

محاسبه تانسور تنش براساس وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها و کاربرد آن در منطقه مکران

شاهرخ پوربیرانوند^۱ و ظاهر حسین شمالی^{۱*}

^۱ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

چکیده

اطلاع از چگونگی تغییرات تنش در پوسته برای درک وضعیت ژئودینامیک و تحقیق زمین‌ساختی منطقه مورد بررسی لازم است. در این نوشتار ضمن بیان مبانی نظری وارون‌سازی تانسور تنش با استفاده از سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها، به معرفی دو رویکرد خطی و غیرخطی در این موضوع پرداخته شده و دو روش برگزیده از هریک از این رویکردها به‌طور خلاصه توضیح داده شده‌اند. سپس هر دو روش روی یک مجموعه داده شناخته شده که مربوط به دره دیکسی در ایالت کالیفرنیا ایالات متحد آمریکا می‌شود، در حکم داده مصنوعی آزمایش شده و نقاط قوت و ضعف روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با توجه به اهمیت منطقه مکران در جنوب ایران و پاکستان و نقش اساسی بررسی تنش در ارزیابی وضعیت زمین‌ساختی این منطقه، از داده‌های مربوط به منطقه مکران در حکم داده واقعی برای پیاده‌سازی روش استفاده شد. در انتها براساس وارون‌سازی تنش با استفاده از سازوکارهای کانونی موجود در منطقه، راستای تنش در مکران غربی برابر با $4 \pm 17/6$ درجه، در مکران مرکزی $3 \pm 38/2$ درجه و در قسمت شرقی مکران $4 \pm 157/0$ درجه به‌دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تانسور تنش، دره دیکسی، سازوکار کانونی زمین‌لرزه، مکران، وارون‌سازی خطی و غیرخطی

Determination of stress tensor based on Inversion of earthquake focal mechanisms and implementation in Makran region

Shahrokh Poubeyranvand¹ and Zaher Hossein Shomali^{1*}

¹ Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 23 July 2011, accepted: 6 March 2012)

Summary

In this study after considering the importance of the stress field and its applications in different branches of earth sciences, the focal mechanism stress inversion techniques were reviewed in a short way. Although the problem in hand was highly nonlinear, according

*Corresponding author:

shomali@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

to the benefits of the linear approaches some authors have tried to linearize the problem by making some extra assumptions in addition to the assumptions that all stress inversion methods share i.e. homogeneity of the stress tensor in the area or assuming the slip direction to be in the direction of maximum shear traction. Therefore two different approaches, linear and nonlinear methods were investigated in this study.

Then two major methods from each division namely Michael (1984) from linear approaches and Lund and Slunga (1999) from the nonlinear ones, were selected and the main aspects of each method were shortly described without entering into details. After that each method was applied to a dataset from a previously studied and widely known area in California, United States of America, to ensure the validity of the results. The results from both methods showed good agreements with the expected results based on the successful studies in the area about the stress field performed by Angelier (1979).

Some of the differences observed in the results from different methods are due to the way they make choice between the nodal planes. In Michael (1984) method this choice is being made during the bootstrap randomly, thus there is a similar chance for each nodal plane to be selected as a fault plane. This increases the ability of the method to deal with the noisy data. On the other hand Lund and Slunga (1999) method has the ability to select the fault plane based on two different methods which are slip angle and instability. The experience of using these methods shows that the Michael (1984) method generally gives an average orientation of the maximum horizontal stress that approximately occurs between the two methods introduced by Lund and Slunga (1999).

Finally the methods were applied on a dataset from Makran region which is placed both in Iran and Pakistan. The result of the stress inversion of all available data from Makran was an average of the SHmax (maximum horizontal stress) directions in the area and therefore the dataset was divided into three different parts: western, central and eastern. The result showed an interesting variation in the maximum horizontal stress directions. Different methods used in this study showed a good agreement again and this led to the higher reliability of the stress directions in Makran.

These directions showed a variation which was acceptable according to the tectonic state of the region and also the previous studies in the region. In the western part of Makran, the maximum horizontal stress orientation was 17.6 ± 4 , parallel to Zagros, and showed the effect of the continent-continent collision between Arabia and Eurasia plates. In Central Makran, this direction showed a clockwise rotation and became 38.2 ± 3 . In the eastern part which is under the influence of the continent-continent collision between Indian and Eurasian plates, the direction was 157.0 ± 4 . Paying attention to these variations in stress states can be helpful to study the area especially in the western part of the Makran subduction zone which is associated with lack of seismicity. The observed correlation of the variation in crustal stress and the seismicity agrees with the recent studies reporting a similar correlation between the seismicity and the upper mantle velocity variations obtained from surface wave tomography. It confirms the changing nature of the subducting slab stretched from west to east in Makran subduction Zone

Key words: Dixie valley, earthquake focal mechanism, linear and nonlinear inversion, Makran, stress tensor

۱ مقدمه

گسل‌های زیادی در منطقه وجود داشته باشد، همه گسل‌های پیش گفته مشترکاً در میدان تنش به دست آمده سهم خواهند داشت.

اصول اولیه لغزش روی یک گسل با جهت‌گیری دلخواه در یک میدان تنش را والاس (۱۹۵۱) و بات (۱۹۵۹) فرمول‌نویسی کردند. بات (۱۹۵۹) همچنین پیشنهاد داد که لغزش روی هر صفحه گسل در امتداد تنش برشی به دست آمده بیشینه اتفاق می‌افتد (معیار بات) و روشن ساخت که جهت تنش برشی به جهت صفحه گسل در میدان تنش و بزرگای نسبی تنش متوسط، R ، بستگی دارد ولی به بزرگای واقعی تنش‌های اصلی وابسته نیست.

کمیت مورد اشاره R یک اندازه‌گیری از بزرگای نسبی تنش‌های اصلی است که به شکل زیر تعریف شده است. (آنجلیر، ۱۹۷۹)

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (1)$$

که σ_1 و σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی به ترتیب دارای بیشترین فشردگی تا بیشترین کشیدگی هستند و رابطه $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$ بین آنها برقرار است.

بات (۱۹۵۹) پیشنهاد داد که معادلات او می‌تواند برای تعیین راستاهای تنش و R مورد استفاده قرار گیرد. ولی پس از کری و برونیر (۱۹۷۴) از معیار بات برای وارون‌سازی تنش استفاده شد. آنها این فرض را اضافه کردند که حرکت نشان داده شده مربوط به همه شیاریا یا خش‌لغزهای ناشی از لغزش صفحات گسلی بر یکدیگر با یک تانسور مشترک منفرد ایجاد شده است. تحلیل آنها را تعدادی از مولفان (آنجلیر، ۱۹۷۹؛ اتچکوپار و همکاران، ۱۹۸۱؛ آرمیجو و همکاران، ۱۹۸۲؛ آنجلیر، ۱۹۸۴؛ مایکل، ۱۹۸۴؛ رچس، ۱۹۸۷؛ آنجلیر، ۱۹۹۰) توسعه و بسط دادند.

اطلاع از میدان تنش و چگونگی تغییرات آن علاوه بر اهمیت اساسی در تشریح ژئودینامیک منطقه مورد بررسی، نقش مهمی در شاخه‌های متفاوتی از علوم زمین مانند ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی دارد. همچنین بررسی تنش که تجمع آن عامل اصلی رخداد زمین‌لرزه است در تحقیقات پیش‌نشانگری و پیش‌بینی زمین‌لرزه دارای اهمیت خاص است. روش‌های متداول برای تعیین کمی تنش شامل روش‌های غیر مستقیم مانند روش شکست گمانه (borehole breakout)، روش حل صفحه گسل و روش تابش صوتی و نیز روش‌های مستقیم شامل روش جک تخت (flat jack)، روش پیش‌مغزه‌گیری (overcoring) و روش شکست هیدرولیکی است.

سازوکارهای کانونی منابع ارزشمندی از اطلاعات در مورد جهت‌ها و بزرگای نسبی تنش در پوسته هستند. در واقع بیش از نیمی از اطلاعات مورد استفاده در برآورد تانسور تنش برای تهیه نقشه جهانی تنش، از سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها به دست آمده‌اند. در ادامه توضیحاتی در مورد چگونگی استخراج اطلاعات تنش از سازوکارهای کانونی عرضه خواهد شد.

