مختلف علوم زمین مانند ژئوتکنیک، زمین‌شناسی مهندسی و همینطور در مطالعات مخازن هیدروکربوری (ژئومکانیک مخازن) نقش مهمی دارد. علاوه بر این در تشریح ژئودینامیک منطقه نیز اهمیت اساسی دارد. در این مطالعه، میدان تنش دیرین با پیاده‌سازی روشی جدید در تعیین جهت لغزش با استفاده از تفسیر داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران در افق‌های گوناگون با سنین مختلف زمین‌شناسی، به وسیله روش وارون سازی تانسور تنش برآورد شد. راس‌های به دست آمده در بازه ۱۱۵ تا ۱۲۱ درجه واقع شده‌اند. همچنین، میدان تنش عهد حاضر نیز با استفاده از داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با همان روش محاسبه گردید که مقدار آن برابر با ۳۲ درجه به دست آمد. این مطالعه نشان داد که در گذر زمان، چرخشی در جهت راستای تنش افقی بیشینه اتفاق افتاده، و جهت‌گیری آن که از دوره کرتاسه تا الیگوسن حدوداً ثابت و تقریباً دارای راستای شمال غربی-جنوب شرقی بوده است، به راستای شمال شرقی-جنوب غربی در عهد حاضر تبدیل شده است. به دلیل عدم وجود داده‌های کافی، اظهار نظر در مورد ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بودن این چرخش امکان پذیر نیست. لذا مطالعات دقیق‌تری در این زمینه در منطقه، مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی: میدان تنش، وارون‌سازی غیرخطی تنش، داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، ساز و کار کانونی زمین‌لرزه‌ها

Stress inversion studies using 3D seismic interpretation data and earthquakes focal mechanism

Mohsen Gholami Dargahi^{1*}, Shahrokh Pourbeyranvand², Mehdi Talkhablou³

1. Kharazmi University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran.

2. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran.

3. Kharazmi University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran.

Abstract

Knowledge of the stress field and its spatial and temporal changes has an essential role in important branches of earth sciences such as geotechnics, engineering geology and also in hydrocarbon reservoirs studies (reservoirs geomechanics). Furthermore, it is necessary in describing the geodynamics of the region. In this study, the paleostress field was estimated by implementing a new method to determine the direction of slip using the interpretation of 3D seismic data in one of the hydrocarbon fields of southern Iran in different horizons with various geological ages by stress tensor inversion. The obtained directions are in the range of 115 to 121 degrees. Also, the present-day stress field was calculated from the earthquake's focal mechanism data in the same way. The value of which was equal to 32 degrees. This study showed that over time, a rotation occurred in the direction of maximum horizontal stress and its orientation, which was approximately constant from the Cretaceous to the Oligocene and had a near northwest-southeast direction, became northeast-southwest in the present era. Due to the lack of sufficient data, it is impossible to comment on whether this rotation is clockwise or counterclockwise. Therefore, more detailed studies in this area in the region are needed.

Keywords: stress field, non-linear stress inversion, 3D seismic data, earthquakes focal mechanism

*Corresponding Author: m.gholami.920707@gmail.com

مقدمه

در مطالعات زمین‌ساختی، تحلیل دینامیکی نقش بسیار مهمی را داراست. منظور از تحلیل دینامیکی، مشخص کردن جهت تنش‌های مؤثر در شکل‌گیری و پیدایش ساختارهای زمین‌ساختی است. برای این کار روش‌های مختلفی از جمله روش‌های زمین‌ساختی مثل وارون‌سازی داده‌های لغزش گسلی، روش‌های زمین‌فیزیکی مثل وارون‌سازی سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها و روش‌های دستگاهی مثل نگاربرداری برای تحلیل ریزش‌های تنشی دیواره‌چاه، ارائه شده است. در این میان، از روش زمین‌فیزیکی برای محاسبه تنش عهد حاضر و از روش زمین‌ساختی برای تعیین جهت تنش عهد دیرین، شامل استفاده از صفحات گسلی که تنش‌های وارد شده را در خود ثبت می‌کنند، استفاده می‌شود (عباسی و فرید، ۱۳۸۳). گسل‌ها شکستگی‌هایی هستند که در اثر نیروی وارد شده بر آنها، بلوک‌های دو طرف شکستگی نسبت به همدیگر و در جهت تنش برشی بیشینه جابه‌جا می‌شوند. تحلیل کیفی و کمی این گسل‌ها، راه حل مطمئنی را برای درک توزیع و تکامل میدانهای تنش از رویدادهای تکتونیکی مهیا می‌سازد. اما گاهی ممکن است گسل رخنمون نداشته باشد و در نتیجه داده‌های لغزش گسلی در دسترس نباشند. در چنین مواردی، استفاده از تفسیر لرزه‌نگاری سه‌بعدی می‌تواند در مطالعات تنش دیرین‌گره‌گشا باشد. این رهیافت که در ابتدا توسط گاترل و لیسک پیشنهاد شد، در ادامه توسط لوهر و همکاران و سپس توسط ون‌گنت و همکاران بسط و توسعه یافت (Gartrell and Lisk, 2005; Lohr et al., 2008; Van Gent et al., 2009). بنابر مطالعات گاترل و لیسک، تخمین جهت‌گیری‌ها و بزرگای تنش دیرینه از داده‌های لرزه‌ای، از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های لغزش گسلی به دست آمده با استفاده از تکنیک‌های بازگردانی^۱ سه‌بعدی، امکان‌پذیر است و نتایج به دست آمده در موارد مطالعاتی با مشاهدات منطقه‌ای مطابقت دارد (Gartrell and Lisk, 2005). البته وجود چندین منبع خطا در رابطه با کیفیت داده‌های موجود، تفسیر لرزه‌ای، تکنیک‌های بازگردانی و روش وارون‌سازی قابل ذکر است. ون‌گنت و همکاران یک روش جدید به منظور بازسازی تنش دیرینه در سطوح زیرسطحی که امکان اندازه‌گیری‌های لغزش گسل با روش‌های سنتی مبتنی بر برون‌زد صفحه گسل ممکن نیست، معرفی کردند. که در آن برای تعیین سطوح گسل و بردارهای لغزش، از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و بازگردانی ساختمانی استفاده شد. از این داده‌ها به عنوان ورودی برای الگوریتم بازسازی تنش دیرینه استفاده گردید و یک روش بازگردانی گام به گام برای حذف تغییرشکل‌های جوان‌تر به منظور دستیابی به بردارهای لغزش مربوط به رویدادهای منجر به تغییرشکل‌های قدیمی‌تر انتخاب شد. همچنین نتایج ارائه شده، با تفسیرهای تنش دیرینه منطقه مورد مطالعاتی سازگار بوده است. اما در عین حال، نیازمند به ارزیابی‌های نقادانه بیشتری در مورد سوالات مربوط به اندازه میدان تنش همگن، موضوعات مهم فرضیات اصلی وارون‌سازی تنش، و بحث پیرامون ابهام در استخراج شاخص‌های لغزش گسل از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، می‌باشد (Van Gent et al., 2009). در مطالعه حاضر، از روش وارون‌سازی توأم تکرار شونده برای تحلیل دینامیک گسل‌ها به کمک داده‌های لغزش گسلی (راستا ϕ ، شیب δ ، زاویه لغزش λ) حاصل از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده و داده‌های ساز و کار کانونی زمین‌لرزه‌ها، استفاده شده است.

¹ restoration

هدف این مطالعه شامل بررسی نتایج مطالعات تنش دیرین انجام شده در پوشش رسوبی منطقه و مقایسه آن با وضعیت کنونی تنش در همان منطقه، و تعیین نحوه فرگشت زمین‌ساختی منطقه جنوب‌غربی زاگرس با استفاده از اطلاعات به دست آمده از تنش دیرین و حالت کنونی تنش می‌باشد.

روش انجام پژوهش

وارون‌سازی توأم تکرارشونده

در مورد وارون‌سازی تنش، الگوریتم‌های خطی و غیرخطی متعددی وجود دارد. استفاده از روش‌های مختلف برای مطالعه وضعیت تنش این مزیت را به همراه دارد که در صورت مشابهت نتایج، آن‌گاه نتایج دارای سطح اطمینان بالاتری خواهند بود. از سوی دیگر با توجه به شناختی که از منطقه در دست است می‌توان به مطالعه نتایج حاصل از هر دو روش پرداخت و روشی که بهترین جواب را به دست می‌دهد معرفی نمود. برتری روش‌های خطی، مؤثرتر و سریع‌تر بودن، عدم نیاز به حدس اولیه در مورد جواب و آسانی بیشتر در به دست دادن حدود اطمینان است. در نقطه مقابل، روش‌های غیرخطی به پیش‌فرض‌های کمتری نیاز دارند و جواب واقعی‌تری به دست می‌دهند (پوربیرانوند، ۱۳۹۱).

تمام روش‌های وارون‌سازی تنش نیازمند تشخیص صفحه گسلی از صفحه کمکی می‌باشند. انتظار می‌رود صفحه گسل در میدان تنش به دست آمده، ناپایدارتر باشد (Vavry'cuk, 2014). این رویکرد توسط لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) مورد استفاده قرار گرفت و جهت‌گیری دو صفحه گرهی در میدان تنش بررسی شده، آن صفحه گرهی که ناپایدارتر بود به عنوان صفحه گسل برگزیده شد (Lund and Slunga, 1999). این ناپایداری با معیار موهر-کلمب سنجیده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - 1)}{\mu + \sqrt{1 + \mu^2}} \quad (1)$$

که در آن،

$$\sigma = n_1^2 + (1 - 2R)n_2^2 - n_3^2 \quad (2)$$

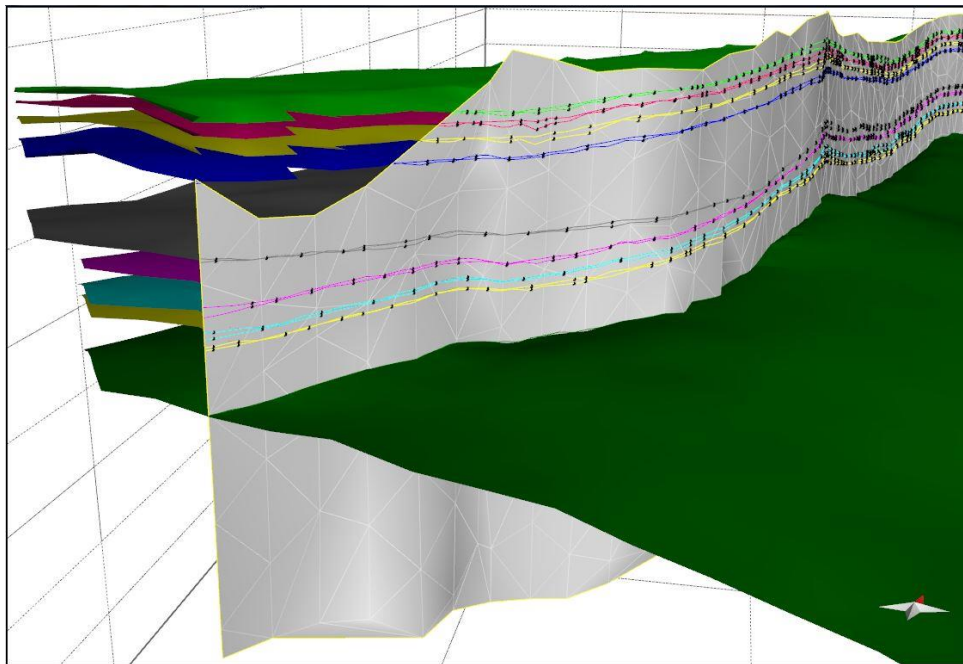
$$\tau = \sqrt{n_1^2 + (1 - 2R)^2 n_2^2 + n_3^2 - [n_1^2 + (1 - 2R)^2 n_2^2 + n_3^2]^2} \quad (3)$$

$R = (\sigma_1 - \sigma_r) / (\sigma_1 - \sigma_r)$ ، بزرگای نسبی یا نسبت شکلی، n بردار نرمال گسل و μ ضریب اصطکاک سطح گسل هستند. μ دارای مقادیری بین ۰/۲ و ۰/۸ است (Vavry'cuk, 2013). برای ترسیم دایره موهر سه بعدی، در دست داشتن بزرگای نسبی کافی است (Gephart and Forsyth, 1984). لذا صفحه‌های گرهی در نمودار موهر مشخص می‌شوند و چون وارون سازی توأم تکرار شونده نسبت به μ حساس نیست، رابطه ناپایداری برای مقادیر مختلف μ را می‌توان حل کرد و صفحه گرهی که بالاترین ناپایداری را داشته باشد به عنوان صفحه گسل در نظر گرفت.

