

## تحلیل پس لرزه‌های زمین لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان بر اساس داده‌های یک شبکه لرزه‌نگاری محلی موقت

حمید خسروی<sup>۱</sup>، غلام جوان دلرئی<sup>۲\*</sup>، محمد تاتار<sup>۳</sup> و مهدیه سفری<sup>۱</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده لرزه‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲. استادیار، پژوهشکده لرزه‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳. دانشیار، پژوهشکده لرزه‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۷/۴، پذیرش نهایی: ۹۸/۷/۹)

### چکیده

در ساعت ۱۰:۳۹:۱۰ صبح روز ۱۳۹۶/۱/۱۶ (مطابق با ۰۹:۱۰:۰۶ به وقت جهانی روز ۲۰۱۷/۰۴/۰۵) زمین لرزه‌ای با بزرگی  $M_L=6$  روستای دوقلعه در ۴۶ کیلومتری شمال شرقی فریمان از توابع خراسان رضوی را تخریب کرد. رو مرکز این زمین لرزه در  $35/81$  درجه عرض شمالی و  $60/36$  درجه طول شرقی و عمق ۱۳ کیلومتری محاسبه شد. پس از وقوع زمین لرزه اصلی پس لرزه‌های فراوانی به وقوع پیوست که بزرگ‌ترین آنها حدود ۱۴ ساعت بعد از زمین لرزه اصلی با بزرگی  $M_L=5.5$  خراسان رضوی را به شدت لرزاند. با توجه به پیشینه لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی، علی‌رغم اینکه پهنه خراسان از مناطق فعال و لرزه‌خیز ایران است اما در منطقه فریمان به جز چند مورد، زمین لرزه بزرگی گزارش نشده است. بلافاصله پس از وقوع این زمین لرزه یک شبکه موقت محلی با توانمندی ۱۶ ایستگاه لرزه‌نگاری و سه ایستگاه شتاب‌نگاری به مدت ۳۶ روز توسط پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله در منطقه نصب شد و فرصت مناسبی برای بررسی توزیع مکانی پس لرزه‌ها، شناخت گسل مسبب و ویژگی‌های زلزله شناختی این زمین لرزه که در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ قرار دارد را فراهم آورد که در این پژوهش پس از به دست آوردن نسبت سرعت موج P به S با روش واداتی، بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی اولیه انجام گرفته و پس لرزه‌ها مجدداً تعیین محل شده‌اند. سازوکارهای به دست آمده از روش ترکیبی پلاریته و نسبت دامنه بیانگر این است که روند گسل مسبب آنها غالباً به صورت شمال غربی-جنوب شرقی است. توزیع پس لرزه‌ها نیز روندی شمال غربی-جنوب شرقی نشان می‌دهد که در ادامه گسل مزدوران و هم‌راستا با گسل فریمان می‌باشد اما با توجه به اینکه نوع سازوکارها غالباً فشاری و فشاری با مؤلفه امتداد لغز بوده است لذا احتمال اینکه گسل مسبب گسل مزدوران باشد بیشتر است. نمودار توزیع عمقی پس لرزه‌ها بیانگر آن است که عمده پس لرزه‌ها در محدوده ۸-۴ کیلومتر از سطح زمین رخ داده‌اند. علاوه بر آن با ترسیم پروفیل‌هایی در راستا و عمود بر روند پس لرزه‌ها مشاهده شد که عمق غالب پس لرزه‌ها کمتر از ۱۰ کیلومتر همراه با به خط‌شدگی کاملاً واضح با شیب به سمت شمال شرقی می‌باشد. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد که فعالیت لرزه‌ای گسل پی‌سنگی در عمق کمتر از ۱۰ کیلومتر صورت گرفته است بنابراین ضرورت رعایت دقیق مقررات ساخت‌وساز بر اساس معیارهای فنی استاندارد در طراحی و ساخت بناهای مسکونی و صنعتی در منطقه فریمان برای کاهش آسیب‌های وسیع ناشی از زلزله‌های مخرب آتی اجتناب‌ناپذیر است.

واژه‌های کلیدی: زمین لرزه دوقلعه فریمان، شبکه موقت لرزه‌نگاری، کپه‌داغ، گسل مزدوران، سازوکارکانونی.

### ۱. مقدمه

(آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) زمین لرزه تاریخی مهمی در گستره ۱۰۰ کیلومتری زمین لرزه ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان گزارش نشده است. استان خراسان رضوی از دیدگاه زمین‌شناسی دو پهنه ساختاری-رسوبی با ویژگی‌های زمین‌شناسی کاملاً متفاوت را شامل می‌شود. نواحی واقع در شمال و شمال شرقی استان، به پهنه کپه‌داغ معروف هستند و دارای ویژگی‌های همگن می‌باشند. حرکت صفحه ایران به سمت کپه‌داغ، در چین خوردن رسوب‌ها نقش اساسی داشته و چنین حرکتی سبب تغییر

فلات ایران با قرارگیری بر روی نوار لرزه‌خیزی آلپ هیمالیا به عنوان یکی از مناطق لرزه‌خیز دنیا همواره زمین لرزه‌های شدیدی را شاهد بوده است. شمال شرق ایران یکی از مناطق فعال به لحاظ لرزه‌خیزی است که در طول تاریخ زمین لرزه‌های مخرب زیادی را متحمل شده است و همواره با خسارات جانی و مالی زیادی همراه بوده است. به غیر از زمین لرزه سال ۸۴۰ میلادی در منطقه تربت‌جام با بزرگای برآورد شده ۶/۵ و زمین لرزه‌های ۱۶۸۷ و ۱۶۷۳ میلادی مشهود با بزرگای حدود ۶/۶،

سازوکار گسل‌های پی سنگ از نرمال به راندگی، با شیب به سمت شمال و همچنین ایجاد گسل‌های امتدادلغز شده است (آقانباتی، ۱۳۸۳). نواحی مرکزی و جنوبی استان، بخشی از ایالت زمین‌ساختی ایران مرکزی است که این پهنه سرزمینی ناهمگن با ویژگی‌های گوناگون است که به زیرپهنه‌های بینالود، سبزوار-تربت‌جام و زیرپهنه لوت تقسیم می‌شود. اگرچه در بسیاری از گزارش‌های زمین‌شناسی، کپه‌داغ را لبه جنوبی صفحه توران و بخشی از ابرقاره اوراسیا دانسته‌اند، ولی در حال حاضر در باره جایگاه این پهنه دو نظریه مختلف مطرح شده است:

الف) نظریه اوراسیایی: گروهی از زمین‌شناسان، کپه‌داغ را بخشی از ابرقاره اوراسیا و سنگ‌های اولترامافیک ناحیه مشهد را بقایای پوسته اقیانوسی می‌دانند که دو صفحه توران (اوراسیا) و ایران (گندوانا) را از یکدیگر جدا و به سوی شرق، در امتداد گسل هرات، تا هندوکش ادامه داشته است.

ب) نظریه گندوانایی: بر خلاف طرفداران نظریه اوراسیایی، عده‌ای از محققین به‌خصوص افتخارنژاد و بهروزی (۱۳۷۰) بر این عقیده‌اند که پی سنگ پهنه کپه‌داغ به هرسی‌نین توران (اوراسیا) تعلق ندارد، بلکه دنباله‌ای از پی سنگ آفریقا-عربستان است و بنابراین مرز میان سکوی ایران و پهنه هرسی‌نین توران را در شمال کوه‌های کپه‌داغ و در خارج از ایران فعلی می‌داند. علاوه بر این دو نظریه، وجود شواهد زمین‌شناسی به‌ویژه تورییدیت‌های دانه‌ریز، رادیولاریت، چرت، روانه‌های بالشی و سنگ‌های اولترامافیک شرق شهر سفیدسنگ (آقانباتی، ۱۳۸۳) واقع در حومه شرقی شهرستان فریمان در حوالی کانون زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶، به سن پرمین پسین و گاهی پرمین میانی، نشان می‌دهد که در انتهای دوره کربنیفر و شروع دوره پرمین، در بخش شمال شرقی ایران، یک کافت درون قاره‌ای شکل گرفته است که از آن هنگام کپه‌داغ نقش یک حوضه رسوبی مستقل با شرایط رسوبی و زمین‌ساختی متفاوت با سایر زون‌های زمین‌ساختی فلات ایران به‌خصوص ایران مرکزی و البرز شرقی را تشکیل داده است.

با توجه به شواهد بالا بودن شدت چین‌خوردگی‌ها در

جبهه جنوبی و همچنین نامتقارن و پرشیب بودن یال جنوب‌غربی چین‌ها، به‌نظر می‌رسد حرکت صفحه ایران به سمت کپه‌داغ، در چین‌خوردن رسوب‌ها نقش اساسی‌تری داشته است. این نوع حرکت سبب تغییر سازوکار گسل‌های پی سنگ از نرمال به راندگی، با شیب به سمت شمال و همچنین ایجاد گسل‌های امتداد لغز را در پی داشته است که با جهت جابه‌جایی زوج‌های گسلی با راستای فشاری وارد بر کمر بند چین‌خورده کپه‌داغ منطبق است. از نظر زمان تشکیل و سازوکار حرکت، گسل‌های کپه‌داغ را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه نخست گسل‌های هم‌زمان با فرونشست حوضه کپه‌داغ است که به‌طور عموم روند شرقی-غربی و یا شمال‌غربی-جنوب‌شرقی دارند. این گسل‌ها در آغاز سازوکار نرمال داشته‌اند اما پس از برقراری سامانه‌های فشارشی به سامانه معکوس تغییر وضعیت داده‌اند و شیب آنها رو به شمال و شمال‌شرق شده است. گروه دوم گسل‌ها، محور چین‌ها را قطع می‌کنند و از نوع همگرا هستند که ممکن است امتداد لغز راست‌گرد، با روند شمال‌غربی، و یا امتداد لغز چپ‌گرد، با روند شمال‌شرقی باشند. گسل‌های امتداد لغز راست‌گرد، در مقایسه با انواع چپ‌گرد، طول و توان لرزه‌خیزی بیشتر دارند (آقانباتی، ۱۳۸۳).

بررسی نقشه گسل‌های خراسان رضوی (شکل ۱) بیانگر حضور گسل‌های متعدد و متنوع در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در این نوشتار به معرفی فقط دو گسل اصلی پرداخته می‌شود در مجاورت منطقه زلزله‌زده هستند که احتمالاً یکی از آنها مسبب زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ دو قلعه فریمان با بزرگی  $M_L=6.0$  باشند.

الف) گسل‌های آغار و فریمان: قطعه گسلی آغار به طول ۴۰ کیلومتر و قطعه گسلی فریمان به طول ۸۰ کیلومتر که با دو قطعه مجزا نام‌گذاری شده‌اند، یک گسله با طول تقریبی ۱۲۰ کیلومتر با راستای عمومی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی را تشکیل می‌دهند که از جنوب شرقی شهر فریمان عبور می‌کند. این قطعات گسلی با سازوکار

اندازه‌گیری حرکات گسل با استفاده از شبکه نقاط و اندازه‌گیری توسط سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) از سوی سازمان نقشه‌برداری، نیز نشان‌دهنده فعالیت این گسل است. بخش‌های میانی این گسل در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چناران با نام گسل چشمه گیلاس معرفی شده است. ادامه گسل کشف رود (بخش انتهایی آن) را گسل مزدوران نامیده‌اند که به موقعیت زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان نزدیک می‌باشد که براساس نتایج بررسی‌های پژوهش ما قطعه جدیدی از این گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی نیز می‌باشد. علاوه بر آن حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های آن مطابقت نسبتاً خوبی با سازوکار گسله مزدوران را نشان می‌دهد.

