

تغییرات میدان تنش در منطقه گذار بین زاگرس و مکران با استفاده از وارون سازی سازوکار کانونی زمین لرزه ها

شاهرخ پوربیرانوند^{*1}

¹استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: 1398/12/10، تاریخ پذیرش: 1399/04/28)

چکیده

وارون سازی تانسور تنش با استفاده از سازوکار کانونی زمین لرزه ها یکی از روش های مورد استفاده در مطالعه تنش های زمین ساختی است. در این مطالعه با استفاده از این روش، راستای تنش بیشینه افقی در منطقه گذار بین زاگرس و مکران تعیین شده است. نتایج، نشان دهنده تغییرات زیاد در راستای محورهای اصلی تنش در این منطقه است. در اطراف تنگه هرمز، محورهای تنش افقی بیشینه می چرخند و الگوی پیچیده ای را نشان می دهند. این چرخش در سمت راست خط عمان، به صورت ساعت گرد از باختر به خاور حول این خط فرضی اتفاق می افتد، اما در سمت دیگر، به خصوص جایی که جزیره قشم قرار دارد، جهت گیری های متقاطع تنش افقی بیشینه نشان دهنده پیچیدگی میدان تنش است. احتمال دارد که تفاوت خصوصیات پوسته اقیانوسی و قاره ای مسئول تفاوت در جهت گیری های میدان تنش در این منطقه باشد. راستاهای تنش بیشینه افقی با توجه به روند امتداد گسل های فعال منطقه، به خوبی با سازوکار گسلش در مناطق مورد مطالعه همخوانی دارد. دیگر روش های ژئوفیزیکی نیز چرخش مشابهی را در اطراف تنگه هرمز به نمایش می گذارند و این راستاها با اطلاعات حاصل از آنها سازگارند. این مطالعه می تواند با فراهم کردن نگرشی نو، به درک ساختار و فرایندهای زمین ساختی در این منطقه پیچیده کمک کند.

واژه های کلیدی: زمین ساخت، تنش، زاگرس، سازوکار کانونی، مکران، منطقه گذار، وارون سازی

1 مقدمه

بر همگان آشکار است که سرزمین ایران زمین لرزه های بزرگ بسیاری را همراه با تلفات و خسارات فراوان تحمل کرده است. در سده گذشته، پیشرفت در مهندسی عمران، معدن و نفت باعث توسعه فناوری های اندازه گیری تنش شد. در زمین شناسی و ژئوفیزیک نیز شناخت کمی نحوه توسعه ساختارهای چین خورده، حرکت روی گسل های مسبب زمین لرزه و مانند آن، همواره حائز اهمیت بوده است. امروزه، در این چهارچوب، بررسی های مختلفی روی سامانه های گسلی با عنوان تحلیل لغزش گسل ها انجام می شود (آکی و ریچاردز، 2002).

در ایران، در خلال همگرایی بین صفحات عربی در جنوب غرب و اوراسیا، حرکت نسبی شمال-شمال شرقی صفحه عربی نسبت به اوراسیا از غرب به شرق از 18 تا 25 میلی متر در سال تغییر پیدا می کند. قطب این چرخش در آفریقای شمالی قرارداد (والپرسدورف و همکاران، 2006). بر اساس مطالعات GPS، کوتاه شدگی شمالی-جنوبی از 9 mm/yr در قسمت های جنوب شرقی تا حدود 4 mm/yr در قسمت های شمال غربی در زاگرس تفاوت نشان می دهد (ورنانت و همکاران، 2004 و میسن و همکاران، 2005).

کمر بند کوهستانی زاگرس از گسل آناتولی شرقی در ترکیه تا فرورانش مکران در جنوب ایران امتداد دارد. بنا به پیچیدگی های بسیار این منطقه، کوهزایی و اهمیت آن در همگرایی صفحات عربی و اوراسیا و دگرشکلی های حاصل از آن، مطالعات فراوانی در این منطقه به انجام رسیده است. منطقه مکران در مجاورت زاگرس، در جنوب شرق ایران و جنوب پاکستان واقع شده است و بخشی از مرز صفحه ای اوراسیا-عربستان به شمار می رود که در آن، پوسته اقیانوسی صفحه عربستان واقع در دریای عمان از اوایل کرتاسه با شیب کم به سوی شمال، شروع به فرورانش به زیر صفحه اوراسیا کرده است. مرز غربی

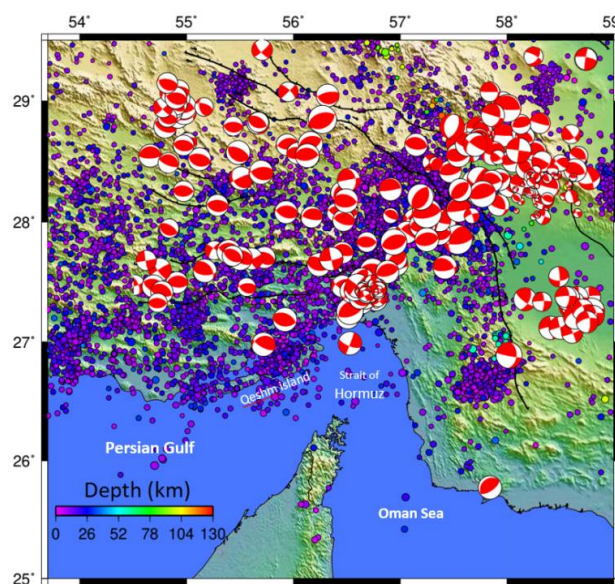
زون فرورانش مکران، که آن را از منطقه برخورد قاره ای زاگرس جدا می کند، با سامانه گسلی میناب (مگی و همکاران، 2002) مشخص می شود. در مرز شرقی مکران، سامانه های گسلی امتداد لغز چپ گرد اصلی اراچال و چمن وجود دارند که با حرکت بین صفحه اوراسیا و بخش غربی صفحه هند متناسب هستند. آتشفشان های کوآترنری در بخش شرقی مکران نسبت به بخش غربی، فاصله بیشتری از جبهه فرورانش دارند. از نظر هندسه فرورانش، مکران یک گوه پرافزایشی است که در اثر تجمع رسوبات ناشی از فرورانش ایجاد شده است. پوسته اقیانوسی فرورونده، این رسوبات را به مرز فرورانش حمل و انباشته می کند. از این نظر، مکران با ضخامت رسوباتی در حدود 7 کیلومتر، یکی از ضخیم ترین گوه های پرافزایشی دنیاست. نرخ همگرایی در امتداد زون فرورانش مکران در حدود 2 سانتی متر در سال برآورد شده است و به طور جزئی از غرب به شرق افزایش می یابد (ظریفی، 2006). در شکل 1 اطلاعات زمین ساختی موجود درباره زاگرس، مکران و منطقه گذار بین این دو به تصویر کشیده شده است. در این شکل، لرزه خیزی از سال 2006 تا 2020 (برگرفته از وبگاه مرکز لرزه نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) روی توپوگرافی ترسیم شده است. در شکل 2 اسامی گسل های مهم منطقه نوشته شده است. همچنین در این شکل، بردارهای سرعت GPS (رئسی و همکاران، 2016) جهت استفاده و مقایسه در قسمت بحث آورده شده است.