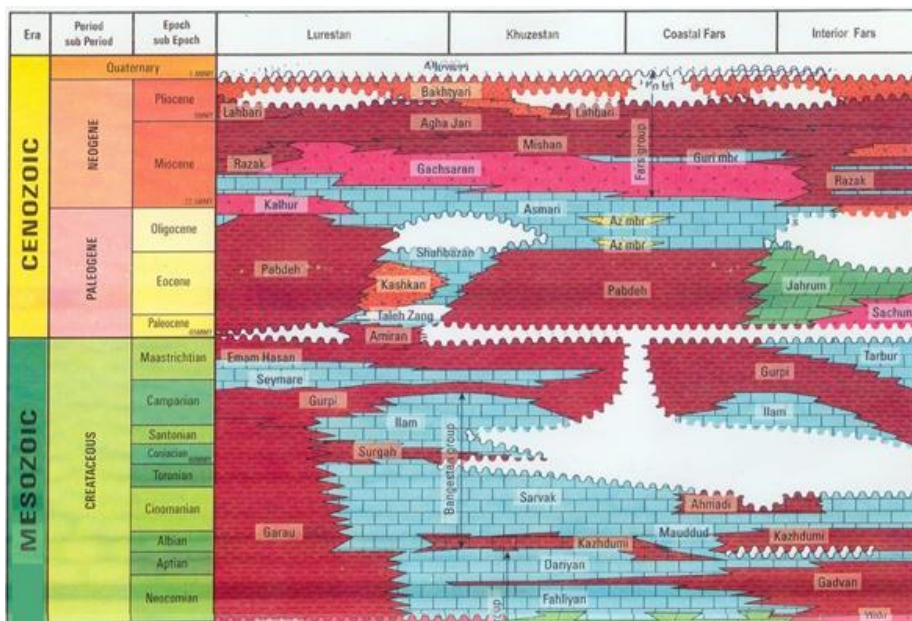
با در نظر گرفتن قید ناپایداری، وارون سازی منجر به تکرار می‌شود، یعنی تنش به جای محاسبه در یک مرحله، بعد از چند بار تکرار محاسبه می‌شود. در الگوریتم وارون سازی توأم تکرار شونده در مرحله اول، روش مایکل با صفحه گسلی اتفاقی، اجرا می‌شود (Michael, 1984). سپس جهت‌های تنش‌های اصلی و بزرگای نسبی در این مرحله مشخص می‌شوند. این مقادیر سپس در معادله ناپایداری جاگذاری می‌شوند و ناپایداری و به تبع آن صفحه گسل تعیین می‌شود. در تکرار بعدی یا تکرارهای بالاتر، روش مایکل (۱۹۸۴) با صفحه‌های گسل تعیین شده با قید ناپایداری، اجرا می‌شود و این فرایند تا هنگامی که تنش به یک مقدار همگرا شود ادامه می‌یابد. تجربه به دست آمده از آزمون‌های عددی نشان می‌دهند که این فرایند بعد از ۳ یا ۴ تکرار همگرا خواهد شد (Vavry'cuk, 2014).

داده‌های لرزه‌ای سه بعدی تفسیر شده

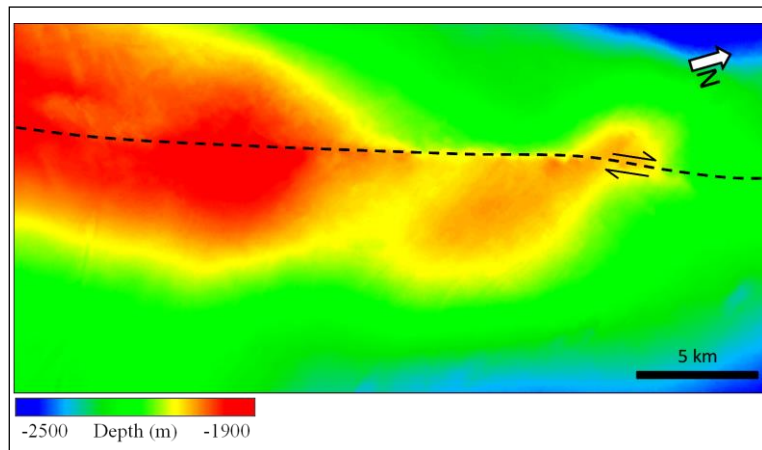
مکعب سه بعدی تفسیر شده بر اساس داده‌های لرزه‌ای مهاجرت یافته پیش از برانبارش، با سطح ۶۰۰ کیلومتر مربع، یک میدان هیدروکربوری در جنوب غربی ایران را پوشش می‌دهد. طول گسل در مکعب سه بعدی ۳۵ کیلومتر اندازه‌گیری شده و عمق این گسل عرضی عمیق، بیش از ۱۰ کیلومتر است. روند عربی این گسل (تقریباً شمالی-جنوبی) نشانه‌ای از پی سنگی بودن آن است و این گسل راست‌الغز راست‌بر، بسیار شیب‌دار یا عمودی است (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ طیب حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). تعدادی افق بر روی این مکعب سه بعدی، برای به دست آوردن جزئیات منطقه گسلی تفسیر شده‌اند. افق‌های تفسیر شده که توسط گسل قطع شده‌اند، و خطوط آلن که محصول تقاطع افق‌های تفسیر شده با صفحه گسلی هستند، به انضمام مجموعه جفت نقاط جدایشی که در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرند، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. نام افق‌ها و سازندها نیز از شکل ۲ قابل استخراج می‌باشد که از این میان، نقشه عمقی افق فهلیان مربوط به زمان کرتاسه زیرین (گروه خامی) در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱- تقاطع برخی از افق‌های تفسیر شده با گسل اصلی منطقه، و خطوط آلن (Allan) حاصل از تقاطع، و جفت نقاط جدایشی.
Figure 1. The intersection of some interpreted horizons with the main fault of the region, and Allan lines resulting from the intersection, and pairs of separation points.



شکل ۲- ستون چینة شناسی گستره زاگرس در زمانهای زمین‌شناسی مورد بررسی (Alizadeh et al, 2015).
Figure 2. Stratigraphic column of the Zagros area in geological times under study.



شکل ۳- نقشه عمقی افق فهلیان مربوط به زمان کرتاسه زیرین (گروه خامی)، (پوربیرانوند، ۱۳۹۱).

Figure 3. Depth map of the Fahliyan horizon related to Lower Cretaceous time (Khami group) (Pourbeyranvand, 2012).

افق‌های تفسیر شده در شکل ۱، از شکل ۲ قابل استعلام اند. با توجه به شکل ۲، مرز بالایی سازند سروک (کرتاسه بالایی) از گروه سازندی بنگستان، یک ناپیوستگی دارد که مربوط به عصر تورونین است. این ناپیوستگی و تنوع ضخامت در سازند سروک به علت بالآمدگی در نتیجه رژیم تنش‌های فشارشی ایجاد شده است (نوری، ۱۳۸۸). این بالآمدگی‌های خطی و اختلافات شدید و ناگهانی در توپوگرافی که در امتداد روندهای موجود در پی سنگ است، و همچنین متعاقب آن، این تغییر ضخامت و نازک شدن روی همین بلنداهای قدیمی، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم نشان‌دهنده فعال شدن گسل‌های بزرگ و عمیق پی‌سنگی واقع در زیر بلنداهای، به‌ویژه گسل مورد مطالعه باشد. که با توجه به مقطع لرزه‌نگاری، حداکثر فعالیت بلنداهای و گسل‌های مسبب آن، هم‌زمان با نهشته شدن سازندهای گروه بنگستان (سروک و ایلام) اتفاق افتاده، به‌طوری‌که باعث نازک شدن و فرسایش این دو سازند در اواخر دوره کرتاسه شده است. هم‌این‌طور در سازندهای گورپی مربوط به کرتاسه بالایی، و پابده و آسماری مربوط به ترشیری نیز تا حدودی نازک شدن قابل مشاهده است که نشان‌دهنده ادامه فعالیت بلنداهای و گسل‌های پی‌سنگی مورد نظر است. پس از آسماری تا عهد حاضر نیز نازک شدن روی مقطع لرزه‌نگاری دیده می‌شود که نشان می‌دهد فعالیت بلنداهای همچنان ادامه داشته و حتی ممکن است در اثر نیروهای زاگرس نیز تا حدی تشدید شده باشد (طیب‌حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

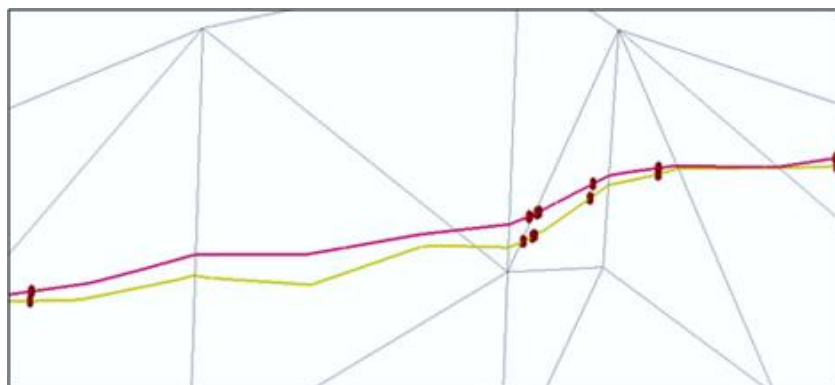
برآورد داده‌های لغزش گسلی از داده‌های لرزه‌ای

به منظور وارون سازی تنش همان‌طور که پیش‌تر در مقدمه اشاره شد، داده‌های لغزش گسلی از جمله راستای گسل Φ ، شیب گسل δ ، و زاویه لغزش λ (راستای تنش برشی بیشینه) به‌عنوان ورودی‌های ضروری نرم‌افزار وارون سازی تنش مورد نیاز است. در همین راستا و در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم‌افزار مدل سازی زمین‌شناسی ساختمانی Move از مجموعه Petroleum Experts (Petex) (Petex. (n.d.). MOVE Core)، سطح سه‌بعدی گسل به صورت مثلث‌بندی مشبک شده و هر مثلث سازنده سطح گسل به‌عنوان یک صفحه گسلی مجزا در نظر گرفته شد (شکل ۳). در واقع هرچند که صفحه گسل در کلیت می‌تواند نامسطح باشد، اما هر مثلث به تنهایی مسطح است. از تقاطع این صفحه گسلی مثلث‌بندی شده با

افق‌های زمین‌شناسی، فصول مشترکی تحت عنوان خطوط آلن پدیدار می‌شوند که در تعیین زاویه لغزش (λ) نقش اساسی دارند.