تانسور تنش پوسته‌ای را نمی‌توان با استفاده از سازوکار کانونی یک زمین‌لرزه با اطمینان به دست آورد (مکتزی، ۱۹۶۹)، چرا که ممکن است سازوکار کانونی زمین‌لرزه مورد نظر دارای خطای بزرگی است یا اساساً از نظر راستای نیروهای وارده با راستای منطقه‌ای تنشها تفاوت داشته باشد. بلکه یک فرآیند وارون‌سازی مورد نیاز است که به ما اجازه دهد تانسور تنش را از تعداد زیادی زمین‌لرزه به دست آوریم. سازوکارهای کانونی مورد استفاده بایستی متعلق به زمین‌لرزه‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه باشند. گستره داده‌های مورد استفاده بیانگر وسعت محدوده‌ای است که تانسور تنش در آن یکسان و یکنواخت فرض می‌شود و چنانچه تعداد

معرفی دو روش خطی و غیرخطی مورد استفاده در این تحقیق، با پیاده‌سازی آنها در مورد یک مجموعه داده، سعی در پیدا کردن نقاط قوت و ضعف آنها خواهد شد. در این تحقیق با استفاده از وارون‌سازی سازوکارهای کانونی موجود در منطقه مکران به بررسی راستاهای تنش افقی بیشینه در گستره مورد نظر پرداخته می‌شود و تغییرات مکانی آن در بخش‌های مرکزی، شرقی و غربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که میدان تنش در قسمت غربی تحت تاثیر زون برخوردی زاگرس است درحالی‌که با پیشروی به سمت شرق، پس از مشاهده چرخش راستای تنش افقی بیشینه در جهت عقربه‌های ساعت، شاهد تاثیرگذاری بیشتر برخورد صفحات هند و اوراسیا بر این و چرخش شدید راستای مورد بحث در جهت عقربه‌های ساعت هستیم. نتایج این تحقیق با اطلاعات موجود مقایسه شده است و به دلیل همخوانی با تحقیقاتی که در خصوص تنش در منطقه صورت گرفته است، اطمینان به نتایج افزایش می‌یابد.

۲ روش وارون‌سازی خطی مایکل (۱۹۸۴)

جهت شیب θ ، شیب δ و ریک λ با استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها یا با اندازه‌گیری‌های صحرائی روی گسل تعیین می‌شوند. این مقادیر، \hat{n} بردار نرمال به طرف بیرون از بلوک کمر پایین، و \hat{s} جهت لغزش بلوک کمر بالا نسبت به بلوک کمر پایین را به دست می‌دهند. هدف پیدا کردن تانسور تنش یکنواخت منفردی است که با بیشترین احتمال باعث رویدادهای گسلش شده است. تنها با داشتن مولفه‌های لغزش برای بازسازی تانسور تنش نمی‌توان مولفه همسانگردیای یکرند (ایزوتروپیک) $(\sigma_{zz}, \sigma_{xx}, \sigma_{yy})$ را تعیین کرد. مگر اینکه پیش فرض‌هایی در مورد شرایط شکستگی در نظر گرفته شود. لذا وارون‌سازی فقط برای تانسور تنش انحرافی (deviatoric) خواهد بود (مایکل، ۱۹۸۴).

وارون‌سازی اندازه‌گیری‌های صفحه گسل بدون محدودیت‌های دیگر غیر از همگن بودن تنش و معیار بات فرایندی به شدت غیرخطی است. مقالات مورد اشاره در بالا، گستره متفاوتی از روش‌های عددی را برای وارون‌سازی تنش مورد استفاده قرار داده‌اند. برخی فرضیاتی را برای خطی کردن مسئله در روش خود اضافه می‌کنند. اگرچه وارون‌سازی‌های غیرخطی هم قابل استفاده هستند و انتظار می‌رود که جواب واقعی‌تری بدهند، اما وارون‌سازی‌های خطی از نظر محاسباتی موثرتر عمل می‌کنند، به حدس اولیه نیازی ندارند و با سهولت بیشتری حدود اطمینان (confidence limits) را به دست می‌دهند.

تعمیم این طرح‌های وارون‌سازی از اندازه‌گیری‌های زمین‌شناسی لغزش گسل به سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها کار تقریباً ساده‌ای است ولی در اینجا مسئله دو صفحه گرهی (nodal planes) پیش می‌آید. همان‌طور که می‌دانیم دو صفحه گرهی غیر قابل تمایز برای هر سازوکار کانونی وجود دارد. استفاده از سازوکارهای کانونی در وارون‌سازی تنش ما را مجبور می‌کند که یا یکی از دو صفحه گرهی را انتخاب کنیم یا هر دو را مورد استفاده قرار دهیم. رویکرد معمول در ارتباط با مسئله صفحه گرهی، انتخاب آن است که به بهترین وجه با شواهد زمین‌شناسی سطحی که نشان‌دهنده جهت‌گیری‌های گسل هستند انطباق داشته باشد. اما برون‌یابی جهت‌گیری‌های سطحی گسل همواره ممکن نیست، یعنی همیشه امکان حدس زدن صفحه گسلی از شواهد سطحی زمین‌شناسی وجود ندارد؛ چرا که یک منطقه ممکن است ساختارهای گسلش سطحی پیچیده‌ای داشته باشد که استفاده از آنها برای تعیین صفحات گسلی کار مشکلی است. روش لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) دو ابزار در مورد انتخاب صفحه گسلی به دست داده است که در ادامه به این مبحث پرداخته خواهد شد. در اینجا ضمن

مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای هریک از سازوکارهای کانونی موردنظر صفحه گسلی از میان دو صفحه گرهی با در نظر گرفتن پایداری کمتر بر مبنای شرایط موهر کولمب انتخاب و عدم قطعیت برای صفحه گسلی محاسبه می‌شود. سپس سازوکار کانونی‌ای که به بهترین وجه با تانسور تنش مورد آزمایش مطابقت داشته باشد برای هر رویداد انتخاب می‌شود و عدم انطباق برای همه رویدادها بر یم منطبق بودن نهایی برای تانسور تنش مورد آزمایش اضافه می‌شود. وقتی تمام شبکه جست‌وجو شد، حدود اطمینان تانسور تنش با بهترین میزان تطابق با استفاده از منطبق نبودن نرم L1 محاسبه می‌شود (پارکر و مکت نات، ۱۹۸۰). در نهایت جهت‌های بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تنش‌های افقی فشارشی از تانسور تنش بهینه محاسبه می‌شوند (لوند و تاوند، ۲۰۰۷). انتخاب صفحه گسلی از ویژگی‌های این روش است که در ادامه به این موضوع پرداخته خواهد شد.

۳-۱ انتخاب صفحه گسلی

انتخاب صفحه گسلی صحیح از میان دو صفحه گرهی در حل صفحه گسل یکی از مسائل اصلی وارون‌سازی تانسور تنش سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها است. اهمیت شرایط تعیین صفحه گسلی فقط در اینکه طبق تعریف تصمیم می‌گیرند که زمین‌لرزه روی کدام گسل اتفاق افتاده و از این راه، توصیفی زمین‌شناسانه از ناحیه مورد بررسی فراهم می‌کنند نیست، بلکه تانسور تنش به‌دست آمده هم به صفحه گسلی انتخاب شده بستگی دارد. انتخاب صفحات گسلی اشتباه، قطعاً تانسور تنش نادرست را نتیجه خواهد داد، اگرچه حالت‌های تنش مشابه می‌تواند گاهی، حتی وقتی که الگوریتم‌ها صفحات گسلی متفاوتی را انتخاب می‌کنند، به‌دست آیند (مایکل، ۱۹۸۴). به‌علاوه اگر کسی در پی به‌دست آوردن اطلاعات در مورد سازوکارهای گسلش و قدرت گسل‌ها باشد، انتخاب صفحه گسلی

همچنین تعیین بزرگ‌های واقعی مولفه‌های تانسور تنش ممکن نیست و فقط بزرگ‌های نسبی را می‌توان به‌دست آورد. برای پیدا کردن بهترین تانسور تنش انحرافی، فقط جهت لغزش با توجه به جهت‌گیری گسل، مورد بررسی قرار می‌گیرد. باید توجه کرد که جهت‌گیری گسل به خودی خود هیچ‌گونه اطلاعاتی که برای بررسی لغزش گسلی مفید باشد در بر ندارد. چرا که گسل ممکن است پیش از لغزش ثبت شده شکل گرفته باشد. به مجرد آنکه تانسور تنش کاهش یافته (reduced) که شامل راستاهای محورهای تنش اصلی و بزرگای نسبی این تنش‌ها است، معلوم شود مقادیر R و محدوده‌های خطا را هم می‌توان محاسبه کرد.

در این روش با فرض مشابه بودن کشش مماسی بر همه صفحات گسلی اقدام به خطی کردن مسئله می‌شود و مسئله وارون در نهایت با استفاده از روش‌های استاندارد کمترین مربعات حل می‌شود. روش وارون‌سازی ارائه شده از نظر مطابقت با نتایج به‌دست آمده در وارون‌سازی تایید شده قبلی (آنجلیر، ۱۹۷۹) موفق عمل کرده است. این مطلب بیان‌کننده این است که فرض جدیدی که در این روش به کار گرفته شده؛ یعنی مشابه بودن کشش مماسی بر همه صفحات گسلی، درست است یا حداقل به اندازه فرضیات قبلی (مثل میدان تنش یکنواخت) معتبر است.

