# وارونسازی تنش با استفاده از نتایج تفسیر دادههای لرزهای سهبعدی و سازوکار کانونی زمینلرزهها

محسن غلامی درگاهی<sup>۱</sup>\*، شاهرخ پوربیرانوند<sup>۲</sup>، مهدی تلخابلو<sup>۱</sup>

۱. دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین
 ۲. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله
 دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۱۱

## چکیدہ

اطلاع از میدان تنش و تحولات مکانی و زمانی آن، در شاخههای مختلف علوم زمین مانند ژئوتکنیک، زمینشاسی مهندسای و همینطور در مطالعات مخازن هیدروکربوری (ژئومکانیک مخازن) نقش مهمی دارد. علاوه بر این در تشاریح ژئودینامیک منطقه نیز اهمیت اساسی دارد. در این مطالعه، میدان تنش دیرین با پیاده سازی روشی جدید در تعیین جهت لغزش با استفاده از تفسیر داده های لرزهای سهبعدی در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران در افقهای گوناگون با سنین مختلف زمین شناسی، به وسیله روش وارون سازی تانسور تنش بر آورد شد. را ستاهای به دست آمده در بازهٔ ۱۱۵ تا مروش محاسبه گردید که مقدار آن برابر با ۳۲ درجه به دست آمد. این مطالعه نشان داد که در گذر زمان، چرخشای در روش محاسبه گردید که مقدار آن برابر با ۳۲ درجه به دست آمد. این مطالعه نشان داد که در گذر زمان، چرخشای در موش محاسبه گردید که مقدار آن برابر با ۳۲ درجه به دست آمد. این مطالعه نشان داد که در گذر زمان، چرخشای در راستای شمال غربی جنوب شرقی بوده است، به راستای شمال شرقی جنوب غربی در عاد ارای محان دارای معتر راستای تنش افقی بیشینه اتفاق افتاده، و جهت گیری آن که از دورهٔ کرتاسه تا الیگوسن حدودآ ثابت و تقریبا دارای مالتای شمال غربی جنوب شرقی بوده است، به راستای شمال شرقی جنوب غربی در عهد حاضر تبدیل شده است. به دلیل معدم وجود داده های کافی، اظهار نظر در مورد ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بودن این چرخش مالی نی در این زمین با داد مال با در این زمین در مال مالی ی مید در می در مهد حاض تبدیل شده است. به دلیل عدم وجود داده های کافی، اظهار نظر در مورد ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بودن این چرخش امکان پذیر نیست. لذا مطالعات

**واژههای کلیدی** : میدان تنش ، وارونسازی غیرخطی تنش ، دادههای لرزهای سهبعدی ، ساز وکار کانونی زمینلرزهها

"نويسندهٔ مسئول: m.gholami.920707@gmail.com

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

Mohsen Gholami Dargahi<sup>1\*</sup>, Shahrokh Pourbeyranvand<sup>2</sup>, Mehdi Talkhablou<sup>3</sup>

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 شکل گیری 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 دیوارهٔ چاه، 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 می شود (عباسی و فربد، 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 می شوند. تحلیل کیفی و کمی این گسل ها، راه حل مطمئنی را برای درک توزیع و تکامل میدآنهای تنش از رویدادهای تکتونیکی مهیا میسازد. اما گاهی ممکن است گسل رخنمون نداشته باشد و در نتیجه دادههای لغزش گسلی در د سترس نبا شند. در چنین مواردی، ا ستفاده از تفسیر لرزهنگاری سهبعدی می تواند در مطالعات تنش ديرين گرهگشا باشد. اين رهيافت كه در ابتدا توسط گارترل و ليسك پيشنهاد شد، در ادامه توسط لوهر و همكاران و سپس تو سط ون گنت و همکاران بسط و تو سعه یافت ( , Constrell and Lisk, 2005; Lohr ea al., 2008; Van Gent et al., ا 2009). بنابر مطالعات گاترل و لیســک، تخمین جهتگیریها و بزرگاهای تنش دیرینه از دادههای لرزهای، از طریق تجزیه و تحلیل دادههای لغزش گسلی بهدست آمده با استفاده از تکنیکهای بازگردانی سهبعدی، امکان پذیر است و نتایج بهدست آمده در موارد مطالعاتی با مشــاهدات 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 اندازه گیریهای لغزش گسل با روشهای سنتی مبتنی بر برونزد صفحهٔ 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 تغیر شکل های جوان تر به منظور دستیابی به بردارهای لغزش مربوط به رویدادهای منجر به تغیرشــکلهای قدیمی تر انتخاب شــد. همچنین نتایج ارائه شــده، با تفسیرهای تنش دیرینهٔ منطقهٔ مورد مطالعاتی سازگار بوده است. اما در عین حال، نیازمند به ارزیابیهای نقادانهٔ بیشتری در مورد سوالات مربوط به اندازهٔ میدان تنش همگن، موضوعات مهم فرضیات اصلی وارون سازی تنش، و بحث پیرامون ابهام در ا ستخراج شاخصهای لغزش گسل از دادههای لرزهای سهبعدی، میبا شد (Van Gent et al., 2009). در مطالعهٔ حاضر، از روش وارون سازی توأم تکرار شونده برای تحلیل دینامیک گسل.ها به کمک دادههای لغزش گسلی (راستا φ، شیب δ، زاویهٔ لغزش ریک  $\lambda$ ) حاصل از دادههای لرزهای سهبعدی تفسیر شده و دادههای ساز وکار کانونی زمینلرزهها، استفاده شده است.

<sup>1</sup> restoration

هدف این مطالعه شامل برر سی نتایج مطالعات تنش دیرین انجام شده در پو شش ر سوبی منطقه و مقایسهٔ آن با و ضعیت کنونی تنش در همان منطقه، و تعیین نحوهٔ فرگشت زمینساختی منطقهٔ جنوبغربی زاگرس با استفاده از اطلاعات به دست آمده از تنش دیرین و حالت کنونی تنش میباشد.