در رابطه با استخراج داده‌های لغزش گسلی، را ستا (Φ) و شیب (δ) هر صفحه گسلی (هر مثلث) دقیقاً از مدل سه‌بعدی ساختاری آن به آسانی و به‌طور مستقیم از نرم‌افزار مدل‌سازی مذکور به دست می‌آید. اما محاسبه زاویه لغزش (λ) به‌عنوان سومین داده لغزش گسلی، همیشه به منزله مشکل‌ترین بخش در مطالعات تنش دیرین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای است. در رابطه با استخراج زاویه لغزش (λ)، محاسبه آن با استفاده از داده‌های (جفت نقطه) جدایشی^۲ ارائه شده توسط الگوریتم برش مایل^۳، و به‌وسیله همان نرم‌افزار انجام می‌پذیرد. در اینجا، در ابتدا به ارتباط بین بردار لغزش و جفت نقطه جدایشی پرداخته شده و پس از فرمول‌بندی محاسبه زاویه λ ، آن‌گاه ارتباط موجود بین نحوه استخراج جفت نقطه جدایشی و الگوریتم برش مایل، به تفصیل تشریح می‌شود.

ارتباط بردار لغزش ریک با جفت نقطه جدایشی به این صورت است که، این جفت نقطه فرضی که پیش از وقوع گسلش جزو یک افق یکپارچه بوده و با همدیگر هم‌مختصات بوده‌اند، حال به دلیل وقوع گسلش از همدیگر جدا شده و به دو نقطه مجزا در صفحه گسل تبدیل می‌شوند، و اکنون خط فرضی‌ای که این دو نقطه را به هم متصل گرداند در واقع جهت جابجایی گسل یا همان جهت لغزش در صفحه گسل را در آن محدوده نشان می‌دهد (شکل ۴). بنابراین، بردار اتصال‌دهنده جفت نقطه جدایشی همان بردار لغزش است، و زاویه آن بردار با بردار راستای گسل نیز همان زاویه لغزش ریک (λ) می‌باشد (شکل ۵). مسئله مهم، یافتن مختصات این دو نقطه بر روی صفحه گسل پس از وقوع گسلش است.

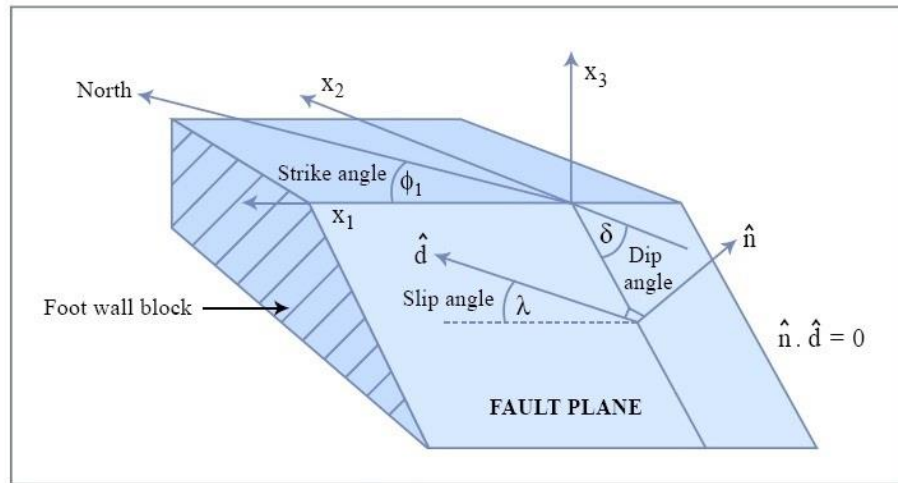


شکل ۴- خطوط آلن (خط قرمز یا تیره تر، و خط زرد یا روشن تر) هر دو منتسب به یکی از افق‌های تقطیع یافته توسط گسل اصلی و نیز برخی از جفت‌های جدایشی برای نمونه. در اینجا هنوز هیچ جفت نقطه‌ای به هم متصل نشده‌اند. مثلث‌های سازنده سطح گسل هم با اضلاع خاکستری نمایان است (پوربیرانوند، ۱۳۹۱).

Figure 4. Allan lines (red or darker line, and yellow or lighter line) are both attributed to one of the horizons fragmented by the main fault and some separation pairs, for example. No pair of dots are connected here yet. The constituent triangles of the fault surface are also plotted in gray (Pourbeyranvand, 2012).

² separation

³ Inclined shear



شکل ۵- بردار فرضی \hat{d} همان بردار جابجایی گسل یا همان خط واصل جفت نقطه جدایشی فرضی است؛ و پارامتر λ نیز بیانگر ریک (زاویه لغزش) می باشد (<https://ocw.mit.edu/terms>).

Figure 5. The hypothetical vector \hat{d} is the same as the fault displacement vector or the line joining the hypothetical separation point pair; And the parameter λ also indicates the rake (slip angle) (<https://ocw.mit.edu/terms>).

مطابق آن چه که تا کنون ارائه گردید، با فرض دانستن مختصات جفت نقطه جدایشی، فرمول بندی و محاسبه زاویه لغزش ریک λ (زاویه فضایی مابین بردار خط واصل جفت نقطه جدایشی و بردار راستای گسل)، به طریق زیر امکان پذیر است. در ابتدا بردار خط واصل جفت نقطه جدایشی (بردار جابجایی یا بردار لغزش) در دستگاه مختصات کارتزین به این صورت نوشته می شود:

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (X_1 - X_2, Y_1 - Y_2, Z_1 - Z_2) \quad (4)$$

سپس بردار راستای گسل را نیز می توان از روی حرکت ساعت گرد زاویه Φ نسبت به شمال جغرافیایی به صورت زیر نوشت:

$$(\sin(\Phi), \cos(\Phi), 0) \quad (5)$$

زاویه بین دو بردار دلخواه a و b از معادله زیر محاسبه می شود:

$$\lambda = \cos^{-1} \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|} \quad (6)$$

بنابراین با جایگذاری بردارهای (۴) و (۵) به ترتیب به جای بردار a و b در معادله (۶)، زاویه لغزش ریک (λ) در نهایت به شکل ساده شده زیر به دست می آید:

$$\text{Rake} = \pm \lambda = \cos^{-1} \frac{\Delta X \cdot (\sin(\Phi)) + \Delta Y \cdot (\cos(\Phi))}{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)^{1/2}} \quad (7)$$

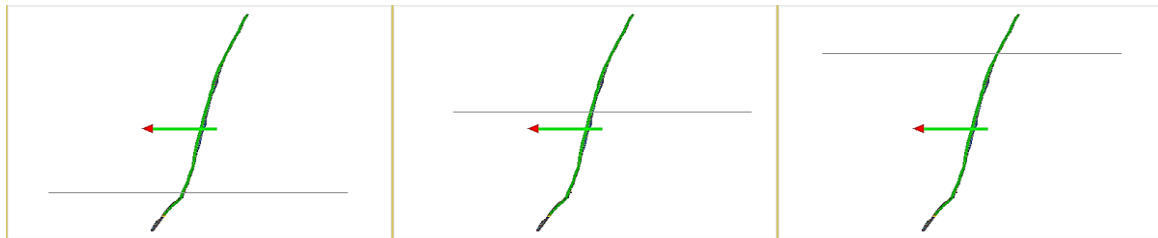
رابطه پیشنهادی فوق (معادله ۷)، بر پایه مختصات طول و عرض و عمق جفت نقاط جدایشی که هر سه از جمله خروجی های مدل ساختمانی محسوب می شوند، بنا نهاده شده است. علامت های منفی و مثبت در λ به دلیل آن است که بنا به تعریف، مقادیر ریک بازه ای مابین -180 درجه الی $+180$ درجه را شامل می شود.

و اما ارتباط جفت نقطه جدایشی با الگوریتم برش مایل به این ترتیب است که در هر برش، یک جفت نقطه جدایشی به دست می‌آید. صفحه برش که در بستر نرم افزار Move فراهم می‌آید همواره بر صفحه افق عمود است و آزیموت آن از صفر تا ۳۶۰ درجه قابل تغییر است. آنچه که مورد برش واقع می‌شود، مکعب لرزه‌ای تفسیر شده است. به‌طور دقیق‌تر، آنچه که توسط صفحه برش مورد تقطیع قرار می‌گیرد خطوط آلن مستقر بر صفحه گسل، هستند. فصل مشترک صفحه برش با جفت خط آلن، مختصات جفت نقطه جدایشی می‌باشد. جفت خط آلن، خود فصل مشترک یک افق گسلش یافته با صفحه گسلی است. دلیل نسبت دادن جفت خط آلن به تنها یک افق، این است که وقوع پدیده گسلش، یک افق یکپارچه را به دو قسمت مجزا از هم در طرفین گسل تقسیم می‌کند؛ و از آنجا که هر قسمت مجزا، فصل مشترک (خط آلن) جداگانه‌ای با صفحه گسل پیدا می‌کند، لذا به ازای هر افق گسلش یافته و جدا شده، دو خط آلن مجزا روی صفحه گسل پدید می‌آید. بنابراین برای یک افق، در هر برش با الگوریتم برش مایل، از هر خط آلن فقط یک نقطه جدایشی و از مجموع دو خط آلن (مرتبط به همان یک افق)، جفت نقطه جدایشی استخراج می‌گردد. البته این برش باید به‌طور یکنواخت در سرتاسر امتداد خطوط آلن اعمال گردد. لازم به ذکر است که در یک آزیموت یکتای صفحه برش، از آنجا که سطح گسل می‌تواند نا صاف باشد، لذا زوایای لغزشی که از سراسر خطوط آلن به دست می‌آیند می‌توانند متفاوت از هم باشند، اما همواره تصاویر آنها بر روی صفحه افق، موازی باهم و موازی با آزیموت صفحه برش خواهد بود (شکل ۶ و ۷).

همان‌طور که پیش‌تر درباره پیدا کردن زاویه لغزش ریک (λ) آمده است، مسئله مهم، یافتن مختصات دقیق جفت نقطه جدایشی بر روی صفحه گسل پس از وقوع گسلش است؛ و این خود مستلزم یافتن آزیموت مناسب برای صفحه برش می‌باشد، به‌طوری که آزیموت انتخابی متناسب با زاویه لغزش ریک (λ) باشد؛ حال آنکه زاویه لغزش ریک (λ) خود مجهول اصلی است. لذا به‌منظور یافتن آزیموت مطلوب برای صفحه برش، به ناچار باید تمام زوایای ممکن در گستره ۳۶۰ درجه مورد پایش قرار گیرد. روش بهینه برای پایش تمام این گستره، آن است که این فرایند طی دو مرحله انجام پذیرد به این ترتیب که در مرحله اول به منظور تخمین اولیه، تمام گستره با دقت کمتر و در مرحله دوم به منظور تدقیق بیشتر کسری از این گستره را که منتخب مرحله اول بوده با دقت بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد.

