

Investigation of the Dorouneh fault system based on the focal mechanism of the earthquakes of the last two decades

Assar Enayati, M.¹  | Javan Doloei, Gh.²  | Ahmadzadeh, S.²  | Afshar Savat, A.² 

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. Iran.

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

Corresponding Author E-mail: javandoloei@iiees.ac.ir

(Received: 24 Aug 2022, Revised: 23 Oct 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 30 Aug 2023)

Summary

Fault plane solution is one of the most important tools to determine the orientation of the stress field. The focal mechanism of earthquakes can be applied to determine the direction of rupture propagation, the structure of the fault and the stress field of the region. Dorouneh fault is the largest fault in Iran after the main Zagros fault with about 800 km length. The purpose of this study is to investigate the seismicity, the stress fields and the focal mechanism of earthquakes that have occurred across the three main segments western, middle and eastern parts of the Dorouneh fault. Therefore, the calculation of the focal mechanism is performed using the P-wave first-motion polarity. Also the stress situation of the events and the recognition of fault planes are presented in this research. Along this fault, the blocks have moved in both left and right directions, but certainly one of its last movements has had a right lateral motion. In this study, the waveforms recorded at the seismic stations of the National Seismological Center of Tehran University (IRSC), the National Center of Broadband Seismic Network of Iran belong to the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) and seismic stations of Seismological Research Center at the Ferdowsi University of Mashhad were used. At first, the waveforms of each seismic event were combined with each other, and then the relocation of the events were determined based on new data set of this study (Figure 2). A number of high quality earthquake with a magnitude of more than 3 and an average depth of 14 km have been selected (their list is presented in table1) to calculate the fault plane solution.

In order to calculate the mechanism of the recent earthquakes in the Khorasan region, interesting results have been obtained based on several methods (Assar Enayati, 1400). One of the common methods for estimating the mechanism of earthquakes, especially earthquakes with small magnitudes and at close distances from the epicenter, is the polarization of the first arrival of the P wave. Due to the dependence of the amplitude and polarization of the P wave on the focal mechanism, by determining the polarization of the first arrival of the seismic phase, the earthquake focal mechanism can be calculated. The results of focal mechanism solutions for significant events around Dorouneh fault show mostly left lateral strike slip motion which is consistent with the tectonic setting of the region. The difference in the focal mechanism of the events in the eastern and western parts of the fault is justified by the northward movement of the Lut block. The integration of data shows high accuracy in calculating the focal mechanism and more certainty about the results. Therefore, in the direction of the Dorouneh fault, the movements are both left-handed and right-handed from the seismic situation. The change in the focal mechanism obtained from the seismic results, considering the stress axes changes, can represent the second and third order stress fields that balance the stress in this area today. The second-order stress can be related to continental rifting, isostasy adaptation, topography and deglaciation, and the third-order stress field can be related to the local stress source on a scale smaller than 100 km, which is influenced by the structural geometry, and interference between fault systems, topography and local density difference (Sheikh-ul-Islami et al., 2021).

Keywords: focal mechanism, wave polarization, seismicity, Dorouneh fault, state of stress.

Cite this article: Assar Enayati, M., Javan Doloei, Gh., Ahmadzadeh, S., & Afshar Savat, A. (2023). Investigation of the Dorouneh fault system based on the focal mechanism of the earthquakes of the last two decades. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 353-369. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347529.1007452>

E-mail: (1) mohadeseh.as4899@gmail.com (2) sahmadzadeh8119@gmail.com | azar.afshar@stu.iiees.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347529.1007452>

Print ISSN: 2538-371X

Online ISSN: 2538-3906

بررسی فعالیت گسل درونه بر اساس سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های دو دهه اخیر

محدثه عصار عنایتی^۱ | غلام جوان دلویی^۲ | سمیه احمدزاده^۲ | آذر افشار ساوات^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: javandoloei@iiees.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲، بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

چکیده

بررسی‌های فعالیت گسل‌ها مهم‌ترین ابزار برای تعیین جهت‌گیری میدان تنش هستند. با محاسبه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها جهت انتشار گسیختگی، هندسه گسل و میدان تنش منطقه مورد مطالعه را می‌توان مشخص کرد. گسل درونه با طول حدود ۸۰۰ کیلومتر بعد از گسل اصلی زاگرس بزرگ‌ترین گسل ایران است. هدف از این پژوهش مطالعه لرزه‌خیزی، حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های رخ داده در راستای سه بخش غربی، میانی و شرقی گسل درونه و تخمین تنش در منطقه است. در این مطالعه محاسبه سازوکار کانونی با استفاده از روش پلاریته (قطبش) اولین رسید موج P برای ۲۱ زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۳ رخ داده در مجاورت گسل درونه طی دو دهه اخیر انجام می‌شود. علاوه بر آن برای راستی‌آزمایی نتایج از مدل‌سازی شکل موج برای محاسبه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های کمتر از ۴ استفاده می‌شود. سپس از بررسی سازوکارهای محاسبه‌شده، مقادیر تنش آزادشده در صفحه‌های گسلی ارائه می‌شود. سازوکار کانونی رویدادها و مقایسه آن با بررسی‌های زمین‌ساختی پیشین در راستای گسل درونه همخوانی قابل‌قبولی دارد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای در سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های سه قطعه شرقی، میانی و غربی گسل درونه وجود دارد که تأییدکننده حرکت بلوک‌ها به دو صورت چپ‌بر و راست‌بر در راستای گسل است. اختلاف سازوکار کانونی رویدادهای بخش‌های شرقی و غربی با توجه به حرکت رو به شمال بلوک لوت و انحنای گسل درونه توجیه‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: سازوکار کانونی، قطبش موج، لرزه‌خیزی، گسل درونه، وضعیت تنش.

۱. مقدمه

کپه‌داغ تشکیل شده است. در زمان پالئوژن در فلات ایران و به‌طور ویژه در شرق ایران رژیم‌های کششی حاکم بوده است، که به احتمال با لایه‌لایه شدن لیتوسفر همراه شده است (پانگ و همکاران، ۲۰۱۳) و ماگماتیسیم کالک آلکالن در شرق ایران را به‌وجود آورده است (پانگ و همکاران، ۲۰۱۲). از طرف دیگر، نتایج تحقیقات توکلی و آقائباتی (۱۳۸۸) از بررسی و مقایسه رسوبات کرتاسه زیرین در دو حوزه کپه‌داغ و ایران مرکزی مؤید همزمانی و شباهت بسیار زیاد این دو حوضه رسوبی با یگدیگر است. علاوه بر آن در مطالعه عباسی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داده شده است که حرکت شمالی بلوک لوت و ایران مرکزی نسبت به بلوک افغان باید توسط گسل درونه و کپه‌داغ جذب شود. در این راستا بخشی از این

بخش شرقی فلات ایران را می‌توان حاصل فرگشت تاریخیچه ژئودینامیکی پیچیده‌ای دانست که حاصل تعامل همگرایی ورقه عربی به اوراسیا، همگرایی ورقه هند به اوراسیا و فرار بلوک افغان به سوی ایران، فروراندگی مکران و فعالیت‌های آذرین دانست. گسل درونه مرز آشکاری را بین بلوک لوت و پهنه سبزوار شکل داده است (باقری و دامنی گل، ۲۰۲۰؛ باقری و اشتامفلی، ۲۰۰۸؛ علوی، ۱۹۹۱؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). خردقاره ایران مرکزی در اواخر تریاس به حاشیه جنوبی ورقه پایدار اوراسیا برخورد کرده است (موئنتی و همکاران، ۲۰۰۹)، پس از آن فرورانش شمالی تیس نو آغاز و سبب کشش کمان پشته مزوزوئیک و فرونشست کوهزاد سیمین در بالای ورقه فرورانشی و حوضه رسوبی پساتریاس در منطقه

استناد: عصار عنایتی، محدثه؛ جوان دلویی، غلام؛ احمدزاده، سمیه و افشار ساوات، آذر (۱۴۰۲). بررسی فعالیت گسل درونه بر اساس سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های دو دهه اخیر.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹ (۲)، ۳۵۳-۳۶۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347529.1007452>

رایانامه: (۱) mohadeseh.as4899@gmail.com (۲) sahmadzadeh8119@gmail.com | azar.afshar@stu.iiees.ac.ir

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.347529.1007452>



داخل خاک افغانستان کشیده می‌شود. موقعیت مکانی گسل درونه در شکل ۱ مشخص شده است.