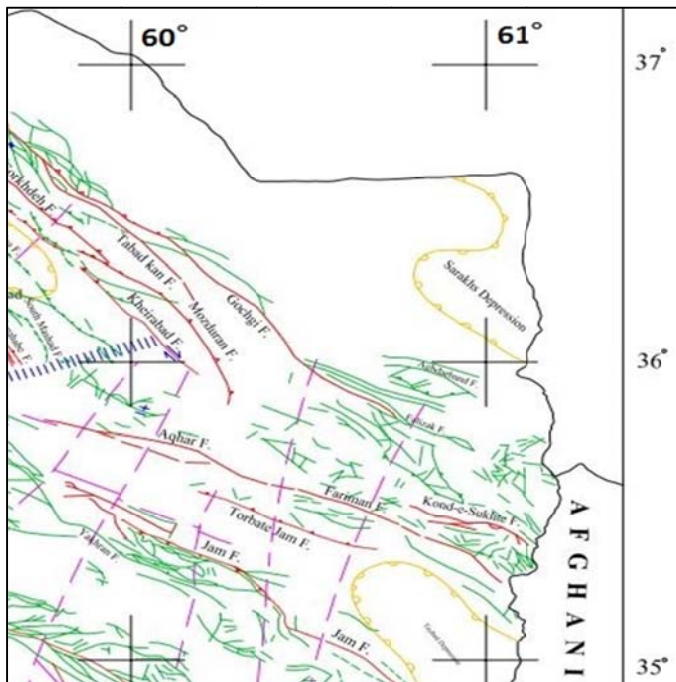
## ۲. پردازش داده

یک هفته پس از وقوع زمین‌لرزه، ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله یک شبکه محلی موقت فشرده لرزه‌نگاری را در منطقه شرق فریمان طراحی، نصب و راه‌اندازی کرد. شبکه موقت پژوهشگاه با ۱۶ ایستگاه لرزه‌نگاری سه مؤلفه‌ای و ۳ ایستگاه شتاب‌نگاری سه مؤلفه‌ای به صورت پیوسته در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴/۱۲ تا ۲۰۱۷/۰۵/۱۷ مطابق مشخصات جدول ۱ و نقشه شکل ۲ همه پس‌لرزه‌های رخ داده را ثبت کرده است. در این عملیات لرزه‌نگاری از ۱۶ لرزه‌سنج ۲۰ ثانیه‌ای لنارتز (Lenartz) و دیجیتایزرهای ساخت شرکت لرزه‌نگار پارسیان با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز استفاده شده است. علاوه بر آن در سه ایستگاه شتاب‌نگاری شبکه موقت از سه شتاب‌نگار CMG-5TD ساخت شرکت گورالپ با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز استفاده شد. پس از تبدیل فرمت داده‌ها و تشکیل بانک داده در بازه زمانی بهره‌برداری از شبکه موقت پژوهشگاه، بیش از ۱۵۰۰ پس‌لرزه با کیفیت مناسب شکل موج که در بیش از چهار ایستگاه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری موقت ثبت شده بودند،

معکوس و شیب به سوی جنوب‌شرق باعث رانده شدن آمیزه‌های افیولیتی کرتاسه (از سمت جنوب‌غرب) بر روی کنگلومرای اتوسن (در شمال‌شرق) شده‌اند. علاوه بر آن، نهشته‌های پلیوسن کواترنری بریده شده در امتداد گسله فریمان بیانگر جوان بودن آن می‌باشد. شایان ذکر است علی‌رغم اینکه داده دقیق سن‌سنجی و یا لرزه‌خیزی برای این دو قطعه گسلی گزارش نشده است اما با توجه به شواهد ریخت‌زمین‌ساختی حسامی آذر (۱۳۸۷) آنها را به‌عنوان گسل‌های توانمند معرفی کرده است.

ب) گسل کشف رود: گسل فشاری کشف رود، گسلی با راستای خمدار شمال‌غربی-جنوب‌شرقی و درازای نزدیک به ۱۲۰ کیلومتر است. گسل بنیادی کشف رود به موازات رشته کوه‌های کپه‌داغ و کناره شمالی دشت مشهد کشیده شده و به روشنی رسوبات آبرفتی کواترنر دشت را قطع کرده و دارای شیب به سوی شمال‌شرقی است. وجود ریخت‌های تخت سه گوش در راستای این گسل، برش در رسوبات جوان آبرفتی و چشمه‌های فراوان (به‌طور نمونه در روستای چشمه گیلاس) و ایجاد دیواره در تمامی درازای آن، نشانه فعال بودن گسل فشاری کشف رود است (بربریان، ۱۳۶۱). گسل کشف رود بر روی نقشه خطواره‌های بنیادین مغناطیسی (فروتن و خیرالهی، ۱۳۹۳) به‌وضوح مشاهده می‌شود. با توجه به دانسته‌های ژئوفیزیکی و ریخت‌شناسی و برداشت‌های صحرائی آشکار است که فرونشست بین کوه‌های کپه‌داغ و بینالود و به‌وجود آمدن ارتفاعات شمال، شمال‌غربی و جنوب‌شرقی مشهد، در امتداد همین گسل اتفاق افتاده (بربریان و همکاران، ۱۳۷۸) و در واقع می‌توان آن را به‌عنوان مرز جنوبی گستره کپه‌داغ در ناحیه مشهد معرفی کرده و به‌عنوان خط جدایی حوضه بینالود و کپه‌داغ آن را در نظر گرفت (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲). این گسل، گسلی است لرزه‌زا و به احتمال زیاد زمین‌لرزه‌های ۳۰ ژوئیه سال ۱۶۷۳ و آوریل ۱۶۸۷ مشهد به‌سبب جنبش دوباره این گسل رویداده‌اند (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ بربریان و یتس، ۲۰۰۱). پژوهش‌های نوین در زمینه

استخراج شد. جدول ۲ استفاده شد. شایان ذکر است در مدل کشوری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مطابق برای تعیین محل رویدادهای ثبت شده از مدل سرعتی پژوهشگاه نسبت سرعت موج P به موج S برابر با ۱/۷۳ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. نقشه گسل‌های منطقه فریمان برگرفته از حسامی آذر و همکاران (۱۳۸۲) با تغییرات جزئی.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

اسم روستا	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
رزمگاه	Razm	۳۵/۷۲۶	۶۰/۲۹۱	۱۴۵۰
محمدآباد سرچشمه	Mohm	۳۵/۷۰۱	۶۰/۳۷۸	۱۴۰۴
القور	Algh	۳۵/۶۹۶	۶۰/۴۶۹	۱۲۵۱
کارغش علیا	Karo	۳۵/۷۵۹	۶۰/۲۳۴	۱۳۴۷
کوه سفید	Kohs	۳۵/۷۷۹	۶۰/۴۵۶	۱۰۹۳
درخت بید	Derb	۳۵/۸۰۸	۶۰/۳۵۳	۱۲۳۹
کلاته منار	Kalm	۳۵/۹۳۸	۶۰/۲۴۲	۹۸۵
چاه مزار سفلی	Chah	۳۵/۶۷۶	۶۰/۵۸۸	۱۳۸۶
قلعه پختوک	Ghal	۳۵/۸۹۰	۶۰/۴۷۹	۹۰۹
بابا نظر	Baba	۳۵/۸۷۷	۶۰/۳۱۵	۱۰۶۶
کلاته کربلایی قدم	Kalk	۳۵/۸۲۳	۶۰/۴۰۱	۱۰۹۶
صالح خانی	Sale	۳۵/۹۸۴	۶۰/۲۶۹	۱۰۴۱
چشمه علی	Chea	۳۵/۸۲۱	۶۰/۲۱۳	۱۲۲۰
جیزآباد	Giza	۳۵/۸۳۷	۶۰/۱۴۴	۱۲۷۲
سنجدک	Sanj	۳۵/۷۴۶	۶۰/۲۴۵	۱۳۸۸
خانقاه	Khan	۳۵/۷۳۶	۶۰/۴۸۸	۱۱۷۳
دوقلعه	Dogh	۳۵/۷۰۸	۶۰/۴۳۲	۱۲۷۳
شاهان گرماب	Shah	۳۵/۷۹۱	۶۰/۱۹۴	۱۴۵۵
کلاته حاج علی	Kalh	۳۵/۸۴۵	۶۰/۲۷۳	۱۱۱۰

شکل ۲ برگرفته از نقشه گسل‌های ایران حسامی آذر و همکاران (۱۳۸۲) می‌باشد؛ از طرفی با توجه به نقشه گسل‌های منطقه مورد مطالعه که توسط سازمان برنامه و بودجه کشور گزارش شده است، یک قطعه گسلی دیگری که با رنگ سیاه نشان داده شده برای منطقه فریمان پیشنهاد شده است؛ که در نقشه گسل‌های فعال ایران ارائه شده توسط حسامی آذر و همکاران (۱۳۸۲) مشخص نشده بود.

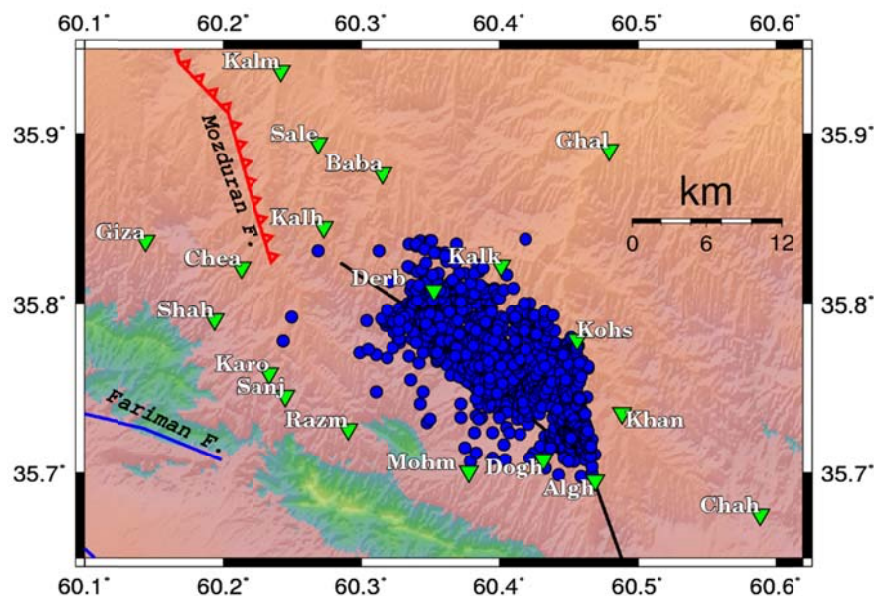
با توجه به انطباق مناسب پس‌لرزه‌ها با قطعه گسلی پیشنهادی سازمان برنامه، سعی شده است با شواهد و بررسی دقیق‌تر از وجود این گسل اطمینان حاصل شود بنابراین پس از بررسی‌های گسترده نقشه‌های هوایی و زمین‌شناسی منطقه، حضور این قطعه گسلی مورد تأیید قرار گرفت که با شواهد زمین‌شناسی مطابقت دارد. برای بررسی دقیق‌تر خصوصیات هندسی قطعه گسلی جدید شناسایی شده، در مرحله‌های بعدی مدل سرعتی یک‌بعدی منطقه رابینه کرده و موقعیت پس‌لرزه‌ها را بازیابی می‌کنیم.