۳ روش وارون‌سازی غیرخطی لوند و اسلونگا (۱۹۹۹)

در این وارون‌سازی زاویه بین جهت‌های تنش برشی محاسبه شده و لغزش مشاهده شده در صفحه گسل کمینه می‌شود. الگوریتم یک جست‌وجوی شبکه‌ای (grid search) براساس جهت‌های تنش اصلی و مقادیر R را عملی می‌سازد. عدم قطعیت در برآورد سازوکارهای کانونی از راه در نظر گرفتن بخش معینی از سازوکارهای کانونی قابل قبول لحاظ می‌شود. لذا برای هر تانسور تنش، مجموعه‌ای از سازوکارهای کانونی برای همه رویدادها

جهت محاسبه شده از نظری تنش برشی بیشینه و لغزش مشاهده شده کوچکترین باشد، درحکم صفحه گسلی انتخاب می‌کند. گفارت و فورسیت (۱۹۸۴) خاطر نشان ساختند که روش زاویه لغزش، توضیحی فیزیکی برای انتخاب صفحه گسل فراهم نمی‌آورد. مگی (۱۹۹۷) پیامدهایی که انتخاب صفحه گسلی برای تانسور تنش به دست آمده دارد را به تفضیل مورد بحث قرار دارد و روشن ساخت که SA غالباً صفحه گسلی اشتباه را انتخاب می‌کند و نتیجه را به تانسور تنشی میانگین آغشته می‌کند. مگی (۱۹۹۷) همچنین روشن ساخت که SA تمایل دارد صفحات گسلی با نسبت تنش برشی به تنش نرمال پایین را انتخاب کند. اگرچه با توجه به طبیعت الگوریتم، SA قطعاً نتایج وارون‌سازی با مقادیر عدم انطباق خیلی کم می‌دهد.

۳-۱-۲ روش ناپایداری (Instability)

بنا نهادن نحوه انتخاب صفحه گرهی به اینکه کدام صفحه در میدان تنش جاری ناپایدارتر است از دید فیزیکی، نسبت به SA که پیش‌تر در مورد آن بحث شد روش پُر جاذبه‌تری است. این روش ناپایداری نام دارد و از آن با نماد IS یاد می‌شود. اگرچه نه همیشه، اما به‌طور کلی باید انتظار داشته باشیم که ناپایدارترین صفحه، صفحه‌ای باشد که لغزش می‌کند. مایکل (۱۹۸۴)، رچس (۱۹۸۷) و آنجلیر (۱۹۹۰) همگی قیود متفاوتی را روی بزرگای تنش برشی در الگوریتم‌های وارون‌سازی خود، در به دست آوردن راه حلی واقع‌گرایانه از نظر فیزیکی و خطی کردن مسئله وارون‌سازی مدنظر قرار دادند. این قیدها، به‌هر حال بر خود شرایط عدم انطباق اعمال شده‌اند، نه بر انتخاب صفحه گرهی.

فقط اینکه کدام یک از دو صفحه گرهی بالاترین مقدار ناپایداری را دارد برای ما جالب توجه نیست بلکه با توجه به نمودار تنش دایره مور (Mohr circle) (جایگر و کوک، ۱۹۷۹) ما می‌خواهیم نزدیک‌ترین صفحه به پوش

اشتباه برای تعداد زیادی از رویدادها نتایج را به هم خواهد ریخت.

مولفان گوناگون رویکردهای متفاوتی در مورد انتخاب صفحه گسل صحیح اتخاذ کرده‌اند. یک روش معمول استفاده از قیود زمین‌شناسی سطح‌الارضی است (آنجلیر، ۱۹۸۴). این کار خصوصاً برای زمین‌لرزه‌های بزرگ که سطح را دچار گسیختگی می‌کنند یا نواحی وسیعی از گسیختگی زیرسطحی را دارند، ارزشمند است. زمین‌شناسی سطح‌الارضی همچنین علایمی از جهت‌های ازپیش‌تعیین شده گسلش در یک ناحیه به دست می‌دهد ولی باید با احتیاط برای تک‌زمین‌لرزه‌ها یا زمین‌لرزه‌های کوچک مورد استفاده قرار گیرد. روش متداول دیگر این است که اجازه بدهیم الگوریتم وارون‌سازی صفحات گسلی را انتخاب کند. در این جا دو رویکرد متفاوت در مورد اجازه دادن به الگوریتم وارون‌سازی برای انتخاب صفحه گسلی با یکدیگر مقایسه می‌شود. همچنین رویکرد سومی را نیز می‌تواند مورد بررسی قرار داد که در آن یک صفحه گسلی برای یک خوشه از ریززمین‌لرزه‌ها با استفاده از تعیین مکان مطلق و نسبی رویدادهای مشابه به دست می‌آید (اسلونگا و همکاران، ۱۹۹۵). این صفحه گسلی سپس در وارون‌سازی درحکم صفحه صحیح برای همه رویدادهای خوشه در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱-۱ روش زاویه لغزش (Slip Angle)

انتخاب صفحه گرهی که کوچک‌ترین عدم تطابق (misfit) در میدان تنش مورد آزمون را دارد متداول‌ترین روش در روش‌های وارون‌سازی تانسور تنش است که به الگوریتم اجازه انتخاب صفحه گسلی را می‌دهد. مولفان بسیاری (آنجلیر، ۱۹۷۹؛ گفارت و فورسیت، ۱۹۸۴) از این روش استفاده کرده‌اند و در این نوشتار از آن درحکم روش زاویه لغزش (SA) یاد خواهد شد. در این روش الگوریتم وارون‌سازی آن صفحه گرهی را که زاویه بین

که در مقاله مایکل (۱۹۸۴) اشاره شده است به دلیل وجود اطمینان به نتایج به‌دست آمده از سوی آنجلیبر (۱۹۷۹) و بهره‌گیری از موفقیت او در پیاده‌سازی روش وارون‌سازی تنش در این ناحیه است.

داده‌های استفاده شده در مکران شامل داده‌های موجود در سایت Global CMT Project از ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۱ و داده‌های استخراج شده از مقالات کوییتیمیر و کافکا (۱۹۸۴) و بیرنه، سایکس و دیویس (۱۹۹۲) است که به روش‌های قطبیدگی و مدل‌سازی شکل موج به‌دست آمده‌اند.

۵ نتایج آزمایش روی داده مصنوعی

با اعمال روش وارون‌سازی غیرخطی مایکل بر داده‌های موردبحث که در شکل ۱-الف امتداد و شیب آنها به‌علاوه نقاط قطب برای این صفحات نشان داده شده است، تانسور تنش پوسته‌ای در منطقه به صورت نشان داده شده در شکل ۱-ب به دست می‌آید. در روش مایکل برای به‌دست آوردن حدود اطمینان از روش بوت استرپ (bootstrap) استفاده می‌شود که طی آن مجموعه داده به دفعات و به‌طور تصادفی به زیرمجموعه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود و فرایند وارون‌سازی روی آنها صورت می‌پذیرد. تانسورهای تنشی که هر بار به‌دست آمده‌اند برای تعیین حدود اطمینان به کار گرفته می‌شوند و محورهای تنش بهینه برای هر یک از آنها به‌دست می‌آید. درنهایت با رسم این محورها بر استریونت تصویری که بیانگر حدود اطمینان موردنظر برای هر یک از محورهای تنش است به‌دست می‌آید. این شکل همچنین بیانگر موقعیت محورهای اصلی تانسور تنشی است که در خلال وارون‌سازی بهترین انطباق را با داده‌های موجود ظاهر ساخته است.

با اعمال روش لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) بر داده‌های موردبحث، شکل‌های ۱-ج و ۱-د به‌دست می‌آید. شکل

(envelope) شکست را پیدا کنیم. گفارت و فورسیت (۱۹۸۴) روش‌ن ساخت که اندازه نسبی تنش‌های اصلی، که چنانکه پیش‌تر تعریف شد، نسبت R نام دارد، برای ساختن نمودار دایره مور سه‌بُعدی بدون مقیاس از حالت تنش کافی است. موقعیت یک جفت از صفحات گرهی در نمودار مور فقط به جهت‌گیری آنها نسبت به محورهای تنش اصلی بستگی دارد. لذا چهار مولفه تانسور به‌دست آمده در وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها برای ساختن یک نمودار مور با ترسیم صفحات گرهی و سپس تصمیم‌گیری بدون ابهام در مورد اینکه کدام صفحه گرهی برای همه مقادیر ضریب اصطکاک، دارای بیشترین ناپایداری است، کافی است.

۴ داده مصنوعی

به‌طور کلی سازوکارهای کانونی باید نسبت به صفحه‌های گرهی به‌خوبی توزیع شده باشند. تعداد زیادی زمین‌لرزه روی گسل‌هایی با جهت‌گیری و جهت لغزش مشابه، نقشی بیش از یک یا دو رویداد با آن جهت‌گیری در تعیین تانسور تنش ایفا نخواهند کرد. این بدان معنی است که تعداد زیادی رویداد روی گسل‌هایی دارای جهت‌گیری مشابه و لغزش‌های تا حد قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت، نشان‌دهنده تنش غیریکنواخت یا داده نامناسب است (لوند، ۲۰۰۰). با توجه به این مسئله سعی شده است داده مناسبی برای آزمایش روش‌ها انتخاب شود.

