

تعیین پارامترهای هندسی گسل و توزیع لغزش بر روی صفحه گسل بر پایه مشاهدات اینسار؛ مطالعه موردی: زمین‌لرزه ۲۳ فوریه سال ۲۰۲۰ قطور

مهین جعفری^{۱*}، زهرا موسوی^۲، عبدالرضا قدس^۳

^۱ دانشجوی دکترا، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
mjafari@iasbs.ac.ir

^۲ دانشیار، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
z.mousavi@iasbs.ac.ir

^۳ استاد، مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
aghods@iasbs.ac.ir

(تاریخ دریافت: فروردین ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: شهریور ۱۴۰۲)

چکیده

برای مطالعه خطرپذیری زمین‌لرزه‌ها، دستیابی به تخمینی از ویژگی‌های گسل‌های فعال مانند پارامترهای هندسی گسل و توزیع لغزش از اهمیت بسزایی برخوردار است. گسیختگی ناشی از زمین‌لرزه منجر به تغییر شکل و جابه‌جایی در سطح زمین می‌شود؛ در ۲۳ فوریه سال ۲۰۲۰ دو زمین‌لرزه به فاصله ۱۰ ساعت در مرز ایران و ترکیه به وقوع پیوست. زمین‌لرزه اول با بزرگای ۵/۸ Mw در ساعت ۰۵:۵۲ به‌وقت جهانی با سازوکار نرمال و زمین‌لرزه دوم با بزرگای ۶/۰ Mw در ساعت ۱۶:۰۰ به‌وقت جهانی با سازوکار امتدادلغز رخ دادند. در این پژوهش جهت شناسایی گسل مسبب زمین‌لرزه از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده‌است. به‌منظور تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه از مدل تحلیلی اکادا (۱۹۸۵) استفاده شده‌است. در مرحله اول مدل‌سازی مستقیم جهت تعیین پارامترهای هندسی گسل با توزیع لغزش یکنواخت برآورد گردید. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی زمین‌لرزه دوم، نشان‌دهنده یک گسل امتدادلغز چپ‌بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه است. در مرحله دوم با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای هندسی گسل که در مرحله اول تخمین زده شده‌اند، توزیع لغزش بر روی صفحه گسل محاسبه گردید. با توجه به توزیع لغزش محاسبه‌شده، بیشترین گسیختگی در عمق ۳ کیلومتری و مقدار لغزش 8 ± 97 سانتی‌متر است. همچنین، با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده، بزرگای گشتاوری زمین‌لرزه دوم 6.05 Mw به دست آمد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، اینسار، پارامترهای گسل، زمین‌لرزه قطور، توزیع لغزش، مدل تحلیلی اکادا

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

از زمانی که زمین‌لرزه لندرز^۱ کالیفرنیا در سال ۱۹۹۲ با موفقیت با استفاده از تصاویر راداری حاصل از ماهواره ERS-1 شناسایی شد، تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) به‌عنوان یک ابزار ارزشمند برای مطالعه زمین-لرزه‌ها شناخته شد، این تکنیک مشاهدات مستقلى را ارائه می‌دهد که داده‌های زلزله‌شناسی را تکمیل می‌کند. به لطف پیشرفت‌های فناوری ماهواره‌ای و با عرضه پی‌درپی ماهواره‌های SAR، قابلیت‌های مطالعه زمین‌لرزه‌ها به‌مراتب بهبود یافته‌است. تکنیک‌های ژئودزی مدرن، از جمله سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و InSAR، امکان اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها با دقت بالا در زمان زمین‌لرزه را فراهم می‌کنند. افزایش تعداد اندازه‌گیری‌های ژئودزی فضایی فرصت ارزشمندی را برای بهتر درک کردن فرآیندهای لرزه‌ای، مانند هندسه گسل‌ها و توزیع لغزش، ارائه می‌دهد. این تکنیک‌ها امکان مطالعه‌های دقیق درباره مکانیسم‌های زمین‌لرزه‌ها را فراهم می‌آورند و به درک رفتار گسل‌ها کمک می‌کنند.

در ایران نیز همانند سراسر جهان، مطالعه چشمه زمین لرزه با استفاده از تکنیک‌های ژئودزی مدرن در سال‌های اخیر به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته‌است. با وجود داده‌های ماهواره‌ای، مانند تصاویر Sentinel که بدون هزینه و با فواصل زمانی کوتاه و سریع در دسترس هستند، استفاده از تکنیک InSAR برای مطالعه زمین‌لرزه‌ها به‌طور پیوسته در حال افزایش است. به‌طور طبیعی، زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر مورد توجه و بررسی بیشتری قرار گرفته و موضوع تحقیقات گسترده‌تری هستند. از میان این زمین‌لرزه‌ها، زمین‌لرزه بم در سال ۲۰۰۳ نقطه عطفی در مطالعه چشمه زمین‌لرزه‌ها به‌وسیله تکنیک InSAR بوده‌است. تعداد زیادی مطالعه بر روی زمین‌لرزه بم انجام شده‌است که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه فانینگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۳] اشاره نمود. هرچند، زمین‌لرزه کرمانشاه در سال ۲۰۱۷ بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌است و مطالعات بسیاری با استفاده از تکنیک‌های ژئودزی مدرن بر روی آن انجام شده‌است. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه واجدیان و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۴] اشاره کرد.

