

برآورد سازوکار زمین‌لرزه‌ها در گستره لرزه‌ای پیرامون شهرهای کرمان و شیراز

فاطمه نقدی دودران^۱ و مجید نعمتی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و مرکز پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

نویسنده مسئول: nematimajid_1974@uk.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۷

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲

چکیده

داده‌های مورد نیاز برای حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش از هم‌آمیخت داده‌های شکل موج موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گردآوری شده‌اند. پس از ویرایش داده‌ها از روش قطبش‌های نخستین موج P رسیده به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری باند پهن، بلند دوره و هم‌چنین کوتاه دوره برای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها بهره گرفته شد. خطای کانون‌یابی این زمین‌لرزه‌ها نزدیک به ۵ کیلومتر بوده و بیشینه چرخش صفحه‌های گرهی در سازوکارهای کانونی ۵ درجه در نظر گرفته شد. این سازوکارها با کمترین خطا در شمار قطبش‌ها برای سازوکارهای زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای پرجمعیت و مهم کرمان و شیراز پردازش شده‌اند. برپایه‌ی حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های گلباف، کوهبنان و رفسنجان دارای سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با مولفه معکوس و گسل سروستان دارای سازوکار چیره‌ی معکوس خالص می‌باشند. زمین‌لرزه‌ها در پیرامون شهر شیراز بیش‌تر در نزدیکی سامانه گسلی سبزپوشان، کره‌بس و گسل برازجان پراکنده شده و پراکندگی زمین‌لرزه‌ها در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس و گودال زاگرس (Zagros foredeep) بیش‌تر بوده و گستره زاگرس فراخاسته خالی از زمین‌لرزه است. سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های در این پژوهش نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد به گسل کره‌بس وابسته هستند. زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد و معکوس نیز به گسل سبزه‌واران و زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد با راستای گسلی شمالی- جنوبی به گسل سبزپوشان وابسته هستند. زمین‌لرزه‌هایی نیز روی داده‌اند که سازوکار رو کانون آن‌ها با هیچ گسلی در گستره هم‌خوانی ندارد. در تفسیر زمین‌لرزه‌های همه نقشه‌ها بایستی خطای روکانون زمین‌لرزه‌ها را نیز در نظر گرفت. این خطا باتوجه به فاصله میان ایستگاهی ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری در برخی از زمین‌لرزه‌ها می‌تواند تا ده کیلومتر نیز برسد. سازوکار برخی از این گسل‌ها که در کارهای (زمین‌شناسی یا لرزه‌شناسی) پیشین بررسی شده بودند، با سازوکار حل شده این پژوهش هم‌خوانی دارند.

واژه‌های کلیدی: سازوکار، زمین‌لرزه، کرمان، شیراز، گسل

۱- پیشگفتار

بیشتر انرژی جنبشی به‌گونه‌ی دگرشکلی‌های بی‌لرزه رخ می‌دهد و تنها نزدیک به ۱۰٪ از آزاد شدن تنش (به‌ویژه در زاگرس) به‌صورت لرزه‌ای و همراه با زمین‌لرزه است (جکسون و مکنزی، ۱۹۸۴).

از آن‌جایی که کانون بیشتر تمدن‌های ایرانی (و هم‌چنین جهانی) روی گسل‌ها واقع شده‌اند، زمین‌لرزه‌های ایران در گذشته و حال یکی از منابع خطر برای زیستگاه‌های انسان در بیش‌تر نقاط این سرزمین بوده‌اند. تمرکز روکانون زمین‌لرزه‌ها بیشتر در راستای گستره زاگرس در جنوب و جنوب‌باختر، راستای کپه‌داغ- قفقاز در شمال- شمال‌خاور، راستای رشته کوه‌های البرز، شمال‌لوت و هم‌چنین در خاور ایران قابل بررسی می‌باشد. هم‌خوانی روکانون زمین‌لرزه‌های ایران با روندهای مهم موجود میان پستی‌ها

کشور ایران یکی از لرزه‌خیزترین کشورهای جهان و بخشی از بزرگ‌ترین گستره‌های دگرریختی هم‌گرا در زمین (کمربند کوه‌زایی آلپ-هیمالیا) است (شکل ۱). پوسته ایران زمین در نتیجه واگرایی دریای سرخ و حرکت رو به شمال خاور ورقه عربستان و برخورد صفحات عربی و اوراسیا تحت فشارش قرار گرفته است. کوتاه‌شدگی و ستبرشدگی پوسته‌ای در این گستره‌ی برخوردی سبب تشکیل کمربند کوه‌های قفقاز، زاگرس، البرز، کپه‌داغ، زون راست‌الغز همراه با خم‌های فشاری در خاور و فرورانش مکران در فلات ایران شده است. وجود این پهنه‌های فشاری جنبا موجب می‌شود که زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگی همواره در این گستره‌ها روی دهند. هرچند که

سازوکار زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های چندگانه ۲۰۱۷ هجری را حل کرده‌اند. سازوکار این زمین‌لرزه‌ها که در ۵۰ کیلومتری شمال خاوری کرمان روی دادند، بیشتر معکوس بوده است. این کارها از تنها کارهای نزدیک به موضوع این پژوهش در گستره‌های در دست بررسی بوده و در پیرامون نزدیک‌تر به شهرهای کرمان و شیراز سازوکار زمین‌لرزه‌ای حل نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

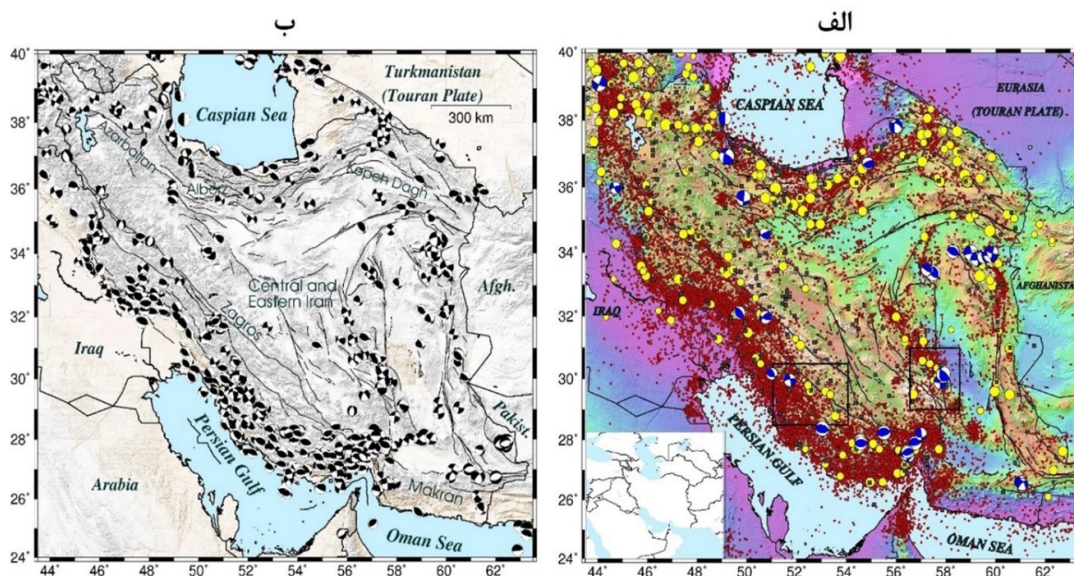
۲-۱- داده‌های لرزه‌ای و روش پردازش

در این پژوهش در نقشه‌ها، گسل‌های اصلی از کار حسامی و همکاران (۲۰۰۳) و گسل‌های فرعی از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی برگرفته شده‌اند. برای حل سازوکار قابل قبول یک زمین‌لرزه با خطای کم، پراکندگی مناسب ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری در پیرامون روکانون زمین‌لرزه لازم است. به کمک داده‌های قطبش این ایستگاه‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های گزینش شده پردازش خواهند شد. پراکندگی ایستگاه‌ها در پیرامون شهرهای شمالی ایران مانند تبریز، تهران و مشهد خوب، پراکندگی این ایستگاه‌ها در پیرامون شهر کرمان قابل قبول و این پراکندگی پیرامون شهر شیراز چندان خوب نیست. زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی در پیرامون همه شهرهای بررسی شده، به‌ویژه شهرهای کرمان و شیراز وجود دارند. زمین‌لرزه‌های برداشت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران همان‌گونه که از لرزه‌زمین‌ساخت گستره انتظار می‌رود، در زاگرس و پیرامون شهر شیراز فشردگی بیشتری دارند.