در مرحله اول می‌توان این گستره ۳۶۰ درجه‌ای را به قطاع‌های اختیاری ۳۰ درجه‌ای تقسیم نموده و با انتخاب آزیموت‌هایی به مرکزیت هر قطاع، صفحه برش را در سرتاسر امتداد گسل (امتداد دو خط آلن) حرکت داده، و برش را در مناطق متعددی در طول گسل ایجاد نموده تا جفت نقاط جدایشی متمایزی در امتداد خطوط آلن استخراج شود. انتخاب عدد ۳۰ برای زاویه قطاع‌ها سه شرط را برآورده می‌کند. اول آن که عدد ۳۰ مقسوم علیه عدد ۳۶۰ باشد و دوم آن که آنقدر کوچک نباشد که حجم داده‌ها را بسیار افزایش دهد و سوم آن که آنقدر بزرگ نباشد که دقت نتایج را بسیار کاهش دهد. سپس به وسیله رابطه‌ای که تعریف شد، از روی جفت نقاط جدایشی استخراج‌شده از تمامی قطاع‌ها، جمیع زوایای لغزش احتمالی را محاسبه نموده تا به‌همراه راستاها و شیب‌های منتسب به آن زوایای لغزش احتمالی، به‌عنوان داده‌های لغزش گسلی در اختیار نرم‌افزار وارون‌سازی تنش قرار گیرند. آن‌گاه، پس از اعمال فرایند وارون‌سازی روی تمام این زوایای لغزش احتمالی،

خروجی‌های هر آزمون را با دیگر آزمون‌ها مقایسه کرده و قطاع نسبت داده شده به آن آزمون‌تی که زاویه لغزش آن با توجه به معیار عدم انطباق، بهترین تانسور تنش را در وارون‌سازی نتیجه دهد، برای پایش دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله دوم به منظور دقت بیشتر در یافتن زاویه لغزش ریک (λ) و به طبع آن محاسبه دقیق‌تر تانسور تنش، قطاع نسبت داده شده به آن آزمون‌تی که بهترین زاویه لغزش از همان آزمون یافت شده است را این بار با گام‌های اختیاری ۵ درجه‌ای جاروب کرده و آن قطاع ۳۰ درجه‌ای به قطاع‌های ۵ درجه‌ای تجزیه می‌شود. سپس تمام فرایندهای اولیه درباره آن قطاع نیز تکرار شده و داده‌های استخراج شده را دوباره در اختیار نرم‌افزار وارون‌سازی قرار داده می‌شود تا بهترین تانسور تنش دیرین تعیین گردد. بدیهی است که آزمون صفحه برش هرچه با گام‌های کوچک‌تری تغییر کند، دقت مطالعه و مدت محاسبه افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است، هرچند که نرم‌افزار Move حداکثر دقت یک درجه‌ای را برای تغییر آزمون صفحه برش فراهم می‌آورد، اما با توجه به اینکه خطای ۵ درجه در حوزه ژئوفیزیک قابل اغماض است به منظور پرهیز از افزایش تصاعدی حجم محاسبات، از اعمال دقت بیشتر صرف‌نظر می‌گردد.



شکل ۶- انتقال صفحه برش با آزمون ثابت و فرضی ۲۷۰ درجه در امتداد خطوط آلن در یک سری از برش‌ها (تصویر از بالا).

Figure 6. Transition of a cutting plate with a fixed and hypothetical 270 ° azimuth along Allan lines in a series of cuts (pictured above).

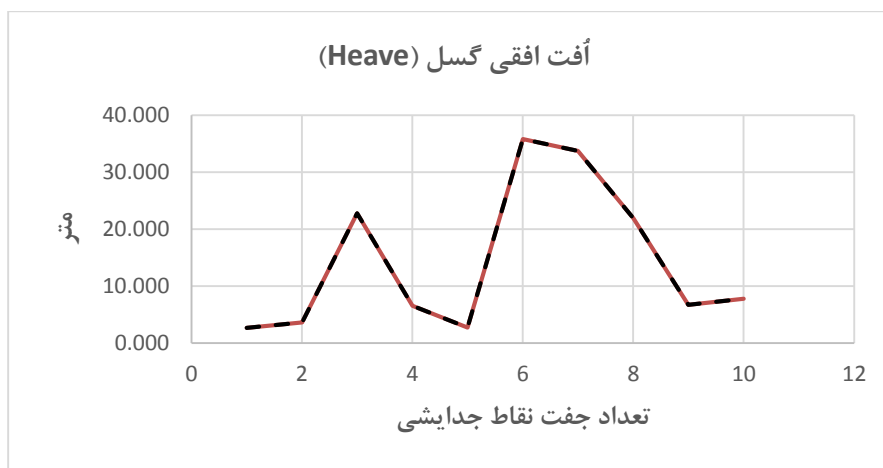


شکل ۷- تغییر آزمون صفحه برش، به ترتیب از راست به چپ: صفر و ۴۵ و ۹۰ درجه در سه سری متمایز از برش‌ها (تصویر از بالا).

Figure 7. Changing the cutting plate azimuth, from right to left, respectively: zero, 45 and 90 degrees in three distinct series of cuts (pictured above).

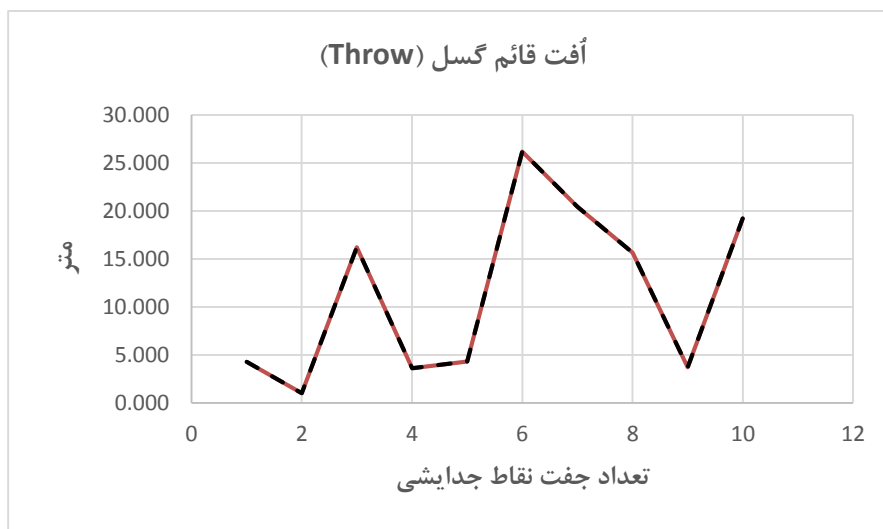
داده‌های مشاهده‌ای اُفت افقی، اُفت قائم، و جابه‌جایی گسل از دیگر خروجی‌های مستقیم نرم‌افزار مدل‌سازی زمین‌شناسی ساختمانی هستند که متناسب با آزمون انتخابی برای صفحه برش، می‌توانند مقادیر مختلفی داشته باشند. با شناختی که از تعاریف سه کمیت فوق‌الذکر و روابط هندسی مابین آنها که همانند سه ضلع از یک مثلث قائم‌الزاویه هستند، از مختصات طول و عرض و عمق جفت نقاط جدایشی بهره‌جسته و مقادیر این سه کمیت نامبرده محاسبه می‌شود. به جهت

صحت‌سنجی رابطه پیشنهادی (که آن هم بر پایه همین مختصات جفت نقاط جدایشی بنا نهاده شده است)، این داده‌های محاسبه‌ای با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌شود. مطابق انتظار، نتایج این مقایسه حکایت از تطابق صدر صدی در مورد اُفت افقی و اُفت قائم گسل داشته، به طوری که دو نمودار کاملاً برهم منطبق می‌شوند. در شکل‌های ۸ و ۹ داده‌های مشاهده‌ای به رنگ آبی (خط تو پر) و داده‌های محاسبه‌ای به رنگ قرمز (خط چین) نمایان هستند.



شکل ۸- اُفت افقی گسل در سازند کژدمی متعلق به دوره کرتاسه. رنگ آبی (خط تو پر) مربوط به داده‌های مشاهده‌ای. رنگ قرمز (خط چین) مربوط به داده‌های محاسبه‌ای (توضیح در متن).

Figure 8. The heave of fault in the Kazhdumi Formation belongs to the Cretaceous period. Blue color (solid line) for observational data. Red (dashed line) for calculated data (explanation in text).

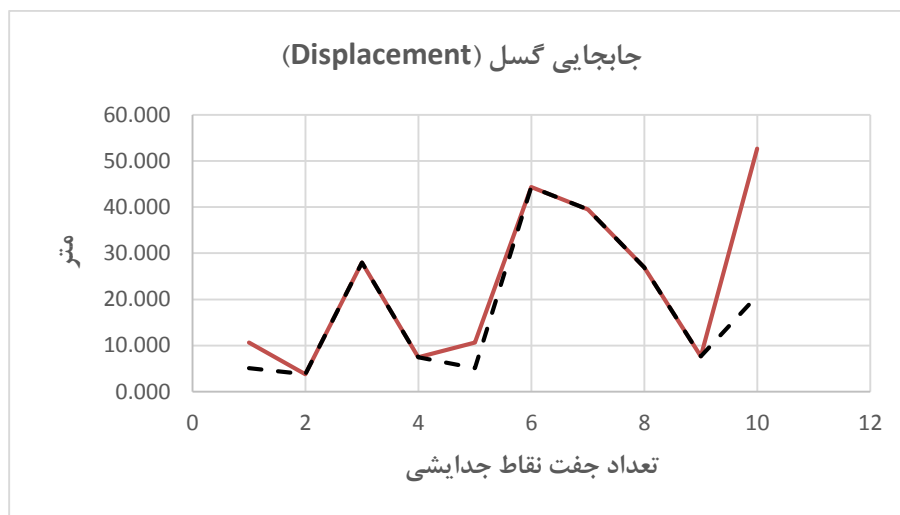


شکل ۹- اُفت قائم گسل در سازند کژدمی متعلق به دوره کرتاسه. رنگ آبی (خط تو پر) مربوط به داده‌های مشاهده‌ای. رنگ قرمز (خط چین) مربوط به داده‌های محاسبه‌ای (توضیح در متن).

Figure 9. Throw fault in Kazhdumi Formation belongs to the Cretaceous period. Blue color (solid line) for observational data. Red (dashed line) for calculated data (explained in text).

اما در مورد جابه‌جایی گسل نیز نتیجه مقایسه قابل قبول، و دارای اختلافی قابل پیش‌بینی بود (شکل ۱۰). نامسطح بودن یا همان ناصاف بودن صفحه گسل، علتی است که به دو صورت در بروز این اختلاف قابل تصور است. صورت اول آنکه اگر این ناصاف بودن موجب شود خطوط آلن نیز به گونه‌ای اعوجاج داشته باشند که حتی تصویر آن خطوط نیز بر روی صفحه افقی ناصاف شوند، در آن صورت است که تحت برخی زوایای خاص تلاقی صفحه برش با هر خط ناصاف آلن، بیش از یک نقطه را به عنوان فصل مشترک نتیجه می‌دهد. از آن‌جا که در تلاقی یک صفحه صاف با یک خط صاف، اگر که بر هم منطبق نباشند، تنها یک نقطه فصل مشترک آن دو خواهد بود، اما اگر خط مفروض اعوجاجی با کیفیت ذکر شده داشته باشد آن‌گاه تعداد فصل مشترک می‌تواند افزایش یابد. برای حل این مشکل می‌توان پیش از تلاقی دادن صفحه برش با خط ناصاف آلن، ابتدا آن خط ناصاف آلن را به کمک همان نرم‌افزار به چندین خط صاف تجزیه کرده، سپس برش‌ها اعمال شود و بدین گونه خطا به صفر خواهد رسید.

و صورت دوم آن‌که، چنانچه در عین ناصافی صفحه گسلی، جفت نقطه جدایشی برداشت شده متعلق به دو مثلث جداگانه باشند، همواره مقدار محاسباتی برای مؤلفه جابه‌جایی کمتر از مقدار خروجی نرم‌افزار خواهد بود، مگر آن‌که دو مثلث هم به همدیگر متصل بوده و هم جهت‌گیری فضایی (بردار نرمال) یکسانی داشته باشند که در آن صورت اختلاف به صفر خواهد رسید. برای حل این مشکل نیز می‌توان با تکنیک‌هایی هندسی محاسبات دقیق‌تری را به صورت موردی انجام داده و مقدار خطا را کمینه کرد یا حتی به صفر رساند.