روش انجام پژوهش

وارونسازى توأم تكرارشونده

در مورد وارونسازی تنش، الگوریتمهای خطی و غیرخطی متعددی وجود دارد. استفاده از روشهای مختلف برای مطالعهٔ وضعیت تنش این مزیت را بههمراه دارد که در صورت مشابهت نتایج، آن گاه نتایج دارای سطح اطمینان بالاتری خواهند بود. از سوی دیگر با توجه به شناختی که از منطقه در دست است میتوان به مطالعهٔ نتایج حاصل از هر دو روش پرداخت و روشی که بهترین جواب را بهدست میدهد معرفی نمود. برتری روشهای خطی، مؤثرتر و سریعتر بودن، عدم نیاز به حدس اولیه در مورد جواب و آسانی بیشاتر در بهدسات دادن حدود اطمینان اسات. در نقطهٔ مقابل، روشهای غیرخطی به پیش فرضهای کمتری نیاز دارند و جواب واقعی تری به دست میدهند (پوربیرانوند، ۱۳۹۱).

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

که در آن،

$$\sigma = n_1^2 + (1 - 2R)n_2^2 - n_3^2 \tag{7}$$

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

مستند.  $\mu = (\sigma_1 - \sigma_r)/(\sigma_1 - \sigma_r)$  بزرگای نسبی یا نسبت شکلی، n بردار نرمال گسل و  $\mu$  ضریب اصطکاک سطح گسل هستند.  $\mu$  دارای مقادیری بین ۲/۰ و ۱۰/۸ است (Vavry´cuk, 2013). برای ترسیم دایرهٔ موهر سهبعدی، در دست داشتن بزرگای نسبی کافی است (که و ۸٫ است (Gephart and Forsyth, 1984). برای ترسیم دایرهٔ موهر مشخص می شوند و چون بزرگای نسبی کافی است (یاست (Gephart and Forsyth, 1984). برای ترسیم دایرهٔ موهر مشخص می شوند و چون وارون سازی توأم تکرار شونده نسبت به  $\mu$  حساس نیست، رابطهٔ ناپایداری برای مقادیر مختلف  $\mu$  را می توان حل کرد و صفحهٔ گرهی که بالاترین ناپایداری را داشته باشد به عنوان صفحهٔ گسل در نظر گرفت.

با در نظر گرفتن قید ناپایداری، وارونسازی منجر به تکرار میشود، یعنی تنش بهجای محاسبه در یک مرحله، بعد از چند بار تکرار محاسبه میشود. در الگوریتم وارونسازی توأم تکرارشونده در مرحلهٔ اول، روش مایکل با صفحهٔ گسلی اتفاقی، اجرا میشود (Michael, 1984). سپس جهتهای تنشهای اصلی و بزرگای نسبی در این مرحله مشخص میشوند. این مقادیر سپس در معادلهٔ ناپایداری جاگذاری میشوند و ناپایداری و به تبع آن صفحهٔ 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. تجربهٔ به دست آمده از آزمونهای عددی نشان میدهند که این فرایند بعد از ۳ یا ۴ تکرار همگرا خواهد شد (۷۹۲ / ۲۰۰۵).

### دادههای لرزهای سهبعدی تفسیر شده

مکعب سهبعدی تفسیر شده بر اساس دادههای لرزهای مهاجرت یافتهٔ پیش از برانبارش، با سطح ۶۰۰ کیلومتر مربع، یک میدان هیدروکربوری در جنوب غربی ایران را پوشش میدهد. طول گسل در مکعب سهبعدی ۳۵ کیلومتر اندازهگیری شده و عمق این گسل عرضیِ عمیق، بیش از ۱۰ کیلومتر است. روند عربی این گسل (تقریباً شمالی-جنوبی) نشانهای از پی سنگی بودن آن است و این گسل راستالغزِ راستبر، بسیار شیبدار یا عمودی است (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ طیب حسینی و همکاران، بودن آن است و این گسل راستالغزِ راستبر، بسیار شیبدار یا عمودی است (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ طیب حسینی و همکاران، بودن آن است و این گسل راستالغزِ راستبر، بسیار شیبدار یا عمودی است (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ طیب حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). تعدادی افق بر روی این مکعب سهبعدی، برای به دست آوردن جزئیات منطقهٔ گسلی تفسیر شدهاند. افقهای تفسیر شده که توسط گسل قطع شدهاند، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند، به انضمام مده که توسط گسل قطع شدهاند، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند. نام افقها و شده که توسط گسل قطع شدهاند، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند، به انضمام میده که توسط گسل قطع شدهاند، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند، به انضمام مده که توسط گسل قطع شده ده، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند، به انضمام مده که توسط گسل قطع شده ده، و خطوط آلن که محصول تقاطع افقهای تفسیر شده با صفحهٔ گسلی هستند، به انضمام می مورد بحث قرار میگیرند، در شکل ۲ نشان داده شده است. کرتاسهٔ زیرین (گروه خاصی) در شکل ۳ نشان داده شده است.



شكل ۱- تقاطع برخى از افقهاى تفسير شده با گسل اصلى منطقه، و خطوط آلن (Allan) حاصل از تقاطع، و جفت نقاط جدايشى. 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.



شکل۲- ستون چینه شناسی گسترهٔ زاگرس در زمآنهای زمینشناسی مورد بررسی (Alizadeh et al, 2015). Figure 2. Stratigraphic column of the Zagros area in geological times under study.



شکل۳– نقشهٔ عمقی افق فهلیان مربوط به زمان کر تاسه 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 شکل۱، از شکل۲ قابل استعلام اند. با توجه به شکل۲، مرز بالایی سازند سروک (کرتاسهٔ بالایی) از گروه سازندی بنگستان، یک ناپیو ستگی دارد که مربوط به عصر تورونین است. این ناپیو ستگی و تنوع ضخامت در سازند سروک بهعلت بالاآمدگی در نتیجهٔ رژیم تنشی فشارشی ایجاد شده است (نوری، ۱۳۸۸). این بالاآمدگیهای 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 شدگی روی همین بلنداهای قدیمی، میتواند به طور غیر مستقیم نشان دهندهٔ فعال شدن گسلهای بزرگ و عمیق پی سنگی واقع در زیر بلنداها، به ویژه گسل مورد مطالعه باشد. که با توجه به مقطع لرزه نگاری، حداکثر فعالیت بلنداها و گسلهای مسبب آن، همزمان با نه شته شدن سازندهای گروه بنگستان ( سروک و ایلام) اتفاق افتاده، به طوری که باعث نازک شدگی و فر سایش این دو سازند در اواخر دورهٔ کرتاسه شده است. همین طور در سازندهای گورپی مربوط به کرتاسه بالایی، و پابده و آ سماری مربوط به تر شیری نیز تا حدودی نازک شدگی قابل م شاهده است که نشاندهندهٔ ادامهٔ فعالیت بلنداها و گسلهای پی سنگی مورد نظر است. پس از آ سماری تا عهد حا ضر نیز نازک شدگی روی مقطع لرزه نگاری دیده میشود که نشان می دهد فعالیت بلندا هم چنان ادامه داشته و حتی ممکن است در اثر نیروهای زاگرسی نیز تا حدی تشدید شده باشد (طیب حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