هم‌خوانی مکانی پراکندگی زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی با شهرها یک امر طبیعی است، چون داده‌های تاریخی برای بررسی این زمین‌لرزه‌ها به کار برده می‌شوند. این داده‌ها نیز در مستندات تاریخی آمده که از شهرهای قدیمی و باستانی گردآوری شده است. شکل ۱ الف و ب به ترتیب، زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5/5$)، تاریخی (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲) و شهرهای ایران و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5/5$) ایران را از جکسون، (۱۹۹۵) و (GCMT) نمایش می‌دهند. پراکندگی کم زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی در مرکز و جنوب خاوری ایران شایان توجه است.

و بلندی‌ها بسیار جالب توجه است. توجه به داده‌های نگاشته شده در سال‌های پس از ۱۹۶۰ میلادی نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های زاگرس با بزرگای کمتر و فراوانی بیشتر نسبت به زمین‌لرزه‌های البرز و ایران مرکزی رخ داده‌اند (نعمتی، ۲۰۱۵). روکلون و سازوکار زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای بزرگ در بررسی خطر لرزه‌ای در این شهرها بسیار مهم هستند. پروژه حل تانسور ممان جهانی^۱ و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها می‌پردازند. زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴ تا ۵ از دسته زمین‌لرزه‌هایی هستند که سازوکار همه آن‌ها توسط نهادهای علمی وابسته حل نمی‌شود، همچنین موسسه ژئوفیزیک نیز از سال ۲۰۱۲ کاتالوگ خود را آغاز نموده است. در این پژوهش سازوکار زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای بزرگ با بزرگای ۴ تا ۶ حل شده و همراه با دیگر سازوکار زمین‌لرزه‌های پیشین روی نقشه‌ها آورده و تفسیر می‌شوند. این پژوهش با توجه به تاثیر کلیدی و مهمی که سازوکار کانونی زمین‌لرزه در بررسی‌های خطر زمین‌لرزه با روش‌های مختلف دارد، انجام شده است. در این پژوهش کوشش بر این بوده که شهرهای گزینش شده برای بررسی سازوکارها، در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران پراکندگی و اهمیت یکسانی داشته باشند. در گستره جنوبی ایران در پیرامون شهرهای بررسی شده در این پژوهش (کرمان و شیراز)، چند کار لرزه‌شناسی انجام شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. کار فاطمی و همکاران، (۲۰۱۱) که یک بررسی خردلرزه‌خیزی با شبکه لرزه‌نگاری محلی بود، نشان داد که خردلرزه‌های وابسته به گسل گلباف در ۵۰ کیلومتری خاور شهر کرمان پیش از سال ۱۹۹۸ یک شیب تقریباً قائم برای گسل پیشنهاد می‌کنند. اخلاص‌پور و همکاران، (۱۴۰۱) نیز خطر لرزه‌ای را در استان کرمان بررسی کرده و در این بررسی گستره گسلی گلباف و جنوب استان را پرخطر معرفی نموده‌اند. تلتار و همکاران (۲۰۰۵) به کمک یک شبکه لرزه‌نگاری محلی روی لرزه‌خیزی و سازوکار زمین‌لرزه‌های گستره قیر و کارزین در جنوب خاوری شیراز کار کرده‌اند. در این بررسی‌ها سازوکار زمین‌لرزه‌ها و گسل‌ها در این گستره راست‌الغز راست‌بر و معکوس به‌دست آمده است. نعمتی و همکاران (۲۰۲۰) نیز

^۱ GCMT: Global Moment Tensor Solution



شکل ۱. الف) زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5.5$) تاریخی (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲) (نشان‌گرهای زرد)، شهرهای ایران (چهارگوش‌های خاکستری)، زمین‌لرزه‌های نهاد ISC (نشان‌گرهای قرمز) و سازوکار زمین‌لرزه‌ها از جکسون، (۱۹۹۵) (نشان‌گرهای آبی) و ب) سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5.5$) ایران (GCMT, 2022).

Fig. 1. a) Historical large earthquakes ($M > 5.5$) (Ambrasis and Melville, 1982) (yellow markers), Iranian cities (gray squares), ISC earthquakes (red markers) and earthquake mechanism from Jackson (1995) (markers in blue), b) The mechanism of large earthquakes ($M > 5.5$) in Iran (GCMT, 2022).

جغرافیایی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و مدل سرعتی موج در زمین، شکل موج زمین‌لرزه‌ها و منحنی پاسخ لرزه‌نگارها. روش به‌دست آوردن سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با به‌کارگیری قطبش‌های نخستین موج P رسیده به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری بلند پهن، بلند دوره و همچنین کوتاه دوره (پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مرکز لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) روش بسیار مطمئن و جا افتاده‌ای است. اگر خطای روکانونی زمین‌لرزه از فاصله میان ایستگاه‌های به‌کار برده شده برای به‌دست آوردن سازوکار کانونی آن کمتر باشد، خطای کانون‌یابی تاثیر زیادی روی سازوکار نمی‌گذارد. تاثیر خطای کانون‌یابی به‌ویژه خطای ژرفی زمین‌لرزه روی سازوکار کانونی آن برای زمین‌لرزه‌های محلی با فاصله روکانونی کمتر از ۱۵۰ کیلومتر بسیار بیشتر از زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و درولرزمی باشد (استین و وایسشن، ۲۰۰۳). زیرا زمین‌لرزه‌های محلی (هم‌چنین خردلرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها) بیشتر با شبکه‌های محلی با فاصله میان ایستگاهی کم برداشت می‌شوند. جای ایستگاه روی دایره سازوکار کانونی بستگی به زاویه گسیل موج داشته که آن هم به ژرفای زمین‌لرزه بستگی دارد. از

داده‌های مورد نیاز برای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های بزرگ از تارنمای موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گردآوری شده‌اند. از میان این داده‌ها، تنها داده برخی زمین‌لرزه‌ها از دیدگاه کمی و کیفی برای حل سازوکار کانونی مناسب بودند. ستون‌های ۸ تا ۱۱ در جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب، خطای زمانی، شمار ایستگاه‌های برداشت کننده، شمار فازهای خوانده شده و نبود^۱ آزیموتی هستند. نبود آزیموتی، پوشش‌دهی ایستگاه‌ها را در پیرامون زمین‌لرزه‌ی مورد نظر بیان می‌کند. هرچه نبود آزیموتی کمتر باشد ایستگاه‌ها زمین‌لرزه را بهتر پوشش داده‌اند. داده‌ها بایستی پیش از پردازش ویرایش شوند. نخستین کار پس از برداشت و ذخیره‌سازی این داده‌ها، دسته‌بندی آن‌ها است. در این کار، این داده‌ها هر کدام برای یک زمین‌لرزه خاص هستند. از آن‌جا که بیشتر پردازش داده‌ها به کمک نرم‌افزار ساینز^۲ انجام می‌شود، این داده‌ها بایستی برای این نرم‌افزار ویرایش و آماده شوند. برای انجام پردازش‌های معمول زمین‌لرزه‌شناسی مانند کانون‌یابی زمین‌لرزه‌ها، برآورد بزرگا و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها به داده‌های زیر نیاز است: موقعیت