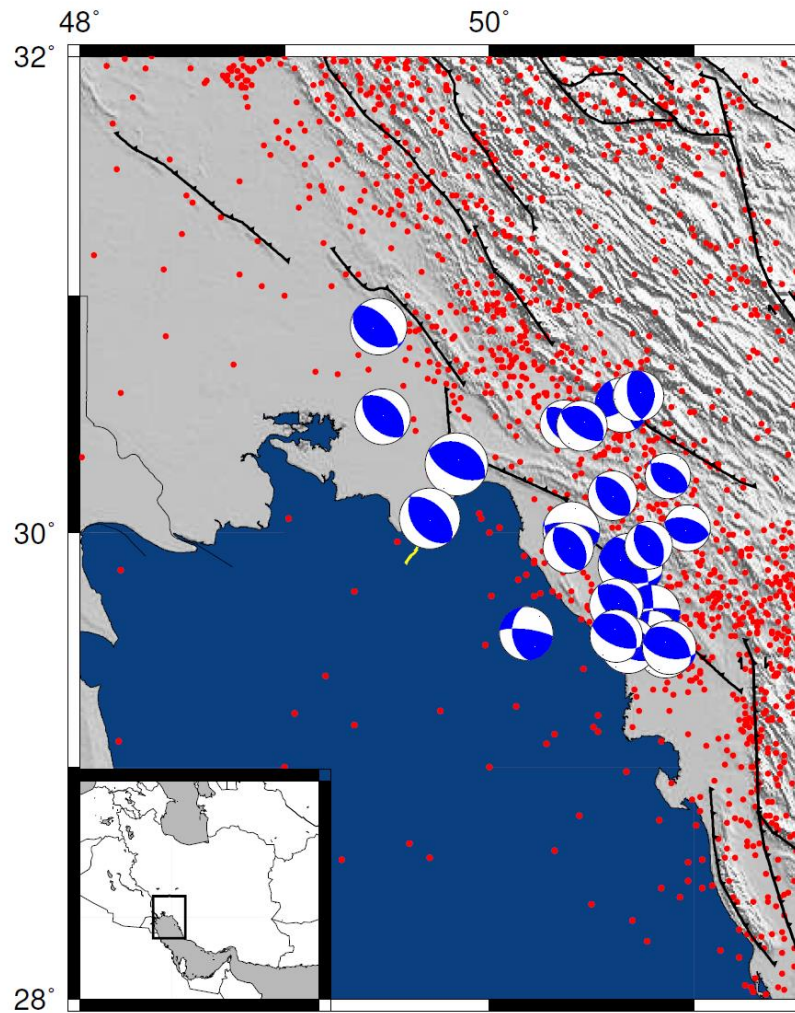
شکل ۱۰- مقایسه میزان لغزش (جابجایی گسل) در سازند کژدمی متعلق به دوره کرتاسه. محور عمودی و افقی به ترتیب معرف جابه‌جایی بر حسب متر و نقاطی در امتداد خطوط آلن یک افق می‌باشد. رنگ آبی (خط تو پر) مربوط به داده‌های مشاهده‌ای. رنگ قرمز (خط چین) مربوط به داده‌های محاسبه‌ای (توضیح در متن).

Figure 10. Comparison of landslide rate (fault displacement) in Kazhdumi Formation belonging to the Cretaceous period. The vertical and horizontal axes represent the displacement in meters and points along the Allan lines of a horizon, respectively. Blue color (solid line) for observational data. Red (dashed line) for calculated data (explained in text).

همان‌طور که از نمودارها پیداست، قدر مطلق مقادیر محاسباتی همواره مساوی و فقط گاهی کوچکتر از قدر مطلق مقادیر خروجی نرم‌افزار است، و هیچگاه مقادیر محاسباتی از حدود مقادیر خروجی نرم‌افزار تجاوز نمی‌کنند.

داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در گستره جنوب غربی زاگرس

ساز و کارهای کانونی منابع ارزشمندی از اطلاعات در مورد جهت‌ها و بزرگای نسبی تنش در پوسته هستند. استفاده از سازوکارهای کانونی جهت ارتباط زمین‌لرزه‌ها با گسل‌ها به‌خصوص در مناطق دارای پیچیدگی تکتونیکی راه‌گشا بوده و از آنجا که گسیختگی سطحی توأم با فعالیت لرزه‌ای در زاگرس کمیاب است، بیشتر اطلاعات موجود در مورد گسلش فعال در این منطقه از زمین‌لرزه‌ها به دست آمده است (Talebian and Jackson, 2004). در مطالعه حاضر تلاش شده است تنش حاکم بر پوسته در منطقه مورد مطالعه در جنوب‌غربی زاگرس با استفاده از وارون‌سازی سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها برآورد شود. تانسور تنش پوسته‌ای را نمی‌توان با استفاده از سازوکار یک زمین‌لرزه، با اطمینان به دست آورد (McKenzie, 1969). از تجربیات گذشته استفاده می‌شود که حداقل ۲۰ تا ۳۰ داده زمین‌لرزه لازم است تا بتوان نتایج بهینه‌ای از وارون‌سازی سازوکارهای کانونی به دست آورد (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ Lund and Böldvarsson, 2002). در این راستا سعی شده است از تمام سازوکارهای کانونی معتبر منتشر شده در دسترس در مورد زمین‌لرزه‌های رخ داده در این پهنه فعال لرزه‌زمین‌ساختی استفاده شود. داده‌های محلی و دورلرزه‌ای مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های سازوکارهای حل شده به روش CMT و ساز و کارهای کانونی موجود در پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، به علاوه سازوکارهای کانونی حل شده به روش مدل‌سازی شکل موج یا پلاریته گزارش شده در مقالات علمی بین‌المللی و همچنین ساز و کارهای کانونی منتشر شده در مرکز لرزه‌نگاری کشوری (پاک زاد و میرزایی، ۱۳۸۶) برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۱۱).



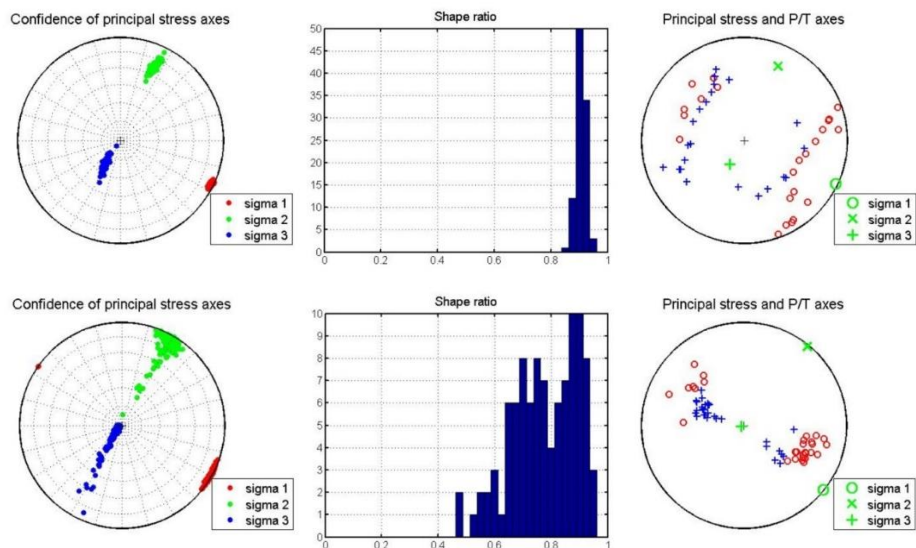
شکل ۱۱- منطقه مورد مطالعه و گسل اصلی، به همراه لرزه خیزی با تلفیقی از کاتالوگ‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (تا سال ۲۰۰۶) (IIIES) و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (از سال ۲۰۰۶ به بعد) (Iranian Seismological Center) و سازوکارهای کانونی موجود از GCMT (Global CMT Web Page) و مرکز لرزه‌نگاری کشوری (پاک زاد و میرزایی، ۱۳۸۶).

Figure 11. The study area and the main fault, along with seismicity with a combination of catalogs of the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (until 2006) (IIIES) and the Institute of Geophysics, University of Tehran (since 2006) (Iranian Seismological Center) and the existing focal mechanisms of GCMT (Global CMT Web Page) and the National Seismological Center (Pakzad and Mirzaei, 2008).

نتایج وارون‌سازی تنش

در این جا روش وارون‌سازی غیرخطی تنش در ابتدا به منظور محاسبه تنش دیرین و سپس به منظور محاسبه تنش عهد حاضر به ترتیب بر روی داده‌های لغزش گسلی استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده و سپس بر روی داده‌های لغزش گسلی استخراج شده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها اجرا شده است. به منظور صحت‌سنجی، زوایای برش متفاوتی مورد پایش و مقایسه قرار گرفتند. مطابق با شناختی که از راستالغز بودن گسل در دست بود، بهترین نتایج مربوط

به زاویه برشی موازی با راستای گسل و نامناسب‌ترین نتایج مربوط به زاویه برشی عمود بر روند گسل به دست آمد (شکل ۱۲). نتایج حاصل از وارون‌سازی تنش دیرینه برای افق‌هایی که توسط گسل اصلی قطع شده‌اند در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از وارون‌سازی تنش عهدحاضر نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این نتایج شامل جهت محور تنش‌های اصلی و در واقع حدود اطمینان برای σ_1 ، σ_2 و σ_3 ، نمودار هیستوگرام بزرگای نسبی تنش $R = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ و جهت محورهای فشارش و کشش بر روی استریونت می‌باشند.

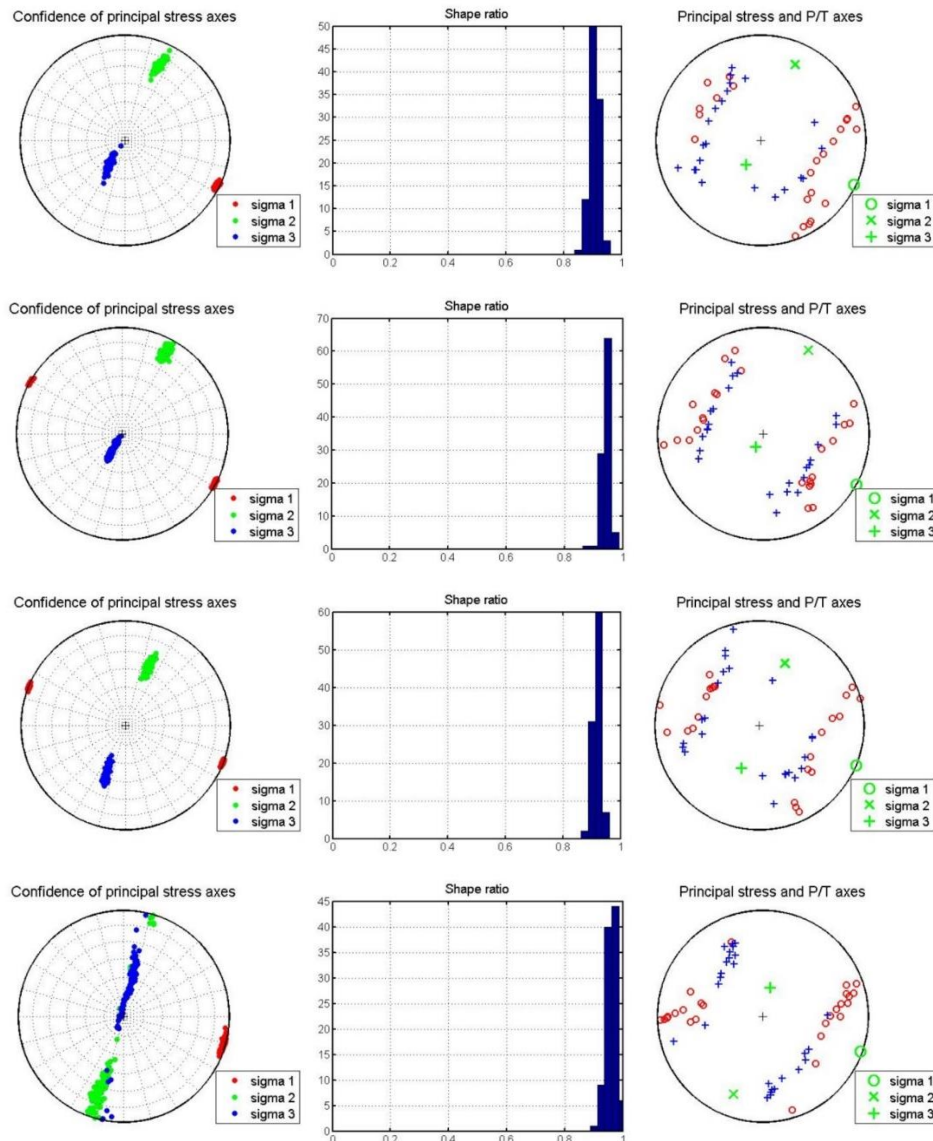


شکل ۱۲- مقایسه نتایج وارون‌سازی تنش دیرین با دو زاویه متفاوت برای صفحه برش. توازی صفحه برش با روند گسل (شکل بالایی) و تعامد صفحه برش با روند گسل (شکل پایینی).