## بر آورد دادههای لغزش گسلی از دادههای لرزهای

به منظور وارون سازی تنش همان طور که پیش تر در مقدمه ا شاره شد، دادههای لغزش گسلی از جمله را ستای گسل  $\phi$ ، شیب گسل  $\delta$ ، و زاویهٔ لغزش رِیک  $\lambda$  (را ستای تنش بر شی بیشینه) به عنوان ورودیهای ضروری نرمافزار وارون سازی تنش مورد نیاز است. در همین را ستا و در مطالعهٔ حاضر، با ا ستفاده از نرمافزار مدل سازی زمین شنا سی ساختمانی Move از مورد نیاز ا ست. در همین را ستا و در مطالعهٔ حاضر، با ا ستفاده از نرمافزار مدل سازی زمین شنا سی ساختمانی Move از مورد نیاز ا ست. در همین را ستا و در مطالعهٔ حاضر، با ا ستفاده از نرمافزار مدل سازی زمین شنا سی معنوان ومودی مشید مشبک مورد نیاز ا ست. در همین را ستا و در مطالعهٔ حاضر، با ا ستفاده از نرمافزار مدل سازی زمین شنا سی ماختمانی Move از مجموعهٔ (Petex. (n.d.). MOVE Core) Petroleum Experts (Petex) مشبک مجموعهٔ (مثلث سازندهٔ سطح گسل به عنوان یک صفحهٔ گسلی مجزا در نظر گرفته شد (شکل ۳). در واقع هرچند که صفحهٔ گسل در کلیت می تواند نامسطح باشد، اما هر مثلث به تنهایی مسطح است. از تقاطع این صفحهٔ گسلی مثله با

افقهای زمین شناسی، فصول مشتر کی تحت عنوان خطوط آلن پدیدار می شوند که در تعیین زاویهٔ لغزش (λ) نقش اساسی دارند.

در رابطه با استخراج دادههای لغزش گسلی، را ستا (Φ) و شیب (δ) هر صفحهٔ گسلی (هر مثلث) دقیقاً از مدل سهبعدی ساختاری آن به آسانی و بهطور مستقیم از نرمافزار مدل سازی مذکور به ست میآید. اما محاسبهٔ زاویهٔ لغزش (۸) بهعنوان سومین دادهٔ لغزش گسلی، همیشه به منزلهٔ مشکلترین بخش در مطالعات تنش دیرین با استفاده از دادههای لرزهای است. در رابطه با استخراج زاویهٔ لغزش (۸)، محاسبهٔ آن با استفاده از دادههای (جفت نقطه) جدایشی<sup>۲</sup> ارائه شده تو سط الگوریتم برش مایل<sup>۳</sup>، و به وسیلهٔ همان نرمافزار انجام می پذیرد. در اینجا، در ابتدا به ارتباط بین بردار لغزش و جفت نقطهٔ جدایشی و پرداخته شده و پس از فرمول بندی محاسبهٔ زاویهٔ ۸، آن گاه ارتباط موجود بین نحوهٔ استخراج جفت نقطهٔ جدایشی و الگوریتم برش مایل، به تفصیل تشریح می شود.

ارتباط بردار لغزش رِیک با جفت نقطهٔ جدایشی به این صورت است که، این جفت نقطهٔ فرضی که پیش از وقوع گسلش جزو یک افقِ یکپارچه بوده و با همدیگر هممختصات بودهاند، حال بهدلیل وقوع گسلش از همدیگر جدا شده و به دو نقطهٔ مجزا در صفحهٔ گسل تبدیل میشوند، و اکنون خط فرضیای که این دو نقطه را به هم متصل گرداند درواقع جهت جابجایی گسل یا همان جهت لغزش در صفحهٔ گسل را در آن محدوده نشان میدهد (شکل ۴). بنابرین، بردار اتصال دهندهٔ جفت نقطهٔ جدایشی همان بردار لغزش است، و زاویهٔ آن بردار با بردار راستای گسل نیز همان زاویهٔ لغزش رِیک (λ) میباشد (شکل ۵). مسئلهٔ مهم، یافتن مختصات این دو نقطه بر روی صفحهٔ گسل پس از وقوع گسلش است.



شکل۴- خطوط آلن (خط قرمز یا تیره تر ، و خط زرد یا روشن تر) هردو 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 سازندهٔ 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).

<sup>2</sup> separation

<sup>3</sup> Inclined shear



شکل۵- بردار فرضی d همان بردار جابجایی گسل یا همان خط واصل جفت نقطهٔ جدایشی فرضی است؛ و پارامتر λ نیز بیانگر ریک (زاویهٔ لغزش) میباشد (https://ocw.mit.edu/terms).

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

مطابق آنچه که تا کنون ارائه گردید، با فرضِ دانستن مختصات جفت نقطهٔ جدایشی، فرمول بندی و محا سبهٔ زاویهٔ لغزش  
رِیک 
$$\lambda$$
 (زاویهٔ فضایی مابین بردار خط واصل جفت نقطهٔ جدایشی و بردار راستای گسل)، به طریق زیر امکان پذیر است.  
در ابتدا بردار خط وا صل جفت نقطهٔ جدایشی (بردار جابجایی یا بردار لغزش) در د ستگاه مختصات کارتزین به این صورت  
نوشته می شود:  
(۴)  
سپس بردار راستای گسل را نیز می توان از روی حرکت ساعت گرد زاویهٔ  $\phi$  نسبت به شمال جغرافیایی به صورت زیر نوشت:  
(۵)  
(۵)

زاویهٔ بین دو بردار دلخواه a و b از معادلهٔ زیر محاسبه می شود:  
(۶) 
$$\lambda = \cos^{-1} \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|}$$