² Seisan

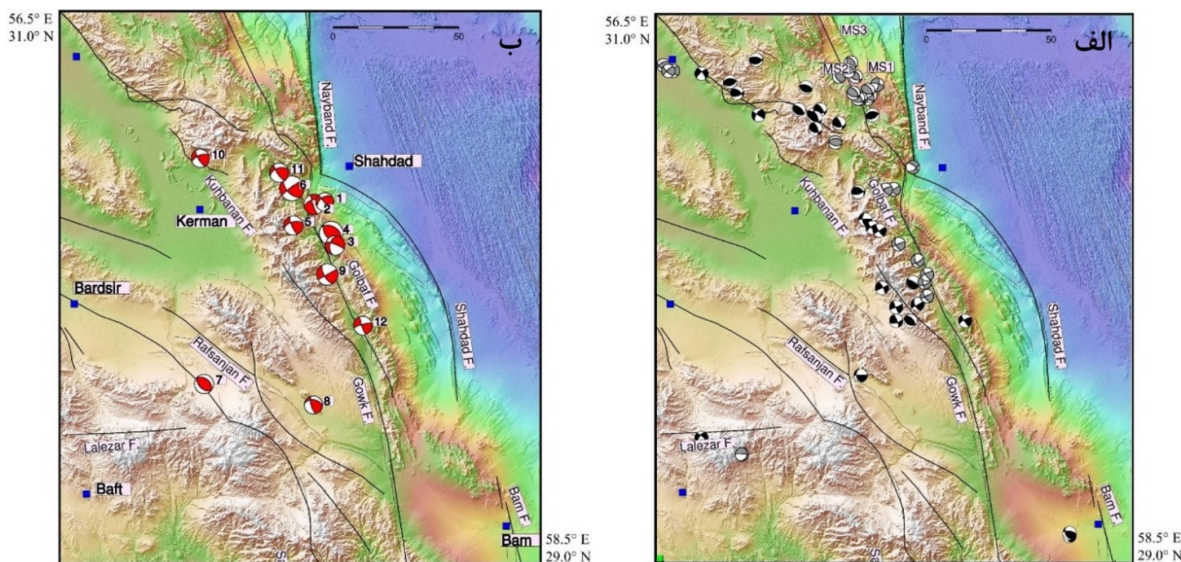
¹ Gap

رسیده به ایستگاه‌ها بوده که برای ایستگاه‌های نزدیک‌تر از ۱۵۰ کیلومتر به زمین‌لرزه فاز P_g و برای ایستگاه‌های دورتر فاز P_n خوانده شده‌اند.

۲-۲- گسل‌های پیرامون شهر کرمان

گسل گلباف از جنباترین گسل‌های ایران است. زمین‌لرزه‌های بزرگ گسل گلباف، زمین‌لرزه‌های ۱۹۸۱ سیرچ، ۱۹۸۹ گلباف و ۱۹۹۸ فندوقا هستند. بزرگای زمین‌لرزه‌های ۱۹۸۱ سیرچ، ۷/۱؛ ۱۹۸۹ گلباف، ۵/۹ و ۱۹۹۸ فندوقا ۶/۴، در مقیاس بزرگای گشتاوری هستند. جلبه‌جایی سطحی این گسل‌ها روی زمین، به‌ترتیب، نزدیک به یک متر، نزدیک به چند سانتی‌متر و سه متر بوده است (بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). زمین‌لرزه‌های بزرگ گسل کوه‌بنان، زمین‌لرزه‌های ۲۰۰۷-۰۷-۰۴-۰۷-۱۱:۰۶ و ۲۰۱۷-۱۲-۲۱-۱۷:۰۴:۴۳ می‌باشند. بزرگای ناتلی (M_N) این زمین‌لرزه‌ها، به‌ترتیب، برابر ۵/۱ و ۵/۴ می‌باشند (IGUT, 2018). زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی زیادی روی این گسل و پیرامون آن روی داده‌اند. این گسل اصلی و مادر شماری از زمین‌لرزه‌ها در گستره بوده است (مانند زمین‌لرزه ۲۰۰۵ زرد، M_w ۶/۴؛ نعمتی و قیطانچی، ۲۰۱۱) (شکل ۲).

آنجایی که زاویه گسیل موج زمین‌لرزه‌های محلی بزرگ‌تر از زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و دورلر می‌باشد (لی و والاس، ۱۹۹۵)، بنابراین خطای ژرفی در زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و دورلر تاثیر کمتری روی زاویه گسیل موج و در پی آن سازوکار کانونی زمین‌لرزه می‌گذارد تا زمین‌لرزه‌های محلی. پژوهش‌گران زیادی با این روش سازوکار زمین‌لرزه‌ها را در یک گستره وسیعی از بزرگا به‌دست آورده‌اند (مکنزی، ۱۹۷۲؛ جکسون و مکنزی، ۱۹۸۴؛ عکاشه و برکمر، ۱۹۸۴؛ نی و برازنگی، ۱۹۸۶؛ پرسیتلی و همکاران، ۱۹۹۴؛ سویچ و همکاران، ۲۰۱۹). برونداد این پژوهش برای این زمین‌لرزه‌ها هم‌آمیخت و در پی آن پردازش موج‌های پیکری برداشت شده با ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی بوده است. بیشینه خطای کانون‌یابی این زمین‌لرزه‌ها ۵ کیلومتر بوده و بیشینه چرخش صفحه‌های گرهی در سازوکارهای کانونی آن‌ها ۵ درجه می‌باشد. این سازوکارها با کم‌ترین خطا در پلارته‌ها پردازش شده‌اند (پیوست ۱ و ۲ به‌ترتیب برای سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای کرمان و شیراز). روش به‌دست آوردن سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها به‌کارگیری قطبش‌های نخستین موج P



شکل ۲. الف) نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ($M_I > 4.5$) مرکز لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (نشان‌گرهای خاکستری) و سازوکار زمین‌لرزه‌های ($M_I > 5.5$) از GCMT (نشان‌گرهای مشکی) در پیرامون شهر کرمان و ب) نقشه سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های ($M_I > 4.0$) در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون شهر کرمان.

Fig 2. A) Map of major and minor faults with their names, the focal mechanism of earthquakes ($M_I > 4.5$) of Seismological Center of Institute of Geophysics, the University Tehran (gray markers) and the mechanism of earthquakes ($M_I > 5.5$) from GCMT (black markers) around the city of Kerman. b) The map of the resolved mechanisms of earthquakes ($M_I > 4.0$) in this research (red markers) around the city of Kerman.

جدول ۱. ویژگی‌های سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر کرمان.

Table 1. Characteristics of the resolved mechanisms of earthquakes around the city of Kerman.

NO.	Date	Time	Lat.	Lon.	Mn	St.	Dip	Rake	RMS.	N.S.
1	6/15/2007	37:44.2	30.319	57.603	4	234.70	45.22	4.98	0.4	11
2	6/4/2008	38:45.0	30.31	57.559	4.5	160.30	80.42	-39.03	0.5	33
3	5/12/2009	30:51.9	30.162	57.647	4.3	193.01	43.37	-13.00	0.4	12
4	6/26/2011	47:00.8	30.206	57.63	5.2	300.68	41.03	74.66	0.5	16
5	1/6/2013	24:15.3	30.234	57.473	4.2	255.75	58.68	16.48	0.8	46
6	1/21/2013	48:58.1	30.368	57.466	5.4	233.47	81.46	34.07	0.7	80
7	2/22/2013	39:22.7	29.66	57.1	4.2	308.65	42.04	87.01	0.6	54
8	9/18/2015	06:09.3	29.584	57.556	4	278.60	42.06	31.11	0.6	58
9	6/4/2016	54:13.8	30.057	57.614	4.7	240.00	90.00	25.00	0.5	65
10	6/24/2018	24:32.1	30.476	57.084	4	247.47	61.86	17.99	0.4	37
11	12/11/2018	41:00.7	30.424	57.413	4.2	250.03	47.47	19.50	0.4	53
12	9/19/2019	24:12.6	29.872	57.762	4.1	254.14	78.56	9.77	0.2	38

جدول ۲. ویژگی‌های سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر شیراز.