Figure 12. Comparison of long-term stress inversion results with two different angles for the shear plate. Parallelism of the cutting plane with the fault trend (upper figure) and orthogonality of the cutting plane with the fault trend (lower figure).

نتایج وارون‌سازی غیرخطی تنش:

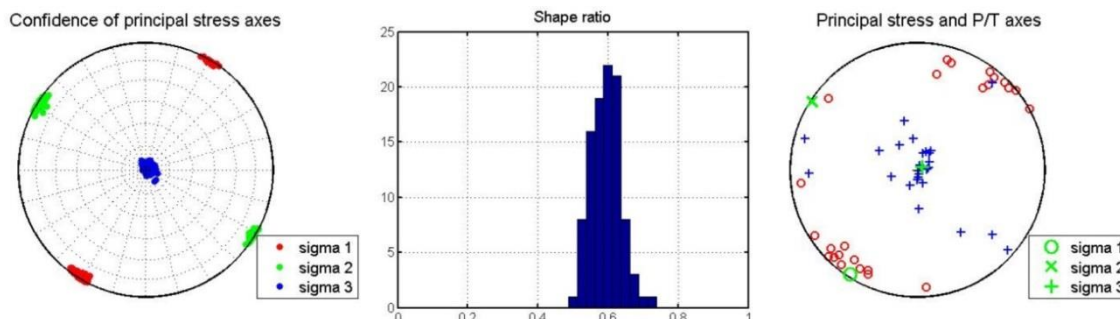
در این روش، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده، از چهار افق مجزا با سن‌های متفاوت که در عمق‌های مختلف با صفحه گسلی تقاطع داشتند به‌طور متغیر به تعداد حدوداً ۲۵ الی ۳۰ جفت داده نقاط جدایشی استخراج شده و به وسیله نرم‌افزار وارون‌سازی، مورد پردازش قرار گرفته و نتایج تنش دیرین، به تفکیک بر روی استریونت به نمایش در آمده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نتایج وارون سازی تنش بر روی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده. در سمت چپ هر تصویر نتایج بهینه تانسور تنش به ترتیب σ_1 به رنگ قرمز، σ_2 به رنگ سبز و σ_3 به رنگ آبی مشاهده می‌گردد. در وسط هر تصویر، هیستوگرام بزرگای نسبی تنش، شکل میدان تنش را نشان می‌دهد. در سمت راست هر تصویر، جهت محورهای P و T قابل مشاهده است. این نتایج مربوط به سازندهایی است که نام آنها به ترتیب از بالا به پایین سازند آسماری، سازند سروک، سازند کژدمی و سازند داریان می‌باشند.

Figure 13. Stress inversion results on interpreted three-dimensional seismic data. On the left side of each image, the optimal stress tensor results are shown σ_1 in red, σ_2 in green and σ_3 in blue, respectively. In the middle of each image, the relative magnitude histogram of the stress shows the shape of the stress field. To the right of each image, the direction of the P and T axes can be seen. These results are related to the formations whose names are Asmari Formation, Sarvak Formation, Kazhdumi Formation and Dariyan Formation, respectively, from top to bottom.

همچنین در این روش، ۲۶ داده سازوکار کانونی زمین‌لرزه به وسیله نرم‌افزار وارون‌سازی مورد پردازش قرار گرفته و نتایج تنش عهدحاضر بر روی استریونت به نمایش در آمده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- نتیجه وارون‌سازی تنش عهدحاضر بر روی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها.
Figure 14. The result of stress inversion on the earthquake focal mechanism data.

نتایج فوق که به طور کیفی ارائه شد، در جدول زیر (جدول ۱) به طور کمی نیز به نمایش در آمده است. راستای تنش افقی بیشینه محاسبه شده برای تمامی سازندهای منقطع با گسل و برای سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها در این جدول مرقوم گردید. در اینجا "Focal mechanism" معرف سازوکارهای کانونی و عدد مقابل آن بیان‌گر راستای تنش عهد حاضر است. دیگر عناوین ذکر شده در ستون داده، معرف نام سازندها و اعداد مقابل آنها راستای تنش عهد دیرین را بیان می‌کنند. با توجه به عدم قطعیت در داده‌ها، اعم از داده‌های لرزه‌ای (و به تبع آن داده‌های لغزش گسلی) و داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (Kumar et al., 2017)، و همچنین عدم قطعیت در روش وارون‌سازی (Keiding et al., 2009) که جملگی در حدود ۶ درجه می‌باشند، راستای تنش افقی بیشینه در عهد دیرین از آغاز دوره کرتاسه تا ابتدای دور الیگوسن عملاً ثابت بوده است. زیرا گستره تغییرات این راستاها که در حدود ۶ درجه است در محدوده عدم قطعیت واقع می‌شود.

جدول ۱- نتایج کمی وارون‌سازی تنش عهد دیرین و تنش عهد حاضر.

Table 1. Quantitative results of inversion of paleostress and present-day stress.

No.	Data	SHmax (degree)
1	Focal mechanism	32°
2	Asmari	117°
3	Sarvak	121°
4	Kazhdumi	116°
5	Dariyan	115°

بحث

درباره تنش دیرین، راستاهای تنش افقی بیشینه (SHmax) همان طور که در استریونت‌های شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند و همچنین از جدول ۱ قابل تشخیص هستند برای مدت زمانی طولانی در مقیاس زمین‌شناسی از اوایل دوره کرتاسه تا الیگوسن، تقریباً ثابت مانده‌اند. این راستاهای به دست آمده در دوره زمانی کرتاسه از سازندهای گروه خامی از جمله داربان و گروه بنگستان از جمله کژدمی و سروک و همچنین راستای تنش افقی بیشینه به دست آمده در دوره زمانی پالئوژن (ترشیری زیرین) از سازند آسماری، جملگی جهت شمال غربی-جنوب شرقی را نشان می‌دهند. ثابت بودن جهت تنش بیشینه افقی در تمام دوره کرتاسه و تا الیگوسن، نشان می‌دهد که تنش تکتونیک ثابته از سمت شبه قاره هند در تمام این مدت بر منطقه مورد مطالعه اعمال می‌شده است.

از طرفی در دور الیگوسن وقوع برخورد قاره‌ای زاگرس بین صفحات عربی و اوراسیا مشاهده می‌شود (Gholami Zadeh et al., 20017). این برخورد با تغییر راستای تنش افقی بیشینه در منطقه مورد مطالعه همراه بوده است، به طوری که در منطقه فارس از پهنه زاگرس، در یک مطالعه راستای تنش در الیگوسن پسین تا میوسن پیشین برابر با $N053^{\circ}$ ، در میوسن پسین تا پلیوسن پیشین $N026^{\circ}$ و در پلیوسن پسین $N002^{\circ}$ به دست آمد (Navabpour et al., 2007) و در مطالعه دیگری راستای تنش در ترشیری $N38^{\circ}E$ و در عهد حاضر برابر با $N19^{\circ}E$ به دست آمد (Sarkarinejad et al., 2018). همچنین در یک مطالعه در منطقه کرمانشاه از پهنه زاگرس، راستای تنش در میوسن تا پلیوسن بصورت NE-SW و در پلیوسن تا عهد حاضر بصورت N-S معرفی شد (Navabpour et al., 2008). و اما در مطالعه دیگری که کل پهنه زاگرس را پوشش می‌دهد، راستای تنش از میوسن تا عهد حاضر به طور کیفی از NE-SW تا NNE-SSW متغیر بوده است (Jentzer et al., 2017). درباره تنش عهد حاضر نیز همان طور که در استریونت‌های شکل‌های ۱۴ مشاهده می‌شود و همچنین از جدول ۱ قابل تشخیص است، راستای تنش افقی بیشینه حاصل از وارون سازی سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها، جهت شمال شرقی-جنوب غربی را نشان می‌دهد. جهت این راستا نسبت به راستای تنش دیرین در ماقبل الیگوسن تقریباً در وضعیت تعامد بوده و این حاکی از آن است که یک چرخش در راستای تنش منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است که متأثر از برخورد قاره‌ای زاگرس در زمان الیگوسن و پس از آن بوده است.

وجود مخازن هیدروکربوری در این منطقه مورد مطالعه و در مناطق هم جوار آن، اهمیت درک این پیچیدگی‌ها و ابهامات ذکر شده در تحول ساختاری منطقه را، افزون می‌کند. امتداد مخازن هیدروکربوری منطقه همان گونه که از شکل ۱۵ پیدا است، عمدتاً با راستای تنش افقی بیشینه در عهد دیرین در توازی نسبی است. و به واسطه تعامد آشکار شده در این مطالعه بین راستای دو تنش عهد دیرین و تنش عهد حاضر در این منطقه، امتداد مخازن هیدروکربوری یاد شده روندی عمود بر تنش عهد حاضر را نمایان می‌سازد.

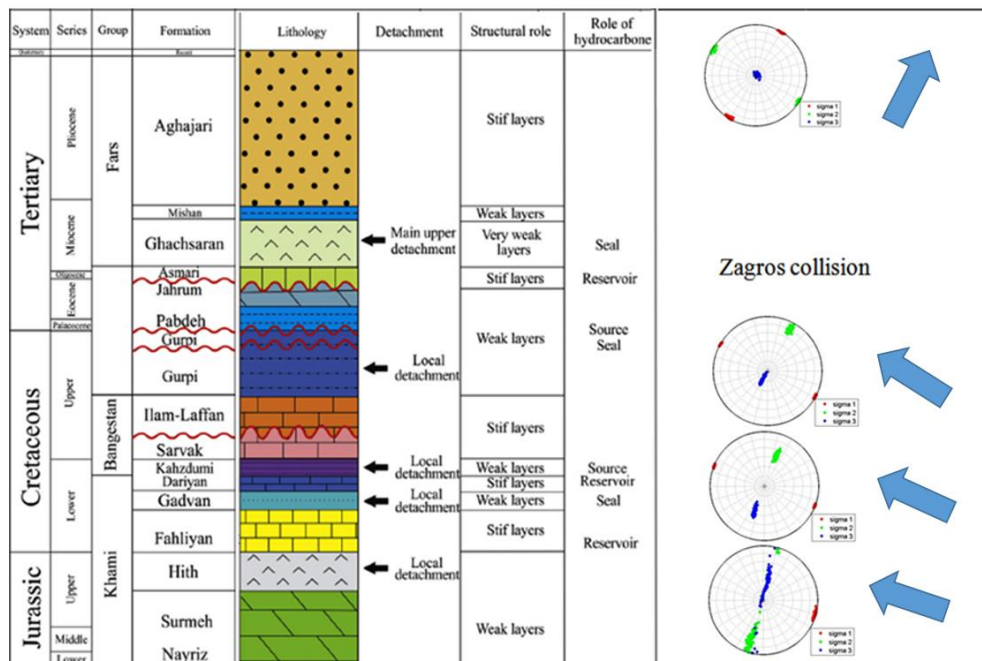


شکل ۱۵- مخازن هیدروکربوری حوضه خلیج فارس و زاگرس. رنگ سبز مخازن نفتی، و رنگ قرمز مخازن گازی هستند (Jaehong, 2017).