پس از انتخاب مدل سرعت اولیه برای تعیین محل رویدادها و مشخص کردن فایل مختصات ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری، با قرائت فازهای لرزه‌ای  $P_g$  و  $g_k$  تعیین محل اولیه و زمان وقوع همه ۱۵۰۰ رخداد لرزه‌ای انجام شد. که از این تعداد ۱۱۶۵ پس‌لرزه دارای گپ آزیموتی کمتر از ۱۸۰ بودند. در شکل ۲ رومرکز پس‌لرزه‌هایی که در بیش از ۵ ایستگاه ثبت شده‌اند و دارای گپ آزیموتی کمتر از ۱۸۰ درجه هستند همراه با موقعیت ایستگاه‌ها نشان داده شده است. روند کلی توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها از روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق و تقریباً هم‌راستا با روند گسله مزدوران تبعیت می‌کند.

بر اساس موقعیت زمین‌لرزه اصلی و همچنین توزیع پس‌لرزه‌ها، مشاهده می‌شود که زمین‌لرزه فریمان در بخش انتهایی گسل مزدوران (ادامه گسل کشف رود) و بخش میانی گسل فریمان، مرتبط با جنبش یکی از دو گسل فوق، روی داده است. گسل‌های مزدوران و فریمان در

جدول ۲. مدل کشوری ساختار سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۸۰	۴۶	۱۸	۱۴	۶	۰	عمق (km)
۸/۱	۸/۰۵	۶/۵	۶/۳	۵/۹	۵/۴	سرعت موج P (km/s)



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌ها (مثلث‌های سبزرنگ) و رومرکز پس‌لرزه‌ها (دایره‌های آبی‌رنگ) با توجه به مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

می‌باشد؛ لذا در ادامه برای تعیین محل مجدد پسر لرزه‌ها از مدل سرعتی به دست آمده در این تکرار استفاده می‌شود که به صورت خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است:

جدول ۴. مدل سرعتی یک‌بعدی به دست آمده با استفاده از برنامه لوتوس ۱۲ به ازای تکرار ششم در بازه‌های عمقی مختلف.

عمق	$V_p$	$V_s$	$V_p/V_s$
۰	۵/۳۶۳	۳/۱۰۵	۱/۷۲۷
۳	۵/۶۳۲	۳/۲۰۱	۱/۷۵۹
۶	۵/۹۳۱	۳/۳۰۵	۱/۷۹۴
۹	۶/۰۹۶	۳/۴۰۳	۱/۷۹۱
۱۲	۶/۲۳۹	۳/۵۰۶	۱/۷۷۹
۱۵	۶/۳۸۶	۳/۵۹۶	۱/۷۷۵
۱۸	۶/۵۲۶	۳/۶۸۳	۱/۷۷۱
۲۱	۶/۶۶۰	۳/۸۱۵	۱/۷۴۵
۲۴	۶/۸۲۸	۳/۹۳۹	۱/۷۳۳
میانگین	-----	-----	$1.757 \pm 0.024$

در گام بعدی مدل سرعتی به دست آمده از برنامه لوتوس را با استفاده از برنامه ولست مجدداً بهینه می‌کنیم؛ از آنجا که داده‌های مورد استفاده در تعیین مدل سرعت باید دقت کافی داشته باشند، لازم است که داده‌های مورد استفاده با معیارهای ویژه‌ای انتخاب شوند بدین منظور ابتدا زمین‌لرزه‌هایی که دارای گپ آزیموتی کمتر از ۱۲۰ درجه، باقی‌مانده زمانی کمتر از ۰/۱، ثبت شده در حداقل ۱۱ ایستگاه دریافت‌کننده و خطای رومرکز و عمق کمتر از ۲ کیلومتر بودند را انتخاب کردیم که تعداد آنها ۵۵۷ زمین‌لرزه بود.

سپس با استفاده از روش واداتی و در نظر گرفتن معیارهایی همچون ثبت در حداقل ۱۱ ایستگاه، حداکثر باقی‌مانده زمانی ۰/۱ و حداقل همبستگی ۰/۹۷ نسبت سرعت  $V_p/V_s$  به صورت  $1.71 \pm 0.07$  محاسبه شد. به دست آوردن مدل سرعتی با استفاده از برنامه ولست در دو گام انجام شد. در گام اول مدل به دست آمده از برنامه لوتوس را به کار برده و ۵۰ مرتبه عمل برگردان را انجام دادیم. در شکل ۳ مدل اولیه (نمودار قرمز رنگ)، نتایج

علاوه بر آن سعی شده است سازوکار کانونی آن را که مسبب زمین‌لرزه اصلی ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان بوده است را محاسبه و ارائه کنیم.

### ۳. محاسبه مدل سرعتی یک‌بعدی بهینه‌شده برای منطقه

مدل سرعتی پوسته یکی از عوامل موثر در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها می‌باشد، بنابراین یکی از دلایل عمده خطای زیاد در تعیین موقعیت زمین‌لرزه‌ها، عدم صحت مدل‌های سرعت اولیه استفاده شده، می‌باشد. با توجه به این مطلب، هر چه دقت مدل سرعتی پوسته به کار رفته در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها بیشتر باشد مسلماً نتایج ما بهتر و قابل اعتمادتر خواهد بود. داشتن مدل سرعتی مناسب، علاوه بر تعیین محل دقیق‌تر زلزله‌ها، برای تعیین و تشخیص لایه‌بندهای زمین، ارتقاء توانایی برای تشخیص انفجارها از زلزله‌ها، تعبیر و تفسیر زمین‌ساخت بزرگ‌مقیاس و در نهایت تعیین واقع‌گرایانه خطر زلزله نیز مؤثر می‌باشد بنابراین ما در گام بعدی با استفاده از برنامه لوتوس ۱۲ ارائه شده توسط ایوان کولاکوف (۲۰۱۲) مدل یک‌بعدی پژوهشگاه که برای تعیین محل‌های مورد استفاده قرار گرفت را بهینه کرده و آنگاه سعی شده است که زلزله‌ها با استفاده از مدل سرعتی جدید دوباره تعیین محل شوند.

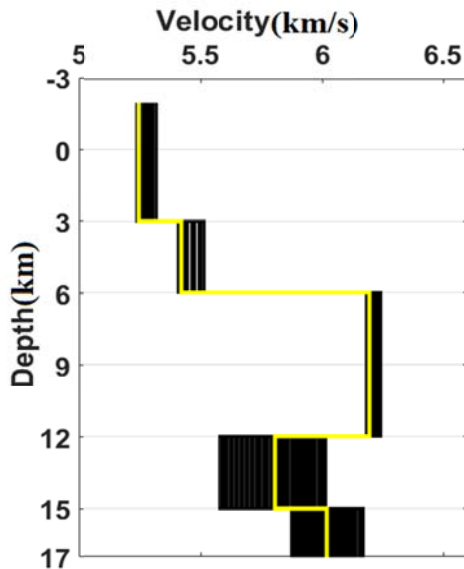
پس از نصب و راه‌اندازی نرم‌افزار لوتوس ۱۲ و تبدیل فرمت داده‌های استخراج شده از شبکه لرزه‌نگاری موقت فریمان، فرآیند بهینه‌سازی مدل ساختار سرعتی منطقه انجام شد. در این راستا برنامه لوتوس ۱۲ را ۶ بار تکرار کردیم که نتایج خطای RMS مطابق جدول ۳ خلاصه شده است:

جدول ۳. RMS‌های حاصل از ۶ تکرار بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی سرعت با استفاده از برنامه لوتوس ۱۲.

تکرار	خطای RMS
۱	۰/۰۸۹۲
۲	۰/۰۸۰۷
۳	۰/۰۷۹۶
۴	۰/۰۷۸۵
۵	۰/۰۷۸۵
۶	۰/۰۷۷۱

مطابق جدول ۳ کمترین RMS مربوط به تکرار ششم

دوم مجدداً با استفاده از برنامه ولست ۵۰ مرتبه عمل برگردان را انجام داده که در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج حاصل از ۵۰ مرتبه برگردان (نمودارهای سیاه رنگ) تا عمق ۱۲ کیلومتری همگرایی تقریباً خوبی را نشان می‌دهند و از این عمق به پایین‌تر با توجه به نبود زمین‌لرزه‌ها در این نواحی، همگرایی ضعیف می‌شود و مدل به‌دست آمده قابل قبول نخواهد بود لذا مدل نهایی به‌دست آمده تا عمق ۱۲ کیلومتر گزارش خواهد شد. مدل نهایی را مقدار میانگین به‌دست آمده از ۵۰ مدل در هر لایه (نمودار زرد رنگ) در نظر می‌گیریم.



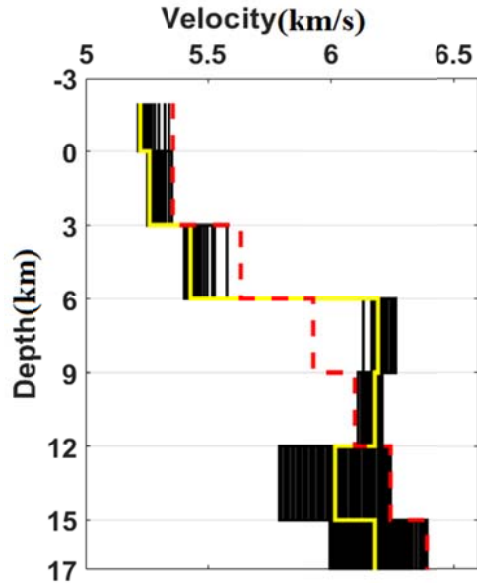
شکل ۴. ورودی و خروجی برنامه ولست در گام دوم. نتایج حاصل از ۵۰ برگردان (نمودارهای سیاه رنگ) و مدل نهایی (نمودار زرد رنگ).

بنابراین مدل سرعتی نهایی در مراحل بعدی به‌صورت جدول ۶ خواهد بود. در شکل ۵ هر سه مدل سرعتی ذکر شده، با هم مقایسه شده اند.

جدول ۶. مدل سرعتی یک‌بعدی نهایی به‌دست آمده در منطقه فریمان.

Depth (Km)	$V_p$ (km/s)
۰	۵/۲۵
۳	۵/۴۲
۶	۶/۲۰
۱۲	۵/۸۱

حاصل از ۵۰ برگردان (نمودارهای سیاه رنگ) و مقدار میانگین به‌دست آمده از ۵۰ مدل در هر لایه (نمودار زرد رنگ) نشان داده شده است.



شکل ۳. ورودی و خروجی برنامه ولست در گام اول. مدل اولیه (نمودار قرمز رنگ)، نتایج حاصل از ۵۰ برگردان (نمودارهای سیاه رنگ) و مقدار میانگین مدل‌ها (نمودار زرد رنگ).