Table 2. Characteristics of the resolved mechanisms of earthquakes around the city of Shiraz.

NO.	Date	Time	Lat.	Long.	Mag.	St.	Dip	Rake	RMS.	N.S.	Q
1	9/5/2008	11:47.3	29.888	51.746	4.4	330.08	57.07	55.99	0.4	31	A
2	10/24/2008	22:59.8	29.541	51.841	4.2	265.87	41.24	12.81	0.4	27	B
3	11/25/2008	13:16.9	29.848	51.729	4.5	289.96	43.37	-13.00	0.3	44	B
4	11/26/2008	02:26.5	29.848	51.781	4.3	277.43	41.08	-48.16	0.4	26	B
5	10/19/2012	10:51.6	29.303	52.481	4.2	189.44	74.24	-37.25	0.6	77	A
6	5/12/2013	40:31.7	29.547	52.7	4.4	217.75	47.74	-17.17	0.7	60	A
7	9/1/2013	58:56.7	29.368	52.521	4	178.00	85.54	-47.84	0.6	69	A
8	2/6/2014	35:14.7	29.249	52.819	4.1	327.00	49.97	13.94	0.6	56	A
9	2/6/2014	09:35.9	29.255	52.825	4.2	17.93	44.14	84.25	0.5	63	A
10	8/27/2014	51:11.2	29.549	52.137	4.2	134.41	25.46	78.30	0.7	62	B
11	9/4/2014	51:21.2	29.539	52.143	4.5	306.34	45.52	45.51	0.7	81	B
12	5/10/2016	20:20.3	29.256	52.041	4.2	249.82	48.36	-18.88	0.5	87	A
13	9/23/2018	22:58.6	29.452	52.017	4.7	313.73	50.93	46.96	0.3	73	A
14	5/12/2019	46:44.4	29.266	53.238	4.2	58.39	75.07	21.53	0.3	55	A
15	5/18/2019	48:17.0	29.754	52.052	4.6	240.19	61.98	-11.17	0.4	80	A
16	11/13/2019	28:38.7	29.667	51.971	4	91.22	56.56	39.62	0.4	44	B
17	1/27/2020	28:26.0	29.609	52.091	5.4	265.84	56.02	1.35	0.3	86	A
18	1/28/2020	24:32.7	29.585	52.128	5.1	89.11	69.30	22.21	0.3	81	A
19	3/11/2020	24:05.7	29.599	52.136	4.3	51.00	87.27	19.82	0.3	47	A

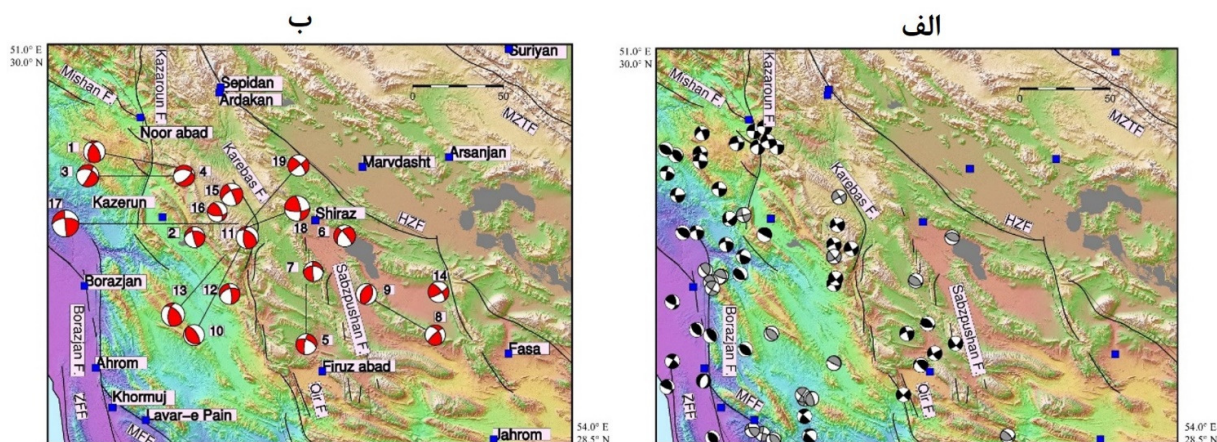
۲-۳- گسل‌های پیرامون شهر شیراز

گسل کازرون درازایی نزدیک به ۲۳۵ کیلومتر داشته و از شمال به گسیختگی دنا و از جنوب تا خلیج فارس ادامه دارد. این گسیختگی با راستای متغییر، شمالی - جنوبی و میان آزیموت ۲۵ تا ۳۴۰ درجه امتداد داشته و بر این

پایه به تکه‌های زیادی قابل تکه‌بندی است. این گسل از شمار بزرگ‌ترین گسله‌های عرضی راستالغز راست‌بر است. گسل کازرون گسلی بنیادی و پی‌سنگی است که ضمن کنترل مرز باختری حوضه نمکی هرمز، بر نهشته‌های زاگرس نیز اثر گذار بوده، به گونه‌ای که ساختارهای

می‌باشد. این گسل دست‌کم سه تکه دارد. گسیختگی سبزپوشان که از گسل‌های عرضی زاگرس است، بخش‌های خاوری دشت شیراز را بریده است. گسیختگی سبزپوشان در گروه گسله‌های عرضی - برشی راستالغز راست‌بر است. این گسیختگی برپایه راستا و سازوکار آن به دو تکه گسلی با درازای نزدیک به ۵۵ کیلومتر بخش شده که قطعه شمالی آن با سازوکار راست‌بر و همراه با افت قائم با آزیموت ۳۵۰ درجه و تکه جنوبی با سازوکار راندگی و راستالغز راست‌بر با آزیموت ۳۱۷ درجه، مشخص شده است (نقشه زمین‌شناسی قیروکارزین مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور) (شکل ۳).

زاگرس را با جهت راست‌بر خمیده و جابه‌جا کرده است. در گستره کازرون و برازجان این خمش چشم‌گیر است. گسل کره‌بس از ۴۵ کیلومتری خاور شهر شیراز می‌گذرد. این گسل از شمار گسله‌های عرضی با راستای شمالی - جنوبی، ادامه جنوبی گسیختگی اردکان است. گسل کره‌بس از چند تکه گسلی تشکیل شده، بخش شمالی آن دارای سازوکار راستالغز راست‌بر بوده و سبب انحراف محور ساختمان‌های چین‌خورده شده است. بخش میانی آن، سازوکار راست‌بر همراه با مولفه شیب‌لغز نزدیک به قائم دارد. این گسیختگی در دنباله خود با تغییر راستای تدریجی به سوی جنوب خاور تداوم یافته و در پایان در گروه گسله‌های هم‌راستا با زاگرس امتداد می‌یابد. گسل قیر از شمار شاخه‌های تغییر روند یافته این گسیختگی



شکل ۳. الف) نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های ($M_L > 4.5$) موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) (از سال ۲۰۱۲ تاکنون) و سازوکار زمین‌لرزه‌های ($M_L > 5.5$) از GCMT (نشان‌گرهای مشکی) (از سال ۱۹۷۶ تاکنون) در پیرامون شهر شیراز. MZTF، HZF، MFF و ZFF به ترتیب، تراست اصلی زاگرس، گسل فراخاست زاگرس، گسل پیشانی زاگرس و گسل جنبه زاگرس هستند و ب) نقشه سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های ($M_L > 4.0$) در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون شهر شیراز.