Figure 15. Hydrocarbon reservoirs in the Persian Gulf and Zagros basins. Oil reservoirs are green and gas reservoirs are red (Jaehong, 2017).

گسل‌های پی‌سنگی و به‌طور کلی گسل‌های عمیق اهمیت زیادی در شکل‌گیری و توزیع تله‌های هیدروکربوری دارند، از این رو شناخت هرچه دقیق‌تر این قبیل گسل‌ها در اکتشاف و توسعه میادین نفت و گاز سودمند است (طیب‌حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). همان‌طور که در تصویر بالا (شکل ۱۵) مشخص است، مخازن هیدروکربوری ایران روند شمال‌غربی-جنوب شرقی زاگرس را دنبال می‌کنند. هرچند که سن زمین‌شناسی سنگ منشأ و سنگ مخازن این میادین هیدروکربوری، سنی برابر با سن افق‌های مورد بررسی در مطالعات تنش دیرینه حاضر دارند، اما سن دگرشیبی سنگ مخازن، شکل‌گیری تله‌های نفتی، مهاجرت ثانویه هیدروکربورها و نهایتاً به دام افتادن آنها، مربوط به زمان برخورد صفحه عربی با ایران مرکزی و پس از آن است. چرا که راستای این مخازن هیدروکربوری همواره موازی با محور چین‌ها و تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی است که خود حاصل تنش اعمال شده از برخورد صفحه عربی با ایران مرکزی می‌باشند، و همچنان آن تنش کم‌وبیش با همان راستا تا عهد حاضر نیز پابرجا است.

به منظور جمع‌بندی بین نتایج کسب شده و ارزیابی فرگشت تکتونیکی منطقه مورد مطالعه، مجموع راستاهای تنش دیرین و راستای تنش عهد حاضر به دست آمده از وارون‌سازی تنش، جملگی به صورت استریونوت و در یک توالی زمانی، در شکل ۱۶ که در آن ستون چین‌نگاری و ستون زمان زمین‌شناسی با هم هم‌بسته شده‌اند، گردآوری شده است. علیرغم مشاهده تمایزی حدوداً ۹۰ درجه‌ای در قیاس دو راستای تنش عهد دیرین و تنش عهد حاضر، هیچ‌گونه روند تدریجی که گویای جهت چرخش راستای تنش باشد مشاهده نمی‌شود. و از آنجا که داده‌هایی که در دسترس نگارندگان قرار دارد نشان‌دهنده قطع نمودن افق‌های بالاتر توسط صفحه گسلی نیست، لذا اظهار نظر در مورد ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بودن جهت چرخش راستای تنش افقی بیشینه در حدفاصل بین الیگوسن و عهد حاضر که برخورد صفحه عربی و اوراسیا به آن دوران نسبت داده می‌شود، به دلیل نبود داده‌ها در این گستره زمانی، امکان‌پذیر نیست (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- فرگشت تکتونیکی در گذر زمان (تغییر یافته از Kazem Shiroodi et al., 2015). سه استریونوت ترسیم شده در قسمت پایینی تصویر مربوط به قبل از برخورد زاگرسی و هم‌زمان با دوره کرتاسه، معرف راستای تنش افقی بیشینه در عهد دیرین می‌باشد. استریونوت منفرد در قسمت بالایی تصویر نیز معرف راستای تنش افقی بیشینه در عهد حاضر است.

Figure 16. Tectonic evolution over time (modified from Kazem Shiroodi et al., 2015). The three stereonet drawn in the lower part of the image from before the Zagros collision and at the same time as the Cretaceous period represent the direction of maximum horizontal stress in the old testament. The single stereonet at the top of the image also represents the direction of maximum horizontal stress in the present age.

تا جایی که نگارندگان اطلاع دارند در منطقه مورد مطالعه شاید به علت فرسایش شدید و نبود رخنمون سطحی یا برون‌زد گسل‌ها مطالعه تنش دیرینی انجام یا منتشر نشده است. اما با مراجعه به مقالات منتشر شده در مورد تنش دیرین در منطقه زاگرس می‌توان ملاحظه نمود که در مناطق همجوار، فرگشت تکتونیکی به دست آمده بیانگر چرخشی خلاف جهت عقربه‌های ساعت در راستاهای تنش تکتونیکی از زمانهای گذشته زمین‌شناسی تا امروز بوده است (Navabpour et al., 2007; Sarkarinejad et al., 2018; Navabpour et al., 2008; Jentzer et al., 2017). لذا با استناد به این مطالعات می‌توان به این نتیجه‌گیری رسید که در منطقه مورد مطالعه نیز جهت چرخش احتمالا در خلاف جهت عقربه‌های ساعت اتفاق افتاده است. البته در خصوص توجه به نکته‌ای حائز اهمیت است و آن اینکه منطبقاً با مطالعات در این پژوهش، در فروافتادگی دزفول و در جایی واقع گردیده است که پلتفرم یا زمین‌بوم عربی است. حال آن که بیشتر مطالعات تنش دیرین مورد اشاره، در نواحی دیگر زاگرس واقع شده‌اند که از جبهه برخورد فاصله داشته و در صفحه اوراسیا واقع گردیده‌اند. اینکه آیا فرگشت تکتونیکی منطقه مورد مطالعه با سایر مناطق مورد ارجاع یکسان باشد خود محل بحث جداگانه‌ای است و به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، میدان تنش دیرین، با به‌کارگیری روشی جدید در تعیین جهت لغزش گسل از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده، در افق‌های مختلف با سنین مختلف زمین‌شناسی در یکی از میدانی هیدروکربوری جنوب ایران برآورد شد. در این روش، بردار جابجایی دوطرف گسل نسبت به قبل از گسلش، به واسطه اندازه‌گیری مختصات دو نقطه در طرفین گسل (جفت نقاط جدایشی) که پیش از گسلش هم‌مختصات بوده‌اند، محاسبه شد. سپس امتداد و شیب صفحات گسلی در بردارنده این جفت نقاط جدایشی، در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی زمین‌شناسی ساختمانی Move قرائت گردید. آن‌گاه برای تصویر نمودن بردار جابجایی بر صفحه گسل و اندازه‌گیری زاویه آن نسبت به راستای گسل، رابطه‌ای ریاضی ارائه شده و صحت آن رابطه با توجه به مطابقت محاسبات انجام شده با مشاهدات صورت گرفته تأیید گردید. در این مطالعه بر اساس نتایج به‌دست آمده حاصل از وارون‌سازی غیرخطی تنش از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی تفسیر شده، در طی مدت زمان طولانی تقریباً از اوایل دوره کرتاسه تا دور الیگوسن از ترشیری زیرین، راستای تنش افقی بیشینه تغییرات بسیار کمی داشته است. به طوری که با توجه به عدم قطعیت ناشی از خطای داده‌های لرزه‌ای و داده‌های لغزش گسلی، این تغییرات اندک در راستای تنش افقی بیشینه، در حدود عدم قطعیت داده‌ها است، و این راستا به صورت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی ثابت مانده است. این نکته نشان‌دهنده این حقیقت است که جهت تنش بیشینه افقی بیشینه در تمام دوره کرتاسه و تا دور الیگوسن، فشارش از سمت شبه قاره هند را مشخص می‌کند. اما نتایج به‌دست آمده از وارون‌سازی غیرخطی تانسور تنش از داده‌های محلی و دورلرزه‌ای سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها که در مقایسه با نقشه جهانی تنش سازگار با جهت تنش‌های حال حاضر منطقه‌ای است، تأیید می‌کند که در یک برآیند کلی، جهت‌گیری تنش برای زمانهای اخیر از شمال‌غربی-جنوب‌شرقی به شمال‌شرقی-جنوب‌غربی تبدیل شده است. از جمع‌بندی نتایج فوق مشخص می‌شود که در منطقه مطالعاتی در زاگرس جنوب غربی،

حدوداً از دور الیگوسن تا کنون، چرخشی در راستای تنش بیشینه افقی، در این دوره طولانی زمین‌شناسی اتفاق افتاده است به طوری که راستای تنش عهد حاضر تقریباً عمود بر راستای تنش دیرین می‌باشد. اما به دلیل فقدان داده‌های مورد نیاز در بازه زمانی مذکور به منظور اظهار نظر قطعی در تعیین ساعتگرد یا پادساعتگرد بودن چرخش، این مهم ممکن نمی‌باشد.

منابع

۱. پاک‌زاد، م.، میرزایی، ن.، "بررسی سازوکار کانونی زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور"، مجله فیزیک زمین و فضا. ۳۳(۳) (۱۳۸۶) ۷۳-۸۶.
۲. پوربیرانوند، ش.، "تغییرات تنش در زاگرس با استفاده از وارون سازی سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها"، رساله دکترا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (۱۳۹۱).
۳. طیب حسینی، ف.ا.، سپهوند، م.، عبدالهی فرد، ا.، میری، س.ا.، "توصیف گسل هندیمان ایذه با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری دوبعدی داده‌های زمین‌لرزه و اطلاعات زمین‌شناسی"، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۴۸ (۱۳۹۶) ۴۲-۴۷.
۴. عباسی، م.، فرید، ی.، "مقدمه‌ای بر تعیین وضعیت تنش به کمک روش برگشتی صفحه‌های گسلی و خط خشک‌های مربوطه"، علوم زمین، سال دوازدهم، شماره ۵۴ (۱۳۸۳) ۲-۹.
۵. نوری، ب.، بشری، ع.، جهانی، د.، کاظم شیرودی، س.، "بررسی ویژگی‌های مخزنی سازند سروک در میدان نفتی هندیمان با مطالعات رسوب شناسی، محیط رسوبی و ارزیابی پتروفیزیکی"، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۶۱ (۱۳۸۸) ۵۰-۴۷.
6. Alizadeh M., Movahed Z., Junin R., Mohsin R., "Fracture modeling in oil and gas reservoirs using image logs data and petrel software", *Jurnal Teknologi*, 75(11), (2015).
7. Gartrell A.P., Lisk M., "Potential new method for paleostress estimation by combining three-dimensional fault restoration and fault slip inversion techniques: extraction of fault slip indicators from 3D seismic data. First test on the Skua Field, Timor Sea", In: Boulton, P., Kaldi, J. (Eds.), *Evaluating fault and cap rock seals. AAPG Hedberg Series*, 2, (2005) 23-26.
8. Gephart J.W., Forsyth D.W., "An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence", *Journal of Geophysical Research*, 89(B11), (1984) 9305-9320.