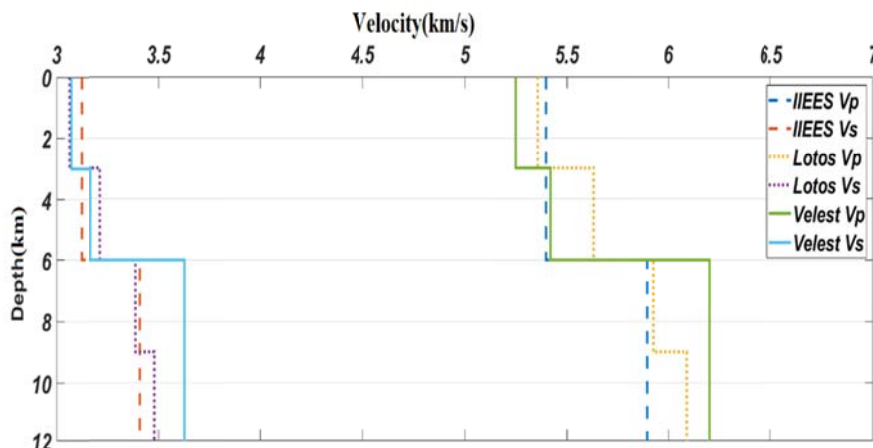
همان‌طور که از روی شکل نیز مشخص است در عمق‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۱۵ کیلومتر تغییرات سرعت داریم؛ لذا در گام بعدی این اعماق را مرز لایه‌ها فرض کرده و مدل اولیه‌ای متناسب با آن در نظر می‌گیریم.

در گام دوم با توجه به عمق لایه بندی‌های به‌دست آمده، مدل سرعتی اولیه به‌صورت جدول ۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵. مدل سرعتی یک‌بعدی به‌دست آمده در گام اول که به‌عنوان مدل اولیه گام دوم در نظر گرفته شده است.

Depth (Km)	$V_p$ (km/s)
۰	۵/۲۴
۳	۵/۴۳
۶	۶/۱۹
۱۲	۶/۰۲
۱۵	۶/۱۸
۱۸	۶/۴۱

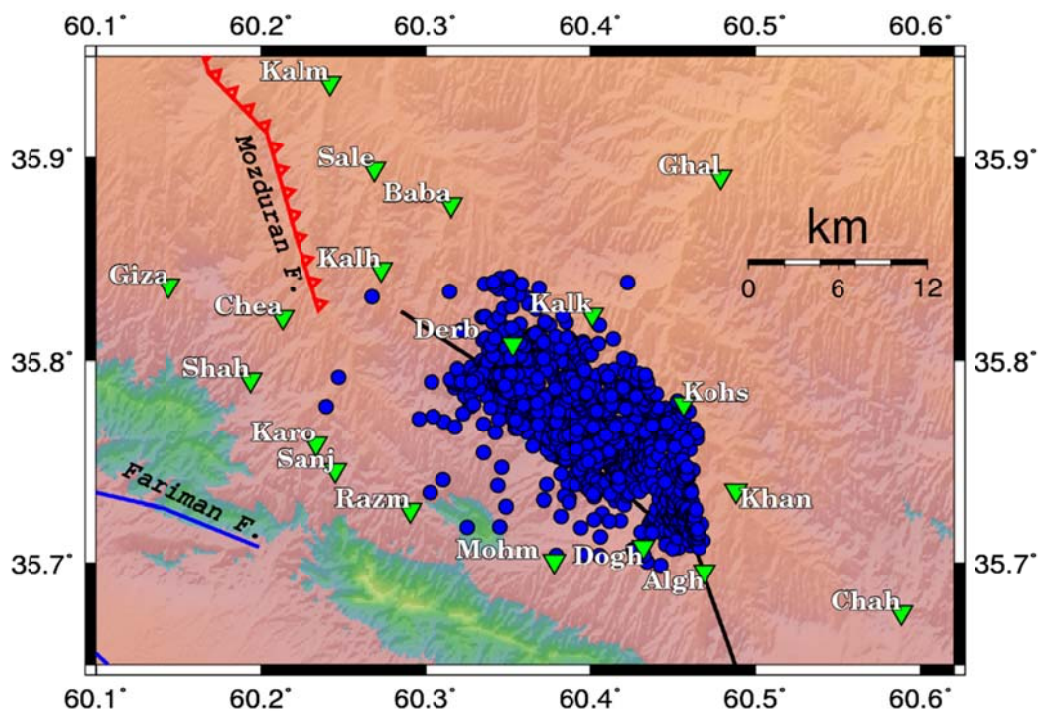
حال با در نظر گرفتن مدل اولیه‌ای مطابق جدول ۵ در گام



شکل ۵. مقایسه مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES)، مدل سرعتی به‌دست آمده با استفاده از برنامه لوتوس (Lotos) و مدل نهایی به‌دست آمده در این پژوهش (Velest).

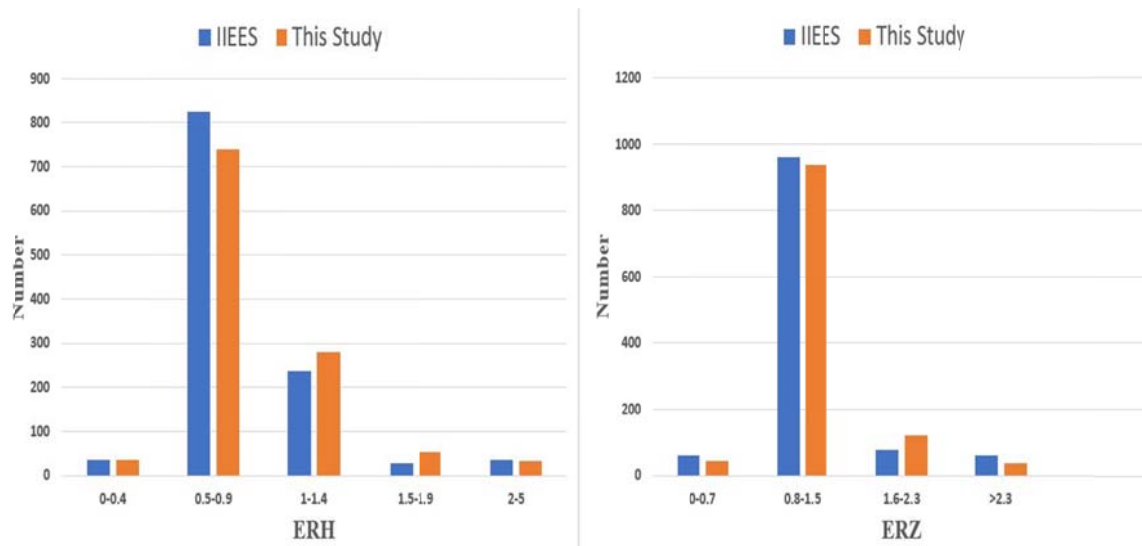
مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از روی شکل نیز مشخص است خطای مکان‌یابی با استفاده از مدل به‌دست آمده در این پژوهش کمتر از خطای مکان‌یابی با استفاده از مدل پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله می‌باشد. بنابراین استفاده از این مدل سرعتی، نتایج بهتری را نشان می‌دهد.

حال با استفاده از این مدل سرعتی، پس‌لرزه‌ها را مجدداً تعیین محل می‌کنیم که در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷ مقادیر خطای زمان وقوع (RMS)، خطای تعیین رومرکز (ERH) و خطای عمق (ERZ) به‌دست آمده از مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مدل سرعتی حاصل از این پژوهش،

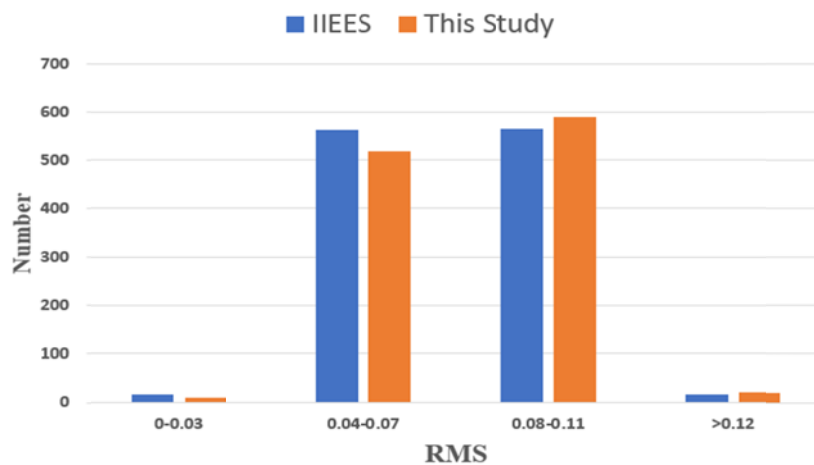


شکل ۶. رومرکز پس‌لرزه‌ها (دایره‌های آبی‌رنگ) و موقعیت ایستگاه‌ها (مثلث‌های سبز رنگ) با توجه به مدل سرعتی محاسبه شده در این پژوهش.





(الف)

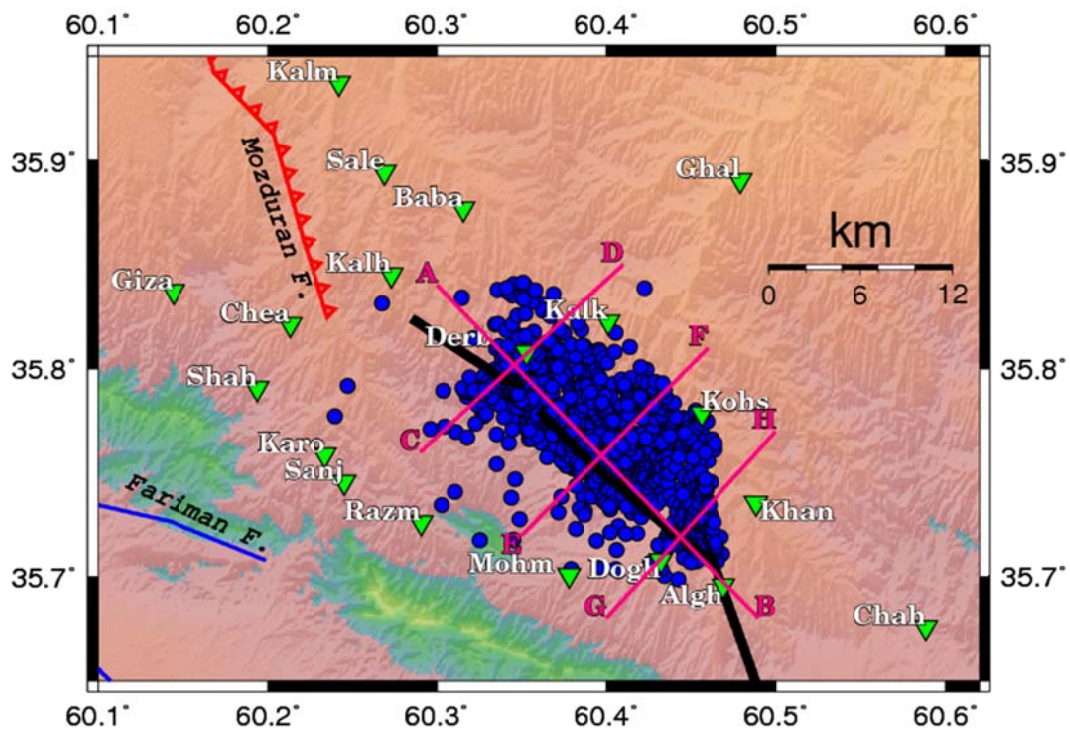


(ب)

شکل ۷. مقایسه خطای مکان‌یابی با استفاده از مدل به‌دست آمده در این پژوهش و مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. الف) نمودار مقایسه خطای رومرکز (ERH) و خطای عمق کانونی (ERZ) بر حسب کیلومتر. ب) نمودار مقایسه خطای زمان وقوع (RMS).