لرزه خیزی در منطقه گذار بین زاگرس و مکران به علت وجود گسل های فعال و متراکم در این منطقه شدید است حتی در مقایسه با زاگرس که از نظر لرزه خیزی منطقه ای بسیار فعال به شمار می رود (شکل 1). با حرکت به سمت مکران، فعالیت لرزه خیزی کاهش چشمگیری پیدا می کند و به استثنای فعالیت های درخور توجه روی سامانه گسلی میناب-زندان، فعالیت چشمگیر دیگری در سمت

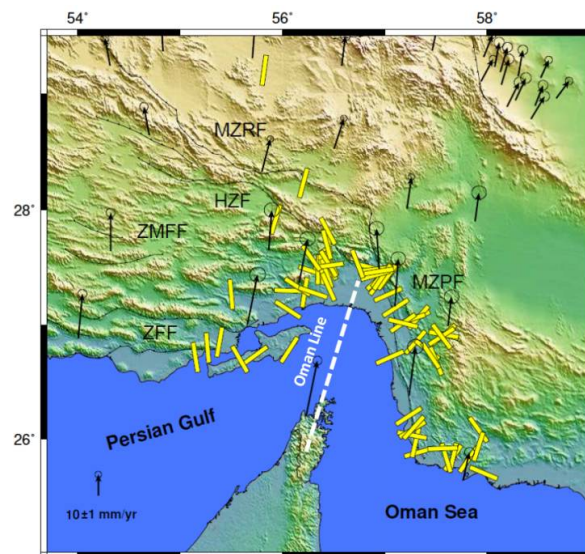
زمین‌شناسان خطی فرضی را که با در نظر گرفتن خصوصیات زمین‌شناختی و لرزه‌ای متفاوت، دو سوی تنگه هرمز را از یکدیگر جدا می‌کند و نمایانگر منطقه گذار بین زاگرس و مکران است، خط عمان می‌نامیدند (کادینسکی-کید و برزنگی، 1982). توضیح اینکه ژئوفیزیک‌دان‌ها مرز شاخصی را با راستای N208E، که به آن خط عمان می‌گفتند، بین شرق و غرب تنگه هرمز تشخیص داده بودند و با وجود لرزه‌خیزی کم، آن را گسلی انتقالی توصیف می‌کردند (ریگارد و همکاران، 2010). این خط فرضی، پوسته قاره‌ای را در سمت مشرق از پوسته اقیانوسی در سمت مغرب تنگه هرمز جدا می‌کرد و بیانگر منطقه گذاری بود که از بازشدگی اقیانوس نئوتتیس به‌جامانده است و مرزی را بین ناحیه‌ای با لرزه‌خیزی زیاد در شمال غربی (حوزه زاگرس) و ناحیه‌ای با لرزه‌خیزی کم در سمت شرق مشخص می‌کرد (وایت و روس، 1979). بعدها تصور غالب به این شکل تغییر کرد که این نقش را سامانه گسلی میناب-زندان

مکران منطقه گذار دیده نمی‌شود. عمق زمین‌لرزه‌ها، که با مقیاس رنگی نشان داده شده است، بیانگر سطحی بودن قسمت عمده انرژی لرزه‌ای آزاد شده است. با توجه به استفاده از کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک، بزرگای زمین‌لرزه‌ها بیشتر از 2/5 است. اگرچه عمق زمین‌لرزه‌ها با توجه به پوشش ناکافی شبکه لرزه‌نگاری به‌طور کامل قابل اعتماد نیست، وجود رخداد های عمیق در مناطق شمالی‌تر، گسترش نفوذ عمقی جبهه فروانش را با شیب به‌نسبت کم نشان می‌دهد.

منطقه گذار بین زاگرس و مکران، محل تلاقی این دو ایالت مهم لرزه‌زمین‌ساختی است و در مطالعات صورت گرفته درباره تنش در ایران مورد توجه بوده است (پوریبرانوند و تاتار، 1393 و قربانی رستم و همکاران، 2017). درباره این منطقه به علت تفاوت‌های مشهود نظیر اختلاف راستای روندهای گسلی و اختلاف فاحش در میزان لرزه‌خیزی در دو طرف تنگه هرمز، همواره پرسش‌های گوناگونی مطرح شده است. در گذشته، گاهی



شکل 1. نقشه منطقه مورد مطالعه شامل لرزه‌خیزی از سال 2006 تا 2020 (برگرفته از وبگاه مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) و سازوکارهای کانونی استفاده‌شده در این مطالعه (برگرفته از مراجع مختلف توضیح داده شده در متن).



شکل 2. مطالعات خطواره‌های مغناطیسی (مپله‌های زرد رنگ) در منطقه مورد مطالعه (باختری و همکاران، 1998 و ابور و همکاران، 2004).

بردارهای سرعت GPS (رئسی و همکاران، 2016) با پیکانهای مشکی نمایش داده شده‌اند. توضیح گسل‌ها: HZF: High Zagros Fault, ZMFF: Zagros Mountain Frontal Fault, MZRF: Main Zagros Reverse Fault, ZFF: Zagros Foredeep Fault

در این مطالعه با هدف تعیین راستاهای اصلی تنش زمین‌ساختی در منطقه گذار بین زاگرس و مکران، با استفاده از وارون‌سازی تنش سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، وارون‌سازی روی یازده خوشه از سازوکارهای کانونی اجرا و تغییرات مکانی میدان تنش در این منطقه پیچیده و مهم بررسی شد. در قسمت نتایج این مطالعه، در توافق با سایر مشاهدات ژئوفیزیکی، تفاوت‌های موجود در دو طرف تنگه هرمز بحث و ضمن مقایسه راستاهای اصلی تنش، بر اهمیت تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت موجود بر چگونگی انجام دگرشکلی تحت تنش‌های بحث‌شده در منطقه گذار بین زاگرس و مکران تأکید می‌شود.