بنابرین با جایگذاری بردارهای (۴) و (۵) بهترتیب به جای بردار a و b در معادلهٔ (۶)، زاویهٔ لغزش رِیک ( $\lambda$ ) در نهایت به شکل ساده شدهٔ زیر بهدست میآید: (۲)

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

رابطهٔ پیشنهادی فوق (معادلهٔ ۷)، بر پایهٔ مختصات طول و عرض و عمقِ جفت نقاط جدایشیی که هر سه از جمله خروجیهای مدل ساختمانی محسوب می شوند، بنا نهاده شده است. علامتهای منفی و مثبت در λ بهدلیل آن است که بنا به تعریف، مقادیر رِیک بازهای مابین ۱۸۰- درجه الی ۱۸۰+ درجه را شامل می شود. و اما ارتباط جفت نقطهٔ جدایشی با الگوریتم برش مایل به این ترتیب است که در هر برش، یک جفت نقطهٔ جدایشی بهدست می آید. صفحهٔ برش که در بستر نرم افزار Move فراهم می آید همواره بر صفحهٔ افق عمود است و آزیموت آن از صفر تا ۳۶۰ درجه قابل تغییر است. آنچه که مورد برش واقع می شود، مکعب لرزهای تفسیر شده است. به طور دقیق تر، آنچه که تو سط صفحهٔ برش مورد تقطیع قرار می گیرد خطوط آلن مستقر بر صفحهٔ گسل، هستند. فصل مشتر ک صفحه برش با جفت خط آلن، مختصات جفت نقطهٔ جدایشی می با شد. جفت خط آلن، خود فصل مشتر ک یک افق گسلش یافته با صفحهٔ گسلی است. دلیل نسبت دادن جفت خط آلن به تنها یک افق، این است که وقوع پدیدهٔ گسلش، یک افق یکپارچه را به دو قسمت مجزا از هم در طرفین گسل تقسیم می کند؛ و از آنجا که هر قسمت مجزا، فصل مشتر ک (خط آلن) جداگانهای با صفحهٔ گسل پیدا می کند، لذا به ازای هر افقِ گسلشیافته و جدا شده، دو خط آلن مجزا روی صفحهٔ گسل پداین این. بنابراین برای یک افق، در هر برش با الگوریتم برش مایل، از هر خط آلن فقط یک نقطهٔ جدایشی و از مجموع دو خط آلن (مرتبط به مهمان یک افق)، جفت نقطهٔ جدایشی استخراج می گردد. البته این برش باید به طور یکنواخت در سرتاسر امتداد خطوط آلن اعمال گردد. لازم به ذکر ا ست که در یک آزیموت یکتای صفحهٔ برش، از آنجا که سطح گر سل می تواند نا صاف با شد، لذا افق، موازی با آزیموت موضو آلن به دست می آیند می توانند منقطهٔ جدایشی و از مجموع دو خط آلن (مرتبط به وایای لغزشی که از سراسر خطوط آلن به دست می آیند می واند منفاوت از هم باشند، اما همواره تصاویر آنها بر روی صفحهٔ افق، موازی با آزیموت صفحهٔ برش خواهد بود (شکل ۶ و ۷).

همان طور که پیش تر دربارهٔ پیدا کردن زاویهٔ لغزش رِیک (λ) آمده است، مسئلهٔ مهم، یافتن مختصات دقیق جفت نقطهٔ جدایشی بر روی صفحهٔ گسل پس از وقوع گسلش است؛ و این خود مستلزم یافتن آزیموت منا سب برای صفحهٔ برش میبا شد، به طوری که آزیموت انتخابی متنا سب با زاویهٔ لغزش رِیک (λ) با شد؛ حال آنکه زاویهٔ لغزش رِیک (λ) خود مجهول اصلی است. لذا به منظور یافتن آزیموت مطلوب برای صفحهٔ برش، به ناچار باید تمام زوایای ممکن در گسترهٔ ۲۶۰ 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 مرحلهٔ اول به منظور تخمین اولیه، تمام گستره با دقت کمتر و در مرحلهٔ دوم به منظور تدقیق بیشتر کسری از این گستره را که منتخب مرحلهٔ اول بوده با دقت بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد.

در مرحلهٔ اول میتوان این گسترهٔ ۳۶۰ درجهای را به قطاعهای اختیاری ۳۰ درجهای تقسیم نموده و با انتخاب آزیموتهایی به مرکزیت هر قطاع، صفحهٔ 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 زاویهٔ قطاعها سه شرط را برآورده میکند. اول آن که عدد ۳۰ مقسوم علیه عدد ۳۶۰ با شد و دوم آن که آنقدر کوچک نبا شد که حجم دادهها را بسیار افزایش دهد و سوم آن که آنقدر بزرگ نبا شد که دقت نتایج را بسیار کاهش دهد. سپس به و سیلهٔ رابطهای که تعریف شد، از روی جفت نقاط جدایشی استخراج شده از تمامی قطاعها، جمیع زوایای لغزش احتمالی را محاسبه نموده تا به همراه راستاها و شـیبهای منتسـب به آن زوایای لغزش احتمالی، به عنوان دادههای لغزش گسـلی در اختیار نرمافزار وارونسـازی تنش قرار گیرند. آن گاه، پس از اعمال فرایند وارونسـازی روی تمام این زوایای لغزش احتمالی، خروجیهای هر آزیموت را با دیگر آزیموتها مقایسه کرده و قطاع نسبت داده شده به آن آزیموتی که زاویهٔ لغزش آن با توجه به معیار عدم انطباق، بهترین تانسور تنش را در وارونسازی نتیجه دهد، برای پایش دقیق تر مورد بررسی قرار میگیرد. در مرحلهٔ دوم به منظور دقت بیشتر در یافتن زاویهٔ لغزش رِیک (λ) و به طبع آن محاسبهٔ دقیق تر تانسور تنش، قطاع نسبت داده شده به آن آزیموتی که بهترین زاویهٔ لغزش از همان آزیموت یافت شده ا ست را اینبار با گامهای اختیاری ۵ درجهای جاروب کرده و آن قطاع ۳۰ درجهای به قطاعهای ۵ درجهای تجزیه میشود. سـپس تمام فرایند مرحلهای اول دربارهٔ آن قطاع نیز تکرار شده و دادههای ا ستخراج شده را دوباره در اختیار نرمافزار وارون سازی قرار داده می شود تا بهترین تان سور تنش دیرین تعیین گردد. بدیهی است که آزیموت صفحهٔ برش هرچه با گامهای کوچک تری تغییر کند، دقت مطالعه و مدت محاسبه افزایش پیدا میکند. لازم به ذکر است، هرچند که نرم افزار وارون سازی قابل اغماض را برای تغییر آزیموت صفحهٔ برش فراهم میآورد، اما با توجه به اینکه خطای ۵ درجه در حوزهٔ ژئوفیزیک قابل اغماض است به منظور پرهیز از افزایش تصاعدی حجم محاسبات، از اعمال دقت بیشتر صرفنظر میگردد.