Fig. 3. a) The map of the major and minor faults with their names, the mechanism of earthquakes ($M_L > 4.5$) of the Institute of Geophysical (gray markers) (since 2012) and the mechanism of earthquakes ($M_L > 5.5$) from GCMT (black markers) (since 1976 until now) around the city of Shiraz. MZTF, HZF, MFF and ZFF are Zagros main thrust, Zagros subduction fault, Zagros frontal fault and Zagros front fault, respectively. b) The map of the resolved mechanisms of earthquakes ($M_L > 4.0$) in this research (red markers) around the city of Shiraz.

۳- نتایج

۳-۱- زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر کرمان

لرزه‌خیزی تاریخی، پیش‌دستگاهی و دستگاهی پیرامون شهر کرمان به سامانه‌های گسلی کوهبنان - لکرکوه - گلباف وابسته است. فشردگی زمین‌لرزه‌های ($M_L > 3.5$) وابسته به موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای قرمز) در خاور شهر کرمان، همان پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۹۸۱ سیرچ ($M_W 7.1$) می‌باشند (شکل‌های ۱ و ۲). جدول ۱ ویژگی‌های رقوم سازوکارهای حل‌شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر کرمان را نشان می‌دهد. شکل ۲ ب نیز

شکل ۲ نقشه گسل‌های اصلی و فرعی، سازوکار کانونی برخی از زمین‌لرزه‌ها از موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) و سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ از GCMT (نشان‌گرهای تیره) را در پیرامون شهر کرمان نمایش می‌دهد. شهرهای بردسیر، بافت، بم و کوهبنان از شهرهای کوچک پیرامون کرمان هستند. تقریباً همه

زمین‌لرزه‌های 1, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19 # با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد به گسل کره‌بس وابسته هستند. زمین‌لرزه‌های 8, 9, 14 # با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد و معکوس (به جز 8 #) به گسل سبزه‌واران فسا وابسته هستند. زمین‌لرزه‌های 5, 6, 7 # با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با راستای گسلی شمالی-جنوبی به گسل سبزپوشان وابسته هستند. سازوکار زمین‌لرزه 4 # نیز با هیچ گسلی در گستره هم‌خوانی ندارد. در تفسیر زمین‌لرزه‌های همه نقشه‌ها بایستی خطای روکانون زمین‌لرزه‌ها را نیز در نظر گرفت. این خطا باتوجه به فاصله میان ایستگاهی ایستگاه‌های شبکه موسسه ژئوفیزیک می‌تواند تا ده کیلومتر نیز برسد.

۴- بحث

حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها برپایه بیشترین شمار قطبش ایستگاه‌ها، پراکندگی یکنواخت و مناسب آن‌ها و محدودیت صفحه‌های گرهی با ایستگاه‌ها انجام شده است. درجه آزادی حرکت صفحه‌های گرهی ۵ درجه در نظر گرفته شده و سازوکارهای کانونی با بیشینه یک یا دو خطای قطبش در گستره‌های کششی و فشاری حل شدند. این سازوکارهای حل شده، برپایه شرایط بالا، به دو دسته با کیفیت خوب (A) و منصفانه (B) دسته‌بندی شدند. در حل سازوکارها در این پژوهش، برخلاف برخی از کارهای پژوهشی دیگر مانند جکسون و مکزی (۱۹۸۴)، تنها از پراکندگی قطبش‌ها کمک گرفته شد. علت به‌کار بردن این روش، مقایسه نتیجه دو روش و نشان دادن استقلال و کارآمدی این روش است. در برخی از کارها، از حل سازوکارها که با روش‌های دیگر مانند مدل‌سازی امواج پیکری یا حل تانسور گشتاور زمین‌لرزه انجام می‌گیرد، بهره برده می‌شود، به‌گونه‌ای که در برآورد راستای صفحه‌های گرهی از آن‌ها کمک گرفته می‌شود. برپایه توضیحات بالا نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- لرزه‌خیزی خاور ایران بیشتر بر روی چند گستره متمرکز است: گستره دشت‌بیاض-آبیز، گستره طیس، گستره گسلی لک‌کوه، پیوندگاه چندگانه گسلی گلباف، نای‌بند، کوه‌بنان و شهداد، گستره گسلی بم و جنوب خاوری استان کرمان. لرزه‌خیزی خاور ایران بیشتر به گسل‌های دورتادور بلوک‌های بی‌لرزه در این گستره

سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های با بزرگای $M_L > 4.0$ را در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون شهر کرمان نمایش می‌دهد. سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های ($M_L > 4.0$) در این پژوهش نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12 # به گسل گلباف وابسته هستند. زمین‌لرزه 10 # به گسل کوهبنان، زمین‌لرزه 7 # به گسل سروستان و زمین‌لرزه 8 # به گسل رفسنجان وابسته هستند. برپایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های گلباف، کوهبنان و رفسنجان دارای سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با مولفه معکوس و گسل سروستان دارای سازوکار چیره‌ی معکوس خالص می‌باشند.

۳-۲- زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر شیراز

گسل‌های زاگرس در گستره بررسی شده، گسل قیر، کازرون، کره‌بس، برازجان و MZF, HZF, MFF و ZFF بوده که به‌ترتیب، تراست اصلی زاگرس، گسل فراخاست زاگرس، گسل پیشانی زاگرس و گسل جبهه زاگرس هستند. شکل ۳ نقشه گسل‌های اصلی (خم‌های پهن) و گسل‌های فرعی (خم‌های باریک)، و سازوکار زمین‌لرزه‌های موسسه ژئوفیزیک و حل شده در این پژوهش (نشان‌گرهای خاکستری و قرمز) را در پیرامون شهر شیراز در زاگرس نمایش می‌دهد. شهرهای نورآباد، کازرون، مرودشت، فیروزآباد، فسا و برازجان از شهرهای بزرگ و کوچک و دور و نزدیک به این شهر پرجمعیت ایران در گستره زاگرس هستند. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی در نزدیکی شیراز و پیرامون در سامانه گسلی سبزپوشان و گسل فراخاست زاگرس^۱ دیده می‌شود (شکل ۳). لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون شهر از سال 1894-1591 روی داده است. زمین‌لرزه‌ها در پیرامون شهر شیراز بیشتر در نزدیکی سامانه گسلی سبزپوشان و گسل برازجان پراکنده شده و همان‌گونه که انتظار می‌رفت، زمین‌لرزه‌ها در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس و گودال زاگرس بوده و گستره زاگرس فراخاسته خالی از زمین‌لرزه است. جدول ۲ ویژگی‌های رقومی سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر شیراز را نشان می‌دهد. سازوکارهای کانونی حل‌شده زمین‌لرزه‌های این پژوهش نشان می‌دهد که

^۱ HZF: High Zagros Fault

سبزپوشان وابسته هستند. روکانون چند زمین‌لرزه نیز نشان می‌دهد که ظاهراً به هیچ گسلی در گستره وابسته نیستند.