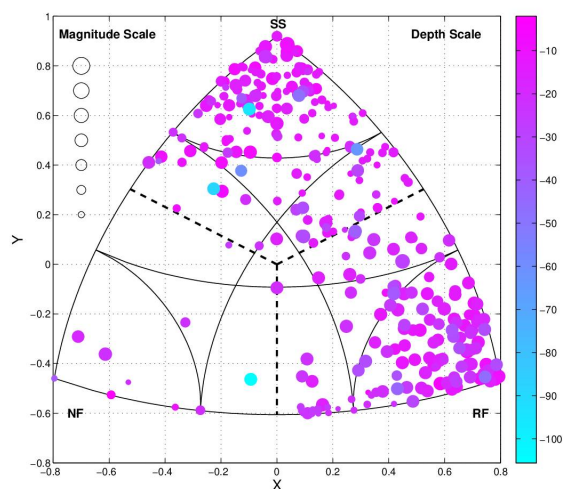
2 داده‌های استفاده‌شده و سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها

از آنجا که گسیختگی سطحی توأم با فعالیت لرزه‌ای در زاگرس کمیاب است، بیشتر اطلاعات موجود درباره

بازی می‌کند که ادامه جنوبی آن در مقاطع لرزه‌ای دیده شده است (راووت و همکاران، 1998). در برخی مطالعات اخیر، خط عمان، خطی مرزی معرفی می‌شود که آهنگ لرزه‌خیزی از زاگرس واقع در غرب آن به مکران واقع در شرق آن کاهش زیادی می‌یابد (قربانی رستم و همکاران، 2017).

داده‌های ژئوفیزیکی مختلف از جمله مطالعات مغناطیس‌سنجی، تفاوت‌هایی را در راستای روند خطواره‌های مغناطیسی در دو سوی تنگه هرمز آشکار می‌کند. با مطالعه فابریک یا بافت مغناطیسی رسوبات، امکان بررسی تحولات زمین‌ساختی منطقه وجود دارد. جهت کوتاه‌شدگی به‌دست‌آمده از این مطالعات (باختری و همکاران، 1998 و ابور و همکاران، 2004) در شکل 2 نمایش داده شده است. همان‌طور که در ادامه خواهد آمد، تغییراتی در جهت خطواره‌های مغناطیسی در دو سوی تنگه هرمز به چشم می‌خورد که این تغییرات در راستای تنش‌های اصلی در منطقه نیز دیده می‌شوند.

GCMT (که در گذشته به اختصار HRVD نامیده می شد)، وبگاه مرکز لرزه نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، وبگاه مرکز بین المللی زلزله شناسی (ISC)، وبگاه مرکز ملی اطلاعات زمین لرزه ایالات متحده (NEIC) و وبگاه سرویس لرزه نگاری سوئیس (ZUR_RMT) است. همچنین از مقالات متعددی برای تکمیل مجموعه داده ها استفاده شد (تاتار و همکاران، 2004؛ غلامزاده و همکاران، 2009؛ یمینی فرد و همکاران، 2007؛ یمینی فرد و همکاران، 2012؛ رضایی نایه، 1390؛ آزادفر و قیطانچی، 1392 و رضا و همکاران، 1393). بازه زمانی داده های سازوکار کانونی استفاده شده در این مطالعه از سال 1970 تاکنون یعنی 2020 را شامل می شود. با توجه به استفاده از داده های شبکه های محلی، امکان استفاده از راه حل کانونی به دست آمده برای خردزمین لرزه ها نیز وجود داشت که با دقت پذیرفتنی محاسبه شده اند. بزرگای کوچک ترین زمین لرزه استفاده شده برابر 0/7 است.



شکل 3. دیاگرام مثلی کاگان که نشان دهنده گستردگی سازوکار گسلش در منطقه مورد مطالعه است.

درباره خطاهای موجود در داده ها و تأثیر آنها بر مطالعه حاضر باید اشاره کرد که دقت مکانی نتایج

گسلش فعال در این منطقه از زمین لرزه ها به دست آمده است (طالبیان و جکسون، 2004). زمین لرزه ها در زاگرس اغلب کم عمق با بزرگای بیشینه 7 هستند. به علت وجود پوشش رسوبی ضخیم که در حدود 10 تا 14 کیلومتر است (پیروز و همکاران، 2017)، معمولاً نسبت دادن زمین لرزه ها به گسلی خاص دشوار است (مک کواری، 2004). لرزه خیزی در زاگرس با تعداد زیاد رویدادهای لرزه ای که بزرگای کوچک دارند، از دیگر مناطق ایران متمایز می شود. به نظر می رسد لرزه خیزی به طور یکسان در سراسر زاگرس توزیع شده باشد، اما کاهش نسبی در لرزه خیزی در قسمت های شمال غربی نسبت به قسمت های مرکزی و جنوب شرقی به چشم می خورد. در مکران غربی و مرکزی، لرزه خیزی کمی دیده می شود که این ویژگی به بحث های موجود درباره قفل شدگی یا بی لرزه بودن (aseismic) فرایند دگرشکلی در این ناحیه منجر شده است. در مکران خاوری که در کشور پاکستان واقع است، لرزه خیزی افزایش چشمگیری یافته است. همان طور که در ادامه نشان داده خواهد شد، این منطقه با مناطق شرقی و مرکزی مکران متفاوت است. تفاوت میزان لرزه خیزی در نواحی مختلف محدوده مورد مطالعه در شکل 1 مشخص است. توزیع سازوکارهای کانونی منطقه در دیاگرام کاگان (کاگان، 2002) نشان دهنده سازوکار غالب گسلش در هر زمین لرزه است (شکل 3). مطابق انتظار، ملاحظه می شود که بیشتر رخدادها فشارشی و سپس امتدادلغز هستند که از محیط ترافشارشی حاکم بر منطقه حکایت می کند. تعدادی سازوکار نرمال نیز در منطقه دیده می شود که می تواند در اثر رژیم های محلی کششی در نتیجه برهم کنش بین بلوک ها یا در اثر چین خوردگی ها پدید آمده باشد.

برای تکمیل و به روزرسانی پایگاه داده موجود، سازوکارهای کانونی زمین لرزه های منطقه با استفاده از منابع مختلف جمع آوری شدند. این منابع شامل وبگاه

وارون‌سازی تنش به میزان عدم قطعیت در مکان‌یابی رخدادهای لرزه‌ای بستگی دارد. با توجه به منابع استفاده‌شده در تشکیل پایگاه داده این مطالعه که حاوی داده‌های دورلرز (مراکز تحقیقاتی بین‌المللی شامل GCMT، USGS و ISC) و داده‌های محلی (شامل داده‌های سازوکار کانونی IRSC و نتایج منتشرشده از شبکه‌های محلی در قالب مقالات علمی) است، می‌توان گفت عدم قطعیت در پارامترهای سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها چیزی در حدود 15 تا 20 درجه است. میزان عدم قطعیت چشمداشتی برای نتایج وارون‌سازی تنش با توجه به الگوریتم‌های آماری استفاده‌شده کمتر و در حدود 3 تا 6 درجه است (کیدینگ و همکاران، 2009). در مقایسه بین روش‌های خطی و غیرخطی وارون‌سازی، گاه بین راستای تنش بیشینه به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف تفاوت‌هایی وجود دارد که این تفاوت‌ها بیشتر از عدم قطعیت موجود در داده‌های ورودی یعنی سازوکارهای کانونی نیست.