تاکنون نظرات مختلفی در ارتباط با سازوکار و جهت حرکت گسل درونه بیان شده است. برخی پژوهشگران سازوکار کانونی گسل درونه را راستالغز چپ‌بر بیان می‌دارند (ولمن و همکاران، ۱۹۶۶؛ چالنگو، ۱۹۷۳؛ جوادی کاریزکی، ۱۳۸۵؛ فرید و همکاران، ۲۰۱۱)، البته برخی پژوهشگران به سازوکار راست‌بر در بخش غربی گسل درونه اشاره کرده‌اند (نبوی، ۱۳۵۵)، برخی تنوعی از سازوکارهای عادی و معکوس به ویژه سازوکار معکوس و چپ‌بر برای بخش شرقی معرفی کرده‌اند (مهاجر اشجعی و همکاران، ۱۹۷۵). شکل خمیده گسل درونه در اثر حرکات رو به شمال بلوک لوت نسبت به اوراسیا سبب اختلاف سازوکار در دو بخش شرقی و غربی آن است (حسامی و همکاران، ۱۳۹۰). گسل درونه توانمندی ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۷-۷/۵ را دارد (فتاحی و همکاران، ۲۰۰۷؛ فرید و همکاران، ۲۰۱۶). نوزعیم و همکاران (۲۰۱۳) داده‌های ساختاری و زمین‌ریختی جمع‌آوری‌شده در راستای پهنه گسلی راستالغز راست‌بر کوه‌سرهنگی در لبه شمال غربی بلوک لوت، در جنوب گسل فعال راستالغز چپ‌بر را درونه مطالعه کردند. آنها تفکیک کرنش برشی درون قاره‌ای ناشی از تغییر محلی در میدان تنش منطقه‌ای، همراه با بازفعال‌سازی زمین‌ساختی نواحی تغییر شکل از پیش موجود را با احتمال برای توضیح الگوی جنبش‌شناسی پیچیده پس از نژون در ایران مرکزی مطرح کردند. بر اساس پردازش داده اندازه‌گیری‌های GPS چند سال اخیر توسط خرمی و همکاران (۲۰۱۹)، جابجایی ناچیزی در امتداد گسل درونه همراه با چرخش ساعتگرد مشاهده شد. این چرخش با مدل امتدادلغز راست‌بر شمال بلوک لوت که در مطالعات قبلی پیشنهاد شده بود، همخوانی دارد. اما چرخش محاسبه‌شده در جهت عقربه‌های ساعت توسط موسوی و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه ژئودزی، ریخت‌زمین‌شناسی و تداخل‌سنجی راداری، نرخ لغزش گسل درونه را $2/5 \pm 0/3$ میلی‌متر در سال به‌دست آورده‌اند و با توجه به عدم قطعیت

دگرشکلی به منطقه بینالود و کپه‌داغ از طریق فعالیت گسل‌های امتدادلغز صورت می‌گیرد و بخش دیگر آن سبب فعالیت بخش‌های مختلف سامانه گسلی درونه خواهد شد.

بنابراین به احتمال قریب به یقین، سامانه گسلی درونه را مرز تلاقی سه حوزه بلوک لوت از جنوب، پهنه کپه‌داغ از شمال-شمال‌شرق و پهنه ایران مرکزی از غرب-شمال‌غرب می‌توان در نظر گرفت. در این راستا شناخت رفتار سامانه گسلی درونه بر اساس سازوکار کانونی رویدادهای لرزه‌ای ده سال اخیر و محاسبه تنش آزادشده، درک و شناخت قابل‌اعتمادی از فعالیت لرزه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌کند.

هدف این مطالعه، تعیین محل مجدد رویدادهای مهم دو دهه اخیر پیرامون گسل درونه بر اساس تلفیق لرزه نگاشت‌های ثبت‌شده تمامی ایستگاه‌های وابسته به مراکز لرزه‌نگاری کشور است و سپس محاسبه سازوکار کانونی رویدادهای اصلی و تقسیم‌بندی آنها به سه دسته مجزا و سپس محاسبه تانسور تنش عهدحاضر است. شکل ۲ موقعیت زمین‌لرزه‌ها و سازوکارهای محاسبه‌شده آنها را نشان می‌دهد. بدیهی است شناخت دقیق سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها کمک قابل‌توجهی به تعیین روند غالب تنش آزادشده عهدحاضر در منطقه خواهد کرد.

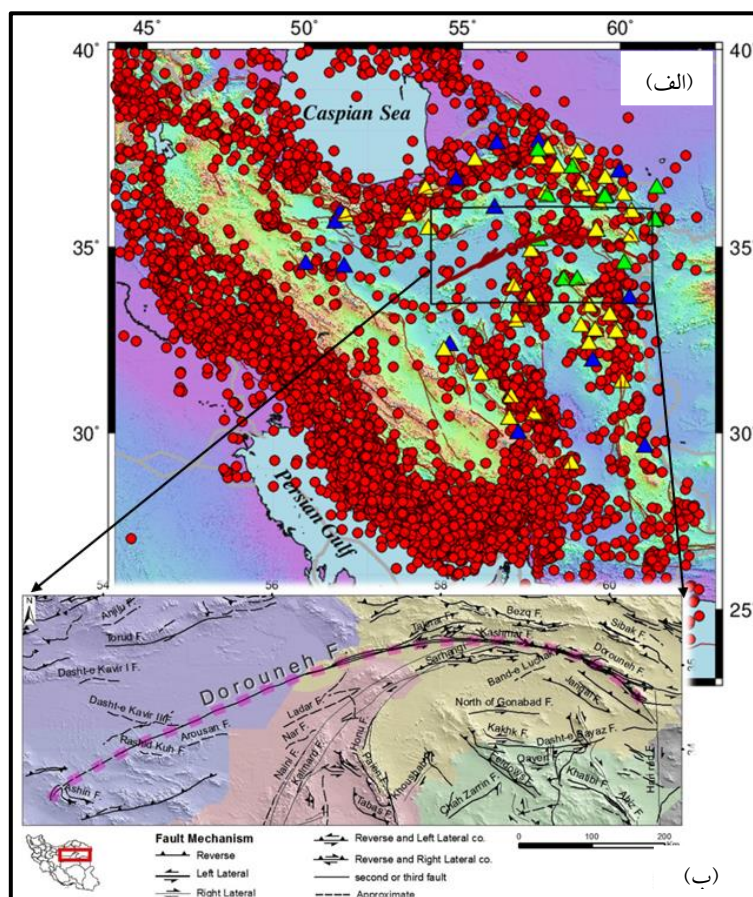
۲. سامانه گسلی درونه

سامانه‌های گسلی راستالغز طولی مسئول تعدیل تنش در شرق ایران هستند. گسل درونه به‌عنوان مرز شمالی خردقاره مرکزی-شرقی ایران در نظر گرفته می‌شود (بربریان، ۲۰۱۴؛ فرید و همکاران، ۲۰۱۱؛ والپرسدروف و همکاران، ۲۰۱۴) که در شمال‌شرق ایران، از انارک، با راستای شمال شرقی-جنوب غربی تا ناحیه روستای درونه در جنوب غربی شهر کاشمر از توابع خراسان ادامه دارد. این گسل از روستای درونه، با روند شرقی-غربی، با خمیدگی به سمت جنوب، تا مرز افغانستان ادامه دارد (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) و شاخه‌ای از بخش شرقی گسل جدا می‌شود و با راستای تقریبی شرقی-غربی به

و جنبایی گسل درونه، قطعی و اثبات شده است. به‌طور کلی سامانه‌های اصلی گسل‌های راست‌الغز درون قاره‌ای همچون سامانه گسلی درونه، در حالت طبیعی دوران‌های تکتونیکی چند مرحله‌ای طولانی‌مدت را سپری می‌کنند که در غالب اوقات، وضعیت تنش در مرزهای صفحه را نشان می‌دهند (تدین و همکاران، ۲۰۱۸). از این‌رو، محاسبه سازوکار کانونی گسل‌ها و محورهای تنش که امروزه در حال تعدیل تنش در پهنه گسل درونه هستند، شناسایی موقعیت‌های میدانی برای مطالعات زمین‌شناسی و ساختاری را فراهم می‌کند که اهمیت زیادی در زلزله‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساخت منطقه دارد.

اندازه‌گیری‌ها، نرخ لغزش در ۱۰۰ هزار سال گذشته را ثابت و نماینده تجمع کرنش در حال حاضر در نظر گرفتند. بیشینه نرخ فشار افقی با مقادیر بالا در مجاورت پهنه انتقالی بین زیر پهنه‌های زمین‌شناسی و ساختاری ایران مرکزی در بخش غربی گسل دورونه مشاهده می‌شود و نسبت نرخ گشتاور لرزه‌ای به ژئودزی در گسل درونه کم است که نشان می‌دهد بخش زیادی از انرژی کشسان در بخش شمالی بلوک لوت هنوز آزاد نشده است یا خارج از بازه زمانی کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه، آزاد شده است (رشیدی و همکاران، ۲۰۲۲).

با توجه به جابه‌جایی مربوط به سن کواترنری و مشاهده لرزه‌خیزی دستگاهی چند دهه اخیر، فعالیت لرزه‌ای



شکل ۱. نقشه لرزه‌خیزی فلات ایران، موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و سامانه گسلی درونه. (الف) لرزه‌خیزی فلات ایران در نیم‌قرن اخیر برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴ (مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک، <http://irsc.ut.ac.ir>), مثلث‌های زرد رنگ موقعیت ایستگاه‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC), مثلث‌های آبی‌رنگ موقعیت ایستگاه‌های مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مثلث‌های سبزرنگ موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی را نشان می‌دهند. موقعیت منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر با مربع مشکی‌رنگ مشخص شده است. (ب) بزرگنمایی نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه و سازوکار آنها (اقتباس از جوادی کاریزکی و همکاران، ۲۰۱۳) و هاشورزدن مسیر سامانه گسلی درونه.