شکل۶- انتقال صفحهٔ برش با آزیموت 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 آزیموت صفحهٔ 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 افت افقی، افت قائم، و جابهجایی گسل از دیگر خروجیهای مستقیم نرمافزار مدل سازی زمین شناسی ساختمانی Move هستند که متناسب با آزیموت انتخابی برای صفحهٔ 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 قائم الزاویه هستند، از مختصات طول و عرض و عمق جفت نقاط جدایشی بهره جسته و مقادیر این سه کمیت نامبرده محاسبه میشود. به جهت صحت سنجی رابطهٔ پیشنهادی (که آن هم بر پایهٔ همین مختصات جفت نقاط جدایشی بنا نهاده شده است)، این دادههای محا سبهای با دادههای مشاهدهای مقایسه می شود. مطابق انتظار، نتایج این مقایسه حکایت از تطابق صددر صدی در مورد افت افقی و اُفت قائم گسل داشته، بهطوری که دو نمودار کاملاً برهم منطبق می شوند. در شکلهای ۸ و ۹ دادههای مشاهدهای به رنگ آبی (خط تو پر) و دادههای محاسبه ای به رنگ قرمز (خط چین) نمایان هستند.



شکل۸- اُفت افقی گسل در سازند کژدمی متعلق به دورهٔ 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).



شکل۹- اُفت قائم گسل در سازند کژدمی متعلق به دورهٔ 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 جابه جایی گسل نیز نتیجهٔ مقایسه قابل قبول، و دارای اختلافی قابل پیش بینی بود (شکل ۱۰). نامسطح بودن یا همان ناصاف بودن صفحهٔ 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 گونه ای اعوجاج داشته باشند که حتی تصویر آن خطوط نیز بر روی صفحهٔ افق ناصاف شوند، در آن صورت است که تحت برخی زوایای خاص تلاقی صفحهٔ برش با هر خط ناصاف آلن، بیش از یک نقطه را به عنوان فصل مشترک نتیجه می دهد. از آن جا که در تلاقی یک صفحهٔ 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 آن گاه تعداد فصل مشترک می تواند افزایش یابد. برای حل این مشکل می توان پیش از تلاقی دادن صفحهٔ برش با خط ناصاف آلن، ابتدا آن خط ناصاف آلن را به کمک همان نرم افزار به چندین خط صاف تجزیه کرده، سپس برشها اعمال شود و بدین گونه خطا به صفر خواهد رسید.

و صورت دوم آن که، چنانچه در عینِ ناصافی صفحهٔ گسلی، جفت نقطهٔ جدایشی برداشت شده متعلق به دو مثلث جداگانه با شند، همواره مقدار محا سباتی برای مؤلفهٔ جابهجایی کمتر از مقدار خروجی نرمافزار خواهد بود، مگر آن که دو مثلث هم به همدیگر متصل بوده و هم جهت گیری فضایی (بردار نرمال) یکسانی دا شته با شند که در آن صورت اختلاف به صفر خواهد ر سید. برای حل این مشکل نیز میتوان با تکنیکهایی هند سی محا سبات دقیق تری را به صورت موردی انجام داده و مقدار خطا را کمینه کرد یا حتی به صفر رساند.



شکل۱۰- مقایسهٔ میزان لغزش(جابجایی گسل) در سازند کژدمی متعلق به دورهٔ 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).

همان طور 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 گسترهٔ جنوب غربی زاگرس

ساز وکارهای کانونی منابع ارزشمندی از اطلاعات در مورد جهتها و بزرگاهای نسبی تنش در پوسته هستند. استفاده از سازوکارهای کانونی جهت ارتباط زمین لرزهای در زاگرس کمیاب است، بیشتر اطلاعات موجود در مورد گسلش فعال در آنجا که گسیختگی سطحی توأم با فعالیت لرزهای در زاگرس کمیاب است، بیشتر اطلاعات موجود در مورد گسلش فعال در این منطقه از زمین لرزهها به د ست آمده ا ست (2004) کمیاب است، بیشتر اطلاعات موجود در مورد گسلش فعال در حاکم بر پوسته در منطقهٔ مورد مطالعه در جنوب غربی زاگرس با استفاده از وارون سازی سازوکارهای کانونی زمین لرزهها بر آورد حاکم بر پوسته در منطقهٔ مورد مطالعه در جنوب غربی زاگرس با استفاده از وارون سازی سازوکارهای کانونی زمین لرزهها بر آورد شود. تاند سور تنش پو ستهای را نمی توان با استفاده از سازوکار یک زمین لرزه، با اطمینان به دست آورد (1969). از شود. تاند سور تنش پو ستهای را نمی توان با استفاده از سازوکار یک زمین لرزه، با اطمینان به دست آورد (1969). از سرزوکارهای کانونی وزن با استفاده از سازوکار یک زمین لرزه ازم است تا بتوان نتایج بهینه ای از وارون سازی سازوکارهای کانونی به دست آورد (پوربیرانوند، ۱۳۹۱؛ 202 Lund and Bödvarsson). در این را ستا سعی شده ا ست از تجربیات گذشته استفاده می شود که حداقل ۲۰ تا ۳۰ دادهٔ زمین لرزه ازم است تا بتوان نتایج بهینه ای از وارون سازی سازوکارهای کانونی معتبر منتشر شده در دسترس در مورد زمین لرزه های رخ داده در این را ستا سعی شده ا ست از تمام سازوکارهای کانونی معتبر منتشر شده در دسترس در مورد زمین لرزه های رخ داده در این پهنهٔ فعال لرزه زمین ساختی استفاده شود. داده های محلی و دور لرزه ای مورد استفاده در این مطالعه شامل داده های سازوکارهای کانونی کانونی مانو می مان و کارهای کانونی موجود در پایگاه داده سازمان زمین شناسی آمریکا (SUS)، به علاوه سازوکارهای کانونی کانونی مینه در مورد زمین شده ای مورد مین لرزه های مازوکارهای کانونی کانونی مانو مرد و ساز و کارهای کانونی موجود در پایگاه داده سازمان زمین شناسی آمریکا (SUS)، به علاوه سازوکارهای کانونی منتشر شده در مرکز لرزه نگاری کشوری (پاک زاد و میرزایی، ۱۳۸۶) برای منطقهٔ مورد مطالعه می با شد برای منطقهٔ مورد مطالعه می باشد (شکل ۱۱).