3 روش تحقیق

اصول اولیه لغزش روی یک گسل با جهت‌گیری دلخواه در یک میدان تنش را والاس (والاس، 1951) و بات (بات، 1959) فرمول‌نویسی کردند. بات همچنین پیشنهاد کرد که لغزش روی هر صفحه گسل در امتداد تنش برشی بیشینه به‌دست‌آمده اتفاق می‌افتد (معیار بات) و نشان داد جهت تنش برشی به جهت صفحه گسل در میدان تنش و بزرگای نسبی تنش متوسط R بستگی دارد و به بزرگای واقعی تنش‌های اصلی وابسته نیست. از نظر بات، معادلات او می‌تواند برای تعیین راستای تنش و R استفاده شود. کری و برونیر (کری و برونیر، 1974) این فرض را اضافه کردند که حرکتی را که تمام شیارها (striae) نشان داده‌اند، یک تانسور مشترک منفرد ایجاد کرده است. آنجلیه (1979) و مایکل (1984) این تحلیل را توسعه و

بسط دادند. وارون‌سازی اندازه‌گیری‌های صفحه گسل بدون محدودیت‌های دیگر غیر از همگن بودن تنش و معیار بات، فرایندی به شدت غیرخطی است. مقالات اشاره‌شده، گستره متفاوتی از روش‌های عددی را برای وارون‌سازی تنش استفاده و برخی فرضیات را برای خطی کردن مسئله در روش خود اضافه می‌کنند. خطی کردن مسئله با این فرض انجام شد که بزرگای تنش برشی روی تمام گسل‌های ضعیف مشابه است (مایکل، 1984). تمامی این رهیافت‌های مختلف می‌توانند به نتایج مختلف با خطاهای متفاوت منجر شوند. روش وارون‌سازی جستجوی شبکه‌ای (گفارت و فورتیث، 1984) رویکرد نوینی را در انحراف زاویه‌ای با اندازه‌گیری عدم برازش (misfit) معرفی کرد. پیش از آن، زاویه عدم برازش معمولاً به‌عنوان زاویه بین تنش برشی تخمین‌زده‌شده و جهت لغزش مشاهده‌شده در صفحه گسل تعریف می‌شد. گفارت و فورتیث نشان دادند که این کار به‌طور ضمنی تنها خطاهای جهت لغزش را بررسی می‌کند و خطاهای جهت‌گیری صفحه را بررسی نمی‌کند. آنها در عوض زاویه چرخش کمینه بین جهت لغزش مشاهده‌شده و خانواده پذیرفته‌شده‌ای از هندسه‌های گسلی را به‌عنوان زاویه عدم برازش تعریف کردند. لوند و اسلونگا (1999) بر مبنای روش گفارت و فورتیث روشی را بنا نهادند که از روش‌های نوآورانه در تشخیص صفحه گسلی استفاده می‌کرد. در این روش به دلیل ناشناخته بودن بزرگای تنش‌ها، تمام بردارها طول واحد دارند. محاسبه جهت تنش برشی روی صفحه، به همراه زاویه بین جهت تنش برشی و جهت لغزش مشاهده‌شده، در دستگاه اصلی انجام می‌گیرد. تنش برشی روی یک صفحه با مشخصه نرمال $n = (n_1, n_2, n_3)$ به‌صورت زیر نوشته می‌شود (لوند و اسلونگا، 1999):

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)[Kn_1, (K - R)n_2, (K - 1)n_3]$$

$$R = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$K = n_3^2 + Rn_2^2, \quad (1)$$

که σ_1 و σ_3 بزرگای تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه هستند. R اندازه نسبی تنش اصلی میانه است. ملاحظه می‌شود که بزرگای تنش‌های اصلی معلوم نیست، اما جهت تنش برشی بیشینه بر صفحه را می‌توان محاسبه کرد. زاویه بین جهت تنش برشی τ و جهت لغزش مشاهده‌شده S در داخل صفحه گسل، که به آن زاویه عدم برازش می‌گویند، با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \arccos(\tau.S), \quad (2)$$

با کمینه کردن این زاویه در خلال فرایند وارون‌سازی، نتایج و راستاهای تنش اصلی محاسبه می‌شوند (لوند و اسلونگا، 1999).

در این مطالعه برای راستی‌آزمایی نتایج وارون‌سازی تنش، نتایج با روش وارون‌سازی دیگری مقایسه شد. در این روش با فرض یکسان بودن کشش مماسی روی تمام صفحات گسل، مسئله خطی می‌شود (مایکل، 1984). مقایسه این دو روش وارون‌سازی که یکی خطی و دیگری غیرخطی است، می‌تواند به راستی‌آزمایی نتایج کمک کند.

در روش‌های وارون‌سازی تنش، بزرگای مطلق تنش‌های اصلی را نمی‌توان محاسبه کرد، اما بزرگای نسبی آنها با پارامتری به همین نام محاسبه می‌شود که با علامت R یا Φ نشان داده می‌شود. از طرفی، سازوکارهای مختلف گسلش مستلزم وجود روابطی خاص بین اندازه مؤلفه‌های اصلی تنش هستند. به بیان دیگر، برای شکل‌گیری هر کدام از انواع گسلش، باید بزرگای مؤلفه‌های تنش به نحو مقتضی آرایش یافته باشند. مثلاً برای گسلش رانده، σ_1 باید افقی و σ_2 نیز باید افقی و عمود بر σ_3 باشد. در چنین گسلی باید قائم باشد. پس اگر بزرگا و راستای مؤلفه‌های تنش اصلی به این شکل چیده شده باشند،