۲. داده و شیوه پژوهش

۲-۱. داده‌ها

در این مطالعه از بانک داده مشخصات و شکل موج رویدادهای ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مرکز لرزه‌نگاری کشوری دانشگاه تهران (IRSC)، مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد (FUMSN) استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در این پژوهش به تفکیک مراکز لرزه‌نگاری کشوری در شکل ۱ نشان داده شده است. این رویدادها با توجه به نوع تجهیزات فنی هر مرکز از فرمت ذخیره متفاوتی بهره‌مند بوده‌اند که در مرحله نخست همه آنها به فرمت یکسان نوردیک (Nordic) با توجه به نرم‌افزارهای مورد استفاده در این مطالعه تبدیل شده‌اند.

سپس برای تعیین محل مجدد، شکل موج هر رویداد لرزه‌ای ثبت شده در هر سه مرکز لرزه‌نگاری با هم تلفیق شده‌اند. این امر باعث شد رویدادهای لرزه‌ای توسط حداقل ۶ ایستگاه و حداکثر ۳۳ ایستگاه لرزه‌نگاری که ثبت شده‌اند، بانک جامعی را با حداکثر پوشش ممکن از ایستگاه‌های منطقه تشکیل دهند و گاف آزمون‌ی را به کمتر از ۱۶۰ درجه کاهش دهند. در این مرحله با پردازش مجدد هر رویداد برای محاسبه پارامترهای مکان و زمان وقوع آن، کمک شایان توجهی به کاهش عدم قطعیت مکان و زمان وقوع رویدادها کرده است. با در نظر گرفتن شرایط سخت گیرانه گاف آزمون‌ی ۱۶۰ درجه، تعداد ۲۱ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۳ و ژرفای متوسط ۱۴ کیلومتر در این مطالعه انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است که فهرست آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این پژوهش.

ردیف	تاریخ	زمان رخداد	عرض جغرافیایی درجه شمالی	طول جغرافیایی درجه شرقی	عمق km	بزرگی Mw
۱	۲۰۱۰/۰۴/۱۲	۱۱:۵۶:۳۲/۵	۳۵/۰۶۴	۵۸/۶۲۳	۱۴	۴/۵
۲	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۱۳:۵۰:۱۲	۳۵/۲۱۴	۵۹/۲۷۶	۱۴	۵/۸
۳	۲۰۱۱/۰۴/۲۳	۰۸:۰۰:۴۸	۳۵/۰۶۴	۵۸/۰۹۱	۱۴	۴
۴	۲۰۱۱/۰۷/۰۳	۱۷:۵۹:۱۰/۶	۳۵/۱۴۵	۵۷/۲۸۱	۱۴	۴
۵	۲۰۱۱/۰۹/۰۵	۰۰:۵۲:۱۵	۳۵/۲۶۵	۵۸/۰۹۶	۱۵	۴/۱
۶	۲۰۱۱/۱۲/۰۱	۲۲:۳۲:۳۷	۳۵/۳۶۶	۵۹/۸۷۵	۱۴	۳/۴
۷	۲۰۱۲/۰۱/۰۱	۱۴:۴۴:۰۲	۳۵/۴۹۹	۵۹/۴۹۲	۱۵	۳/۳
۸	۲۰۱۲/۰۵/۱۹	۱۸:۱۹:۱۱	۳۵/۰۱۶	۵۶/۵۴۵	۱۴	۳/۲
۹	۲۰۱۲/۰۷/۰۴	۰۰:۰۶:۰۳	۳۵/۰۵۱	۵۸/۵۲۸	۱۴	۳/۴
۱۰	۲۰۱۲/۰۷/۲۰	۰۰:۱۶:۵۰	۳۵/۲۸۷	۵۸/۱۰۵	۱۵	۴/۴
۱۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۰	۲۱:۴۰:۲۶	۳۵/۴۹۷	۵۹/۲۳۰	۱۴	۳
۱۲	۲۰۱۲/۱۰/۰۲	۰۶:۵۱:۱۲	۳۵/۳۸۹	۵۸/۴۲۷	۱۵	۳/۳
۱۳	۲۰۱۳/۰۶/۲۸	۱۲:۰۳:۳۴	۳۵/۲۲۸	۵۹/۰۲۳	۱۵	۳/۷
۱۴	۲۰۱۳/۰۷/۱۵	۱۱:۵۵:۳۷	۳۵/۴۷۵	۵۸/۸۰۴	۱۵	۴
۱۵	۲۰۱۴/۰۱/۳۰	۲۱:۱۸:۵۵	۳۵/۰۴۵	۵۹/۰۸۴	۱۴	۳/۳
۱۶	۲۰۱۵/۰۵/۱۰	۰۲:۰۲:۵۵/۸	۳۵/۳۱۳	۵۸/۴۶۲	۱۴	۴/۱
۱۷	۲۰۱۵/۰۵/۰۵	۲۱:۲۸:۳۲	۳۵/۳۱۷	۵۸/۳۷۹	۱۵	۵/۲
۱۸	۲۰۱۵/۰۵/۱۳	۱۴:۲۷:۴۸	۳۵/۵۵۵	۵۸/۰۳۰	۱۴	۳/۱
۱۹	۲۰۱۵/۰۸/۰۹	۱۴:۵۷:۰۸	۳۵/۲۴۵	۵۹/۰۷۰	۱۵	۳/۳
۲۰	۲۰۱۵/۱۱/۱۲	۱۲:۴۷:۲۵	۳۵/۰۲۹	۵۹/۷۵۸	۱۵	۳/۸
۲۱	۲۰۱۶/۱۰/۲۵	۰۴:۲۷:۱۵/۵	۳۵/۲۴	۵۷/۱۸۱	۱۴	۴/۹

۲-۲. محاسبه سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها و ارتباط آن با مؤلفه‌های تنش

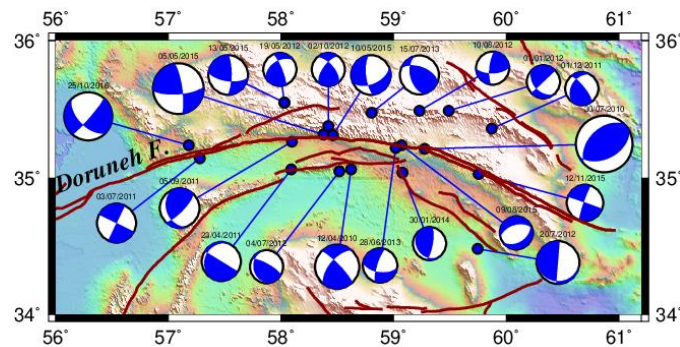
پس از تکمیل بانک داده مورد نیاز شامل مشخصات مکان و زمان وقوع رویداد علاوه بر شکل موج ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌ای منطقه، آماده سازی داده برای محاسبه سازوکار کانونی بر اساس پلاریته اولین رسید موج P انجام شده است. شایان ذکر است در یک دهه اخیر سازوکار کانونی زمین لرزه‌های شرق ایران توسط تعدادی از محققین (به عنوان نمونه، عصارعنایتی، ۱۴۰۰) با روش‌های مختلف محاسبه شده است. مطالعه حاضر به محاسبه سازوکار کانونی زمین لرزه‌هایی که مسبب آنها سامانه گسلی درونه بوده است، اختصاص داده شده است.

یکی از روش‌های متداول برای محاسبه سازوکار کانونی زمین لرزه‌ها به ویژه زمین لرزه‌های با بزرگی کوچک و در فواصل نزدیک از رومرکز، قطبش اولین رسید موج P می‌باشد. به دلیل وابستگی دامنه و قطبش موج P به سازوکار کانونی، با تعیین قطبش اولین رسید فاز لرزه‌ای، سازوکار کانونی زمین لرزه را می‌توان محاسبه کرد.

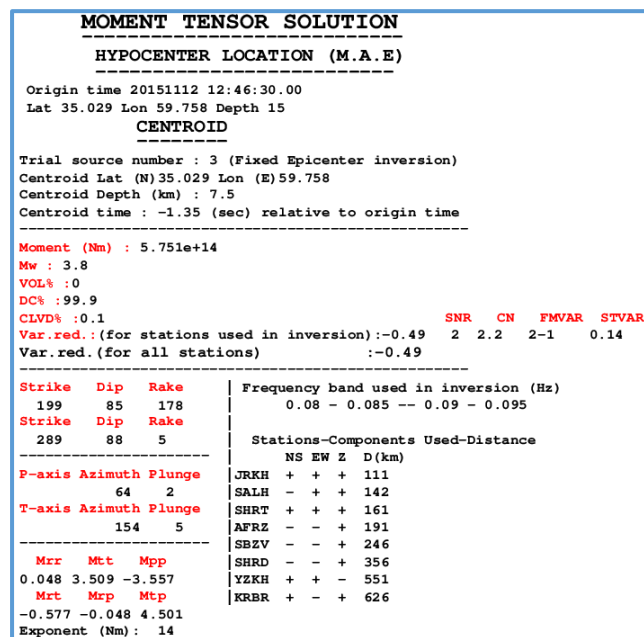
موج P اولین موجی است که به دستگاه لرزه سنج می‌رسد، لذا تشخیص قطبش آن به مراتب ساده تر است. این موج با انتشار در محیط، ذرات را در راستای انتشار فشرده یا منبسط می‌کند. به طوری که در محل فشردگی ذرات، قطبش موج P به طرف بالا و در محل انبساط ذرات، قطبش موج P به طرف پایین خواهد بود. با تعیین قطبش موج P در مجموعه‌ای از شکل موج‌ها که در ایستگاه‌های لرزه نگاری اطراف کانون زمین لرزه ثبت شده‌اند، صفحات گرهی را می‌توان تعیین کرد. با مشاهده مجموعه‌ای از