داده‌های مورد استفاده به‌منزله داده مصنوعی مجموعه داده‌های مورد استفاده آنجلیبر (۱۹۷۹) هستند و مربوط به دره دیکسی (Dixie valley) در ایالت کالیفرنیا در ایالات متحده آمریکا می‌شوند. به دلیل شناخته شده بودن این منطقه از نظر زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و زلزله‌شناسی معمولاً روش‌های جدیدی که در این زمینه وارون‌سازی تانسور تنش ابداع شده‌اند روی داده‌های مربوط به این منطقه آزمایش شده‌اند. از طرفی انتخاب این داده‌ها همان‌طور

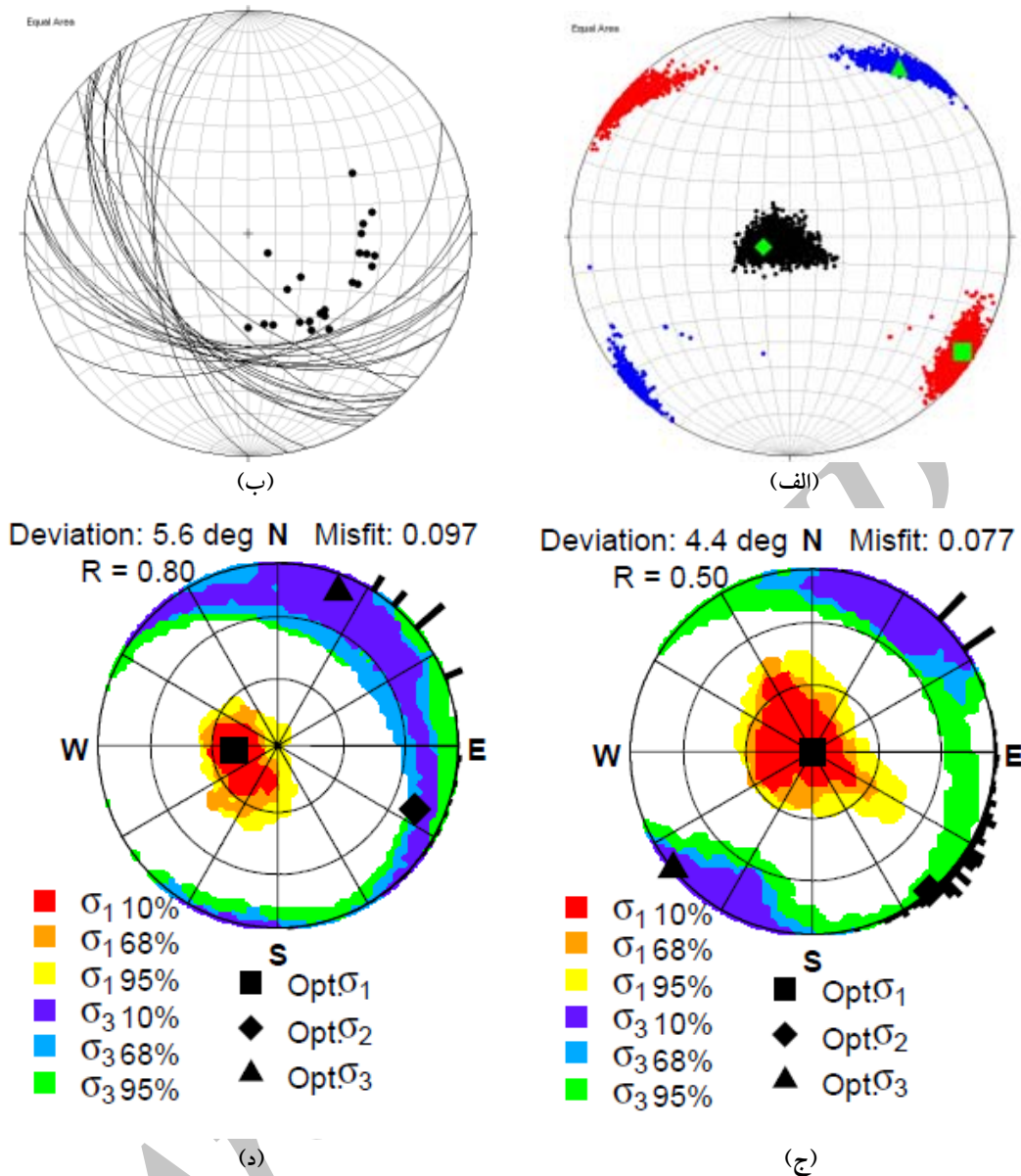
کوچک است. اما حدود اطمینان در نتایج وارون‌سازی در مورد روش لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) برای σ_3 بزرگ هستند. به عبارتی به علت نزدیک بودن بزرگای تنش‌های افقی σ_2 و σ_3 به یکدیگر، این محورها به خوبی با وارون‌سازی تنش قابل تعیین نیستند. این مشکل در استفاده از روش مایکل (۱۹۸۴) نیز در برخی مناطق قابل مشاهده است. به این معنی که پس از ترسیم حدود اطمینان با کمک برنامه، ملاحظه می‌شود که محورهای تنش بعضاً جای مشخصی روی استریونت ندارند و با یک نوار پهن روی آن مشخص می‌شوند (مایکل، ۱۹۸۴). این مسئله به علت نزدیک بودن مقادیر بزرگای تنش‌های افقی و توانا نبودن روش در تفکیک این دو از یکدیگر است. وجود این مشکل را می‌توان بیانگر وجود نوفه در داده‌ها و توانا نبودن نسبی روش غیرخطی مورد بحث در تعیین مناسب حدود اطمینان و همچنین منطبق نبودن شرایط پیش فرض‌ها با واقعیات زمین‌شناسی در منطقه دانست. در این مورد هم مشاهده می‌شود که روش خطی مایکل (۱۹۸۴) با استفاده از رویکرد آماری خود توانسته است به خوبی محورهای اصلی تنش افقی را با حدود اطمینان کوچک تعیین کند. اگرچه تفاوت‌هایی در نحوه به دست آوردن حدود اطمینان در روش‌های فوق مشاهده می‌شود اما نکته حائز اهمیت مطابقت بسیار خوب نتایج به دست آمده در مورد محورهای اصلی تنش است که این مطابقت اطمینان به نتایج حاصل از تحقیق حاضر را افزایش می‌دهد. نتایج وارون‌سازی با روش‌های مورد بحث شامل جهت‌های محورهای اصلی تنش و بزرگای نسبی در جدول ۱ آورده شده.

۱-ج حاصل استفاده از روش زاویه لغزش و شکل ۱-د نتیجه استفاده از روش ناپایداری است. در این شکل‌ها نتایج وارون‌سازی تنش روی داده‌های لغزش گسلی آنجلیر (۱۹۷۹)، به دو روش پیش گفته نشان داده شده است. توضیح نشانه‌ها و رنگ‌ها در زیرنویس شکل آورده شده است.

به طوری که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، با توجه به طبیعت نحوه نمایش در استریونت و خواص چرخشی آن محورهای تنش اصلی در دو استریونت مطابقت قابل قبولی با یکدیگر دارند. با مقایسه شکل‌های ۱-ج و ۱-د با شکل ۱-ب به نظر می‌رسد که روش مایکل (۱۹۸۴) نتیجه‌ای بینابین در مقایسه با دو روش زاویه لغزش و ناپایداری دارد. این نتیجه‌گیری با توجه به طبیعت آماری روش مایکل که از روش بوت استرپ ناشی می‌شود مورد انتظار است.

از طرفی با توجه به غیرخطی بودن روش در رویکرد لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) حدود اطمینان گستره وسیع‌تری را در بر گرفته‌اند که نشان‌دهنده تغییرات و خطاهای بیشتر در جواب‌ها است. اگرچه به طور کلی انتظار می‌رود که روش‌های غیرخطی در ازای صرف هزینه و زمان بیشتر، به جواب‌های واقعی‌تری دست پیدا کنند، اما ضمناً مشاهده می‌شود که روش مایکل (۱۹۸۴) در هنگام پیاده‌سازی روی این مجموعه داده در خصوص به دست دادن حدود اطمینان موفقیت بیشتری کسب کرده است، چرا که حدود اطمینان به دست آمده کوچک‌تر از حدود اطمینان به دست آمده از روش غیرخطی لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) هستند.

حدود اطمینان در نتیجه به دست آمده برای σ_1 با استفاده از روش ناپایداری برای هر سه روش نسبتاً



شکل ۱. (الف) داده‌های مورد استفاده در منطقه دیکسی که راستا و شیب آنها در استریوت ترسیم شده‌اند. تعداد سازوکارهای لرزه‌ای مورد استفاده ۲۴ عدد است. (ب) تانسور تنش بهینه به دست آمده به علاوه حدود اطمینان حاصل از وارون‌سازی خطی (مایکل، ۱۹۸۴) به دست آمده از روش بوت استراب. در این شکل لوزی نشان‌دهنده σ_1 ، مربع σ_2 و مثلث σ_3 است. حدود اطمینان ۸۰٪ به دست آمده به روش بوت استراب با رنگ‌های مشکی، سرخ و آبی برای هر یک از محورهای تنش یادشده نشان داده شده‌اند. (ج) نتیجه وارون‌سازی غیرخطی تنش (لوند و اسلونگا، ۱۹۹۹) روی داده‌های لغزش گسلی دره دیکسی، به روش زاویه لغزش. (د) نتیجه وارون‌سازی غیرخطی تنش (لوند و اسلونگا، ۱۹۹۹) روی داده‌های لغزش گسلی دره دیکسی، به روش ناپایداری. تانسور تنش بهینه σ_1 به شکل مربع، σ_2 به شکل لوزی، σ_3 به شکل مثلث، به همراه حدود اطمینان ۱۰٪، ۶۵٪ و ۹۵٪ برای σ_1 تیره به روشن از ۱٪ تا ۹۵٪ و σ_3 روشن به تیره از ۱۰٪ تا ۹۵٪ نشان داده شده است. بافت‌نمای (هیستوگرام) سیاه پیرامونی جهت فشردگی افقی بیشینه تانسورها را در محدوده اطمینان ۹۵٪ نشان می‌دهد.