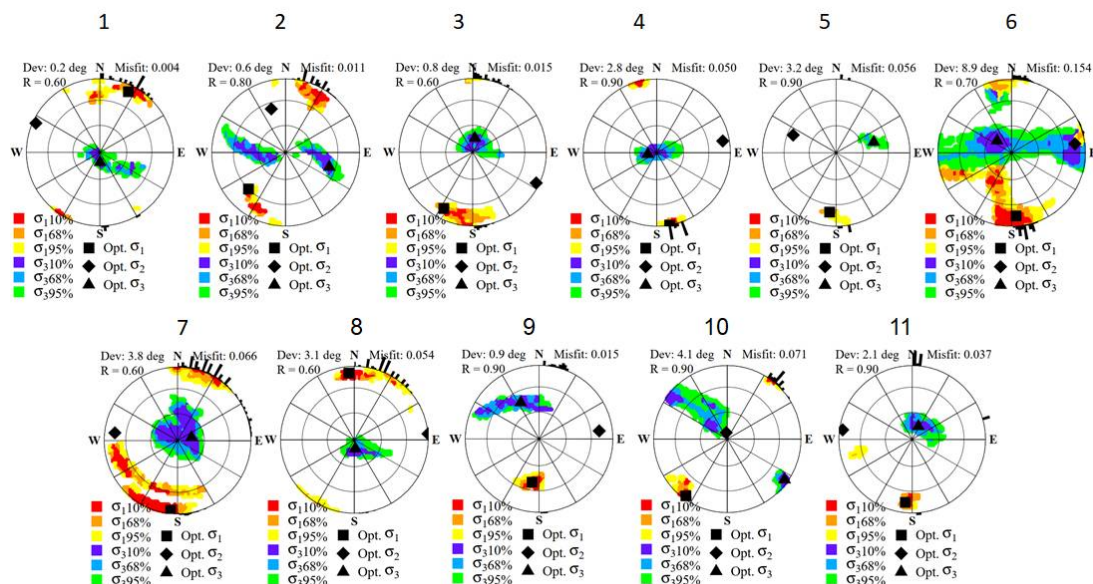
سازوکار راندگی بر محیط زمین‌ساختی چیرگی دارد. چیرگی سایر حالات یعنی راستالغز و نرمال نیز با توجه به بزرگا و راستای مؤلفه‌های تنش پیش‌بینی می‌شود؛ لذا با دانستن روابط نسبی مؤلفه‌های تنش اصلی با یکدیگر می‌توان به چیرگی هریک از سازوکارهای گسلش پی برد. در قسمت نتایج، با استفاده از این نکته‌ها، ضمن انجام وارون‌سازی، سازوکار چیره گسلش در هر منطقه به‌دست آمده و تفسیر شده است.

4 نتایج وارون‌سازی تنش و تفسیر زمین‌ساختی

در شکل‌های 4 و 5، نتایج وارون‌سازی تنش به دو روش، روی داده‌های جمع‌آوری‌شده ارائه شده است. در شکل 4 حدود اطمینان با رنگ‌های مشخص‌شده روی استریونت‌ها نشان داده شده و محل بهینه محوره‌های اصلی تنش ترسیم شده است.

روش خطی استفاده‌شده به‌عنوان روش کمکی و در جهت راستی‌آزمایی دقت نتایج وارون‌سازی (مایکل، 1984) پیاده‌سازی شد. نتایج وارون‌سازی در شکل 5 نشان داده شده است. در این روش، نمونه‌برداری مجدد از داده‌ها برای تعیین حدود اطمینان به‌صورت آماری انجام می‌پذیرد و در هر مرحله، محوره‌های تنش تعیین می‌شوند. این محورها طی 2000 بار نمونه‌گیری مجدد از مجموعه داده‌ها به‌دست آمده و در استریونت ترسیم شده‌اند.

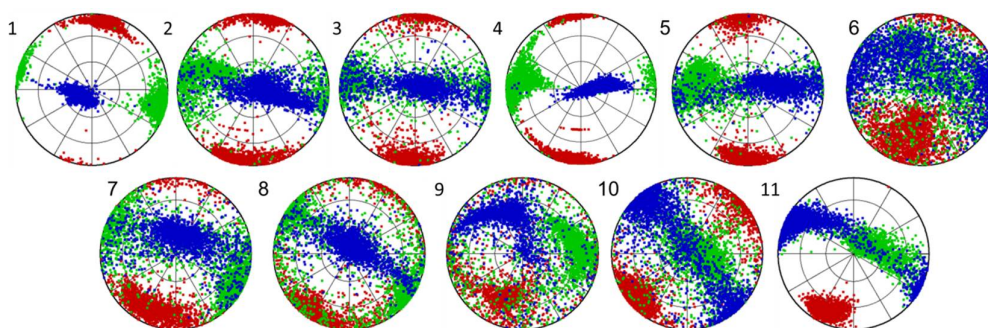
حالت تنش در منطقه مورد مطالعه با وارون‌سازی‌های متعدد و با امتحان کردن تعداد مختلفی از رویدادها در هر گروه و نیز پارامترهای گوناگون (برای مثال، روش‌های مختلف انتخاب صفحه گسلی) بررسی شد. در این گروه‌ها که از قسمت‌های مختلف زاگرس انتخاب شده‌اند، انواع مختلفی از سازوکارهای کانونی وجود دارند و جهت‌های تنش متفاوتی برای هر گروه از داده‌ها به‌دست آمده است.



شکل 4. نتایج وارون‌سازی روی یازده گروه از داده‌ها با روش لوند و اسلونگا (1999).

شکل 6 دربردارنده نتایج وارون‌سازی تنش به روش‌های مختلف و مقایسه با بردارهای حرکت صفحات زمین‌ساختی است. در این شکل، زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی آنها در گروه‌های مختلف وارون‌سازی شده است، با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند. میله‌های بلند به رنگ‌های قرمز و آبی، نشان‌دهنده نتایج وارون‌سازی به روش غیرخطی (لوند و اسلونگا، 1999) هستند که به ترتیب رژیم تنش راندگی و راستالغز را نشان می‌دهند. میله‌های کوتاه‌تر سبزرنگ، نشان‌دهنده نتایج وارون‌سازی تنش به روش خطی (مایکل، 1984) هستند. کوتاه‌ترین میله‌ها به رنگ بنفش مربوط به نتایج وارون‌سازی تنش در سلول‌های 200 کیلومتر در 200 کیلومتر است (ظریفی و همکاران، 2013). بردارهای حرکت صفحات زمین‌ساختی با استفاده از مدل NUVEL-1A به رنگ سفید نمایش داده شده‌اند.