شده است که در شکل ۸ راستای پروفیل‌ها به نمایش در آمده‌اند. مقطع طولی AB و مقاطع عرضی EF، CD و GH برای ۸۱۲ پس‌لرزه با گپ آزمون‌توی کمتر از ۱۲۰ درجه نیز در شکل ۹ محاسبه و ترسیم شده است.

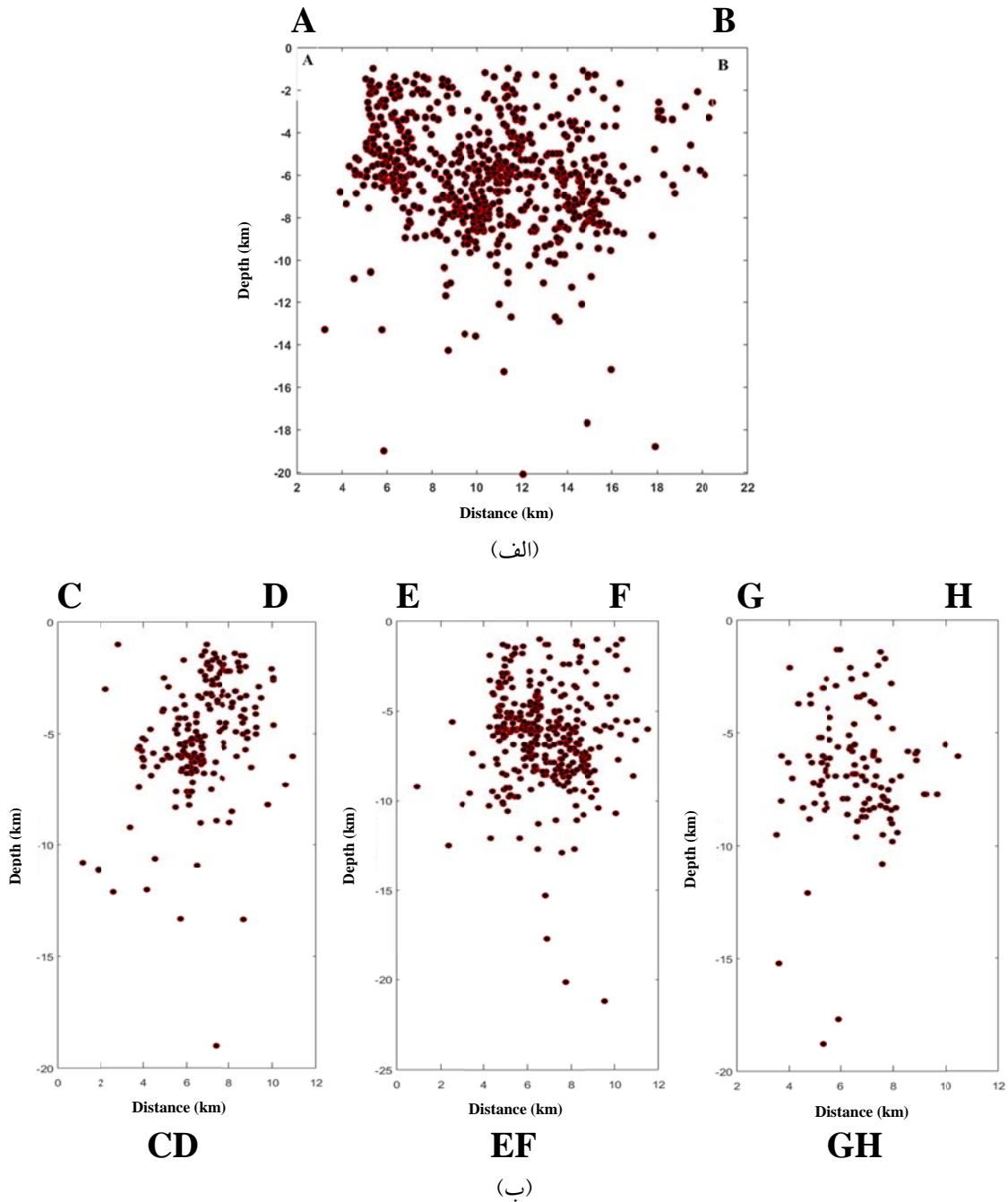
۴. بررسی مقاطع طولی و عرضی و عمق پس‌لرزه‌ها به‌منظور بررسی عمق پس‌لرزه‌ها و نیز مطالعه شیب گسل، چهار مقطع یکی در راستای روند پس‌لرزه‌ها و سه تای دیگر عمود بر روند پس‌لرزه‌ها در منطقه محاسبه و ترسیم



شکل ۸. موقعیت و راستای مقاطع لرزه‌های پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ فریمان به‌همراه رومرکز پس‌لرزه‌های با گپ آزیوتی کمتر از ۱۲۰ درجه.

است. مقطع EF که در میانه‌های روند پس‌لرزه‌ها در نظر گرفته شده است نیز یک به‌خط‌شدگی همانند مقطع CD البته با وضوح بیشتر را نشان می‌دهد. محدوده عمقی پس‌لرزه‌های روی مقطع EF نیز در حدود ۱۰-۲ کیلومتر است. در پایان روند نیز مقطع GH ترسیم شده است که چون در انتهای روند قرار دارد تعداد پس‌لرزه‌های روی آن به مراتب کمتر از دو مقطع عمودی دیگر خواهد بود. این مقطع نیز یک به‌خط‌شدگی شبیه به دو مقطع عمودی دیگر نشان می‌دهد و پس‌لرزه‌های روی آن دارای عمقی در محدوده ۷-۲ کیلومتر هستند. از مقاطع ترسیم شده می‌توان نتیجه گرفت که گسل مسبب زمین‌لرزه گسلی با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرقی و شیب به‌سوی شمال‌شرق خواهد بود که با مشاهدات میدانی درزه‌ها و شکستگی‌های برشی و ریزش توده‌های سنگی عظیم در مسیر روستای کوه سفید علیا به روستای درخت بید کاملاً همخوانی دارد.

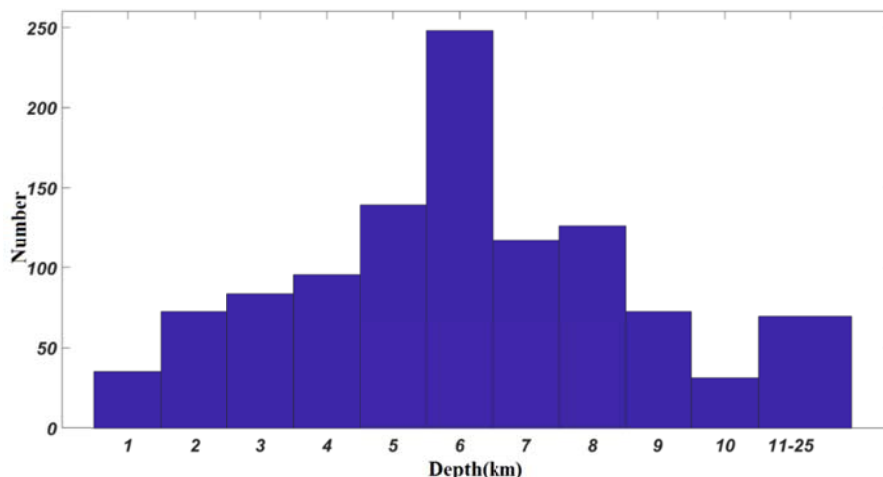
مقطع طولی AB نشان می‌دهد که پس‌لرزه‌ها در محدوده عمقی ۱۰-۲ کیلومتر رخ داده‌اند. در ابتدای مقطع AB پس‌لرزه‌ها دارای عمق متوسط بوده و در ادامه در میانه‌های مقطع، تعداد و عمق پس‌لرزه‌ها بیشتر شده و در نهایت در پایان مقطع، هم تعداد و هم عمق پس‌لرزه‌ها کاهش می‌یابد؛ در نتیجه از روی توزیع عمقی پس‌لرزه‌ها در امتداد این مقطع طولی نمی‌توان جهت شکست را به‌دست آورد. عمق پس‌لرزه‌هایی که روی مقطع عرضی CD که در ابتدای روند پس‌لرزه‌ها زده شده است در محدوده ۸-۲ کیلومتر است و یک به‌خط‌شدگی ضعیفی را نشان می‌دهد؛ البته از روی این مقطع شیب قابل‌قبولی استنتاج نمی‌شود؛ چون در این بخش هم تعداد پس‌لرزه‌ها کم بود و به‌نظر می‌رسد که روی تکه‌ای دیگر از گسل با امتداد متفاوت قرار دارد که ممکن است سازوکار و حتی شیب آن متفاوت با قطعه گسلی مدنظر ما در این پژوهش باشد. بنابراین مقطع CD صرفاً جهت تعیین وضعیت عمقی پس‌لرزه‌ها در انتهای محدوده در نظر گرفته شده



شکل ۹. توزیع عمقی پس‌لرزه‌های دارای گپ آزیموتی کمتر از  $120^\circ$  درجه روی مقطع طولی AB (الف)، مقاطع عرضی (ب).

درجه که در بیش از ۵ ایستگاه ثبت شده‌اند در شکل ۱۰ ترسیم شده است. بررسی عمق پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که بیشتر آنها در گستره عمقی ۴-۸ کیلومتر قرار دارند بنابراین زون خرد شده در عمق  $6 \pm 2$  کیلومتر واقع شده است.

برای درک بهتر زون خرد شده بهتر است که نمودار فراوانی پس‌لرزه‌های تعیین محل شده بر حسب عمق را ترسیم کرد تا به یک دید کلی از محدوده عمقی پس‌لرزه‌ها دست یابیم. بدین منظور نمودار فراوانی پس‌لرزه‌های با گپ آزیموتی کمتر از  $180^\circ$



شکل ۱۰. فراوانی پس‌لرزه‌های تعیین محل شده با گپ کمتر از ۱۸۰ درجه در منطقه فریمان بر حسب عمق آنها.

تعیین پارامترهای صفحه گسلی با استفاده از قرائت پلاریته اولین زمان رسید موج P پرداخته شد که نتایج آن در مقایسه با گزارش سایر مراکز لرزه‌نگاری در جدول ۷ ارائه شده است. علاوه بر آن نقشه شکل ۱۱ موقعیت و سازوکار کانونی محاسبه شده در این پژوهش برای زمین‌لرزه اصلی را در مقایسه با گزارش سایر مراکز علمی نشان می‌دهد. خطاهای محاسبه موقعیت مکانی به ترتیب  $Erz=4.4$  و  $Erx=3.6$ ،  $Erh=4.2$  کیلومتر به دست آمده است.