شکل۱۱- منطقهٔ مورد مطالعه و گسل اصلی، بههمراه لرزه خیزی با تلفیقی از کاتالوگهای پژوهشگاه بین المللی زلز له شناسی و مهندسی زلز له (تا سال ۲۰۰۶) (IIEES) و موسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران (از سال ۲۰۰۶ به بعد) (Iranian Seismological Center) و سازوکارهای کانونی موجود از ITAA (پاک زاد و میرزایی، ۱۳۸۶) و مرکز لرزه نگاری 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) (IIEES) 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).

### نتايج وارونسازى تنش

در اینجا روش وارونسازی غیرخطی تنش در ابتدا بهمنظور محاسبهٔ تنش دیرین و سپس بهمنظور محاسبهٔ تنش عهدحاضر 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 صحت سنجی، زوایای برش متفاوتی مورد پایش و مقایسه قرار گرفتند. مطابق با شناختی که از راستالغز بودن گسل در دست بود، بهترین نتایج مربوط به زاویهٔ برشی موازی با راستای گسل و نامناسبترین نتایج مربوط به زاویهٔ برشی عمود بر روند گسل بهدست آمد (شکل ۱۲). نتایج حاصل از وارون سازی تنش دیرینه برای افقهایی که توسط گسل اصلی قطع شدهاند در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این نتایج شامل داده شده است. همچنین نتایج حاصل از وارون سازی تنش عهدحاضر نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این نتایج شامل داده شده است. این نتایج شامل جهت محور تنش های اصلی و در واقع حدود اطمینان برای  $\sigma_1 \circ \sigma_2$  و  $\sigma_2 \circ \sigma_1$  ، نمودار هیستوگرام بزرگای نسبی تنش ع





Fiqure 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).

نتايج وارونسازي غيرخطي تنش:

در این روش، با استفاده از دادههای لرزهای سهبعدی تفسیر شده، از چهار افق مجزا با سنهای متفاوت که در عمقهای مختلف با صفحهٔ گسلی تقاطع داشتند بهطور متغیر به تعداد حدوداً ۲۵ الی ۳۰ جفت دادهٔ نقاط جدایشی استخراج شده و به وسیلهٔ 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 وارونسازی تنش بر روی دادههای لرزهای سهبعدی تفسیر شده. در سمت چپ هر تصویر نتایج بهینه تانسور تنش به ترتیب σ<sub>1</sub> به رنگ قرمز، σ<sub>2</sub> به رنگ سبز و σ<sub>3</sub> 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  $\sigma_1$  in red,  $\sigma_2$  in green and  $\sigma_3$  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 دادهٔ سازوکار کانونی زمینلرزه بهوسیلهٔ نرمافزار وارونسازی مورد پردازش قرار گرفته و نتایج تنش عهدحاضر بر روی استریونت به نمایش در آمده است (شکل ۱۴).



شکل۱۴- نتیجهٔ 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 بیشینهٔ محا سبه شده برای تمامی سازندهای منقطع با گسل و برای سازوکارهای کانونی زمین لرزهها در این جدول مرقوم گردید. در اینجا "Focal mechanism" معرف سازوکارهای کانونی و عدد مقابل آن بیان گر را ستای تنش عهد حا ضر ا ست. دیگر عناوین ذکر شده در ستون داده، معرف نام سازندها و اعداد مقابل آنها راستای تنش عهد دیرین را بیان می کنند. با توجه به عدم قطعیت در دادهها، اعم از دادههای لرزهای (و به تبع آن دادههای لغزش گسلی) و دادههای سازوکار کانونی زمین لرزهها (Kumar et al., 2007)، و همچنین عدم قطعیت در روش وارون سازی (2009) که جملگی در حدود ۶ درجه می با شند، را ستای تنش افقی بیشینه در عهد دیرین از آغاز دورهٔ کرتا سه تا ابتدای دور الیگو سن عملا ثابت بوده است. زیرا گسترهٔ تغییرات این راستاها که در حدود ۶ درجه است در محدودهٔ عدم قطعیت واقع می شود.

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

دربارهٔ تنش دیرین، راستاهای تنش افقی بیشینه (SHmax) همانطور که در استریونتهای شکل ۱۳ مشاهده میشوند و همچنین از جدول ۱ قابل تشخیص هستند برای مدت زمانی طولانی در مقیاس زمینشناسی از اوایل دورهٔ کرتاسه تا الیگوسن ، تقریباً ثابت ماندهاند. این راستاهای بهدست آمده در دورهٔ زمانی کرتاسه از سازندهای گروه خامی از جمله داریان و گروه بنگستان از جمله کژدمی و سروک و همچنین راستای تنش افقی بیشینه بهدست آمده در دورهٔ زمانی پالئوژن (ترشیری زیرین) از سازند آسماری، جملگی جهت شمال غربی-جنوب شرقی را نشان میدهند. ثابت بودن جهت تنش بیشینهٔ افقی در تمام دورهٔ کرتا سه و تا الیگو سن، نشان میدهد که تنش تکتونیکی ثابتی از سمت شبه قارهٔ هند در تمام این مدت بر منطقهٔ مورد مطالعه اعمال می شده است.