در بعضی از موارد در گستره مورد مطالعه، راستاهای تنش افقی بیشینه شبیه و در راستای همگرایی صفحات عربی و اوراسیا یعنی شمال شرقی هستند، اما برای گروه‌های اطراف خط عمان، تغییرات سریعی در جهت تنش در محدوده‌ای به نسبت کوچک مشاهده می‌شود. در شکل 4 جهت بیشینه تنش افقی SH_{max} به صورت متوسط زاویه‌ای از روش عدم پایداری (لوند و تاونند، 2007) در موقعیت میانگین زمین‌لرزه‌ها در هر گروه ترسیم شده و همچنین اطلاعاتی از رژیم تنش نمایش داده شده که از وارون‌سازی به دست آمده است. در شکل، میله‌های آبی، رژیم تنش امتدادلغز و میله‌های قرمز، رژیم تنش راندگی را نشان می‌دهند. تغییرات زیادی در جهت SH_{max} در اطراف خط عمان و منطقه گذار بین زاگرس و مکران وجود دارد. در گروه‌های غرب خط عمان، جهت‌های SH_{max} شروع به چرخش در جهت ساعت گرد به سمت شمال می‌کنند.

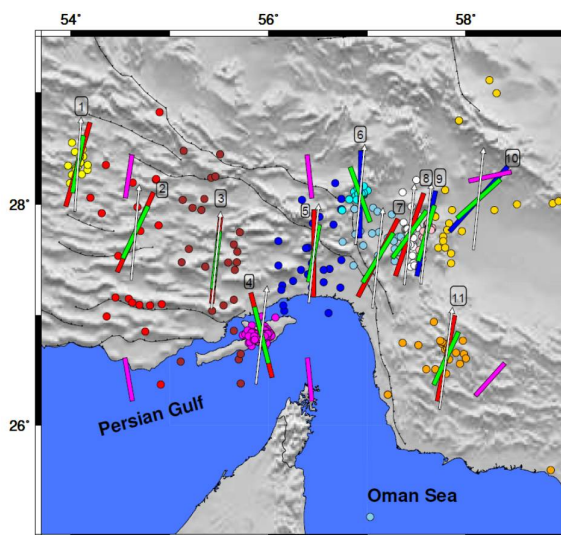


شکل 5. نتایج وارون‌سازی روی یازده گروه از داده‌ها به روش مایکل (1984).

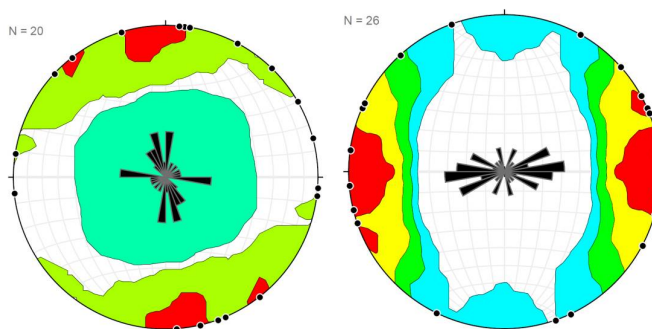
موجود بین راستاهای مورد بحث، جزئی و در حدود عدم قطعیت داده‌هاست.

روند خط‌واره‌های مغناطیسی - که با پیگیری تحولات زمین‌ساختی در رسوبات، امکان دستیابی به جهت کوتاه-شدگی را فراهم می‌کند - با این یافته‌های حاصل از بررسی تنش زمین‌ساختی همخوانی دارد. این خط‌واره‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت در داده‌ها تا حدی پراکنده به نظر می‌رسند، اما با دقت در جهت‌گیری آنها می‌توان دید که در دو سوی خط عمان جهت‌های مختلفی دارند (شکل 2). نمودار گل سرخی خط‌واره‌های مغناطیسی در

در گروه‌های 1 و 2 از داده‌ها که در منتهی‌الیه غربی منطقه مورد مطالعه واقع است، تفاوت‌هایی بین نتایج وارون‌سازی و راستای بردار سرعت صفحات زمین‌ساختی وجود دارد. در گروه‌های 3، 5 و 6 که در سمت چپ خط عمان قرار دارند، سازگاری خوبی بین نتایج وارون‌سازی و بردارهای سرعت صفحات زمین‌ساختی دیده می‌شود. در گروه 4 که در جزیره قشم قرار دارد، نتایج وارون‌سازی که همخوانی خوبی با هم دارند، با بردار سرعت صفحات زمین‌ساختی اختلاف دارد. در گروه‌های 7، 8 و 10 نیز وضعیت مشابهی حاکم است. در گروه‌های 9 و 11 تفاوت



شکل 6. تغییرات تنش بیشینه افقی در ناحیه مورد مطالعه. میله‌های قرمز، رژیم تنش فشارشی و میله‌های آبی، رژیم تنش امتدادلغز را نشان می‌دهند. نقاط رنگی، سازوکارهای کانونی موجود در خوشه‌های مختلف مورد استفاده در وارون‌سازی تنش هستند (توضیح علائم در متن).



شکل 7. نمودار گل سرخی و پربند رنگی نشان‌دهنده توزیع راستاهای خط‌واره‌های مغناطیسی در سمت شرق و غرب خط عمان.

سمت شرق و غرب خط عمان در شکل 7، نشان‌دهنده روندهای متفاوت است. بردارهای سرعت GPS (رئیی و همکاران، 2016) نیز از جهت مقایسه و ملاحظه تفاوت در جهت‌گیری در دو سوی خط عمان در شکل 2 نمایش داده شده‌اند. مقایسه نتایج وارون‌سازی حاضر با مطالعات پیشین، نشان‌دهنده توافق نسبی نتایج است. نتایج مطالعه ظرفی و همکاران (2013) تقریباً با راستاهای به‌دست‌آمده در این مطالعه سازگار است (شکل 6). با توجه به کامل‌تر بودن داده‌های استفاده‌شده و دقت زیاده‌تر مکان‌یابی و نیز کیفیت بیشتر سازوکارهای کانونی حاصل از پروژه‌های لرزه‌نگاری محلی، انتظار می‌رود نتایج مطالعه حاضر به واقعیات زمین‌شناسی نزدیک‌تر باشد.

از شکل 6 روشن است میله‌های آبی‌رنگ، که نشان‌دهنده رژیم تنش امتدادلغز هستند، بیشتر در جانب باختری تنگه هرمز قرار دارند. در این شکل همچنین بردارهای سرعت صفحات زمین‌ساختی به‌دست‌آمده از مدل NUVEL-1A (دمتس و همکاران، 1994) با پیکان‌های سفید روی میله‌های قرمز یا آبی نشان‌دهنده راستای تنش بیشینه افقی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در بیشتر مناطق واقع در غرب خط عمان، این راستاها با یکدیگر مطابقت دارند. این موضوع بیانگر

اعمال تنش در راستای کلی همگرایی است. در بعضی مناطق که بیشتر در شرق تنگه هرمز واقع هستند، این راستاها با یکدیگر زوایایی می‌سازند که حاکی از اعمال تنش در راستاهایی غیر از راستای کلی همگرایی در منطقه است.