۵. محاسبه و بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۶ دوقله فریمان و پس‌لرزه‌های مهم آن

۱-۵. محاسبه سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۶ دوقله فریمان

در ابتدا با استفاده از تلفیق لرزه نگاشت‌های ایستگاه‌های دائمی باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و ایستگاه‌های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به تعیین محل، تعیین بزرگی و

جدول ۷. پارامترهای زلزله اصلی محاسبه شده در این پژوهش در مقایسه با گزارش سایر مراکز علمی.

	Lat.(°N)	Long.(°E)	Depth (km)	Mw	Strike1(°)	Dip1(°)	Rake1(°)	Strike2(°)	Dip2(°)	Rake2(°)
<b>GCMT</b>	۳۵/۹	۶۰/۴	۱۲	۶/۱	۸۹	۵۰	۵۸	۳۱۳	۵۰	۱۲۲
<b>USGS</b>	۳۵/۹	۶۰/۳	۱۲	۶/۱	۱۰۵	۷۳	۸۰	۳۱۶	۲۰	۱۲۰
<b>IPGP</b>	۳۵/۹	۶۰/۴	۱۲	۶/۱	۹۹	۴۴	۶۲	۳۱۶	۵۳	۱۱۴
<b>GFZ</b>	۳۵/۷	۶۰/۴	۱۵	۶/۱	۱۲۶	۵۲	۱۰۳	۲۸۵	۴۰	۷۴
<b>CMT</b>	۳۵/۸۱	۶۰/۳۷	۱۲	۶/۰	۹۱	۴۴	۵۹	۳۱۲	۵۳	۱۱۷
<b>IRSC</b>	۳۵/۷۶	۶۰/۴	۶	۵/۹	۱۰۱	۵۶	۵۶	۳۲۹	۴۵	۱۲۷
مطالعه حاضر	۳۵/۸۱۴	۶۰/۳۲۲	۱۳/۹	۶/۰	۷۴/۵۴	۴۴/۹۳	۳۴/۸۰	۳۱۸/۲۹	۶۶/۲۷	۱۲۹/۲۹

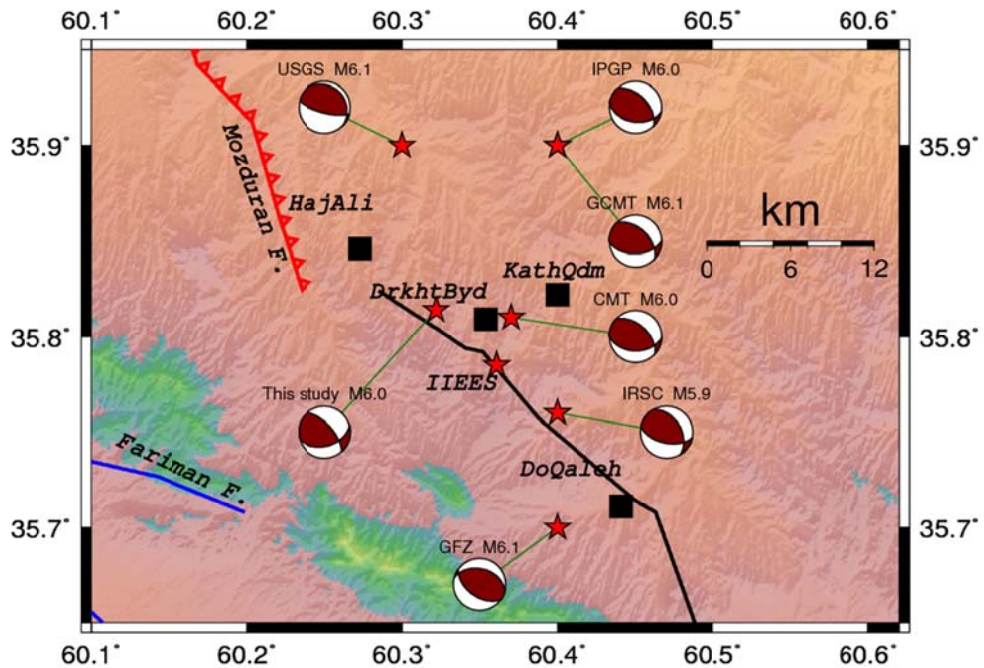
۱۳۹۶ دو قلعه فریمان  $M_w = 6.0$  به‌دست آمده است.

با توجه به مدل سرعتی به‌دست آمده، در حل سازوکار زلزله اصلی از ۴۹ پلارینه استفاده شده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

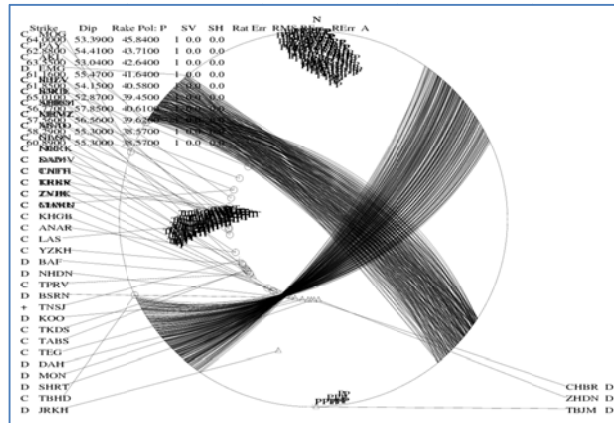
شایان ذکر است برای تعیین بزرگای زلزله اصلی از طیف دامنه لرزه نگاشت‌های مؤلفه قائم ایستگاه‌های لرزه‌نگاری باند پهن به‌شرح جدول ۸ استفاده شده است که میانگین بزرگای گشتاوری محاسبه شده برای زمین‌لرزه اصلی ۱۶ فروردین ماه

جدول ۸. ایستگاه‌های استفاده شده برای تعیین بزرگی گشتاوری زمین‌لرزه اصلی در این مطالعه.

	NASN	SNGE	CHTH	BJRD	TABS	SHRT	BSRN	KRBR	YZKH
$M_w$	۵/۸	۵/۸	۵/۹	۵/۹	۶/۱	۶/۱	۶/۲	۶/۲	۶/۲



شکل ۱۱. رومرکز زلزله اصلی گزارش شده توسط مؤسسات مختلف و این مطالعه.



شکل ۱۲. سازوکار حل شده زلزله اصلی به‌همراه پلارینه‌ها در این پژوهش.

سپس در ادامه به منظور بالا بردن دقت حل سازوکار مربوطه علاوه بر پلاریته از ۱۰ نسبت دامنه استفاده شد که در جدول ۹ ذکر شده‌اند.

بیشترین مقدار خطا در نسبت دامنه‌ها ۰/۱ و بیشترین تعداد خطای پلاریته ۲ در نظر گرفته شده است. در نهایت سازوکار حل شده به صورت شکل ۱۳ به دست آمد که دقت آن به مراتب بهتر از سازوکار شکل ۱۲ است.

۲-۵. محاسبه سازوکارهای کانونی پس‌لرزه‌های

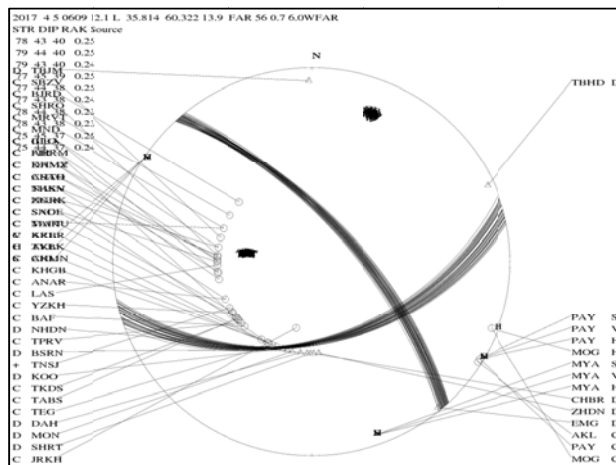
زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ماه ۱۳۹۶ دوقلعه فریمان

در پژوهش حاضر برای محاسبه سازوکارهای کانونی پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه موقت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، از رویدادهایی که دارای حداقل ۸ قطبش و گپ آزمونتی کمتر از ۱۸۰ درجه بودند و خطای رومرکزی زیر ۲ کیلومتر داشتند، استفاده شده است. شایان ذکر است فشرده بودن شبکه لرزه‌نگاری موقت باعث شده است که همه رویدادها در فاصله رومرکزی کمتر از ۶۰ کیلومتر واقع شده‌اند و فقط فازهای لرزه‌ای مستقیم Pg برای محاسبه سازوکارهای کانونی به روش قطبش (پلاریته) موج P مورد استفاده قرار گیرند که با استناد به روش (اسنوکه و همکاران، ۱۹۸۴؛ گیلارد و

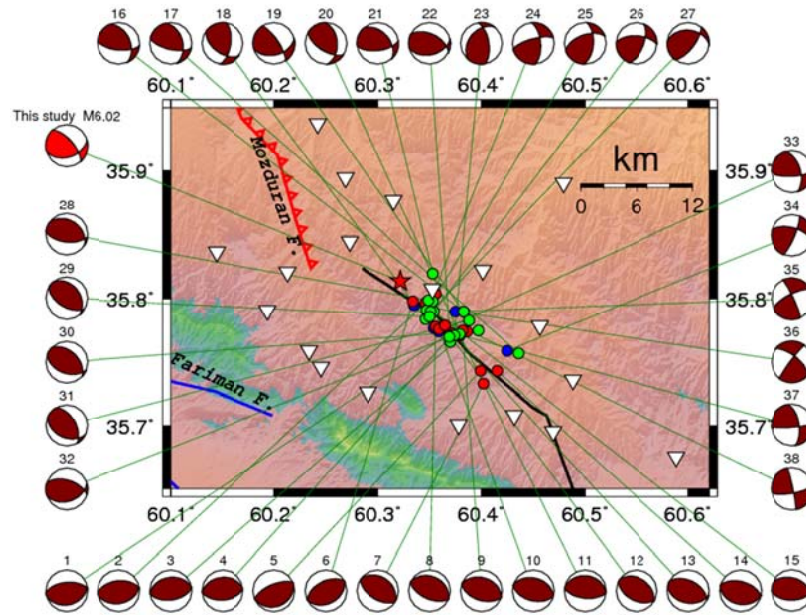
ویس، ۱۹۹۵؛ هاوسکوف و اوتمولر، ۲۰۱۰) و با استفاده از الگوریتم FOCMEC سازوکارهای کانونی بیش از صد پس‌لرزه محاسبه شده است. اما براساس قیدهای میزان انحراف معیار، پارامترهای صفحه گسلی و گپ آزمونتی به سه دسته، بسیار خوب (A)، خوب (B) و متوسط (C) از نظر کیفیت تقسیم‌بندی شده‌اند. بنابراین چنانچه گپ آزمونتی ایستگاه‌ها کمتر از ۱۲۰° بوده باشد و انحراف معیار راستا، شیب و زاویه لغزش به ترتیب کمتر از ۱۰، ۵ و ۱۰ درجه باشند، در گروه A و چنانچه گپ بین ۱۶۰°-۱۲۰° بوده باشد، در گروه B جای می‌گیرند و در نهایت گروه C را آنهایی تشکیل می‌دهند که گپ آزمونتی بیش از ۱۶۰° و کمتر از ۱۸۰° داشته‌اند. با توجه به اینکه سازوکارهای از نوع B و C دارای انحراف معیار زیادی بوده و نمی‌توان صفحه مشخصی را به آنها نسبت داد بنابراین در شکل ۱۴ فقط سازوکارهای کانونی ۳۸ پس‌لرزه با کیفیت A آمده است که عموماً بیانگر گسلی فشاری با مؤلفه امتداد لغز و راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرقی می‌باشند. پارامترهای پس‌لرزه‌های استفاده شده برای سازوکارهای کانونی با کیفیت A همراه با مؤلفه‌های محورهای تنش در پیوست آورده شده است.