جدول ۱. کمیت‌های اندازه‌گیری شده در وارون‌سازی تنش با استفاده از روش‌های متفاوت در درهٔ دیکسی. عبارات tr و pl بیانگر روند (trend) و میل (plunge) محورهای تنش برحسب درجه هستند.

روش غیرخطی لوند و اسلونگا (۱۹۹۹)		روش خطی مایکل (۱۹۸۴)		
روش ناپایداری	روش زاویه لغزش			
۲۶۳/۱	۰/۰	۲۴۷/۹	tr	σ1
۷۰/۰	۹۰/۰	۷۹/۶	pl	
۲۰۴/۲	۱۳۰/۰	۱۲۳/۷	tr	σ2
۷۱/۸	۰/۰	۵/۸	pl	
۲۰/۶	۲۳۰/۰	۳۲/۹	tr	σ3
۹/۸	۰/۰	۸/۵	pl	
۰/۸	۰/۵	۰/۵		R

یکنواختی به دست می‌آید که از نظر کوچک بودن منطقه اطمینان در شرایط خوبی قرار دارد و جهت تنش بیشینه افقی آن نیز مطابق با زمین‌ساخت منطقه است. اما با تقسیم داده‌ها براساس موقعیت مکانی و وارون‌سازی این زیرمجموعه‌های کوچک‌تر نتایج متفاوتی حاصل می‌شود که تغییرات جالب‌توجهی را در منطقه مکران نمایان می‌سازد. این مسئله با اطلاعات حاصل از تحقیقات پیشین مبنی بر افزایش میزان فرورانش از غرب به شرق (شاد منامن، شمالی و کویی، ۲۰۱۱) که با نتایج بررسی‌های GPS تایید می‌شود (ورنانت و چری، ۲۰۰۶) نیز همخوانی دارد. فهرست زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی آنها برای وارون‌سازی تنش در مناطق غربی، مرکزی و شرقی مکران مورد استفاده قرار گرفته است در جدول‌های ۲-الف، ۲-ب و ۲-ج آورده شده است. با توجه به قدیمی بودن برخی از منابع مورد استفاده، درخصوص برخی زمین‌لرزه‌ها به علت نبود اطلاعات دقیق از ذکر عمق خودداری شده است.

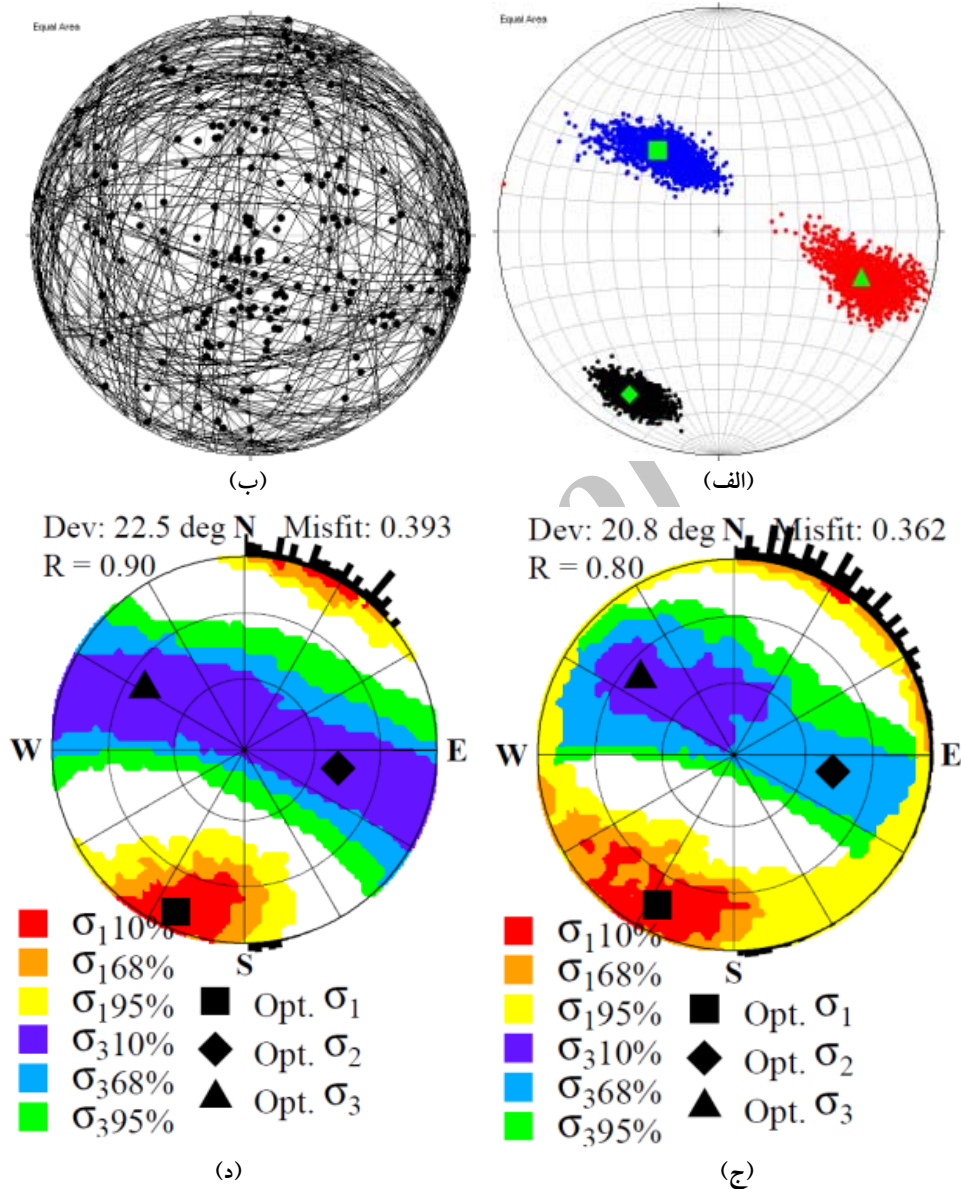
۶ اعمال روش‌ها بر سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های منطقه مکران

منطقه مکران در جنوب ایران و پاکستان با فرورانش پوسته اقیانوسی دریای عمان به زیر صفحهٔ اوراسیا به منزلهٔ یکی از زون‌های فرورانش با مشخصات ویژه در دنیا شناخته شده است. تغییر خصوصیات لرزه‌خیزی در قسمت‌های شرقی و غربی سؤالات زیادی را در مورد زمین‌ساخت منطقه مطرح کرده است (ظریفی، ۲۰۰۶). با وجود کمبود داده‌های زمین‌لرزه در منطقه مکران؛ به دلیل اهمیت خاص این منطقه در این تحقیق سعی شد با بهره‌گیری از پژوهش‌هایی که در گذشته در این منطقه صورت پذیرفته، بررسی‌هایی در مورد تغییرات میدان تنش به عمل آید. سازوکارهای کانونی مورد استفاده در قسمت داده‌ها شرح داده شده‌اند.

با وارون‌سازی داده‌ها برای کل منطقه مکران و با در نظر گرفتن پارامترهای وارون‌سازی مناسب برای دو روش مایکل (۱۹۸۴) و لوند و اسلونگا (۱۹۹۹)، تانسور تنش

می‌کند. همان‌طور که در آزمایش صورت گرفته روی داده مصنوعی ملاحظه شد، روش خطی مایکل (۱۹۸۴) نسبت به روش غیرخطی لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) حدود اطمینان کوچک‌تری به دست می‌دهد.

در شکل‌های ۲-الف تا ۲-د نتایج وارون‌سازی روی داده‌ها به همان ترتیب که در مورد دره دیکسی شرح داده شد آورده شده است و حدود اطمینان و موقعیت محورهای اصلی تنش صحت نتایج و مطابقت آن را با انتظاراتی که از روش‌های مورد بحث می‌رود، تایید



شکل ۲. (الف) داده‌های مورد استفاده در منطقه مکران که راستا و شیب آنها در استریونوت ترسیم شده‌اند. تعداد سازوکارهای لرزه‌ای مورد استفاده ۸۴ عدد است. (ب) تانسور تنش بهینه به دست آمده به علاوه حدود اطمینان به دست آمده از وارون‌سازی خطی (مایکل، ۱۹۸۴) به روش بوت استرپ. (ج) نتیجه وارون‌سازی غیرخطی تنش (لوند و اسلونگا، ۱۹۹۹) روی داده‌های لغزش گسلی مکران، به روش زاویه لغزش. (د) نتیجه وارون‌سازی غیرخطی تنش (لوند و اسلونگا، ۱۹۹۹) روی داده‌های لغزش گسلی مکران، به روش ناپایداری. توضیح مطابق شکل ۱.