به‌نظر می‌رسد اختلاف مشاهده‌شده بین بردار حرکت صفحات زمین‌ساختی و راستای تنش بیشینه افقی در بعضی از گروه‌ها به وجود گسل‌ها و شکستگی‌های از پیش موجود مربوط باشد که در اثر تحولات زمین‌ساختی، دچار گسلش و خردشدگی شده‌اند؛ در نتیجه، اعمال تنش به‌طور محلی در راستاهایی متفاوت با راستای کلی همگرایی در حال روی دادن است. افزاز دگرشکلی به معنای تقسیم حرکت به جابه‌جایی‌های امتدادلغز و رانده است؛ از این رو، مشاهده آمیزه‌ای از رژیم‌های تنش راستالغز و رانده در این منطقه، به همراه وجود اختلاف بین راستای تنش زمین‌ساختی حاصل از وارون‌سازی تنش و جهت بردار حرکت صفحات زمین‌ساختی، بیانگر وجود شواهدی از پراکندگی این پدیده در منطقه مورد مطالعه است. از سوی دیگر، چگونگی دگرشکلی در اثر تنش‌های وارده، به جهت‌گیری روندهای گسلی در میدان تنش منطقه‌ای مرتبط است که با توجه به تغییرات در

منابع

- پوربیرانوند، ش.، تاتار، م.، 1393، تغییرات تنش در زاگرس با استفاده از وارون‌سازی سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها: فصلنامه علوم زمین، 24(94)، 115-122.
- رضایی نایه، ع.، 1390، تعیین سازوکار زمین لرزه با استفاده از برگردان تانسور ممان به روش نسبی برای برخی از زمین لرزه های منطقه زرن در بازه زمانی 2005 تا 2008 و بزرگای بالای 5/3، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Aki, K., and Richards, P. G., 2002, Quantitative Seismology: Theory and Methods: University Science Books.
- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population: Tectonophysics, 56, T17-T26.
- Aubourg, C., Smith, B., Bakhtari, H., Guya, N., Eshragi, A., Lallemand, S., ... , and Delaunay, S., 2004, Post-Miocene shortening pictured by magnetic fabric across the Zagros-Makran syntaxis (Iran): Special Paper 383: Orogenic Curvature: Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses, 17-40, doi: 10.1130/0-8137-2383-3.
- Azadfar, M.R. and Gheitanchi, M.R., 2013, Identifying causative fault of 11th May 2013 Goharan Earthquake using relocation of aftershocks and focal mechanisms. Iranian Journal of Geophysics, 9 (4), 54-67.
- Bakhtari, H. R., Lamotte, D. F. D., Aubourg, C., and Hassanzadeh, J., 1998, Magnetic fabrics of Tertiary sandstones from the Arc of Fars (Eastern Zagros, Iran): Tectonophysics, 284(3-4), 299-316. doi: 10.1016/s0040-1951(97)00179-0
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting: Geological Magazine, 96, 109-117.
- Carey, E., and Brunier, B., 1974, Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 279, 891-894.
- جهت‌گیری گسل‌ها، گسترش پدیده افراز دگرشکلی نیز در منطقه دستخوش تغییر می‌شود. افراز دگرشکلی در مناطق گذار بین زون‌های فرورانش و برخورد قاره‌ای پدیده‌ای است که در نقاط دیگر دنیا مانند تایوان (شیو 2005)، پاپوا گینه نو و تیمور (ون دلاژمات و همکاران، 2018) نیز مشاهده شده است. شناخت ویژگی‌های خاص منطقه گذار زاگرس و مکران در مقایسه با موارد مشابه در دنیا نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر با استفاده از داده‌های مختلف ژئوفیزیکی در یک مطالعه یکپارچه است.
- ### 5 نتیجه‌گیری
- در این مطالعه نشان داده شد که راستاهای تنش بیشینه افقی به‌دست‌آمده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در منطقه گذار بین زاگرس و مکران، تغییرات زیادی را از غرب به شرق به‌صورت چرخشی شدید در جهت عقربه‌های ساعت نشان می‌دهند. بردار حرکت صفحات زمین‌ساختی در بیشتر مناطق واقع در غرب خط عمان با راستای بردار سرعت صفحات زمین‌ساختی و جهت تنش بیشینه افقی با یکدیگر همخوانی دارند. این موضوع نشان‌دهنده اعمال تنش در راستای کلی همگرایی است. در بعضی مناطق، که بیشتر در شرق خط عمان پراکنده هستند، این راستاها با یکدیگر زوایایی می‌سازند که بیانگر اعمال تنش در راستاهایی غیر از راستای کلی همگرایی در منطقه است. این تفاوت‌ها که با داده‌های مختلف ژئوفیزیکی از جمله مطالعات مغناطیس‌سنجی تأیید شده‌اند، بیانگر اختلافات زمین‌ساختی در دو سوی خط عمان هستند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر گسل‌های از پیش موجود بر دگرشکلی ناشی از همگرایی در نواحی مختلفی از منطقه مورد مطالعه و مشاهده پدیده افراز دگرشکلی باشد. این پدیده در سایر نقاط دنیا نیز در مناطق گذار بین زون‌های فرورانش و زون‌های برخوردی قاره به قاره دیده می‌شود.

- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., and Stein, S., 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophysical Research Letters*, **21**, 2191-2194.
- GCMT, Global CMT Catalog Search (n.d.), Retrieved from <https://www.globalcmt.org/CMTsearch>.
- Gephart, J. W., and Forsyth, D. W., 1984, 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**, 9305-9320.
- Gholamzadeh, A., Yamini-Fard, F., Hessami, K., and Tatar, M., 2009, The February 28, 2006 Tiab earthquake, Mw 6.0: Implications for tectonics of the transition between the Zagros continental collision and the Makran subduction zone: *Journal of Geodynamics*, **47**, 280-287.
- IRSC, Iranian Seismological Center (n.d.), Retrieved from <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php>.
- ISC, International Seismological Centre, Focal mechanism search (n.d.), Retrieved from: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>.
- Kagan, Y. Y., 2002, Double-couple earthquake focal mechanism: random rotation and display, *Geophys. J. Int.*, **163**, 1065-1072.
- Kadinsky-Cade, K., and Barazangi, M., 1982, Seismotectonics of Southern Iran: the Oman Line: *Tectonics*, **1**, 389-412.
- Keiding, M., Lund, B., and Arnadottir, T., 2009, Earthquakes, stress, and strain along an obliquely divergent plate boundary: Reykjanes Peninsula, southwest Iceland: *Journal of Geophysical Research*, **114**, B09306, doi: 10.1029/2008JB006253.
- Lund, B., and Slunga, R., 1999, Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: Application to Olfus in southwest Iceland: *Journal of Geophysical Research*, **104**(B7), 14947-14964.
- Lund, B., and Townend, J., 2007, Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor: *Geophysical Journal International*, **170**, 1328-1335.
- Maggi, A., Priestley, K., and Jackson, J., 2002, Focal depths of moderate to large earthquakes in Iran: *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **4**, 1-10.
- Masson, F., Chéry, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., and Ghafory-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data: *Geophysical Journal International*, **160**(1), 217-226.
- McQuarrie, N., 2004, Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran: *Journal of Structural Geology*, **26**, 519-535.
- Michael, A. J., 1984, Determination of stress from slip data: faults and folds: *Journal of Geophysical Research*, **89**(B13), 11517-11526.
- NEIC, New Earthquake Hazards Program (n.d.), Retrieved from <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>.
- Pirouz, M., Avouac, J. P., Gualandi, A., Hassanzadeh, J., and Sternai, P., 2017, Flexural bending of the Zagros foreland basin: *Geophysical Journal International*, **210**(3), 1659-1680, doi: 10.1093/gji/ggx252.
- Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni, S. A., and Tiampo, K., 2016, Quantitative analysis of seismicity in Iran: *Pure and Applied Geophysics*, **174**(3), 793-833, doi: 10.1007/s00024-016-1435-4.
- Ravaut, P., Carbon, D., Ritz, J. F., Bayer, R., and Philip, H., 1998, The Sohar Basin, Western Gulf of Oman: description and mechanisms of formation from seismic and gravity data: *Marine and Petroleum Geology*, **15**, 359-377.
- Regard, V., Hatzfeld, D., Molinaro, M., Aubourg, C., Bayer, R., Bellier, O., . . . , and Abbassi, M., 2010, The transition between Makran subduction and the Zagros collision: Recent advances in its structure and active deformation: *Geological Society, London, Special Publications*, **330**(1), 43-64. doi:10.1144/sp330.4.
- Reza, M.; Abbasi, M.R.; Javan Doloei, Gh. and Sadidkhoy, A., 2014, Identifying fault of Mohammad Abad Rigan 20/12/2010 Earthquake and its focal mechanism using aftershock analyses. *Iranian Journal of Geophysics*, **8** (1), 59-70.
- Shyu, J. B. 2005, Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, **110**(B8).
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran: *Geophysical Journal International*, **156**, 506-526.

- Tatar, M., Hatzfeld, D., and Ghafoory-Ashtiany, M., 2004, Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity: *Geophysical Journal International*, **156**, 255–266.
- USGS, Search Earthquake Catalog (n.d.), Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chéry, J., 2004, Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman: *Geophysical Journal International*, **157**, 381–398.
- Van de Lagemaat, S. H., Van Hinsbergen, D. J., Boschman, L. M., Kamp, P. J., and Spakman, W. 2018, Southwest Pacific absolute plate kinematic reconstruction reveals major Cenozoic Tonga-kermadec slab dragging. *Tectonics*, 37(8), 2647–2674.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting: *Journal of Geology*, **59**, 118–130.
- Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., and Nilforoushan, F., 2006, Difference in the GPS deformation pattern of north and central Zagros (Iran): *Geophysical Journal International*, **167**, 1077–88.
- White, R. S., and Ross, D. A., 1979, Tectonics of the Western Gulf of Oman: *Journal of Geophysical Research*, **84**, 3479–3489.
- Yaminifard, F., Sedghi, M. H., Gholamzadeh, A., Tatar, M., & Hessami, K. (2012). Active faulting of the southeastern-most Zagros (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure. *Journal of Geodynamics*, 55, 56–65.
- Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Farahbod, A. M., and Mokhtari, M., 2007, The diffuse transition between the Zagros continental collision and the Makran oceanic subduction (Iran): microearthquake seismicity and crustal structure: *Geophysical Journal International*, **170**, 182–194.
- Zarifi, Z., 2006, Unusual subduction zones: case studies in Colombia and Iran: Ph.D. thesis, University of Bergen.
- Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., & Raeesi, M. 2013, Crustal Stress Map of Iran: Insight From Seismic and Geodetic Computations. *Pure and Applied Geophysics*, **171(7)**, 1219–1236.
- ZUR_RMT, ETH Zürich-Homepage (n.d.), Retrieved from <http://seismo.ethz.ch>.

Stress field variations in the Zagros-Makran transition zone by using earthquake focal mechanism stress tensor inversion

Shahrokh Pourbeyranvand^{1*}

¹ Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran, Iran

(Received: 29 February 2020, Accepted: 18 July 2020)

Summary

Knowing about stress variations in the Zagros and Makran transition zone in the southwest of Iran is necessary to study the deformation resulting from the oblique collision between the Eurasian and the Arabian plates and gain insight into the complicated tectonics of this crucial region. The stress tensor inversion of earthquake focal mechanisms is one of the methods used to study tectonic stresses. In this study, the direction of maximum horizontal stress in the transition zone between the Zagros and Makran was obtained using this method. The results indicate significant changes in the principal axes of stress in this region and show the stress field's complicated pattern. The rotation in the right of the Oman Line takes place in a clockwise manner from west to east around this imaginary line. Still, on the other side, especially where Qeshm Island is located, the opposing direction of the maximum horizontal stress directions indicates the stress field's complexity. The axis of maximum horizontal stress in this region is compared with the single earthquake focal mechanism's P axis. Since almost all earthquake faulting mechanisms are of reverse and strike-slip type, the comparison shows a good agreement between the resulting directions. The maximum horizontal stress directions are also investigated concerning the trend of the active faults consistent with the fault mechanism in the studied areas. Focal mechanism data were used to obtain information on the state of stress in 5 subdivisions of the data, including teleseismic and local events in the Zagros region. The investigation shows acceptable agreement between the observed faulting mechanisms and what can be predicted based on the fault plane orientations and stress directions in the area. These alignments also correlate with the data from other geophysical methods that exhibit a similar rotation around the Strait of Hormuz. The plate motion velocity vectors were estimated using the NOVEL-1A model. On the right side of the Oman Line in the SE Zagros, the stress and plate motion directions are similar, while in the western part of the Zagros, they differ by about 35 degrees. This angular difference between the stress and plate motion velocity vectors is obverse between the Qeshm Island and the area in the Strait of Hormuz's left-hand side in the Zagros. The oceanic and continental crust differences in the area may be responsible for the variation of these directions in the region. By providing a new perspective, this study can help in understanding the tectonic structure and processes in this complex region.

Keywords: Focal mechanism, inversion, Makran, stress, tectonic, transition zone, Zagros

*Corresponding author:

beyranvand@iiees.ac.ir