قطبش موج P در شکل موج ایستگاه‌های لرزه‌ای (حول چشمه) وضعیت هندسی (راستا و شیب) صفحات گرهی مشخص می‌شود، به طوری که این صفحات قطبش‌های مثبت و منفی را تفکیک می‌کنند. به دلیل تقارن کره کانونیو فرض معادل سازی کانون زمین لرزه با دو جفت نیرو (Double Couple=DC)، قطبش‌ها در نیمکره بالا (زوایای خروجی بیشتر از ۹۰ درجه) را به نیمکره پایین می‌توان منتقل کرد. بنابراین قطبش‌های مثبت و منفی را با خطوط گره‌ای به جای صفحات گره‌ای می‌توان در این مرحله از هم جدا کرد (حاجی میرزا علیان و همکاران، ۱۳۹۷). برای محاسبه سازوکار کانونی رویدادها از نرم افزار Win-Tensor (دلواکس و همکاران، ۱۹۹۷) استفاده شده است. نتایج محاسبه سازوکار کانونی ۲۱ رویداد لرزه‌ای در جدول ۲ و در ستون‌های سوم، چهارم و پنجم به ترتیب برای زاویه‌های راستا، شیب و بردار لغزش آورده شده است. شایان ذکر است برای محاسبه سازوکار کانونی در مطالعه حاضر حداقل ۶ و حداکثر ۳۳ پلاریته با توجه به کیفیت هر لرزه نگاشت ثبت شده در ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ سازوکارهای کانونی زمین لرزه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

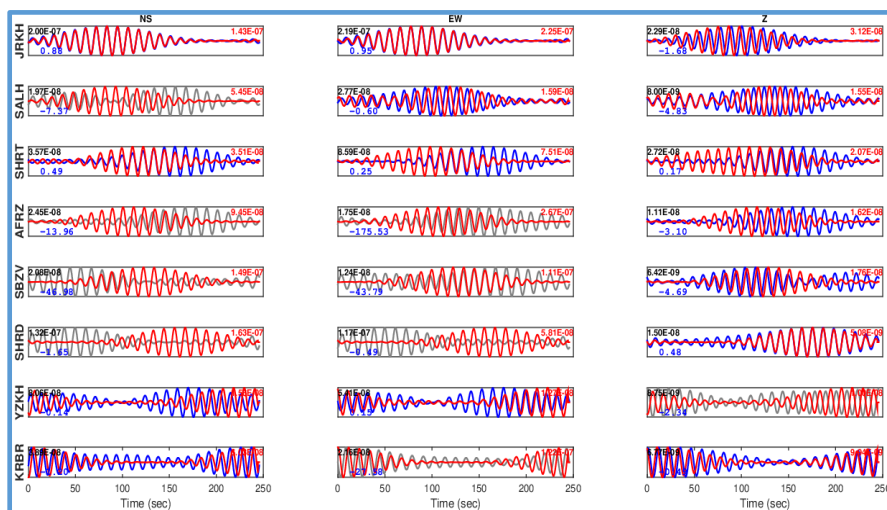
برای اطمینان از سازوکارهای محاسبه شده به روش پلاریته موج، زمین لرزه شماره ۲۰ جدول ۲ با بزرگی ۳/۸ برای حل تانسور گشتاور لرزه‌ای و تعیین سازوکار کانونی به روش مدل سازی شکل موج انتخاب شده است که نتایج پردازش آن در شکل‌های (۳ و ۴) نمایش داده شده است. با توجه به همخوانی نتایج از دو روش متفاوت، قابلیت اعتماد سازوکارهای کانونی محاسبه شده مورد تأیید قرار گرفته است.



شکل ۲. سازوکارهای کانونی محاسبه‌شده در این پژوهش برای زمین‌لرزه‌های دو دهه اخیر با بزرگی $M > 3$ ناشی از فعالیت گسل درونه.

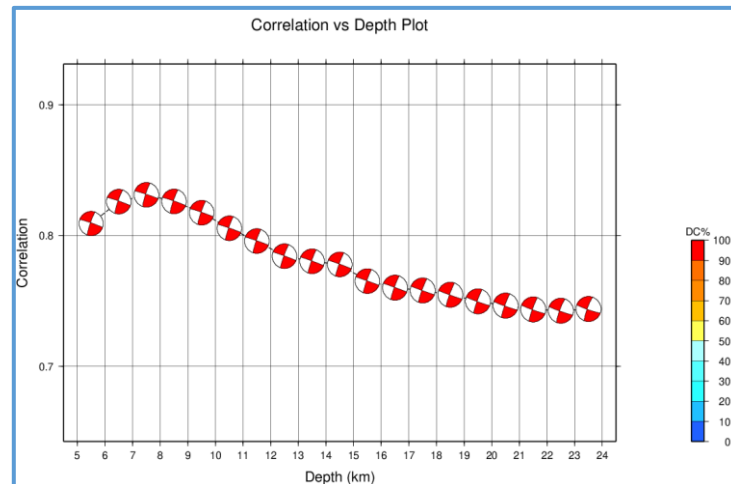


(الف)



(ب)

شکل ۳. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۱۵/۱۱/۱۲ با بزرگی $M_w=3.8$ و عمق ۱۵ کیلومتر بر اساس مدل‌سازی شکل موج. (الف) نتایج محاسبات برای دو صفحه اصلی و کمکی گسل و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در مدل‌سازی که با علامت مثبت مشخص شده‌اند؛ (ب) برازش شکل موج‌های تجربی ثبت‌شده در ایستگاه‌ها (رنگ آبی) با شکل موج‌های مصنوعی تولیدشده برای هر ایستگاه (رنگ قرمز). برخی از مؤلفه‌های لرزه نگاشت ایستگاه‌ها به‌خاطر کیفیت پایین نسبت سیگنال به نوفه در مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند (شکل موج‌های خاکستری رنگ) که در شکل (۳-الف) با علامت منفی مشخص شده‌اند.

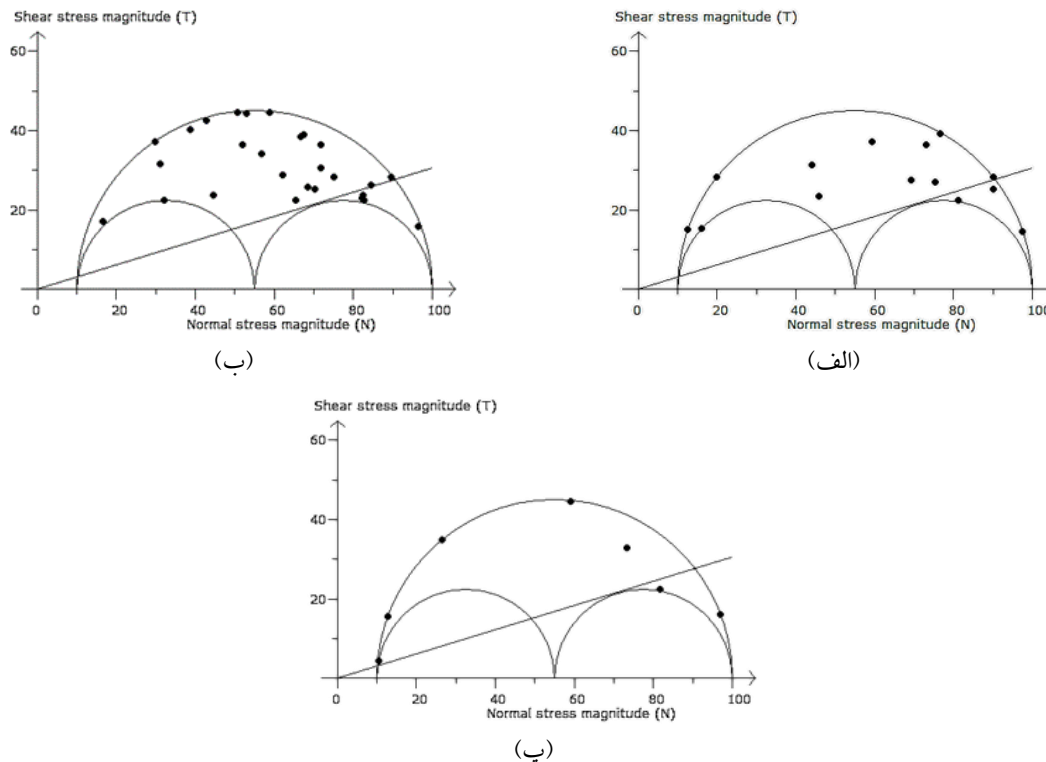


شکل ۴. میزان همبستگی بیش از ۸۲ درصد سازوکارکانونی با تغییرات عمق سنتروئید.