از طرفی در دور الیگوسن وقوع برخورد قارهای زاگرس بین صفحات عربی و اوراسیا مشاهده می شود ( Gholami Zadeh et ). (al., 20017 ). این برخورد با تغییر راستای تنش افقی بیشینه در منطقهٔ مورد مطالعه همراه بوده است، بهطوری که در منطقهٔ فارس از پهنهٔ زاگرس، در یک مطالعه راستای تنش در الیگوسن پسین تا میوسن پیشین برابر با °No33 ، در میوسن پسین تا پلیوسن پیشین °N026 و در پلیوسن پسین °No20 به دست آمد ( Navabpour et al., 2007 ) و در مطالعه دیگری راستای تنش در ترشیاری Eskarinejad et al., 2007 به دست آمد ( Navabpour et al., 2007 ). همچنین در یک مطالعه در منطقهٔ کرمانشاه از پهنهٔ زاگرس، راستای تنش در میوسن تا پلیوسن بصورت We-SW و در پلیوسن تا عهد حاضر بصورت N-A معرفی شد (Sarkarinejad et al., 2018 به دست آمد ( 2018 ). همچنین در یک مطالعه در منطقهٔ کرمانشاه از پهنهٔ زاگرس، راستای تنش در میوسن تا پلیوسن بصورت SW-SW و در پلیوسن تا عهد حاضر بصورت N-A معرفی شد (Navabpour et al., 2008 به دست آمد ( 2018 ). بصورت S-N معرفی شد ( Navabpour et al., 2008 می در مطالعهٔ دیگری که کل پهنهٔ زاگرس را پوشش می دهد، راستای بعد حاضر نیز همان طور که در استریونتهای شکلهای ۱۴ مشاهده می شود و همچنین از جدول ۱ قابل تشخیص است، را ستای تنش افقی بی شینه حاصل از وارون سازی سازو کار کانونی زمین ارزهها، جهت شمال شرقی –جنوبغربی را نه ان می دهد. جهت این راستا نسبت به راستای تنش دیرین در ماقبل الیگو سن تقریباً در و ضعیت تعامد بوده و این حاکی از آن می هدهد. جهت این راستا نسبت به راستای تنش دیرین در ماقبل الیگو سن تقریباً در و ضعیت تعامد بوده و این حاکی از آن الیگوسن و پس از آن بوده است.

وجود مخازن هیدروکربوری در این منطقهٔ مورد مطالعه و در مناطق هم جوار آن، اهمیت درک این پیچیدگیها و ابهامات ذکر شده در تحول ساختاری منطقه را، افزون می کند. 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 واسطهٔ 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 می سازد.



شکل ۱۵– مخازن هیدروکربوری حوضهٔ خلیجفارس 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 شکل گیری و توزیع تلههای هیدرو کربوری دارند، از این رو شناخت هرچه دقیق تر این قبیل گسلها در اکتشاف و توسعهٔ میادین نفت و گاز سودمند است (طیب حسینی و همکاران، ۱۳۹۶). همان طور که در تصویر بالا ( شکل ۱۵) م شخص ا ست، مخازن هیدرو کربوی ایران روند شمال غربی – جنوب شرقی زاگرس را دنبال می کنند. هرچند که سن زمین شناسی سنگ منشأ و سنگ مخازن این میادین هیدرو کربوری، سنی برابر با سن افقهای مورد بررسی در مطالعات تنش دیرینه حاضر دارند، اما سن دگر شیبی سنگ مخازن، شکل گیری تلههای نفتی، سن افقهای مورد بررسی در مطالعات تنش دیرینهٔ حاضر دارند، اما سن دگر شیبی سنگ مخازن، شکل گیری تلههای نفتی، سن افقهای مورد بررسی در مطالعات تنش دیرینهٔ حاضر دارند، اما سن دگر شیبی سنگ مخازن، شکل گیری تلههای نفتی، مهاجرت ثانویهٔ هیدرو کربورها و نهایتاً به دام افتادن آنها، مربوط به زمان بر خورد صفحهٔ عربی با ایران مرکزی و پس از آن است. چرا که راستای این مخازن هیدرو کربوری همواره موازی با محور چینها و تاقدیسها و ناودیسهایی است که خود حاص تنش اعمال شده از برخورد صفحهٔ عربی با ایران مرکزی می با شند، و همچنان آن تنش کی و بس از آن عهد حاضر نیز پابرجا است.

به منظور جمعبندی بین نتایج کسب شده و ارزیابی فرگشت تکتونیکی منطقهٔ مورد مطالعه، مجموع راستاهای تنش دیرین و راستای تنش عهد حاضر به دست آمده از وارون سازی تنش، جملگی به صورت استریونت و در یک توالی زمانی، در شکل ۱۶ که در آن ستون چینهنگاری و ستون زمان زمین شنا سی با هم همبسته شدهاند، گردآوری شده است. علیرغم مشاهدهٔ 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 نمی شود. و از آنجا که دادههایی که در دسترس نگارندگان قرار دارد نشاندهندهٔ قطع نمودن افقهای بالاتر تو سط صفحهٔ گسلی نیست، لذا اظهار نظر در مورد ساعتگرد یا پاد ساعتگرد بودن جهت چرخش راستای تنش افقی بیشینه در حدفاصل بین الیگو سن و عهد حاضر که برخورد صفحهٔ عربی و اوراسیا به آن



شکل ۱۶- فرگشت تکتونیکی در گذر زمان (تغییر یافته از Kazem Shiroodi et al., 2015). سه استریونت ترسیم شده در قسمت پایینی تصویر مربوط به قبل از برخورد زاگرسی و همزمان با دورهٔ کر تاسه، معرف راستای تنش افقی بیشینه در عهد دیرین میباشد. استریونت 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 منطقهٔ مورد مطالعه شاید به علت فرسایش شدید و نبود رخنمون سطحی یا برونزد گسلها مطالعهٔ تنش دیرینی انجام یا منتشر نشده است. اما با مراجعه به مقالات منتشر شده در مورد تنش دیرین در منطقهٔ زاگرس می توان ملاحظه نمود که در مناطق همجوار، فرگشت تکتونیکی به دست آ مده بیانگر چرخشی خلاف جهت عقربههای ساعت در را ستاهای تنش تکتونیکی از زمآنهای گذشتهٔ زمین شنا سی تا امروز بوده است (Navabpour et al., 2007; Sarkarinejad et al., 2018; Navabpour et al., 2008; Jentzer et al., 2017). لذا با است (Navabpour et al., 2007; Sarkarinejad et al., 2018; Navabpour et al., 2008; Jentzer et al., 2017). لذا با است (است در مطالعات می توان به این نتیجه گیری رسید که در منطقهٔ 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 منطق مورد مطالعه در این پژوهش، در فرواقتادگی دزفول و در جایی واقع گردیده است که پلتفرم یا زمین بوم عربی است. حال آن که بیشتر مطالعات تنش دیرین مورد اشاره، در نواحی دیگر زاگرس واقع شدهاند که از جبههٔ برخورد فاصله داشته و در صفحهٔ اوراسیا واقع گردیدهاند. اینکه آیا فرگشت تکتونیکی منطقهٔ مورد مطالعه با سایر مناطق مورد ارامی داشته و در صفحهٔ بحث جداگانهای است و به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