۵- نتیجه‌گیری

برپایه حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های گلباف، کوهبنان و رفسنجان دارای سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با مولفه معکوس و گسل سروستان دارای سازوکار چیره معکوس خالص می‌باشند. با سنجش نقشه این پژوهش با نقشه‌های دیگر مشخص می‌گردد که بخشی از این نتایج با نتایج کارهای پیشین مانند نهاد GCMT هم‌خوانی دارد. همچنین، زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار کانونی چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد به گسل کره‌بس در جنوب شیراز وابسته هستند. دو زمین‌لرزه با سازوکار کانونی چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد و معکوس نیز به گسل سبزه‌واران فسا وابسته هستند. زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با راستای گسلی شمالی- جنوبی هم به گسل سبزپوشان وابسته هستند. روکانون چند زمین‌لرزه نیز نشان می‌دهد که ظاهراً به هیچ گسلی در گستره وابسته نیستند. در این گونه موارد دو احتمال وجود دارد: یکی با در نظر گرفتن خطای روکانون زمین‌لرزه‌ها، آن‌ها را به نزدیک‌ترین گسل وابسته بدانیم و دیگری اینکه با توجه به گواهی‌های زمین‌شناسی آن‌ها را به یک گسل پنهان یا شناخته نشده وابسته بدانیم. به‌گمان زیاد، گسل‌های تهدید کننده شهر شیراز گسل سبزپوشان، کازرون و کره‌بس هستند. با توجه به اینکه بیشتر ویرانی‌ها در فرادیواره گسل‌های معکوس روی می‌دهند، با یک تفسیر، البته ساده، می‌توان گفت که خوش‌بختانه، هیچ‌کدام شهرهای کرمان و شیراز در فرادیواره گسل‌های معکوس پیرامون خود جای ندارد. اگرچه، تنها این عامل در خطر لرزه‌ای دخیل نیست، درازا و در نتیجه بزرگای زمین‌لرزه ایجاد شده‌ی گسل‌های راست‌الغزی مانند گلباف، سبزپوشان و کره‌بس، به‌ترتیب در مورد شهرهای کرمان و شیراز بسیار قابل توجه است. در مقام مقایسه میان دو شهر بررسی شده می‌توان گفت گسل‌های پیرامون شهر کرمان در سال‌های اخیر بسیار جنابت‌تر بوده و گسل کره‌بس و گسل زاگرس فراخاسته در سنجش با آن لرزه‌خیزی چندانی نداشته است. شیراز، بیشتر از سوی گسل کره‌بس

وابسته است. این گسل‌ها که بلوک‌های بی‌لرزه‌ی لوت، جازموریان و کویر بزرگ ایران را دربر گرفته‌اند، بیشتر راست‌الغز و بلند هستند (مانند واکر و جکسون، ۲۰۰۴؛ نعمتی، ۲۰۱۴). استان کرمان، به‌دلیل وجود گسل‌های جنوبی و زمین‌لرزه‌های فراوان، از لرزه‌خیزترین گستره‌های ایران به‌شمار می‌آید. نرخ لرزه‌خیزی بالا در استان کرمان، ویرانی‌ها و زیان‌های جانی و مالی زیادی در دهه‌های گذشته به‌دنبال داشته است. یکی از رخداد‌های تاریخی ثبت شده در این گستره، زمین‌لرزه $M_w \sim 6.1$ سال ۱۸۶۴ چترود است که باعث مرگ بسیاری شده و خرابی‌های فراوانی به بار آورده است (امبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲). زمین‌لرزه‌های ۱۹۱۱ راور با بزرگای $M_w \sim 6.2$ ، ۱۹۲۳ لاله‌زار با بزرگای $M_w \sim 6.7$ و ۱۹۷۷ زرنند با بزرگای $M_w \sim 5.9$ و زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۰۳ بم با بزرگای $M_w \sim 6.6$ و ۲۰۰۵ زرنند با بزرگای $M_w \sim 6.4$ ، زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ ریگان با بزرگای $M_w \sim 6.0$ ، ۲۰۱۷ هجدک با بزرگای $M_w \sim 6.0 - 6.1$ از رویداد‌های ویران‌گر بزرگ گستره کرمان هستند (امبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲؛ طالبیان و همکاران، ۲۰۰۶؛ واکر و همکاران، ۲۰۱۳؛ سوپ و همکاران، ۲۰۱۹؛ نعمتی و همکاران، ۲۰۲۰) (شکل ۲). سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های ($M_L > 4.0$) در این پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر زمین‌لرزه‌ها به گسل گلباف وابسته هستند. گسل کوهبنان، گسل سروستان و گسل رفسنجان نیز هرکدام یک زمین‌لرزه دارند. برپایه حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، گسل‌های گلباف، کوهبنان و رفسنجان دارای سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با مولفه معکوس و گسل سروستان دارای سازوکار چیره معکوس خالص می‌باشند. با سنجش نقشه این پژوهش با نقشه‌های دیگر مشخص می‌گردد که بخشی از این نتایج با نتایج کارهای پیشین مانند نهاد GCMT هم‌خوانی دارد.

۲- سازوکارهای کانونی حل شده زمین‌لرزه‌های در این پژوهش نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار کانونی چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد به گسل کره‌بس وابسته هستند. دو زمین‌لرزه با سازوکار کانونی چیره‌ی راست‌الغز راست‌گرد و معکوس نیز به گسل سبزه‌واران فسا وابسته هستند. زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌گرد با راستای گسلی شمالی- جنوبی هم به گسل