روی این صفحه‌ها مقدار مطلق تنش برشی حداکثر می‌باشد. بنابراین اندازه مطلق بیشینه تنش برشی همواره با شعاع دایره موهر تنش برابر می‌باشد. دایره موهر در حالت تنش سه بعدی، در سه راستای عمود بر هم تحت تأثیر تنش‌های σ_1 ، σ_2 و σ_3 قرار می‌گیرد که در راستای بردار عمود بر سه صفحه $\sigma_1\sigma_3$ ، $\sigma_2\sigma_1$ ، $\sigma_2\sigma_3$ می‌باشند. تنش‌های عمودی و برشی برای هر یک از این صفحات با استفاده از معادلات تنش دو بعدی قابل محاسبه هستند. با استفاده از معادلات تنش دو محوره، بیشینه تنش عمودی بر سطحی اثر دارد که عمود بر تنش σ_1 است و مقدار آن با σ_1 برابر می‌باشد. بیشینه تنش برشی بر روی دو سطحی است که با زاویه 45° درجه نسبت به تنش‌های بیشینه و کمینه قرار گرفته‌اند. مقادیر مطلق تنش بیشینه بر یک صفحه در فضای سه بعدی در دایره مور $\sigma_1-\sigma_3$ با زاویه $\theta = \pm 90^\circ$ قرار می‌گیرد. تنش‌ها در فضای فیزیکی روی صفحه‌های مزدوج تشکیل می‌شود که بردارهای عمودی آنها در صفحه $\sigma_1-\sigma_3$ قرار می‌گیرد و فصل مشترک صفحه‌ها با σ_2 موازی است و در نتیجه با زاویه $\theta = \pm 45^\circ$ نسبت به σ_1 قرار می‌گیرند (صمدی، ۱۳۹۳). با توجه به مطالب فوق، محاسبه‌های انجام شده در قسمت غربی، میانی و شرقی گسل درونه با استفاده از نرم افزار Win-Tensor محاسبه شده است که نتایج آن در شکل ۵ مشخص شده است.

تعیین جهت‌های تنش اصلی با استفاده از آرایش گسل‌ها و بردار لغزش بر روی آنها، به طور کلی بر اساس تئوری ارائه شده توسط اندرسون (۱۹۴۲) انجام می‌شود. فرمول‌بندی اولیه لغزش بر روی یک گسل با جهت گیری دلخواه در میدان تنش بر اساس والاس (۱۹۵۱) و بوت (۱۹۵۹) انجام شده است. منظور از تانسور تنش مشخص کردن اندازه و جهت محورهای اصلی تنش (σ_1 : بیشینه، σ_2 : میانه، σ_3 : کمینه) است که در پهنه گسلی با توجه به شرایط، سامانه‌ای از صفحات گسلی با شیب و راستای مختلف و با توجه به هر صفحه گسلی خط خش‌های مربوط به آن را تشکیل می‌دهد. زاویه عدم انطباق (misfit angle)، زاویه‌ای بین تنش برشی بیشینه محاسبه شده و خش لغز می‌باشد. جهت لغزش در یک صفحه (F) به جهت گیری هر سه محور اصلی تنش و نسبت R و جهت گیری ابتدایی صفحه گسل که از قبل تعیین شده، بستگی دارد (آنجلیه، ۱۹۷۹، ۱۹۸۴، ۱۹۸۹، ۱۹۹۰، ۱۹۹۴، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲).

دایره موهر روش آسانی برای حل مؤلفه‌های عمودی و برشی مؤثر بر صفحه‌ای با جهت گیری معین می‌باشد. یک شکستگی در دایره موهر با یک نقطه بر روی محیط دایره نمایش داده می‌شود. این نقطه تنش برشی بیشینه بر روی خط خش لغز را بیان می‌کند. تنش‌ها در صفحاتی که زاویه $\theta = \pm 45^\circ$ عمود بر آن‌ها با تنش σ_1 می‌سازد، در دایره موهر با محور σ_n زاویه $\theta = \pm 90^\circ$ تشکیل می‌دهد. در نتیجه بر



شکل ۵. الف) مشخصات دایره موهر بدون مقیاس در قطعه شرقی گسل درونه؛ ب) دایره موهر بدون مقیاس در قطعه میانی گسل درونه؛ پ) دایره موهر بدون مقیاس در قطعه غربی گسل درونه.

دست می‌آید.

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (۱)$$

نسبت R بین دو مقدار صفر تا یک متغیر است و بر اساس این تغییرات بیضوی تنش شکل‌های مختلفی به خود می‌گیرد. اگر مقدار $R=0/5$ باشد، در این صورت $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ تنش اصلی متوسط، میانگین دو تنش اصلی دیگر می‌باشد که از نظر بزرگی معادل تنش غیر انحرافی است. طبق تئوری اندرسون با قائم‌بودن σ_1 ، σ_2 و σ_3 به ترتیب کششی، راست‌الغز و تراکمی خواهد بود. اگر مقدار $R=0$ باشد، در این صورت $\sigma_2 = \sigma_3$ و شکل هندسی بیضوی تنش، محوری و کشیده خواهد بود. که با توجه به محورها، تراکمی شعاعی و انتقالی کششی خواهد بود. اگر مقدار $R=1$ باشد، در این صورت $\sigma_1 = \sigma_2$ می‌باشد و دایره موهر به‌طور ظاهری شبیه سامانه‌های دو محوری می‌باشد. سامانه تنش بر اساس مطالعه دلواکس و همکاران (۱۹۹۷) به صورت شاخص عددی R' بیان می‌شود. تنش‌های اصلی تابعی از

در چند سال اخیر انواع روش‌های وارون‌سازی تنش بیان شده است. در حالت کلی این روش‌ها به دو دسته گرافیکی و عددی تقسیم می‌شود. در روش دوجبه‌های عمود بر هم برای هر دسته از داده‌ها (وضعیت گسل و بردار لغزش) می‌توان صفحه گسلی و کمکی ترسیم کرد. صفحه کمکی عمود بر صفحه گسل است و از قطب گسل، و عمود بر بردار لغزشی سطح گسل می‌گذرد، تحت گسلش دو چارک فشاری و دو چارک کششی روبه‌روی هم قرار می‌گیرند. هر سطح گسل و خط لغزش روی آن یک دو وجهی عمود بر هم را تشکیل می‌دهد که محورهای تنش σ_1 و σ_3 به ترتیب نواحی فشارشی و کششی هستند.

شکل بیضوی تنش نقش مهمی در سازوکار گسل‌ها دارد که بهترین بیانگر وضعیت تنش سه‌بعدی در یک نقطه از جسم است که رابطه بین سه محور تنش توسط بیضوی تنش با عنوان نسبت تنش بیان می‌شود. به این ترتیب شکل بیضوی تنش از نسبت بین دو اختلاف تنش از رابطه (۱) به

لرزه‌نگاری، سازوکار گسلش مشخص می‌شود. روش‌های متعددی برای تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های قطبش اولین‌رسید موج P، نسبت دامنه‌های امواج P به S، تلفیق قطبش اولین‌رسید موج P و نسبت دامنه‌های امواج P به S و مدل‌سازی شکل موج و حل تانسور ممان لرزه‌ای اشاره کرد که در این پژوهش از برآورد سازوکار کانونی قطبش اولین‌رسید موج P استفاده شده است.

بررسی سازوکار زلزله‌ها در یافتن زمین‌ساخت فعال و میدان تنش به کار گرفته می‌شود. البته میدان تنش به دست آمده از مطالعه سازوکار زمین‌لرزه‌ها با در نظر گرفتن فرض‌هایی صحیح است و در این مطالعه این فرض‌ها چنین در نظر گرفته شده‌اند که گسل از پیش موجود در محدوده وجود نداشته باشد یا در صورت وجود هیچ فعالیتی نداشته باشد و لغزش بر روی صفحه‌های بهینه روی داده باشد و صفحه بهینه نیز دچار چرخش نشده باشد و تسهیم‌شدگی کرنش نیز در منطقه رخ نداده باشد. با در نظر گرفتن چنین فرضیاتی می‌توان گفت بیشینه محورهای کشش، فشردگی و خنثی به ترتیب با محور تنش لحظه‌ای T، P و B نشان داده می‌شود.

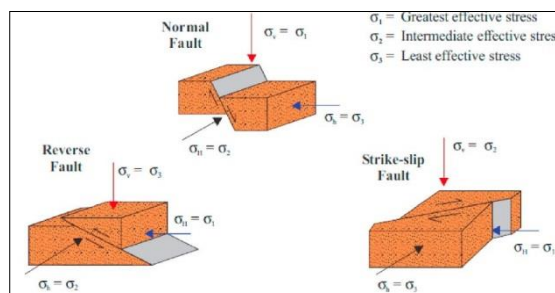
برای بیان وضعیت جنبایی گسلش در یک منطقه می‌توان مؤلفه‌های اصلی تنش را از میانگین محورهای PBT محاسبه کرد. با استناد به مطالعات پیشین لرزه زمین‌ساختی منطقه، سامانه گسلی درونه را به سه قطعه اصلی شرقی، میانی و غربی می‌توان تقسیم کرد. در این راستا رویدادهای دو دهه اخیر بررسی شده در پژوهش حاضر در سه دسته متناسب با سه قطعه اصلی سامانه گسلی درونه دسته‌بندی شده‌اند. در این پژوهش تفکیک داده لغزش گسلی با استفاده از PBT برای تعیین تانسور تنش با استفاده از نرم‌افزار Tensor-Win انجام گرفته است. نتایج حاصل از آن در محدوده مورد مطالعه در ستون‌های ششم الی یازدهم جدول ۲ ارائه شده است. میانگین محورهای PTB در امتداد سه قطعه غربی، میانی و شرقی سامانه گسلی درونه در شکل ۷ نمایش داده شده است.