### نتيجهگيرى

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 میادین هیدروکربوری جنوب ایران براورد شد. در این روش، بردار جابجایی دوطرف گسل نسبت به قبل از گسلش، بهوا سطهٔ اندازه گیری مختصات دو نقطه در طرفین گسل (جفت نقاط جدایشی) که پیش از گسلش هم مختصات بودهاند، محاسبه شد. سپس امتداد و شیب صفحات گسلی در بردارندهٔ این جفت نقاط جدایشی، در محیط نرمافزار مدل سازی زمین شنا سی ساختمانی Move قرائت گردید. آنگاه برای تصویر نمودن بردار جابجایی بر صفحهٔ گسل و اندازهگیری زاویهٔ آن نسبت به را ستای گسل، رابطهای ریا ضی ارائه شده و صحت ان رابطه با توجه به مطابقت محا سبات انجام شده با مشاهدات صورت گرفته تأیید گردید. در این مطالعه بر اساس نتایج بهدست آمدهٔ حاصل از وارونسازی غیرخطی تنش از دادههای لرزهای سهبعدی تفسیر شده، در طی مدت زمان طولانی تقريبا از اوايل دورهٔ كرتاسه تا دور اليگوسن از ترشيري زيرين، راستاي تنش افقي بيشينه تغييرات بسيار كمي 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 افقي بيشينه، در حدود عدم قطعيت دادهها است، و اين راستا بهصورت شمالغربي-جنوبشرقي ثابت مانده است. اين نكته نشاندهندهٔ اين حقيقت است كه جهت تنش بيشينهٔ افقي بيشينه در تمام دورهٔ كرتاسه و تا دور اليگوسن، فشارش از سمت شبه قارهٔ هند را مشخص می کند. اما نتایج بهد ست آمده از وارون سازی غیرخطی تانسور تنش از دادههای محلی و دورلرزهای سازوکار کانونی زمینلرزهها که در مقایسه با نقشهٔ جهانی تنش سازگار با جهت تنشهای حالحا ضر منطقهای است، تأیید میکند که در یک برآیند کلی، جهت گیری تنش برای زمآنهای اخیر از شمالغربی-جنوبشرقی به شمالشرقی-جنوبغربي تبديل شده است. از جمعبندي نتايج فوق مشخص مي شود كه در منطقهٔ مطالعاتي در زاگرس جنوب غربي،

حدوداً از دور الیگوسن تا کنون، چرخشی در راستای تنش بیشینهٔ افقی، در این دورهٔ طولانی زمینشناسی اتفاق افتاده است به طوری که را ستای تنش عهدحا ضر تقریباً عمود بر را ستای تنش دیرین میبا شد. اما بهدلیل فقدان دادههای مورد نیاز در بازهٔ زمانی مذکور به منظور اظهار نظر فطعی در تعیین ساعتگرد یا پادساعتگرد بودن چرخش، این مهم ممکن نمیباشد.

### منابع

- ۱. پاکزاد، م.، میرزایی، ن.، "برر سی سازوکار کانونی زلزله ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ درب آستانه سیلاخور"، مجله فیزیک زمین و فضا. ۱۳(۳) (۱۳۸۶) ۷۲–۸۶.
- ۲. پوربیرانوند، ش.، "تغییرات تنش در زاگرس با استفاده از وارون سازی سازوکارهای کانونی زمین لرزهها"، رسالهٔ دکترا، مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران (۱۳۹۱).
- ۳. طیب حسینی، ف.ا.، سپهوند، م.، عبدالهیفرد، ا.، میری، س.ا.، "توصیف گسل هندیجان ایذه با اسفاده از دادههای لرزهنگاری دوبعدی دادههای زمینلرزه و اطلاعات زمین شناسی" ، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۴۸ (۱۳۹۶) ۴۲-۴۷.
- عباسی، م.، فربد، ی.، "مقدمه ای بر تعیین وضعیت تنش به کمک روش بر گشتی صفحه های گسلی و خط خشهای مربوطه"، علوم زمین، سال دوازدهم، شماره ۵۴ (۱۳۸۳) ۲-۹.
- ۵. نوری، ب، بشری، ع.، جهانی، د.، کاظم شیرودی، س.، "برر سی ویژگی های مخزنی سازند سروک در میدان نفتی هندیجان با مطالعات رسوب شناسی، محیط رسوبی و ارزیابی پتروفیزیکی"، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۶۱ (۱۳۸۸) ۵۰-۴۷.
- 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).
- Gartrell A.P., Lisk M., "Potential new method for paleostress estimation by combining threedimensional 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: Boult, P., Kaldi, J. (Eds.), Evaluating fault and cap rock seals. AAPG Hedberg Series, 2, (2005) 23-26.
- 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.

- 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.
- 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.
- Kazem Shiroodi S., Ghafoori M., Faghih 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.
- 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).
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Vavry'cuk V., "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms", Geophysical Journal International, 199(1), (2014) 69-77.
- Vavry cuk 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<sup>\*1</sup>, Shahrokh Pourbeyranvand<sup>2</sup>, Mehdi Talkhablou<sup>3</sup>

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

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

> <sup>3</sup> 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  $\varphi$ , dip  $\delta$ , rake  $\lambda$ ) 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 ( $\lambda$ ) estimation from 3D seismic interpretation data to provide fault-slip data. Previously, strike ( $\phi$ ) and dip ( $\delta$ ) 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 stereonets qualitically. The results include the direction of the principal stress axis, the confidence limits for  $\sigma 1$ ,  $\sigma 2$  and  $\sigma 3$ , 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