9. Gholami Zadeh P., Adabi M.H., Hisada K., Hosseini-Barzi M., Sadeghi A., Gassemi M.R., “Revised version of the Cenozoic Collision along the Zagros Orogen, Insight from Cr-spinel and Sandstone Modal Analyses”, *Geology, Medicine*. Published in *Scientific Reports* (2017).
10. Global CMT Web Page. (n.d.). Retrieved from <https://www.globalcmt.org/home1/>.
11. <https://ocw.mit.edu/terms/>.
12. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) website. (n.d.). Retrieved from <http://www.iiees.ac.ir/en/>.
13. Iranian Seismological Center (n.d.). Retrieved from <http://irsc.ut.ac.ir/>.
14. Jaehong K., “Petroleum Geology of Iran”, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 54(5), (2017) 549-606.
15. Jentzer M., Fournier M., Agard Ph., Omrani J., Khatib M.M., Whitechurch H., “Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics”, *AGU publication, Tectonics*, 36(2), (2017) 321-339.
16. Kazem Shiroodi S., Ghafoori M., Faghieh A., Ghanadian M., Lashkaripour Gh., Hafezi Moghadas N., “Multi-phase inversion tectonics related to the Hendijan–Nowrooz–Khafji Fault activity, Zagros Mountains, SW Iran”, *Journal of African Earth Sciences*, 111, (2015) 399-408.
17. Keiding M., Lund B., Árnadóttir Th., “Earthquakes, stress and strain along an oblique plate boundary: the Reykjanes Peninsula, southwest Iceland”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B9), (2009).
18. Kumar A., Singh Sh.K., Mitra S., Priestley K.F., Dayal Sh., “The 2015 April 25 Gorkha (Nepal) Earthquake and its Aftershocks: Implications for lateral heterogeneity on the Main Himalayan Thrust”, *Geophysical Journal International*, 208, (2017) 992-1008.
19. Lohr T., Krawczyk C.M., Oncken O., Tanner D.C., “Evolution of a fault surface from 3D attributes analysis and displacement measurements”, *Journal of Structural Geology*, 30(6), (2008) 690-700.
20. Lund B., Bödvarsson R., “Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), (2002) 2419-2433.

21. Lund B., Slunga R., "Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: Application to Olfus in southwest Iceland", *Journal of Geophysical Research*, 104(B7), (1999) 14947-14964.
22. McKenzie D. P., "The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), (1969) 591-601.
23. Michael A.J., "Determination of Stress From Slip Data: Faults And Folds", *Journal of Geophysical Research*, 89(B13), (1984) 11517-11526.
24. Navabpour P., Angelier J., Barrier E. "Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province)", *Tectonophysics*, 432(1-4), (2007) 101-131.
25. Navabpour P., Angelier J., Barrier E. "Stress state reconstruction of oblique collision and evolution of deformation partitioning in W-Zagros (Iran, Kermanshah)", *Geophysical Journal International*, 175(2), (2008) 755-782.
26. Petex. (n.d.). MOVE Core. Retrieved from <https://www.petex.com/products/move-suite/move/>.
27. Sarkarinejad Kh., Zafarmand B., Oveisi B., "Evolution of the stress fields in the Zagros Foreland Folded Belt using focal mechanisms and kinematic analyses: the case of the Fars salient, Iran", *International Journal of Earth Sciences*, 107, (2018) 611-633.
28. Talebian M., Jackson J., "A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran", *Geophysical Journal International*, 156(3), (2004) 506-526.
29. Van Gent H.W., Back S., Urai J.L., Kukla P.A., Reicherter K., "Paleostresses of the Groningen area, the Netherlands-Results of a seismic based structural reconstruction", *Tectonophysics*, 470(1-2), (2009) 147-161.
30. Vavryčuk V., "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms", *Geophysical Journal International*, 199(1), (2014) 69-77.
31. Vavryčuk V., Bouchaala F., Fischer T., "High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic", *Tectonophysics*, 590(B8), (2013) 189-195.

Stress inversion studies using 3D seismic interpretation and earthquakes focal mechanism data

Mohsen Gholami Dargahi^{*1}, Shahrokh Pourbeyranvand², Mehdi Talkhablou³

¹ Kharazmi University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran.
m.gholami.920707@gmail.com

² International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran.
beyranvand@iiees.ac.ir

³ Kharazmi University, Faculty of Earth Sciences, Tehran, Iran.
Talkhablou@khu.ac.ir

Introduction

In structural geology studies, dynamic analysis, which means determining the direction of effective stresses in the formation of tectonic structures, plays a vital role. The tectonic methods are used to determine the direction of stress, including the use of faults that record the applied stresses (Abbasi & Farbod, 2004). When the faulting occurs, blocks on both sides of the faults move relative to each other in the direction of maximum shear stress (SHmax) due to the force applied to them. Analysis of these structures provides a reliable solution for understanding the distribution and evolution of stress fields from tectonic events. However, sometimes, faults may not be exposed at the surface and as a result, the fault-slip data may not be available through outcrops. In such cases, the use of interpreted 3D seismic interpretation data can be helpful in paleostress studies. This approach was first proposed by Gartrell and Lisk (2005) and later developed by Lohr et al. (2008) and Van Gent et al. (2009). According to Gartrell and Lisk's studies (2005), it is possible to estimate the orientations and magnitudes of paleostresses from seismic data by analyzing fault-slip data obtained using 3D restoration techniques and the results obtained in the case studies are consistent with regional observations. Of course, there are several sources of error regarding the quality of available data, including seismic interpretation, restoration techniques, and inversion methods. Van Gent et al. (2009) introduced a new method for reconstructing paleostresses at subsurface layers where fault slip measurements are impossible with traditional methods based on fault outcrops. 3D seismic data and structural restoration were employed to determine fault surfaces and slip vectors. These data were used as input for the paleostress reconstruction algorithm and a stepwise method was selected to remove younger deformations to obtain slip vectors related to older deformation events. Also, the

presented results were consistent with the interpretation of paleostress in the study area (Van Gent et al., 2009).

In this study, the non-linear inversion method is used for dynamic analysis of the fault slip information (strike ϕ , dip δ , rake λ) resulting from 3D seismic data and earthquake focal mechanism data. The purpose of this study is to review the results of paleostress studies in the sedimentary cover and compare them with the current state of stress and determine the tectonic evolution of the southwestern Zagros through these investigations.

Summary of geological settings

There is a hydrocarbon field with a magnificent fault in the Zagros zone, an area in southwestern Iran. The length of the fault is measured approximately 70 km and its depth is more than 10 km. This fault is a strike-slip one with a very steep or vertical plane and its N-S trend is characteristic of basement faults in this region. Some important horizons intersected by the fault are Fahliyan and Dariyan, related to the Khami Group (Lower Cretaceous) and Kazhdumi and Sarvak belonging to Bangestan Group (Cenomanian-Turonian, Upper Cretaceous). Gurpi Formations related to the Upper Cretaceous and Asmari related to Tertiary.

Data and methods

The data used in this study is fault-slip data obtained from primary data divided into two separate classifications, including 3D seismic data and earthquake focal mechanism data. The 3D seismic data is interpreted as several horizons and one fault plane. These data are used to calculate paleostresses for different geological horizons or times. The earthquake focal mechanism data is a set of nodal planes. This data is used to calculate the stress of the present testament.

The method part consists of two different sections. The first method is a new innovative approach to rake (λ) estimation from 3D seismic interpretation data to provide fault-slip data. Previously, strike (ϕ) and dip (δ) were easily obtained with structural geology modeling software. The second method is a non-linear stress inversion proposed by Lund and Slunga (1999), which is applied to fault-slip information from both 3D seismic data and focal mechanism data. Previously, the same method was responsible for providing fault-slip data from the earthquake focal mechanism data. All results of paleostresses and present-day stress are compared to investigate the tectonic evolution of the region.

Results and discussion

First, the fault-slip data from the 3D seismic interpretation data are used to calculate the paleostress inversion. In this method, 25 to 30 pairs of separation point data were extracted from four different

horizons of various ages that intersected by the main fault plane at multiple depths. These results of paleostress inversions are displayed on stereonet qualitatively. The results include the direction of the principal stress axis, the confidence limits for σ_1 , σ_2 and σ_3 , the histogram of the shape ratio and the direction of the P and T axes on the stereonet (Lund and Slunga, 1999). Then, the fault-slip data from the earthquake focal mechanisms are used to calculate the present state of the stress. In this method, 26 fault-slip data from 26 pairs of the nodal plane were obtained from the fault. The results of stress inversion are shown on the stereonets. Both obtained results are also quantitatively mentioned in a table where the SHmax direction calculated for all formations intersecting with the fault plane and the nodal planes is recorded.

Due to the uncertainty in the fault-slip data from the 3D seismic interpretation and the earthquake focal parameters, the error in the results can be up to 6 degrees (Kumar et al., 2017; Keiding et al., 2009). The maximum horizontal paleostress has been approximately constant from the Cretaceous to the beginning of the Oligocene period. There are minor changes in the direction, but the range of variations is small (below 6 degrees), which occurs within the range of the uncertainty and is negligible, therefore.

With respect to the paleostress studies conducted here, the directions of SHmax remained constant for a long time on a geological scale from the Early Cretaceous to the Oligocene (middle Tertiary). In the Cretaceous period, these directions were obtained from the Khami group's formations, including the Dariyan and Bangestan groups, including Kazhdumi and Sarvak formations. Also, in the Paleogene period (Lower Tertiary), the direction of SHmax was obtained from the Asmari formation. All of the SHmax, as mentioned earlier, shows the northwest-southeast orientation. Thus the SHmax force during the Cretaceous up to the Oligocene period is acting from the Indian subcontinent on the Eurasian tectonic plate.

On the other hand, in the middle Oligocene period, the collision between the Arabian and Eurasian plates occurs in the Zagros (Gholami Zadeh et al., 2017). This collision was associated with a change in the direction of SHmax in the study area. Regarding the stress of the present time resulting from the inversion of the earthquake focal mechanism, as can be seen in the stereonets and table, the direction of SHmax shows the northeast-southwest orientation. This direction is almost perpendicular to the direction of paleostress under discussion. This indicates that rotation has taken place in the direction of principal stresses in the study area. This rotation is influenced by the collision in the Zagros, which was initiated during the Oligocene and continued later on. Despite observing a

difference of about 90 degrees in comparing the paleostress and present-day stress directions, there is no gradual trend indicating the direction of rotation between these two states. In other words, since the available data do not show any intersection between the younger horizons and the fault plane, it is not possible to comment on whether the rotation of the stress directions starting from Oligocene up to the present time has occurred clockwise or counterclockwise.

Conclusion

In this study, the paleostress field was estimated at different horizons with various geological ages in one of the hydrocarbon fields in the southwestern Zagros zone (southwestern Iran), using a new method to determine the fault slip direction from the interpreted 3D seismic data. Based on the present results obtained from non-linear stress inversion of 3D seismic interpretation data, the direction of SHmax remained constant (NW-SE) over a long period of time from the Early Cretaceous to the Oligocene period (Lower Tertiary). This fact indicates that the direction of SHmax in this time interval is under the influence of the convergent force from the Indian subcontinent. However, the results obtained from the focal mechanism of earthquakes, which is consistent with the current regional stress map, confirm that the principal stress direction has become NE-SW recently. Thus a rotation in the direction of SHmax has occurred in the western Zagros so that the current stress is almost perpendicular to the previous paleostress orientation. However, this is impossible due to the lack of data to comment on the discussed rotation direction. More data and investigations are needed for this purpose.

Keywords: Stress field; Non-linear stress inversion; 3D seismic data; Earthquakes focal mechanism

*Corresponding Author: m.gholami.920707@gmail.com