جابه‌جایی سطحی ناشی از زمین‌لرزه‌ها را می‌توان با استفاده از یک یا چند صفحه گسل مدل‌سازی نمود؛ بنابراین پس از اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی توسط مشاهدات ژئودتیک می‌توان با استفاده از مدل مناسب پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه را شناسایی نمود. زمین لرزه دوگانه قطور در ۲۳ فوریه ۲۰۲۰ در منطقه‌ای کوهستانی در نزدیکی شهرستان‌های خوی و سلماس در استان آذربایجان غربی ایران در نزدیکی مرز ایران و ترکیه رخ داد. اولین رویداد با بزرگای گشتاوری ۵/۸ در ساعت ۹:۲۳ صبح به‌وقت محلی (۵:۵۲ به‌وقت جهانی) و به دنبال آن دومین رویداد با بزرگای گشتاوری ۶/۰ در ساعت ۱۹:۳۱ عصر به‌وقت محلی (۱۶:۰۰ به‌وقت جهانی) رخ داد. با توجه به سازوکار کانونی ارائه شده توسط USGS^۲ سازوکار زمین‌لرزه اول نرمال و سازوکار زمین‌لرزه دوم امتدادلغز است. با توجه به اینکه بیشترین خسارت‌ها مربوط به رویداد دوم بوده، بنابراین این زمین‌لرزه به‌عنوان رخداد اصلی در نظر گرفته شده‌است. هیچ پارگی سطحی برای رویدادها گزارش نشده‌است. به‌منظور شناسایی گسل مسبب از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده‌است. سپس پارامترهای هندسی گسل و توزیع لغزش با مدل‌سازی طی دو مرحله برآورد گردیده‌است.

۲- خصوصیات ژئودینامیکی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در محدوده جغرافیایی ۳۸-۳۹ درجه شمالی و ۴۴-۴۵ درجه شرقی واقع در مرز ایران-ترکیه و در نزدیکی شهر قطور از توابع شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی که در روز ۴ اسفند ۱۳۹۸ (۲۳ فوریه ۲۰۲۰) تحت تأثیر دو زمین‌لرزه به فاصله ۱۰ ساعت و به ترتیب با بزرگای ۵/۸ و ۶/۰ و پس‌لرزه‌های آن بوده‌است. این منطقه بخشی از منطقه قفقاز، شمال غرب ایران و ترکیه است که تحت تأثیر همگرایی صفحات عربستان و اوراسیا قرار دارد. دگر ریختی‌های حاصل از این همگرایی به‌طور عمده به شکل کوتاه شدگی در راستای شمالی-جنوبی و کشش در راستای شرقی-غربی با گسلش زمین‌لرزه و پدیده

^۲ The United States Geological Survey

^۱ Landers

آشفشانی بروز می‌کنند [۵]، [۹]. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در این ناحیه نشان‌دهنده گسلش امتدادلغز در شمال غرب ایران و شرق آناتولی و گسلش‌های معکوس در حاشیه غربی دریای خزر است. مطالعات اخیر وجود و تأثیر گسل‌های چپ‌گرد در شمال غرب ایران و تأثیر آن‌ها در زمین‌لرزه ۱۱ آگوست ۲۰۱۲ اهر-ورزقان را مورد توجه بیشتری قرار داده‌است [۴]. بررسی‌های اولیه در منطقه قطور نیز نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های مذکور نتیجه عملکرد گسل چپ‌گرد باشکلا^۱ با امتداد کلی شمال شرق جنوب غرب است.

۳- محاسبه میدان جابه‌جایی سطحی

داده‌های ژئودتیک ابزار قدرتمندی برای بررسی تغییر شکل سطحی ناشی از زمین‌لرزه‌ها هستند که امکان برآورد تغییر شکل پوسته زمین را فراهم می‌کنند. تکنیک تداخل سنجی راداری با توجه به پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل‌قبول، یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های مدل‌سازی حین لرزه‌ای است. همچنین، با تفسیر بصری تداخل نگارهای تشکیل‌شده با این تکنیک می‌توان اطلاعاتی درباره مقدار تقریبی برخی از پارامترهای گسل را تخمین زد. این پارامترها شامل موقعیت تقریبی زمین‌لرزه، راستای گسل و طول صفحه گسل هستند. همچنین، با توجه به شکل تداخل نگارها اغلب می‌توان استنباط کرد که آیا صفحه گسل به سطح زمین رسیده‌است یا نه.