جهت‌گیری محورهای اصلی تنش و شکل بیضوی تنش است. در صورتی که σ_1 قائم باشد، تنش کششی حکم‌فرما می‌باشد و تنش راستالغز زمانی که محور σ_2 قائم باشد و تنش فشارشی زمانی که σ_3 قائم باشد حاکم خواهد بود و مقادیر متفاوت R مشخص می‌شود. در صورتی که $R' = R$ باشد، σ_1 قائم و سامانه کششی خواهد بود و اگر $R' = 2 - R$ باشد سامانه راستالغز و σ_2 قائم خواهد بود و اگر $R' = 2 + R$ باشد، سامانه فشارشی و σ_3 قائم خواهد بود (شکل ۶).

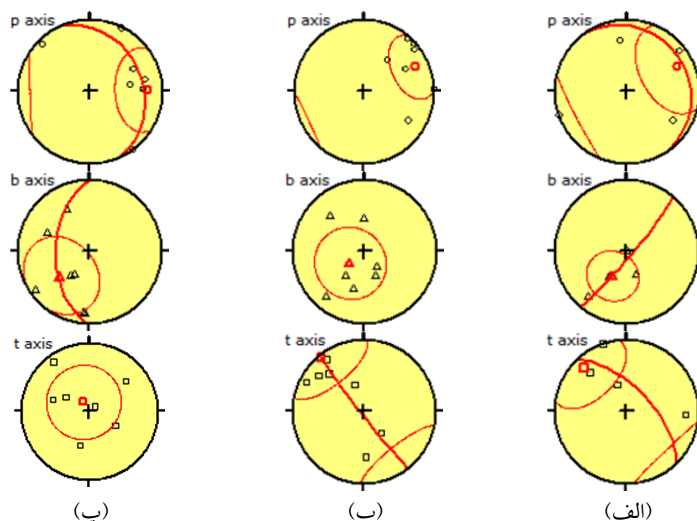
با استفاده از داده‌های لغزشی گسلی محورهای فشارش و کشش را می‌توان مشخص کرد. اگر به صورت تقریبی محور P برابر با محور σ_1 و محور T برابر با محور σ_3 در نظر گرفته شود، با استفاده از داده‌های لغزشی گسلی تنش کاهش‌یافته را می‌توان به دست آورد (اسپرر و همکاران، ۲۰۰۳). در این صورت محورهای PBT حرکت مجموعه‌ای از گسل‌هایی که به طور تقریبی جهت‌گیری یکسانی دارند را نشان می‌دهند که در یک قسمت قرار می‌گیرند و در نتیجه خوشه‌های مختلف تفکیک می‌شوند.

۳. تعیین تنش با استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها

استفاده از سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها، اطلاعاتی در مورد جهت و بزرگی نسبی تنش در پوسته ارائه می‌دهد، به طوری که بیشتر اطلاعات مورد استفاده برای تهیه نقشه جهانی تنش در برابر تانسور تنش از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها به دست می‌آید. بدین ترتیب که محورهای تنش با استفاده از اطلاعات مربوط به سازوکار کانونی فعالیت‌های لرزه‌ای شامل رویدادهای اصلی، پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های آنها محاسبه می‌شود. زمین‌لرزه‌ها با گسیختگی لایه‌های زمین همراه هستند، در اکثر مواقع گسیختگی به سطح زمین می‌رسد بررسی و اندازه‌گیری جابه‌جایی اثر سطحی گسلش، تعیین سازوکار را امکان‌پذیر می‌کند، اما در صورتی که گسیختگی به سطح زمین نرسد، با استفاده از لرزه نگاشت‌های ایستگاه‌های



شکل ۶. سه حالت مختلف تنش و گسلش (بقا دشتکی و همکاران، ۲۰۲۱).



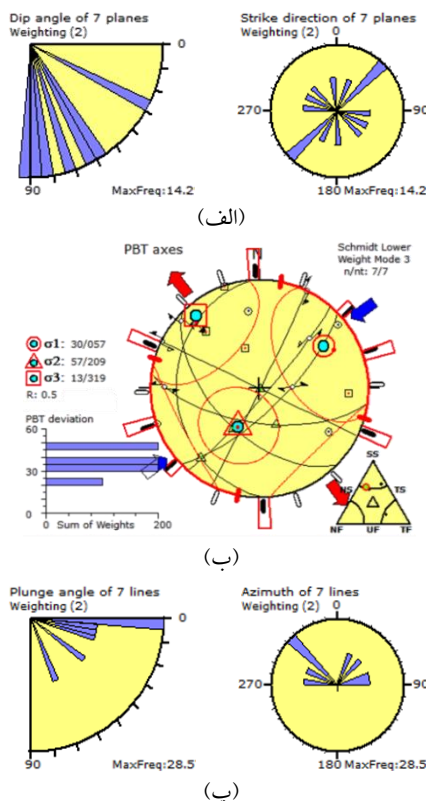
شکل ۷. محورهای PBT در (الف) قطعه غربی گسل درونه؛ (ب) قطعه میانی گسل درونه و (پ) قطعه شرقی گسل درونه.

جدول ۲. سازوکار کانونی و محاسبه تعیین صفحات PBT رویدادهای دو دهه اخیر در راستای گسل درونه.

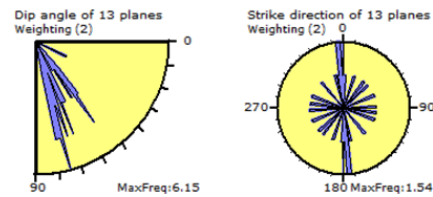
شماره	تاریخ وقوع رویداد	صفحه گسل			محورهای جنبش‌شناسی					
		Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	P		B		T	
					Azim. (°)	Incl. (°)	Azim. (°)	Incl. (°)	Azim. (°)	Incl. (°)
۱	۲۰۱۰/۰۴/۱۲	۳۱۶	۸۰	۲۸	۸۶	۱۲	۳۳۴	۶۰	۱۸۲	۲۷
۲	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۲۲۵	۴۵	۷۷	۱۴۴	۰	۲۳۴	۹	۵۱	۸۱
۳	۲۰۱۱/۰۴/۲۳	۳۰۱	۹۰	۷۳	۴۷	۴۳	۳۰۱	۱۷	۱۹۵	۴۳
۴	۲۰۱۱/۰۷/۰۳	۱۱۶	۹۰	۰	۲۵۱	۱	۱۱۷	۸۹	۳۴۱	۱
۵	۲۰۱۱/۰۹/۰۵	۱۷۷	۲۵	۴۴	۱۲۲	۲۶	۲۲۰	۱۸	۳۴۱	۵۸
۶	۲۰۱۱/۱۲/۰۱	۳۲۱	۷۶	۵۵	۷۷	۲۳	۳۳۱	۳۴	۱۹۵	۴۷
۷	۲۰۱۲/۰۱/۰۱	۱۳۶	۴۱	۰	۱۰۲	۳۱	۲۲۴	۴۱	۳۴۹	۳۳
۸	۲۰۱۲/۰۵/۱۹	۳۳۸	۷۹	۴۴	۵۷	۴۲	۱۶۶	۲۰	۲۷۵	۴۲
۹	۲۰۱۲/۰۷/۰۴	۲۹۹	۷۵	۷۳	۲۸	۲۸	۳۰۴	۱۷	۱۸۶	۵۷
۱۰	۲۰۱۲/۰۷/۳۰	۹۵	۱۴	۰	۸۰	۴۳	۱۸۴	۱۴	۲۸۸	۴۳
۱۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۰	۱۸۶	۷۴	۲۸	۳۱۵	۷	۲۱۳	۵۸	۵۰	۳۱
۱۲	۲۰۱۲/۱۰/۰۲	۳۱۹	۶۳	۲۸	۸۸	۰	۳۵۸	۵۳	۱۷۸	۳۷
۱۳	۲۰۱۳/۰۶/۲۸	۹۸	۵۸	-۱۶	۶۲	۳۳	۲۱۷	۵۴	۳۲۴	۱۲
۱۴	۲۰۱۳/۰۷/۱۵	۲۹۰	۵۵	۵۰	۴۷	۲	۳۱۶	۳۲	۱۴۱	۵۸
۱۵	۲۰۱۴/۰۱/۳۰	۱۴۲	۲۲	۴۴	۸۷	۲۸	۱۸۶	۱۶	۳۰۱	۵۷
۱۶	۲۰۱۵/۰۵/۱۰	۶۷	۵۲	-۲۷	۳۷	۴۴	۱۹۶	۴۵	۲۹۷	۱۱
۱۷	۲۰۱۵/۰۵/۰۵	۸۶	۷۲	۱۳	۴۰	۴	۱۴۰	۶۸	۳۰۸	۲۱
۱۸	۲۰۱۵/۰۵/۱۳	۹۸	۶۴	۱۶	۵۱	۸	۱۵۵	۶۰	۳۱۷	۲۹
۱۹	۲۰۱۵/۰۸/۰۹	۲۵۴	۵۰	-۸۰	۲۱۶	۸۱	۶۸	۷	۳۳۷	۵
۲۰	۲۰۱۵/۱۱/۱۲	۲۸۸	۸۹	۶	۶۳	۴	۲۹۷	۸۴	۱۵۳	۵
۲۱	۲۰۱۶/۱۰/۲۵	۴۱	۸۴	-۳۵	۳۵۲	۲۹	۲۱۳	۵۴	۹۳	۱۹