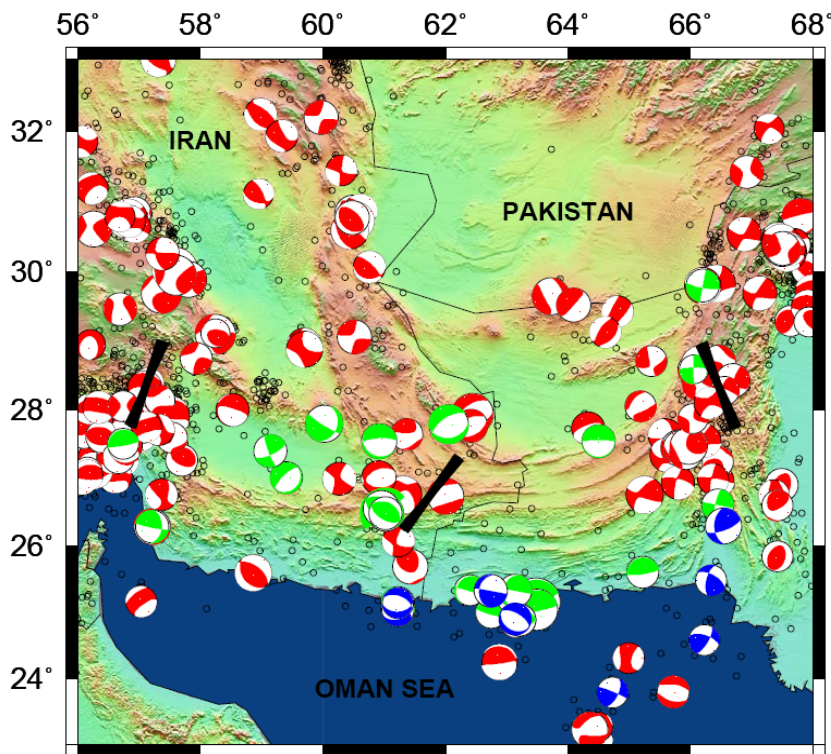
زاگرس که زون برخورد قاره‌ای صفحه‌ی عربی و اوراسیا است، قرار دارد. در مکران مرکزی که منطقه‌ای مشترک بین ایران و پاکستان است وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های موجود نشان می‌دهد که راستای تنش افقی بیشینه با تمایل بیشتر به سمت شرق در جهت حرکت عقربه‌های ساعت برابر با $3 \pm 38/2$ درجه است. این روند در مکران شرقی جایی که محل برخورد صفحات هندوستان و اوراسیا است به روند شمال غربی جنوب شرقی $4 \pm 157/0$ درجه تبدیل می‌شود. راستاهای تنش به‌دست آمده در قسمت‌های گوناگون مکران با تحقیقات پیشین صورت گرفته، همخوانی دارد (ظریفی، ۲۰۰۶). مقایسه‌ی جهت‌های تنش بیشینه افقی به‌دست آمده در این تحقیق می‌تواند به درک وضعیت زمین‌ساختی در منطقه فرورانش مکران در بخش غربی که منجر به کم شدن فعالیت لرزه‌ای در این قسمت شده است. کمک کند.

نتایج این تحقیق همچنین با نتایج پژوهش‌های اخیر در مورد سرعت موج برشی و ضخامت پوسته در منطقه مکران از طریق بررسی امواج سطحی مطابقت دارد و تغییرات مشاهده شده در صفحه فرورونده در امتداد زون فرورانش مکران را که با کمبود فعالیت لرزه‌ای در قسمت غربی نسبت به قسمت شرقی توأم شده است، تایید می‌کند (شاد منامن، شمالی و گویی، ۲۰۱۱). با توجه به اطمینان زیاد پدید آمده از مطابقت کامل دو روش یادشده، بررسی‌های بیشتر و مقایسه نتایج با نتایج به‌دست آمده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی حائز اهمیت بسیار است. استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی در صورت امکان می‌تواند در کنار مشاهدات مربوط به تغییرات راستای تنش، کمک مهمی در جهت پاسخگویی به مجهولات موجود و در نتیجه تعبیر و تفسیر هرچه بیشتر و بهتر منطقه از لحاظ زمین‌ساختی باشد.

در ارزیابی نتایج مربوط به محورهای تنش مجدداً باید طبیعت چرخشی نمایش روی استریونت در نظر گرفته شود. در این صورت ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از اعمال روش‌های متفاوت، همخوانی قابل قبولی دارد و این موضوع اطمینان‌پذیری نتایج حاصل از تحقیق حاضر را افزایش می‌دهد.

در شکل ۳ که در بردارنده نتایج نهایی وارون‌سازی است، مشاهده می‌شود که راستای تنش بیشینه در امتداد ناحیه فرورانش مکران از غرب به شرق تغییرات چشمگیری را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در وارون‌سازی تنش نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود سازوکارهای کانونی نشان داده شده با رنگ‌های آبی و سبز که به روش قطبیدگی تهیه شده‌اند به صورت دو زوج نیرو (Double Couple) و داده‌های برگرفته شده از سایت Global CMT Project که به روش CMT نیز محاسبه شده‌اند به صورت تانسور ممان کامل (Full Moment Tensor) نمایش داده شده‌اند. همچنین لرزه‌خیزی منطقه به صورت نمایش رویدادها به شکل دایره‌های توخالی به نمایش در آمده است. راستاهای تنش بیشینه افقی به صورت میله‌های مشگی روی هم ترسیم شده‌اند. توضیح اینکه به علت مطابقت نسبتاً زیاد نتایج و ممکن نبودن جداسازی میله‌های ترسیمی برای نشان دادن جهت تنش بیشینه در هریک از روش‌ها، این میله‌ها به این شکل رسم شده‌اند تا نحوه نمایش حاصل، برآوردی از گستره کوچک اختلافات موجود بین نتایج نیز باشد.

در قسمت غربی منطقه مکران که در ایران و در نزدیک تنگه هرمز واقع است، راستای تنش بیشینه که در سمت راست خط عمان با استفاده از سازوکارهای کانونی موجود به‌دست آمده، روندی شمال شرقی جنوب غربی معادل با $4 \pm 17/6$ درجه را نشان می‌دهد که تحت تاثیر



شکل ۳. تغییرات راستای تنش بیشینه افقی در مکران با استفاد از روش‌های خطی (مایکل، ۱۹۸۴) و غیرخطی (لوند و اسلونگا، ۱۹۹۹) شامل روش‌های زاویه لغزش و روش ناپایداری. رنگ آبی نشان‌دهنده سازوکارهای کانونی گرفته شده از کویتیر و کافکا (۱۹۸۴)، رنگ سبز نشان‌دهنده سازوکارهای کانونی گرفته شده از بیرنه، سایکس و دیویس (۱۹۹۲) و رنگ سرخ نشان‌دهنده سازوکارهای کانونی گرفته شده از سایت Global CMT Project است. دایره‌های توخالی نشان‌دهنده زمین‌لرزه‌های برگرفته شده از فهرست‌نامه USGS از ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۱، با بزرگای بالای ۳، و عمق تا ۱۸۰ کیلومتر است (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_rect.php).

۷ نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج روش مایکل (۱۹۸۴) با توجه به طبیعت آماری آن به‌صورت میانگین و بینابین نتایج حاصل از دو روش فوق قرار می‌گیرد. نتایج پژوهش‌ها در مکران که به علت همخوانی زیاد نتایج حاصل از روش‌های متفاوت با اطمینان زیادی همراه است می‌تواند در درک وضعیت زمین‌ساختی موجود در منطقه که با کمبود فعالیت لرزه‌ای همراه شده است سودمند باشد. جهت‌گیری تنش بیشینه افقی در بخش غربی مکران شمال شرقی جنوب غربی معادل با $4 \pm 17/6$ درجه، در بخش مرکزی با چرخشی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و با تمایل بیشتر به سمت شرق برابر با $3 \pm 38/2$ درجه و در مکران شرقی با راستای شمال غربی جنوب شرقی $4 \pm 157/0$ درجه تعیین شد.

در روش خطی مایکل (۱۹۸۴) انتخابی بین صفحات گسلی صورت نمی‌گیرد. از این رو این روش در مناطقی که کیفیت داده‌ها مطلوب نیست جواب بهتری می‌دهد. از طرفی استفاده از شیوه بوت استرپ باعث قوی‌تر شدن جنبه استنتاج آماری در این روش شده است؛ چرا که با نمونه‌برداری مجدد از مجموعه داده‌ها در واقع اثرات نوفه موجود در آنها تا حدودی کمینه می‌شود. در روش غیرخطی لوند و اسلونگا (۱۹۹۹) امکان انتخاب بین صفحات گسلی با استفاده از دو روش متفاوت زاویه لغزش و ناپایداری وجود دارد، که در این میان نتایج وارون‌سازی تنش با استفاده از ابزار اخیر دارای دقت بیشتری است. اما

جدول ۲. الف فهرست زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی آنها برای وارون‌سازی تنش در منطقه مکران غربی از طول جغرافیایی ۵۶ تا ۶۰ درجه و عرض جغرافیایی ۲۳ تا ۳۳ درجه مورد استفاده قرار گرفته است. ممان نرده‌ای زمین لرزه‌ها در این جداول به صورت پایه و نما نشان داده شده است.