جدول ۹. ایستگاه‌های استفاده شده برای استفاده از روش دامنه در تعیین سازوکار زلزله اصلی.

Station	AKL	AKL	AKL	PAY	PAY	PAY	MOG	MYA	MYA	MYA
Component	SS	SV	SH	SS	SV	SH	SH	SS	SV	SH



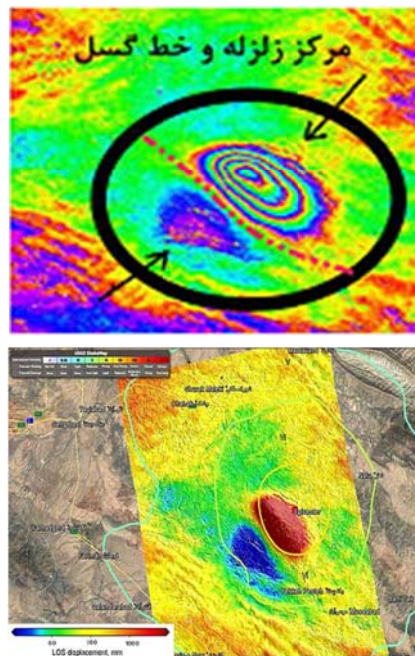
شکل ۱۳. سازوکار حل شده زلزله اصلی به همراه پلاریته‌ها با استفاده از نسبت دامنه در این پژوهش.



شکل ۱۴. سازوکار کانونی پس‌لرزه‌های با کیفیت A. رومرکزهای قرمز رنگ مربوط به مکانیسم‌های معکوس، آبی رنگ مربوطه به مکانیسم‌های امتداد لغز و سبز رنگ‌ها مربوط به مکانیسم‌های ترکیبی (معکوس با مؤلفه امتداد لغز) می‌باشند.

هم‌شدت ناشی از زمین‌لرزه در شکل بالایی و مسیر احتمالی گسل در شکل پایینی نشان داده شده است. بنابراین مسیر شناسایی شده برای گسل مسبب زلزله اصلی در پژوهش حاضر با نتایج مطالعه روش تداخل‌سنجی نیز مورد تأیید است.

۶. بررسی تصاویر تداخل‌سنجی راداری زمین‌لرزه دوقلعه فریمان  
نتایج به‌دست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری توسط بخش سنجش از دور سازمان فضایی ایران در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل رومرکز و منحنی‌های



شکل ۱۵. نقشه جا به جایی به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری توسط بخش سنجش از دور سازمان فضایی کشور (www.isa.ir).

## ۷. نتیجه گیری

مراکز مختلف زلزله‌شناسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه اصلی را گزارش کرده‌اند که خلاصه آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است؛ اما این سازوکارها بیانگر دو صفحه است و مشخص نیست کدام صفحه، صفحه اصلی گسل است. بنابراین با استفاده از مدل سرعتی بهینه‌شده منطقه که با استفاده از برنامه‌های لوتوس و ولست به دست آورده شد، توزیع سطحی پس‌لرزه‌ها را مشخص کرده‌ایم. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است توزیع پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه دوقلعه فریمان روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی دارد که با گسل‌های مزدوران و فریمان در منطقه منطبق می‌باشد. از طرفی منطبق بودن پس‌لرزه‌ها بر قطعه گسلی جدید شناسایی شده در مطالعه حاضر می‌تواند بیانگر حضور این شاخه از ادامه گسل مزدوران در منطقه را تأیید کند. سازوکار عمده پس‌لرزه‌ها به صورت فشاری و فشاری با مؤلفه امتدادلغز بوده است و همچنین مقاطع بررسی شده نشان‌دهنده شیب گسل به سمت شمال‌شرق می‌باشند؛ از طرفی چون پس‌لرزه‌ها در دو طرف گسل مذکور توزیع شده‌اند و رومرکز بیشتر آنها روی سمت راست قطعه گسلی است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این گسل دارای شیب زیادی می‌باشد که جهت شیب آن به سمت شمال‌شرق باشد. با توجه به روند، سازوکار کانونی، نتایج حاصل از توزیع پس‌لرزه‌ها در عمق و همچنین بررسی مقاطع لرزه‌ای ارائه شده در این پژوهش می‌توان گسل مسبب زلزله را گسل سیاه رنگ در شکل ۲ در نظر گرفت که قبلاً نام خاصی به آن نسبت داده نشده است و با توجه به اینکه از روی نقشه‌های تداخل‌سنجی نیز به وضوح مشخص می‌باشد می‌توان آن را ادامه گسل مزدوران نامید که در زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ فعال شده است.

## تشکر و قدردانی

از دو داور محترم که با نظرات ارزشمند افزایش کیفیت مقاله را فراهم کردند، سپاسگزاری می‌کنیم. از آقای دکتر

خالد حسامی آذر بخاطر راهنمایی‌های ارزنده در کمک به بررسی نقشه‌های هوایی و زمین‌شناسی منطقه و تأیید شاخه گسلی جدید صمیمانه سپاسگزاری می‌کنیم. از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که امکان نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری از شبکه لرزه‌نگاری موقت را فراهم آوردند، قدردانی می‌شود. از مهندس علی محمودی و مهندس بندری کارشناسان محترم آزمایشگاه زلزله‌شناسی پژوهشگاه که مسئولیت نصب و بهره‌برداری از شبکه موقت لرزه‌نگاری را به مدت دوماه در منطقه به عهده داشتند، قدردانی می‌کنیم.

## مراجع

- آقناباتی، ع، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ص ۶۰۶.
- افتخارنژاد، ج. و بهروزی، ا، ۱۳۷۰، یافته‌ای جدید از سنگ‌های افیولیتی و سنگ‌های پالئوزویک پایانی در شمال خاوری خراسان (از جمله کپه داغ) و اهمیت ژئودینامیکی آن، فصلنامه علوم زمین، (۱)، ۴-۱۵.
- بربریان، م، قرشی، م، شجاع طاهری، ج، و طالبیان، م، ۱۳۷۸، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه-گسلش در گستره مشهد-نیشابور. سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ۷۲.
- حسامی آذر، خ، جمالی فرد، ف. و طیبی، ه. ۱۳۸۲، نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- حسامی آذر، خ. ۱۳۸۷، بخش لرزه‌زمین‌ساخت از گزارش مطالعات برآورد خطر زمین‌لرزه و ژئوتکنیک لرزه‌ای در ساختگاه حرم مطهر امام رضا (ع)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- سازمان فضایی کشور، ۱۳۹۶، گزارش بخش سنجش از دور سازمان فضایی کشور از زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ شمال‌شرق فریمان استان خراسان رضوی.
- شیخ الاسلامی، م.ر، جوادی، ح.ج، اسدی سرشار، م،



فروتز، م. و خیراللهی، ح.، ۱۳۹۳، نقشه گسل‌های مغناطیسی  
بنیادی ایران، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و  
اکتشافات معدنی کشور.

- Ahmadzadeh, S., Javan Doloei, G. and Zafarani, H.,  
2019, New Intensity Prediction Equation for Iran:  
J. Seismol., <https://doi.org/10.1007/s10950-019-097-882>.
- Ambraseys, N. N. and Melville C. P., 1982, A  
history of Persian earthquakes, Cambridge  
University Press.
- Berberian, M. and king, G.C.P., 1981, Toward a  
paleogeography and tectonic evolution of Iran,  
Canadian J. Earth Sci. 18, 210-265.
- Berberian, M. and Yeats, R. S., 2001,  
Contribution of archaeological data to studies  
of earthquake history in the Iranian Plateau:  
Journal of Structural Geology, 23, 563-584.
- Gillard, D. and Wyss, M., 1995, Comparison of  
strain and stress tensor orientation:  
Application to Iran and southern California: J.  
Geophys. Res., 100(B 11), 22197-22213.
- Havskov, J. and Ottemoller, L., 2010, Routine

آقاحسینی، ا.، کوه پیمان، م. و وحدتی دانشمند، ب.،  
۱۳۹۲، دانشنامه‌ی گسله‌های ایران، پژوهشکده علوم زمین  
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Data Processing in Earthquake Seismology:  
Springer Science +Business Media, B. V., 352  
pp.
- Jackson, L. and McKenzie, D., 1984, Active  
tectonics of the Alpine-Himalayan belt  
between Western Turkey and Pakistan:  
Geophys. J. Astr. Soc., 77, 185-264.
- Koulakov, I., 2012, Code LOTOS-12 for 3D  
tomographic inversion based on passive  
seismic data from local and regional events.
- Naimi, G. N., 2017, Report of Earthquake Mw6.1  
Sefid Sang Mashhad 2017-04-05, Technical  
report, Geological survey of Iran,  
DOI:10.13140/RG.2.2.10927.94888.
- Snoke, J. A., Munsey, J. W., Teague, A. G. and  
Bollinger, G. A., 1984, A program for focal  
mechanism determination by combined use of  
polarity and SV-P amplitude ratio data:  
Earthquake Notes, 55, p15.

پیوست

جدول پارامترهای پس‌لرزه‌های مورد استفاده برای ساز و کارهای کانونی با کیفیت A.