از میان دو صفحه گرهی در حل سازوکار صفحه گسل یکی از مسائل اصلی وارون سازی تانسور تنش زمین لرزه ها است. در این پژوهش به منظور وارون سازی داده های سازوکار کانونی زمین لرزه ها، از روش (آنجلیه و میچل، ۱۹۷۷) که در آن نقاط کششی و فشارشی برای تمام صفحات گسل تعیین می شود و سپس مقدار R متناسب با بردار لغزش در هر صفحه گسل محاسبه می شود و امکان تعیین صفحه مناسب را فراهم می کند که در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار Win-Tensor این فرایند انجام شده است و نتایج حاصل از محاسبه تنش در سه قطعه غربی، میانی و شرقی گسل درونه به همراه سازوکارهای محاسبه شده با روش های بیان شده برای زمین لرزه های مورد مطالعه در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ و جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر آن، نمودار طرح واره تنش های میانگین محاسبه شده برای سه قطعه گسلی درونه در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

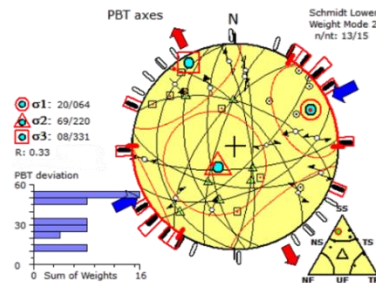
فرضیات مختلفی پیرامون استفاده از سازوکار کانونی زمین لرزه ها برای تعیین میدان تنش مطرح شده است. نخست فرض می شود که سازوکار تعیین شده در یک منطقه با یک میدان تنش یکنواخت در زمان و مکان ثابت است. دیگر این که در زمین لرزه ها جهت لغزش برپایه فرضیه والاس (۱۹۵۱) در جهت بیشینه تنش برشی رخ می دهد. به باور مکنزی (۱۹۶۹) تانسور تنش پوسته ای را با استفاده از سازوکار کانونی یک زمین لرزه به طور قطعی نمی توان به دست آورد؛ به این خاطر که امکان دارد سازوکار کانونی زمین لرزه مورد نظر دارای خطای بالایی باشد یا اساساً از نظر راستای نیروهای وارده با راستای تنش های منطقه ای تفاوت داشته باشد. بنابراین انجام یک مرحله وارون سازی برای محاسبه تانسور تنش از میانگین سازوکارهای تعدادی زمین لرزه ضرورت دارد. در این پژوهش هدف ما تمام سازوکارهای محاسبه شده در محدوده غربی، میانی و شرقی گسل درونه است. انتخاب درست صفحه گسل



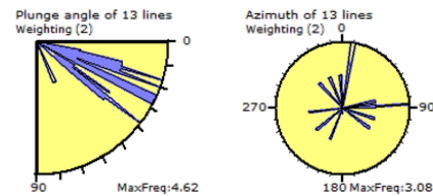
شکل ۸. الف) نمودار گل سرخی راستا و شیب گسل را در غرب گسل درونه نشان می دهد؛ ب) موقعیت محورهای اصلی تنش مربوط به غرب گسل درونه که روند بیشینه محور فشاری در این محدوده شمال شرقی-جنوب غربی است؛ پ) نمودار گل سرخی روند و میل خش لغزش گسلی در غرب گسل درونه.



(الف)

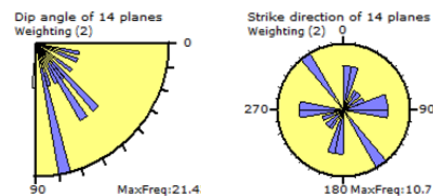


(ب)

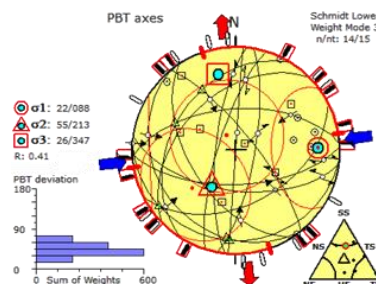


(پ)

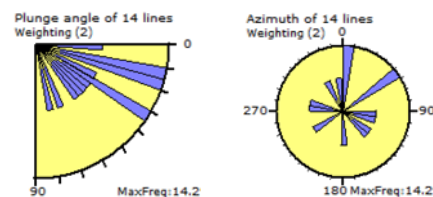
شکل ۹. الف) نمودار گل‌سرخ‌ی راستا و شیب گسل را در قسمت میانی گسل درونه نشان می‌دهد؛ ب) موقعیت محورهای اصلی تنش مربوط به قسمت میانی گسل درونه که روند بیشینه محور فشاری در این محدوده شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است؛ پ) نمودار گل‌سرخ‌ی روند و میل خشل‌غز گسلی در قسمت میانی گسل درونه.



(الف)



(ب)

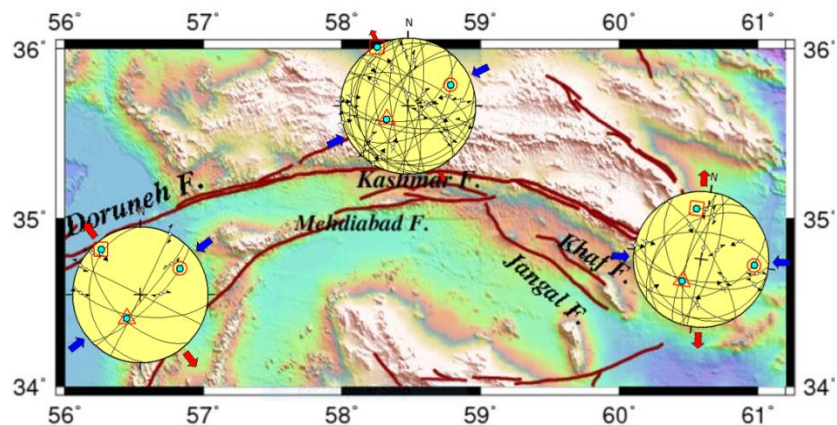


(پ)

شکل ۱۰. الف) نمودار گل‌سرخ‌ی راستا و شیب گسل در شرق گسل درونه را نشان می‌دهد؛ ب) موقعیت محورهای اصلی تنش مربوط به شرق گسل درونه که روند بیشینه محور فشاری در این محدوده شرقی-غربی است؛ پ) نمودار گل‌سرخ‌ی روند و میل خشل‌غز گسلی در شرق گسل درونه.

جدول ۳. موقعیت محوره‌های تنش و فراسنج شکل میدان تنش در سه قطعه غربی، میانی و شرقی گسل درونه.

R	σ_3		σ_2		σ_1		
	Plunge (°)	Trend (°)	Plunge (°)	Trend (°)	Plunge (°)	Trend (°)	
۰/۵	۱۳	۳۱۹	۵۷	۲۰۹	۳۰	۰۵۷	Phaz1 Western
۰/۳۳	۰۸	۳۳۱	۶۹	۲۲۰	۲۰	۰۶۴	Phaz2 Middle
۰/۴۱	۲۶	۳۴۷	۵۵	۲۱۳	۲۲	۸۸	Phaz3 Eastern



شکل ۱۱. بردار محوره‌های تنش اصلی به تفکیک در سه بخش غربی، میانی و شرقی گسل درونه.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب بیان‌شده در این پژوهش، بررسی وضعیت تنش بر اساس سازوکار کانونی رویدادها با قطبش (قطبش) اولین رسید موج P، از نوع سازوکار راستالغز درپهنه غربی، میانی و شرقی گسل درونه به‌طور کامل مشهود می‌باشد. با توجه به محوره‌های تنش به‌دست آمده در بخش‌های میانی و غربی، راستای شمال شرق-جنوب غرب و بخش شرقی راستای شرقی-غربی دارد. این نتایج با مطالعه رشیدی و همکاران (۲۰۲۲) نیز همخوانی دارد. تلفیق داده‌ها دقت بالایی را در محاسبه سازوکار و اطمینان هرچه بیشتر پیرامون نتایج را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که محوره‌های تنش تغییراتی را در بخش شرقی نشان می‌دهد، نمایانگر میدان‌های تنش مرتبه دوم و سوم می‌تواند باشد که امروزه تنش را در این پهنه تعدیل می‌کنند. معمولاً تنش مرتبه دوم در ارتباط با ریف‌شدگی قاره‌ای، سازگاری ایزوستازی، توپوگرافی و یخ‌زدایی و میدان تنش مرتبه سوم با چشمه تنش محلی در مقیاس کوچک‌تر از ۱۰۰ کیلومتر می‌تواند مرتبط باشد، که تحت تأثیر هندسه ساختاری، تداخل بین سامانه‌های گسلی، توپوگرافی و اختلاف چگالی محلی ایجاد می‌شود.

(شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۲۰۲۱)، که تغییر محور تنش بیشینه در بخش شرقی ممکن است در اثر نزدیکی به گسل راستالغز راست‌بر هرات و تداخل ساختاری ایجاد شده باشد و از سوی دیگر ممکن است در شمال بخش شرقی چگالی مواد بالا باشد که موجب تغییر راستای بخش شرقی گسل درونه و محور تنش بیشینه در این محدوده شده باشد. در پهنه گسلی درونه میکروورقه‌های کوچکی وجود دارد که در پهنه گسلی درونه گرفتار آمده‌اند و سامانه‌های متفاوتی دارند که در مطالعه‌های در مقیاس محلی مشاهده می‌شوند (نوزعیم و همکاران، ۲۰۱۳) و از آن جمله می‌توان به بخش میانی گسل چپ‌بر درونه اشاره کرد که سامانه‌های راست‌بر کوه سرهنگی و کوه فغان در نتیجه فرار نسبی به سمت شرق طی کواترناریجاد شده‌اند.