Date (mm/dd/yyyy)	Longitude E°	Latitude N°	Depth	Mo		m _b	Strike (Az)	Dip (°)	Rake (°)
				Mantissa	Exponent				
11/17/1980	56.07	26.98	-	8.67	23	-	251	30	87
4/5/2002	56.07	31.85	-	6.7	23	-	65	72	4
6/9/1988	56.1	27.67	-	8.06	23	-	310	11	139
3/22/1977	56.13	27.23	-	9.4	24	-	75	43	96
11/5/2003	56.15	27.09	-	2.665	23	-	70	39	105
11/3/2009	56.16	27.04	-	3.874	23	-	246	30	63
10/21/2005	56.18	28.01	-	1.958	23	-	257	32	76
1/14/1999	56.2	28.95	-	3.08	23	-	210	44	-57
10/16/2002	56.23	31.19	-	9.59	23	-	298	37	176
12/19/1977	56.25	27.31	-	5.24	23	-	221	42	8
4/16/1981	56.25	30.61	-	7.65	24	-	231	69	4
7/12/1983	56.26	27.11	-	1.07	25	-	241	45	73
4/25/2007	56.34	28.04	-	0.892	24	-	282	34	94
4/1/1977	56.4	27.61	-	1.63	24	-	290	45	106
3/5/2000	56.4	27.37	-	9.56	24	-	262	44	90
12/18/1987	56.42	27.9	-	6.72	24	-	155	39	-149
3/21/1977	56.44	27.25	-	2.28	24	-	261	41	92
3/23/1977	56.44	27.47	-	1.4	26	-	267	27	98
7/27/1997	56.56	27.3	-	6.37	23	-	88	42	92
8/1/1998	56.56	27.41	-	5.82	23	-	108	76	175
11/28/1980	56.61	27.02	-	1.36	24	-	311	37	134
4/17/2002	56.66	27.3	-	9.11	23	-	237	39	36
5/7/2006	56.69	30.79	-	3.408	23	-	324	72	-162
7/31/2010	56.69	29.46	-	1.663	24	-	211	60	-25
1/5/1977	56.73	27.25	-	5.2	23	-	204	43	40
7/13/1977	56.74	27.5	-	3.13	24	-	248	9	78
8/25/2007	56.74	28.05	-	4.443	23	-	314	85	-178
2/14/2003	56.77	27.48	-	2.924	24	-	288	18	97
2/22/2005	56.81	30.76	-	5.197	25	-	71	44	79
5/14/2005	56.84	30.72	-	0.9	24	-	69	53	46
12/27/2005	56.87	27.86	-	1.366	25	-	302	19	118
8/6/1984	56.92	30.84	-	1.5	24	-	72	39	66
5/1/2005	56.93	30.64	-	5.835	23	-	214	63	3
3/21/1977	56.96	27.63	-	1.81	25	-	241	26	78
4/19/1997	57.01	27.64	-	2.58	24	-	215	58	22
5/7/2009	57.03	25.16	-	4.741	23	-	227	26	82
11/25/2001	57.05	27.74	-	4.23	23	-	299	32	125
12/19/1991	57.06	27.97	-	1.42	24	-	215	35	26
2/26/1996	57.09	28.32	-	2.35	24	-	315	7	125

ادامه جدول ۲. الف

11/10/2010	57.12	27.75	-	3.032	23	-	255	36	94
4/12/1993	57.15	28.39	-	3.32	23	-	292	44	97
2/7/1983	57.21	26.28	-	9.77	24	-	5	42	172
4/2/1989	57.25	27.91	-	12.23	23	-	242	24	81
12/8/2004	57.32	27.71	-	4.196	23	-	3	64	162
10/7/2004	57.34	28.14	-	3.674	23	-	211	67	-156
6/11/1981	57.36	29.69	-	9.82	25	-	172	37	171
1/28/2004	57.36	26.75	-	7.169	23	-	27	59	161
11/18/1998	57.38	30.26	-	1.29	24	-	174	55	173
10/20/1997	57.45	27.98	-	1.54	24	-	293	21	124
3/4/1999	57.49	27.91	-	10.07	25	-	250	16	68
7/6/2003	57.53	27.59	-	4.089	23	-	102	48	7
7/28/1981	57.58	30.03	-	9.01	26	-	150	13	119
3/14/1998	57.6	29.95	-	9.43	25	-	154	57	-174
10/18/1996	57.69	27.26	-	12.16	23	-	289	21	83
11/20/1989	57.8	29.89	-	8.18	24	-	240	75	9
10/6/2004	57.93	28.75	-	7.618	23	-	280	75	4
12/26/2003	58.24	29.11	-	1.53	23	-	152	38	138
7/22/2004	58.24	29.1	-	9.312	25	-	172	59	167
6/10/1998	58.52	28	-	1.32	24	-	167	10	-32
12/7/1989	58.86	25.59	-	9.67	24	-	142	37	103
11/21/2003	58.95	31.11	-	3.697	23	-	98	40	40
12/20/2010	59.11	28.1	-	0.826	26	-	36	87	180
10/23/2000	59.33	31.93	-	9.3	23	-	92	40	24
8/4/2003	59.69	28.94	-	3.043	24	-	168	28	117
8/21/2003	59.7	28.88	-	8.682	24	-	183	76	-172

جدول ۲. ب. فهرست زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی آنها برای وارون‌سازی تنش در منطقه مکران مرکزی از طول جغرافیایی ۶۰ تا ۶۴ درجه و عرض جغرافیایی ۲۳ تا ۳۳ درجه مورد استفاده قرار گرفته است.

Date (mm/dd/yyyy)	Longitude E°	Latitude N°	Depth	Mo		m _b	Strike (Az)	Dip (°)	Rake (°)
				Mantissa	Exponent				
2/13/1979	60.27	26.99	-	1.84	24	-	208	80	-178
3/15/1990	60.3	31.44	-	6.34	23	-	100	82	-1
2/26/1994	60.44	30.59	-	13.93	24	-	168	32	125
2/28/1994	60.48	30.77	-	3.09	24	-	136	30	92
2/23/1994	60.5	30.83	-	1.72	25	-	145	33	96
9/26/1990	60.51	29.06	-	2.94	24	-	189	90	-180
2/24/1994	60.52	30.73	-	3.3	25	-	158	43	105
2/23/1994	60.61	30.87	-	2.22	24	-	108	31	62
9/11/1992	60.76	30.07	-	8.82	23	-	91	25	51
6/24/2003	60.91	27	-	2.328	24	-	97	45	-65

ادامه جدول ۲. ب

1/10/1979	60.95	26.55	3	-	-	5.8	256	61	13
1/10/1979	61.02	26.48	2	-	-	5.9	230	91	-4
8/6/1972	61.22	25.14	18	-	-	5	334	15	148
8/8/1972	61.22	25.14	26	-	-	5	95	115	288.75
8/8/1972	61.22	25.04	36	-	-	5.3	92.5	120	296.25
8/8/1972	61.22	25.14	18	-	-	5.4	334	15	148
8/6/1972	61.22	25.04	20	-	-	5.4	321	17	134
1/10/1979	61.23	26.07	-	1.099	24	-	107	67	-12
7/18/2006	61.23	26.75	-	10.83	24	-	338	62	-152
1/10/1979	61.31	26.75	-	1.72	25	-	328	58	-159
4/30/2009	61.37	27.64	-	7.638	23	-	21	35	-167
12/17/1992	61.43	25.68	-	4.47	24	-	8	54	142
3/13/2005	62	26.73	-	1.171	25	-	253	37	-89
3/30/1966	62.32	21.87	28	-	-	5.3	20	60	345
2/10/1978	62.4	25.33	18	-	-	5.1	214	16	19
1/14/2003	62.42	27.77	-	1.566	24	-	61	41	-92
4/18/1983	62.44	27.94	-	1.39	26	-	81	43	-68
8/12/1963	62.74	25.32	33	-	-	5.4	100	90	300
2/13/1969	62.75	24.99	18	-	-	5.1	279	9	84
8/3/1968	62.87	25.19	26	-	-	4.7	290	49	-50
1/30/1992	62.88	24.25	-	6.71	24	-	298	10	126
12/7/1991	62.94	25.08	-	2.86	24	-	309	8	133
7/29/1975	63.09	25.22	18	-	-	5	278	27	88
9/2/1973	63.14	24.83	20	-	-	4.6	277	9	84
8/18/1972	63.14	24.9	25	-	-	5.3	90	120	270
9/2/1913	63.21	24.88	18	-	-	5.2	281	23	70
11/27/1945	63.48	25.15	27	-	-	7.9	246	7	89
8/5/1947	63.49	25.04	20	-	-	6.8	236	7	68
8/10/1987	63.72	29.65	-	1.39	25	-	349	32	-73

جدول ۲. ج فهرست زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی آنها برای وارون‌سازی تنش در منطقه مکران شرقی از طول جغرافیایی ۶۴ تا ۶۸ درجه و عرض جغرافیایی ۲۳ تا ۳۳ درجه مورد استفاده قرار گرفته است.