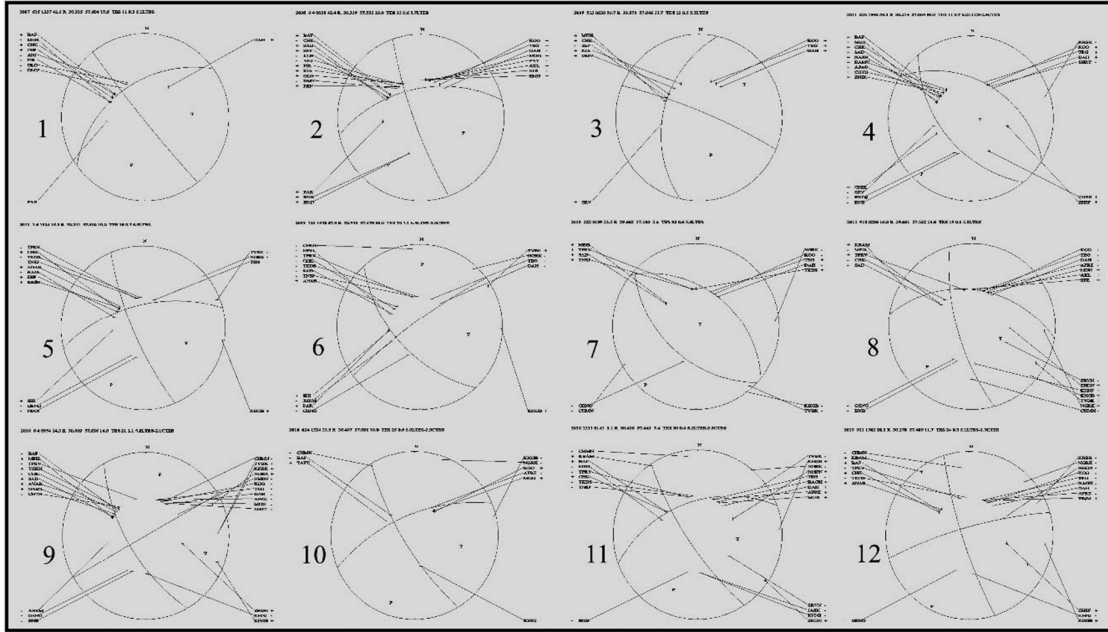
- Province using geographic information system and hierarchical analysis method. *Journal of New Findings of Applied Geology*, 17 (33) 69-82 (in Persian).
- Hessami, K., Jamali, F., Tabassi, H (2003) Map of Major Active Faults of Iran. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Iran.
- Jackson, J. A., McKenzie, D. P (1984) Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 77 (1): 185-264.
- Jackson, J., Haines, J. Holt, W (1995) The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 100(B8), 15: 205-219.
- Lay, T., Wallace, T. C (1995) *Modern Global Seismology*. Academic Press Institute, California, 92101-4495, ISBN-12-732870-X.
- McKenzie, D (1972) Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophysical Journal International*, 30: 109-185
- Moradi-S A., Hatzfeld, D., Tatar, M (2011) Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran). *Tectonophysics*, 506: 22-30.
- Nemati, M (2010) The microseismicity of Alborz Khavari. Ph. D. thesis, Institute of Geophysics, University of Tehran, 103 p (in Persian).
- Nemati, M (2013) Some aspects about seismology of 2012 August 11 Ahar-Varzaghan (Azarbayjan, NW Persia) earthquakes sequences. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran*, 24(3): 229-241.
- Nemati, M (2015) Intermediate-term variations in 200-year seismicity at south of Iran. *Geomatics Natural Hazards and Risks (Taylor & Francis)*, DOI: 10.1080/19475705.2015.1030785.
- Nemati, M. and Gheitanchi, M (2011) Analysis of 2005 Dahuieh (Zarand) aftershocks sequence in Kerman province. *Journal of Earth and Space Physics (Institute of Geophysics the University of Tehran)*, 37(1): 1-9.
- Nemati, M., Jafari Hajati, F., Rashidi, A. and Hassan-zadeh, R (2020) Seismology of the 2017 Hojedk earthquakes (M_N 6.0- 6.1), Kerman province, SE Iran. *Tectonophysics*, 780: 228398.
- Ni, J. Barazangi, M (1986) Seismotectonics of Zagros continental collision zone and a comparison with the Himalayas. *J. Geophys. Res.*, 91: 8205-8218.
- Priestley, K., Baker, C. and Jackson, J (1994) Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian Basin and surrounding regions, *Geophys. J. Int.*, 118: 111-141.
- Savidge, E., Nissen, E., Nemati, M., Karas`ozen, E., Hollingsworth, J., Talebian M., Bergman, E., و سبزیپوشان در معرض خطر لرزه‌ای است تا گسل زاگرس فراخاسته. بزرگ‌ترین زمین‌لرزه پیرامون نزدیک شیراز زمین‌لرزه ۲۰۱۰/۰۷/۲۹ با بزرگای ۶/۱ بوده که وابسته به گسل کازرون است. درحالی‌که بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های پیرامون نزدیک کرمان زمین‌لرزه‌های ۱۹۸۱ با بزرگای ۶/۱ با بزرگای ۷/۱ و ۲۰۱۷ هجری با بزرگای ۶/۱ می‌باشند که به ترتیب، وابسته به گسل‌های گلباف و لکرکوه هستند. نزدیکی زیاد شهر کرمان به گسل گلباف در ایجاد خطر لرزه‌ای بسیار قابل توجه است. زمین‌لرزه‌های پی‌درپی گسل گلباف (زمین‌لرزه‌های ۱۹۸۱ با بزرگای ۷/۱؛ ۱۹۸۹ با بزرگای ۵/۹؛ ۱۹۹۸ با بزرگای ۶/۴) می‌تولند گویای این واقعیت باشد که بخش‌های مختلف این گسل بارها و بارها شکسته شده و ایجاد زمین‌لرزه نموده‌اند. اگرچه این تفسیر نمی‌تواند یکپارچه شدن تکه‌های گسلی و ایجاد یک زمین‌لرزه بزرگتر را نفی کند.

References

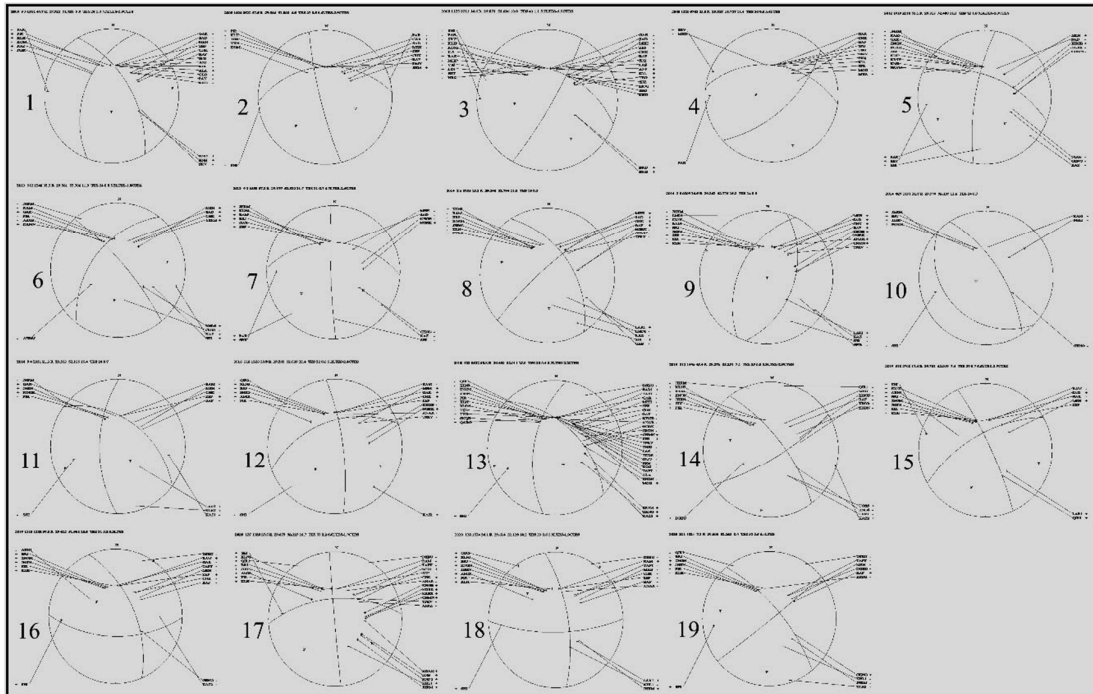
- Akashah, B., Berckhemer, H (1984) Focal mechanisms of earthquakes in Iran with special emphasis on small shocks in Tehran region. *Neues Jahrb. Paleontol. Abh.*, 168: 244-255.
- Ambraseys, M. M. and Melville, C. P (1982) "A History of Persian Earthquakes" [M]. London Cambridge University press, 219 p.
- Berberian, M., Qorashi, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestley, K., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J. Baker, E (2001) The 1998 March 14 Fandoqa earthquake $M=6.6$ in Kerman, southeast Iran: Re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts, and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophys. J. Int.*, 146(2), 371-398.
- Berberian, M., Yeats, R. S (1999) Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89: 120-139.
- Copley, A., Faridi, M., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nazari, H., Oveisi, B., Talebian, M (2013) The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish-Iranian Plateau. *Geophys. J. Int.*, <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggt379>.
- De Martini, P. M., Hessami, K., Pantosti, D., D'ddezio, G., Alinaghi, H., Ghafari-Ashtiany, M (1998) A geologic contribution of the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran). *Tectonophysics*, 287: 187 - 199.
- Ekhlaspour, P., Abbasnejad, A., and Nemati, M (2023) Earthquake risk zoning of the Kerman

- Ghods, A., Ghorashi, M., Kosari, E., Rashidi A. and Rashidi, A (2019) The December 2017 Hojedk (Iran) earthquake triplet-sequential rupture of shallow reverse faults in a strike-slip restraining bend. *GJI*, 217(2): 909-925.
- Solaymani Azad, S., Ritz, J. F., Abbassi, M. R (2011) Left-lateral active deformation along the Mosha–North Tehran fault system (Iran): morphotectonics and paleoseismological investigations. *Tectonophysics*, 497: 1–14.
- Stein, S. Wysession, M (2003) *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*, ISBN 0-86542-078-5.
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., et al (2006) The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February, 22 in central Iran. *Geophys J Int.*, 164: 137-148.
- Tchalenko, J. S (1974) Recent destructive earthquakes in the Central Alborz. In: *Materials for the Study of Seismotectonics of Iran: North-Central Iran*. *Geol. Surv. Iran*, 29: 97–116.
- Tchalenko, J. S (1975) Seismicity and structure of the Kopeh Dagh (Iran, USSR). *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, 278: 1-28.
- Walker, R. T., Bergman, E. Elliott, J. R., Fielding, E. J., Ghods, A. R., Ghorashi, M. Jackson, J. Nazari, H. Nemati, M. Oveisi, B. Talebian, M. Walters, R. J (2013) The 2010-2011 South Rigan (Baluchestan) earthquake sequence and its implications for distributed deformation and earthquake hazard in southeast Iran. *Geophys J Inter.*, 109: 1-26.
- Walker, R. T., Jackson, J (2004) Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23, TC5010, doi: 10.1029/2003TC001529.