تشکر و قدردانی

از مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد برای دراختیار

P. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۲(۳)، ۱۴۴-۱۲۲.

حسامی، خ؛ طبسی، ه. و جمالی، ف. (۱۳۸۲). نقشه گسل‌های جنوب در ایران، انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

حسامی، خ؛ طبسی، ه. و مبین، پ. (۱۳۹۰). نقشه رقومی گسل‌های جنوب در ایران، انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

صمدی، ز. (۱۳۹۳). تعیین تنش دیرین بر مبنای تحلیل لغزش گسل و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در ناحیه سبلان، پایان نامه کارشناسی/ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، ۱۸۶ص.

عباسی، م. ر؛ شبانیان، ا. و مبین، پ. (۱۳۸۹). بررسی زمین‌ساخت فعال در شمال خاور ایران: بینالود و کپه‌داغ. گزارش پژوهشی شماره ۵۱۱۷-پ ۸۹-۲۲، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

عصار عنایتی، م. (۱۴۰۰). ارزیابی پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های مهم پهنه خراسان بر اساس مدل‌سازی تانسور ممان لرزه‌ای، پایان نامه کارشناسی/ارشد زلزله‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۹۱ص.

نبوی، م. (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹ص.

قراردادن داده زمین‌لرزه‌های این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. از سردبیر و داوران محترم برای نقدها و راهنمایی‌های سازنده آنها قدردانی می‌شود. خانم دکتر سمیه احمدزاده به‌عنوان پژوهشگر پسادکتری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره طرح ۲۸۴۹۰۲۹۹ برخوردار بوده است.

منابع

توکلی، ر؛ آقائباتی، س. ع؛ (۱۳۸۸). بررسی و مقایسه رسوبات کرتاسه زیرین در دو حوضه رسوبی کپه داغ و ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین، ۱۹(۷۳)، ۱۱۵-۱۲۲.

جوادی کاریزکی، ح. ر. (۱۳۸۵). زمین‌ساخت جنوب، لرزه زمین‌ساخت و تحلیل سامانه گسل درونه، پایان نامه کارشناسی/ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، ۲۰۹ص.

حاجی میرزاعلیان، ف؛ حاتمی، م. و ملکی، و. (۱۳۹۷). تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با بزرگی $2 \leq M_n \leq 5$ در منطقه البرز با استفاده از قطبش اولین رسید موج P و نسبت دامنه موج S به دامنه موج

Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8), 983-992. <https://doi.org/10.1130/0016-7606, 1991.103>

Anderson, E. M. (1942). The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain: Oliver and Boyd, Edinburgh, 191 p.

Angelier, J., & Mechler, P. (1977). Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalment utilisable en tectonique et en seismologie: La methode des diedres droits. *Bulletin de Societe Geologique de France*, 19, 1309-1318.

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. *Journal of Geophysical Research*, 89, 5835-5848.

Angelier, J. (1989). From orientation to

magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *J. struct. Geol.*, 11, 1/2, 37-50.

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.

Angelier, J. (1994). Fault Slip Analysis & Paleostress reconstruction In Hancock, P. I. *Continental Deformation*, pergamon press Ltd. chapter 4, 53-100.

Angelier, J. (1998). A new direct inversion of earthquake focal mechanisms to reconstruct the stress tensor, Proc. EGS XXIII Gen. Assembly. *Annales Geophysicae*, 16, suppl. 1, C115.

Angelier, J. (2002). Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choices among nodal planes. *Geophys J. Int.*, 150, 588-609.

Bagheri, S., & Damani Gol, Sh. (2020). The

- Eastern Iranian Orocline. *Earth-Science Reviews*, 210, 103322. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103322
- Bagheri, S., & Stampfli, G. M. (2008). The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in Central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications. *Tectonophysics* 451, 123–155. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.047>.
- Berberian, M. (2014). Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian Plateau. A historical, social, and physical approach. Oxford, UK: Elsevier. *Developments in Earth Surface Processes*, 17, 714 p.
- Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11), 1764–1766. <https://doi.org/10.1139/e81-163>
- Bott, M.H.P. (1959). The mechanisms of oblique slip faulting. *Geol. Mag*, 96, 109–117.
- Carey, E., & Brunnier, M. B. (1974). Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique. l'etude d'une population de failles. *C. R. Acad. Sci. Paris D*, D179, 891-894.
- Bagha Dashtaki, B., Lashkaripour, Gh., Ghafoori, M., & Hafezi Moghaddas, N. (2021). Numerical modeling of casing collapse in Gachsaran formation in Sirri-E oilfield in Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, Doi:10.1016/j.petrol.2020.108009.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., & Levi, K. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic tectonic stress and fault kinematics. *Tectonophysics*, 282(1-4), 1-38.
- Farbod, Y., Bellier, B., Shabanian, E., & Abbassi, M.R. (2011). Geomorphic and structural variations along the Doruneh Fault System (central Iran). *Tectonics*, 30, TC6014, doi: 10.1029/2011TC002889.
- Farbod, Y., Shabanian, E., Bellier, O., Abbassi, M. R., Braucher, R., Benedetti, L., Bourlès, D., & Hessami, K. (2016). Spatial variations in late Quaternary slip rates along the Doruneh Fault System (Central Iran). *Tectonics*, 35(2), 386–406. <https://doi.org/10.1002/2015TC003862>.
- Fattahi, M., Walker, R. T., Khatib, M. M., Dolati, A., & Bahroudi, A. (2007). Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 168, 691–709.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, S.A., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., Aghamohammadi, A., & Alijanzadeh, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophys. J. Int.*, 217, 832–843.
- 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.
- Mohajer-Ashjai, A., Behzadi, H., & Berberian, M. (1975). Reflections on the rigidity of the Lut Block and recent crustal deformation in eastern Iran. *Tectonophysics*, 25, 281-301.
- Mousavi, Z., Fattahi, M., Khatib, M., Talebian, M., Pathier, E., Walpersdorf, A., Alastair Sloan, R., Alexander L.T., Rhodes, E.D., Clive, F., Dodds, N., & Walker, R.T. (2021). Constant slip rate on the Doruneh strike-slip fault, Iran, averaged over late Pleistocene, Holocene, and decadal timescales. *Tectonics*, 40, e2020TC006256. <https://doi.org/10.1029/2020TC006256>.
- Muttoni, G., Mattei, M., Marco, B., Zanchi, A., & Berra, F. (2009). The drift history of Iran from the Ordovician to the Triassic. *Geological Society London Special Publications*, 312(1), 7-29.
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Rossetti, F., Della, M., Vignaroli, G., Yassaghi, A., & Eliassi, M. (2013). Post-Neogene right-lateral strikeslip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran. *Tectonophysics*, 589, 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.001>.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.Y., Chu, C.H., Lee, H.Y., & Lo, C.H., (2013). Eocene-Oligocene post-collisional magmatism in the Lut-Sistan region, eastern Iran: Magma genesis and tectonic implications. *Lithos*. 180–181, 234–251. Doi:10.1016/j.lithos.2013.05.009.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Yang, H.M., Chu, C.H., Lee, H.Y., & Lo, C.H., (2012). Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chem. Geol.* 306–307, 40–53. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.020.
- Rashidi, A., Kianimehr, H., Yamini-Fard, F., Tatar, M., & Zafarani, H. (2022). Present Stress Map and Deformation Distribution in the NE Lut Block, Eastern Iran: Insights from Seismic and Geodetic Strain and Moment Rates. *Pure Appl. Geophys.*, 179 (2022), 1887–1917. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03015-x>.
- Sheikholeslami, M.R., Mobayen, P., Javadi, H.R., & Ghassemi, M.R. (2021). Stress field and

- tectonic regime of Central Iran from inversion of the earthquake focal mechanisms. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2021.228931.
- Sperner, B., Muller, B., Heidbach, O., Delvaux, D., Reinecker, J. & Fuchs, K. (2003). Tectonic stress in the Earth's crust: advances in the World Stress Map project. In: NIEUWLAND, D. A. (ed.) *New Insights into Structural Interpretation and Modelling. Geological Society, London, Special Pub.*, 212, 101-116.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C., Khodabakhshi, P., & Frassi, C. (2018). The long-term evolution of the Dorouneh Fault region (Central Iran): A key to understanding the spatio-temporal tectonic evolution in the hinterland of the Zagros convergence zone. *Geological Journal*, doi:10.1002/gj.3241
- Tchalenko, J. S. (1973). The Kashmar (Turshiz) 1903 and Torbat-e Heidariyeh (south) earthquakes in Central Khorassan (Iran), *Ann. Geofis.*, 26(1), 29–40.
- Wallace, R.E. (1951). Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Structural Geology*, 59 (2), 118-130.
- Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., Hatzfeld, D., Aghamohammadi, A., Bigot, A., Djamour, Y., Nankali, H., & Sedighi, M. (2014). Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1359–1383. Doi: 10.1002/2013JB010620.