$Z_0$	Date	Time	Long (°N)	Lat (°E)	Depth (km)	$N.P.$	Gap (°)	Strike1 (°)	Dip1 (°)	Rake1 (°)	Strike2 (°)	Dip2 (°)	Rake2 (°)	P(Az,Pl)
1	2017/05/01	15:25	60.370	35.773	6.1	11	59	264.29 ± 4	57.57 ± 4	93.50 ± 3	77.44 ± 8	32.72 ± 4	84.12 ± 5	340.74, 12.46
2	2017/05/02	08:22	60.356	35.804	5.5	14	88	263.68 ± 2	51.25 ± 2	93.31 ± 1	78.32 ± 3	38.88 ± 2	85.79 ± 1	351.32, 6.19
3	2017/05/02	11:31	60.386	35.774	8.1	14	71	261.57 ± 1	36.6 ± 2	90 ± 0	81.57 ± 1	53.4 ± 2	90 ± 0	171.57, 8.4
4	2017/04/18	15:25	60.371	35.771	7.7	13	60	264.96 ± 2	36.6 ± 1	90 ± 0	84.96 ± 2	53.4 ± 1	90 ± 0	174.96, 8.4
5	2017/04/30	08:08	60.399	35.743	9.8	14	73	247.012 ± 2	65.4 ± 1	90 ± 0	67.012 ± 2	24.6 ± 1	90 ± 0	337.01, 20.4
6	2017/04/22	9:49	60.334	35.798	5.4	14	69	243.02 ± 2	52.6 ± 1	90 ± 0	63.02 ± 2	37.4 ± 1	90 ± 0	333.02, 7.6
7	2017/04/29	07:50	60.402	35.733	8.8	13	88	303.042 ± 3	33 ± 3	90 ± 0	123.042 ± 3	57 ± 3	90 ± 0	219.34, 12
8	2017/05/10	18:26	60.356	35.778	8.2	12	59	294.01 ± 2	32.1 ± 2	90 ± 0	114.01 ± 2	57.9 ± 2	90 ± 0	204.01, 12.9
9	2017/05/07	02:25	60.382	35.775	8.6	10	115	288.3 ± 5	38.00 ± 4	90 ± 0	107.09 ± 6	50.6 ± 4	90 ± 0	197.63, 6.2
10	2017/05/10	21:35	60.359	35.776	8.5	10	60	285 ± 5	39.5 ± 4	90 ± 0	105 ± 5	50.5 ± 4	90 ± 0	195, 7.14
11	2017/05/04	04:53	60.379	35.771	8.8	11	64	276.13 ± 1	29.4 ± 2	90 ± 0	96.13 ± 1	60.6 ± 2	90 ± 0	186.13, 15.8
12	2017/05/06	22:47	60.346	35.797	5.4	12	54	302.14 ± 1	40.08 ± 0.64	94.36 ± 1	127.82 ± 0.97	50.06 ± 0.67	93.64 ± 0.80	215.23, 4.99
13	2017/05/08	00:10	60.365	35.779	7.5	13	57	297.15 ± 6	50.42 ± 2	99.90 ± 1	101.80 ± 7	40.60 ± 2	78.23 ± 1	20.13, 4.96
14	2017/04/14	22:21	60.415	35.743	5.5	10	93	285.29 ± 1	54.41 ± 2	91.46 ± 1	102.73 ± 2	35.63 ± 2	87.9 ± 1	14.24, 9.39
15	2017/05/04	16:32	60.352	35.791	7.2	11	51	289.62 ± 2	40.8 ± 0.65	105.95 ± 2	130.28 ± 2	51.11 ± 0.92	103.31 ± 1	210.87, 5.24
16	2017/04/23	23:32	60.383	35.790	5.8	13	76	336.06 ± 5	44.28 ± 3	141.31 ± 6	95.81 ± 1	63.99 ± 4	52.93 ± 1	211.68, 11.37
17	2017/04/23	07:54	60.436	35.757	4.7	14	80	345.30 ± 2	43.32 ± 1	144.34 ± 2	102.85 ± 1	66.40 ± 2	52.58 ± 0.77	219.08, 13.39
18	2017/05/01	03:11	60.346	35.784	7.1	13	56	8.80 ± 1	60.80 ± 5	133.86 ± 1	125.73 ± 2	51.01 ± 1	38.90 ± 2	69.30, 5.72
19	2017/05/07	05:10	60.383	35.790	6.3	13	77	326.43 ± 2	72.76 ± 4	130.99 ± 1	75.05 ± 2	43.95 ± 2	25.15 ± 5	27.27, 17.47
20	2017/05/05	09:35	60.379	35.772	9	10	64	357.04 ± 2	44.96 ± 1	135.47 ± 1	121.88 ± 3	60.31 ± 0.88	54.55 ± 1	236.39, 8.62
21	2017/04/23	02:26	60.353	35.820	12.2	12	116	318.31 ± 5	43.43 ± 0.91	136.67 ± 1	82.72 ± 5	61.86 ± 0.91	55.45 ± 1	196.78, 10.36
22	2017/05/04	18:07	60.370	35.766	8.6	14	64	296.17 ± 2	52.62 ± 3	116.19 ± 2	76.56 ± 2	43.75 ± 1	59.11 ± 1	7.94, 5.24

## ادامه پیوست

No	Date	Time	Long (°N)	Lat (°E)	Depth (km)	N.P.	Gap (°)	Strike1 (°)	Dip1 (°)	Rake1 (°)	Strike2 (°)	Dip2 (°)	Rake2 (°)	P(Az,Pl)
23	2017/05/06	01:52	60.374	35.771	9	12	61	218.99 ± 5	39.20 ± 1	131.22 ± 2	87.47 ± 3	61.65 ± 1	118.23 ± 2	157.45, 12.25
24	2017/05/07	05:24	60.347	35.791	8.1	13	55	254.61 ± 3	72.37 ± 4	149.62 ± 4	154.34 ± 3	61.10 ± 4	158.57 ± 6	29.72, 8.23
25	2017/04/20	20:38	60.353	35.798	7.1	13	57	249.88 ± 1	56.73 ± 2	140.58 ± 1	135.61 ± 2	57.97 ± 1	139.66 ± 3	193.36, 1.61
26	2017/05/04	08:57	60.354	35.790	7.5	14	53	273.40 ± 2	60.01 ± 3	146.11 ± 1	164.88 ± 1	61.15 ± 1	145.21 ± 3	165.38, 2.30
27	2017/05/04	14:37	60.351	35.790	6.6	14	51	275.29 ± 7	37.18 ± 2	141.74 ± 9	152.91 ± 3	68.21 ± 4	120.38 ± 3	220.82, 17.58
28	2017/04/30	06:32	60.349	35.799	5.2	13	47	303.57 ± 1	33.73 ± 1	112.77 ± 2	96.80 ± 3	59.22 ± 1	75.52 ± 1	197.25, 13.07
29	2017/05/01	04:13	60.350	35.786	7.5	13	54	322.34 ± 2	37.24 ± 0.34	107 ± 2	121.30 ± 4	54.66 ± 0.18	77.46 ± 1	220.27, 8.85
30	2017/05/03	09:38	60.397	35.775	9.2	14	81	313.62 ± 2	45.40 ± 3	106.48 ± 1	110.78 ± 3	47.13 ± 2	74 ± 1	140.03, 2.54
31	2017/05/03	20:38	60.388	35.783	6.5	11	116	330.97 ± 2	55.36 ± 3	112.06 ± 1	113.48 ± 4	40.16 ± 3	59.29 ± 6	45.207, 9.30
32	2017/05/06	08:37	60.369	35.770	8.4	13	62	287.12 ± 2	54.67 ± 1	112.01 ± 1	72.17 ± 3	40.86 ± 1	62.13 ± 1	2.48, 7.15
33	2017/05/08	19:45	60.359	35.774	10.1	12	61	344.27 ± 2	55.90 ± 0.98	157.73 ± 2	87.21 ± 2	71.71 ± 1	36.20 ± 1	212.63, 10.05
34	2017/04/29	09:59	60.425	35.759	8.8	13	70	285.65 ± 2	59.30 ± 1	167.25 ± 5	189.10 ± 3	79.02 ± 4	148.59 ± 1	240.71, 13.12
35	2017/05/12	01:56	60.375	35.790	13.7	11	67	242.79 ± 3	71.73 ± 1	172.35 ± 3	150.43 ± 2	82.71 ± 2	161.56 ± 1	197.73, 7.59
36	2017/04/19	18:56	60.335	35.795	11.4	14	61	216.55 ± 2	84.85 ± 1	155.55 ± 1	124.20 ± 1	65.66 ± 1	174.35 ± 1	347.93, 13.18
37	2017/05/09	09:46	60.354	35.777	10.1	13	60	350.98 ± 3	61.86 ± 1	170.55 ± 5	256.60 ± 5	81.61 ± 4	28.53 ± 1	210.35, 25.87
38	2017/05/04	08:32	60.351	35.789	8.4	15	52	348.27 ± 1	84.48 ± 1	164.32 ± 1	79.80 ± 1	74.4 ± 1	5.72 ± 1	34.95, 7.01

## Analysis of the Do-Ghaleh Fariman $M_w$ 6 Earthquake on 5 April 2017 And its aftershocks based on IIEES local Seismic Network

Khosravi, H.<sup>1</sup>, Javan Doloei, Gh.<sup>2\*</sup>, Tatar, M.<sup>3</sup> and Safari, M.<sup>1</sup>

1. M.Sc. Student, Seismology Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Seismology Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

3. Associate Professor, Seismology Department, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

(Received: 26 Sep 2018, Accepted: 1 Oct 2019)

### Summary

The  $M_w$  6.0 Do-Ghaleh Fariman earthquake occurred at 10:39 local time (06:09 GMT) on 2017 April 5, in 46 km away from Fariman city of Khorasan Razavi province in northeast Iran (Figure 1). The mainshock had a maximum Mercalli intensity of VIII (Severe) (Ahmadzadeh et al., 2018), and was felt by many people a radius of 200 km in eastern part of Iran. Despite the low population density, the earthquake caused widespread destruction, killing 2 people and injuring a further 100 people. Although many historical and instrumental destructive earthquakes have occurred in Great Khorasan, no evidences from large earthquakes reported in Fariman region. Immediately, after Do-Ghaleh Fariman earthquake, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) decided to design an intensive seismic network around epicenter for monitoring aftershocks and seismological aspects studies. The IIEES local seismic network contains 16 velocitymeter (Lenartz 20 Sec) and 3 accelerometers (CMG-5TD Guralp with  $\pm 2g$  sensitivity) that deployed in the region for 40 days (Figure 1). The sampling rate of waveform data have been chosen at 200Hz for all seismic stations. Data acquisition is leading to 1500 aftershocks with high quality waveforms in this area. The IIEES velocity model is used as initial velocity model in Lotus12 program for optimizing velocity model in Fariman region. The optimum derived velocity model (as shown in table 4) is used for relocation of aftershocks. Figure 3 shows the location map of relocated aftershocks and seismic stations. The cross sections of well relocated events show a NW-SE dip direction (Figure 3).

To relocate the mainshock and to derive the fault plane solution we have retrieved all waveforms from seismic stations, both Iran Seismic center (ISC) belong to Institute of Geophysics at University of Tehran (IGUT) and Iran National Center of Broadband of Seismic Network belong to IIEES. For fault plane solution the first P-wave polarity method (Snoke et al., 1984) is used. The result of our relocation and fault plane solution of the main shock is shown in figure 5 & table 5 in comparison with other seismic agencies reports. To estimate the fault plane solutions of well-relocated aftershocks, we extracted 120 aftershocks with azimuthal gap less than  $160^\circ$ . The results of our fault plane solutions of 38 aftershocks with high quality are shown in figure 6 that have azimuthal gap less than  $120^\circ$  and recorded at least in 16 seismic stations. Focal mechanisms of 15 aftershocks are reversed which is numbered from 1 to 15 as shown in figure 6 and table 7. However, the rest of fault plane solutions show reverse mechanisms with strike slip component. Generally, the total average trend of reactivated fault, show NNW-SSE direction based on our study that is in good agreement with the trend and focal mechanism of Mozdoran fault (figure 6). Therefore, reactivation of the Mozdoran fault can be considered as main source of Do-Ghaleh Fariman  $M_w$  6 earthquake on April 5 2017. It should be noted that in some technical reports (e.g. Naimi, 2017) and old geological maps the final section of the Mozdoran fault is termed in Chah-Mazar fault.

**Keywords:** Do-Ghale Fariman Earthquake, Seismic network, Kope-Dagh, Mozdoran Fault, Focal mechanism.

\* Corresponding author:

Javandoloei@iiees.ac.ir