پیوست ۱. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر کرمان.



پیوست ۲. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر شیراز.



Estimation mechanism of earthquakes in active seismic areas around Kerman and Shiraz cities

F. Naghdi Dodaran¹ and M. Nemati^{2*}

1- M. Sc., student. Dept. of Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

2- Prof., Dept. of Geology, Faculty of Science and Earthquake Center of Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

* nematimajid_1974@uk.ac.ir

Received: 2022/5/23 Accepted: 2022/11/8

Abstract

Based on the solution of mechanisms in this study, Golbaf, Kuhbanan and Rafsanjan faults have a dominant right-lateral mechanism with a reverse component and Sarvestan fault has a pure reverse dominant mechanism. Earthquakes are mostly scattered around the city of Shiraz near the Sabzpooshan fault system and Borazjan fault. Solved mechanisms also show that earthquakes with a dominant right-lateral mechanism are related to the Karebas fault. Some earthquakes, which are related to the Sabzevaran fault are with the dominant mechanism of strike slip. Earthquakes of the Sabzpooshan fault are with the dominant mechanism of strike-slip right-lateral (N-S active plain). Mechanism of some earthquake is not compatible with any known faults in the range. In the interpretation of earthquakes in of all maps, the location error of the seismicity must also be considered. This error can reach up to ten kilometers (in some cases) due to the intermediate distance between the stations of the seismological networks. The mechanism of some of these faults, which were studied in previous works (geologically or seismologically), are consistent with the mechanism solved in this study.

Keywords: Mechanism, Earthquake, Kerman, Shiraz, Fault

Introduction

Iran is one of the most seismically active countries in the world and part of the largest convergent deformation zone on Earth (Alpine-Himalayan orogenic belt). Shortening and thickening of the crust in this collision range have led to the formation of the Caucasus, Zagros, Alborz, Kopeh Dagh, strike slip belts along with compressive bends in the east and Makran subduction in the Iranian plateau. The presence of these extensional pressure zones causes small and large earthquakes to always occur in these areas. However, most kinetic energy occurs in the form of seismic deformations, with only about 10% of the stress release being seismic and accompanied by earthquakes (Jackson and Mckenzie, 1984).

Materials and methods

Epicenters and the mechanisms of earthquakes around large cities are very important in accordance to the seismic risk in these cities. Scientific agencies such as GCMT; Global Moment Tensor Solution project, and the Institute of Geophysics, University of Tehran solve the mechanism of earthquakes. All

earthquakes with a magnitude of 4.0 to 5.0, and below are in the category of earthquakes, whose mechanism is not solved by the mentioned organizations. On the other hand, the Iranian Seismological Center, Institute of Geophysics, University of Tehran has started its earthquake focal mechanism database in 2012. In this research, the mechanism of earthquakes around large cities with a magnitude of 5.0 to 6.0 are solved and along with other mechanisms of previous earthquakes, they are brought and interpreted on maps. Efforts have been made to ensure that the cities selected for the study of the mechanisms (Kerman and Shiraz) are evenly distributed in the seismic states of Iran. The data required to solve the mechanism of earthquakes in this study were collected from a combination of waveform data from the Institute of Geophysics, University of Tehran and the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. After editing the data, before processing the data, the first P-wave polarization method for the broadband, long-period and short-period seismic stations were used to solve the earthquake mechanism. The location error of these earthquakes was

about 5 km and the maximum rotation of the nodal plains in the mechanisms was considered 5 degrees. These mechanisms have been processed with the least error in the number of wrong polarizations for seismic mechanisms around the most populous and important cities of Kerman and Shiraz.

Discussion and Results

The solution of the earthquake mechanism is based on the maximum number of polarizations of P waves of the stations, their uniform and proper distribution and the limitation of the nodal plains within the stations. The degree of freedom of movement of the nodal plains in the focal sphere was considered 5 degrees and the mechanisms were solved with a maximum of one or two polarization errors in the tensile and compressive ranges. Based on above conditions, these solved mechanisms, based on the above conditions, were classified into two categories: good (A) and fair (B) quality. In the solution of the mechanisms in this study, unlike some other research works such as Jackson and Mackenzie (1984), only the scattering of polarization was used. The reason for using this method is to compare the results of the two methods and show the independence and efficiency of this method. In some works, mechanisms are solved based on the solution by the other methods, such as body wave modeling or seismic moment tensor solution, in order to estimate the direction of the nodal plane of those solutions.

Based on the solution of mechanisms in this study, Golbaf, Kuhbanan and Rafsanjan faults have a dominant right-lateral mechanism with a reverse component and the Sarvestan fault has a pure reverse dominant mechanism. Earthquakes are mostly scattered around the city of Shiraz near the Sabzpooshan fault system and Borazjan fault. Solved mechanisms also show that earthquakes with a dominant right-lateral mechanism are related to the Karebas fault. Some earthquakes, which are related to the Sabzevaran fault are with the dominant mechanism of strike slip. Earthquakes of the Sabzpooshan fault are with the dominant mechanism of strike-slip right-lateral (N-S active plain). The mechanism of some

earthquakes is not compatible with any known faults in the range. In the interpretation of earthquakes in of all maps, the location error of the seismicity must also be considered. This error can reach up to ten kilometers (in some cases) due to the intermediate distance between the stations of the seismological networks. The mechanism of some of these faults, which were studied in previous works (geologically or seismologically), is consistent with the mechanism solved in this study.

Conclusions

Considering that most of the devastations occur in the hanging walls of reverse faults, with a simple interpretation, we can say that fortunately, none of the cities of Kerman and Shiraz are located in the hanging walls of reverse faults around them. Although, this factor is not the only factor involved in seismic risk, the length and magnitude of the earthquake created by the strike slip faults such as Golbaf, Sabzpooshan and Korebes, respectively, are very significant in seismic hazard for the cities of Kerman and Shiraz. In terms of comparison between the two investigated cities, it can be said that the faults around Kerman city have been much more active in recent years, and Karebas fault and High Zagros fault have not had much seismicity compared to them. Shiraz is more at risk of earthquakes from the Karebas and Sabzpooshan faults than the High Zagros fault. The largest earthquake near Shiraz was the 29/07/2010 earthquake with a magnitude of 1.6, which is related to the Kazeroun fault, while the largest earthquakes near Kerman were the 1981 earthquake with a magnitude of 7.1 and the 2017 Hejduk earthquake with a magnitude of 6.1, respectively, are related to Golbaf and Lakarkouh faults. The close proximity of Kerman city to Golbaf fault is very significant in seismic hazard. The earthquakes of Golbaf fault (1981 earthquakes with a magnitude of 7.1; 1989 with a magnitude of 5.9; 1998 with a magnitude of 6.4) can be indicative of the fact that different parts of this fault have repeatedly broken and caused earthquakes. However, this interpretation cannot rule out the integration of fault fragments and the creation of a larger earthquake.