Date (mm/dd/yyyy)	Longitude E°	Latitude N°	Depth	Mo		m _b	Strike (Az)	Dip (°)	Rake (°)
				Mantissa	Exponent				
10/25/2009	64.09	29.52	-	3.317	24	-	154	2	22
4/28/1980	64.33	27.73	-	2.06	24	-	39	17	-119
4/28/1980	64.5	27.54	60	-	-	5.3	357	20	-172
1/5/1998	64.61	29.13	-	6.49	23	-	48	37	104
11/9/1968	64.73	23.79	15	-	-	5.1	21.25	65	5
12/4/1997	64.81	29.43	-	5.94	23	-	53	46	119
11/7/2006	64.99	24.31	-	3.886	23	-	137	61	9
12/10/1994	65.19	28.05	-	6.55	23	-	204	37	-130

ادامه جدول ۲.ج

9/1/1962	65.22	25.6	18	-	-	5.3	251	10	80
6/17/1990	65.25	26.75	-	1.8	25	-	210	63	15
7/22/2004	65.36	28.71	-	5.137	23	-	70	60	-7
1/18/1984	65.59	27.62	-	3.38	24	-	349	50	-13
6/17/1990	65.62	27.34	-	2.52	24	-	115	56	173
8/14/1990	65.8	26.93	-	1.89	24	-	287	71	-170
7/26/1990	65.81	27.44	-	7.61	24	-	209	63	2
11/14/1990	65.84	27.45	-	2.51	24	-	97	59	151
1/20/1992	65.93	27.37	-	2.03	24	-	99	72	170
4/24/1992	65.97	27.47	-	12.78	24	-	102	60	156
6/5/2010	66.04	27.87	-	3.841	23	-	196	83	6
12/10/1978	66.05	28.59	-	5.4	23	-	270	78	-176
10/19/2007	66.14	28.38	-	1.905	24	-	197	86	-2
3/4/1990	66.16	28.66	-	1.35	25	-	278	78	-176
5/6/1978	66.2	29.8	-	7.77	24	-	101	79	-179
4/4/1968	66.23	27.55	-	2.13	24	-	197	75	12
9/8/1990	66.23	24.58	33	-	-	5	30	70	30
8/14/2010	66.31	28.1	-	6.84	23	-	208	83	-5
5/25/1973	66.34	25.48	29	5.1	s	-	125	120	30
2/2/2009	66.37	26.98	-	6.016	23	-	189	81	-6
3/16/1978	66.43	29.83	-	1.82	25	-	104	77	-173
10/2/1984	66.45	26.96	-	10.87	23	-	191	76	0
10/16/1986	66.45	27.24	-	4.18	23	-	1	60	28
4/27/1990	66.46	28.7	-	2.27	24	-	358	57	8
10/4/1974	66.54	26.29	33	5.9	s	-	70	70	135
12/12/2009	66.56	28.28	-	2.131	23	-	198	66	-11
8/28/1992	66.69	28.43	-	2.58	24	-	118	67	179
11/16/1993	66.88	30.54	-	3.15	24	-	114	77	-179
2/5/1992	66.92	31.42	-	1.98	24	-	299	87	-177
5/29/1977	67.13	29.69	-	2.48	24	-	109	75	166
3/28/1992	67.36	26.75	-	3	23	-	3	33	91
12/28/1992	67.42	25.84	-	4.628	23	-	214	45	106
3/17/2009	67.42	26.59	-	6.3	23	-	173	33	32
10/28/2008	67.43	30.47	-	1.107	24	-	229	63	22
10/28/2008	67.48	30.4	-	5.079	25	-	304	73	171
12/9/2008	67.48	30.32	-	0.86	24	-	64	79	7
1/21/1992	67.49	26.9	-	1.49	24	-	15	44	75
12/9/2008	67.5	30.31	-	1.286	24	-	63	73	11
12/9/2008	67.51	30.33	-	3.985	24	-	62	75	0
11/15/2008	67.56	30.31	-	2.339	23	-	28	78	-10
10/29/2008	67.57	30.29	-	5.39	25	-	324	68	-178
8/2/1996	67.63	29.29	-	6.77	23	-	247	24	129

ادامه جدول ۲.ج

11/3/2008	67.63	30.31	-	3.039	23	-	285	43	108
5/23/2005	67.69	30.39	-	8.742	23	-	86	4	-66
3/20/1997	67.79	30.79	-	8.09	24	-	76	7	-91
5/31/1995	67.84	30.8	-	2.53	24	-	74	5	-85
4/2/1984	67.92	30.04	-	6.71	23	-	140	45	113
9/7/1997	67.92	29.5	-	1.48	24	-	283	29	96
3/21/2006	67.94	29.28	-	2.182	23	-	271	21	46
8/24/1997	67.99	29.71	-	3.32	24	-	258	28	74
12/10/1977	56.74	27.50	15	-	-	5.1	248	9	78
2/7/1983	57.21	26.28	33	-	-	5.5	5	42	172
11/17/1972	59.14	27.40	65	-	-	5.4	141.33	42.33	16.67
29/5/1963	59.40	27.00	52	-	-	5.2	120.5	50	48.5
11/7/1969	60.02	27.80	35	-	-	6.1	134.33	31	1
8/2/1968	60.92	27.54	62	-	-	5.7	119.33	22.33	-48
1/10/1979	60.95	26.55	33	-	-	5.9	300	40	90
1/10/1979	61.02	26.48	33	-	-	5.4	300	34	90
8/8/1972	61.22	25.04	30	-	-	5.5	265	14.33	71.33
8/6/1972	61.22	25.04	33	-	-	5.5	271.67	27.67	84.33
4/18/1983	62.05	27.79	65	-	-	6.5	83	32	-67
8/12/1963	63.14	25.32	5	-	-	5.4	190	30	0
9/2/1973	63.21	24.88	30	-	-	5.3	270	30	90
4/28/1980	64.50	27.54	34	-	-	5.4	90	6	-90
12/10/1978	66.06	28.59	33	-	-	4.8	179	86	-12
5/6/1978	66.20	29.80	33	-	-	5.4	11	89	-11
10/2/1984	66.45	26.6	13	-	-	5.2	191	76	0

منابع

- Byrne, D. E., Sykes, L. and Davis, D. M., 1992, Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *J. Geophys. Res.* **97**, 449-478.
- Carey, E. and Brunier, B., 1974, Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles, *C.R. Acad. Sci. Paris.*, 279, 891.
- CMT project: <http://www.globalcmt.org/>
- Étchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M., 1981, An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis, *J. Struct. Geol.*, **3**, 51-65.
- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population, *Tectonophysics*, **56**, T17-T26.
- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5835-5848.
- Angelier, J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress, III. A new rapid direct inversion method by analytical means, *Geophys. J. Int.*, **103**, 363-376.
- Armijo, R., Carey, E. and Cisternas, A., 1982, The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases, *Tectonophysics*, **82**, 145-160.
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting, *Geol. Mag.*, **96**, 109-117.

- Parker, R. L. and McNutt, M. K., 1980, Statistics for the one-norm misfit measure, *J. Geophys. Res.*, **85**(B8), 4429 – 4430.
- Quittmeyer, R. C. and Kafka, A. L., 1984, Constraints on plate motions in southern Pakistan and northern Arabian Sea from the focal mechanism of small earthquakes. *J. Geophys. Res.* **89**, 2444–2458.
- Reches, Z., 1987, Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition, *Tectonics*, **6**, 849-861.
- Shad Manaman, N., Shomali, H. and Koyi, H., 2011, New constraints on upper-mantle S-velocity structure and crustal thickness of the Iranian plateau using partitioned waveform inversion, *Geophys. J. Int.* **184**, 247–267.
- Slunga, R., Rögnvaldsson, S. T. and Böðvarsson, R., 1995, Absolute and relative locations of similar events with application to microearthquakes in southern Iceland, *Geophys. J. Int.*, **123**, 409-419.
- Vernant, P. and Ch'ery, J., 2006, Mechanical modelling of oblique convergence in the Zagros, Iran, *Geophys. J. Int.*, **165**, 991–1002.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting, *J. Geol.*, **59**, 118-130.
- Zarifi, Z., 2006, Unusual subduction zones: Case studies in Colombia and Iran: PhD. Thesis, University of Bergen.
- 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, *J. Geophys. Res.*, **89**, 9305-9320.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. W. G., 1979, *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman and Hall, New York, third edition.
- Lund, B., 2000, Crustal stress studies using microearthquakes and boreholes, PhD thesis, Uppsala University.
- Lund, B. and Slunga, R., 1999, Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: Application to Olfus in southwest Iceland, *J. Geophys. Res.*, **104**, No. B7, PAGES 14,947-14, 964.
- Lund, B. and Townend, J., 2007, Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor, *Geophys. J. Int.*, **170**, 1328–1335.
- Magee, M. E., 1997, Crustal stress state inferred from earthquake focal mechanisms: Recognition of a non-uniform stress state, slip plane selection criteria and implications for the mechanics of faulting, Ph.D. thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif., USA.
- McKenzie, D. P., 1969, The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **59**, 591-601.
- Michael, A. J., 1984, Determination of stress from slip data, Faults and folds, *J. Geophys. Res.*, **89**, 11517-11526.