۳-۱- تکنیک تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری (InSAR) مخفف کلمه Interferometric Synthetic Aperture Radar است. تصاویر تداخل سنجی، از راداری با دید جانبی به دست می‌آیند که در طول حرکت، سطح زمین را با سیگنال‌های ماکروویو جاروب می‌کند. سیگنال‌های دریافتی به‌صورت اعداد مختلط متشکل از دامنه و فاز ذخیره می‌شوند. اساس کار روش تداخل سنجی، استفاده از اطلاعات فاز سیگنال بازتابی از زمین است؛ به نحوی که تغییر شکل‌های ایجاد شده در سطح زمین، سبب تغییر فاز بین دو تصویر راداری

جمع‌آوری شده از منطقه‌ای مشابه در دو زمان مختلف می‌شود. با بررسی این اختلاف فاز و مدل‌سازی آن، تغییر شکل زمین کمی‌سازی می‌شود [۱۲].

با کم کردن فازهای دو تصویر رادار با درجه مصنوعی که در دو زمان مختلف از یک منطقه گرفته شده، تداخل نگار (Interferogram) تولید می‌شود. در حالت کلی، فاز یک تداخل نگار از مؤلفه‌های زیر تشکیل شده‌است [۱۱]:

$$\Delta\varphi = \varphi_{flatten} + \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{noise}$$

که $\varphi_{flatten}$ فاز زمین‌مرجع، φ_{topo} فاز حاصل از توپوگرافی، φ_{def} فاز تولید شده از دگرشکلی منطقه و φ_{noise} فاز نوفه است. در پردازش رادار با درجه مصنوعی و تشکیل تداخل‌نگار، فاز زمین مرجع را با اطلاعات مداری و فاز توپوگرافی را با مدل ارتفاعی زمین (Elavation Digital Model) حذف یا تصحیح می‌کنند و در نهایت فاز تغییر شکل زمین φ_{def} به دست می‌آید.

۳-۲- معرفی داده و پردازش تصاویر راداری

در این پژوهش از میدان جابه‌جایی سطحی به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده که به این منظور دو تصویر بالاگذر^۲ و دو تصویر پایین‌گذر^۳ ماهواره سنتینل-۱ با نرم‌افزار NSBAS پردازش شده‌اند [۳]. برای حذف اثر توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی با رزولوشن ۹۰ متری استفاده شده‌است. در جدول ۱ جزئیات مربوط به تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شده را مشاهده می‌کنید.

شکل ۱ نمای کلی از تداخل نگارهای تشکیل شده در راستای پایین‌گذر و بالاگذر مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد. همچنین، شکل ۲ جابه‌جایی هم‌لرزه در راستای خط دید ماهواره مربوط به زمین‌لرزه اول را نمایش می‌دهد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده نزدیک شدن تغییر شکل به سمت ماهواره و مقادیر منفی نشان‌دهنده دور شدن تغییر شکل از ماهواره هستند.

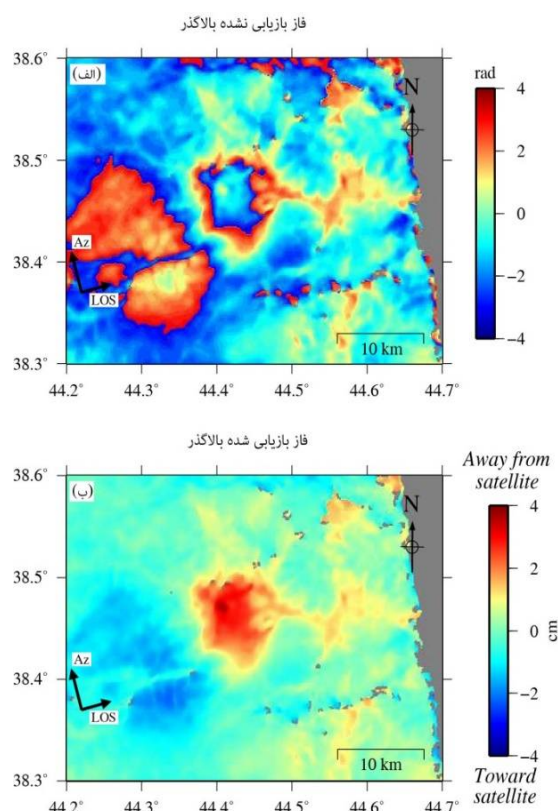
۲ Ascending

۳ Descending

۱ Bashkale

جدول ۱- جزئیات مربوط به داده‌های مورد استفاده

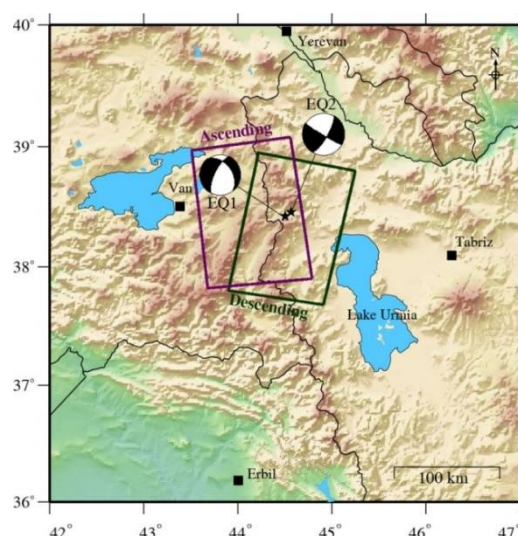
مدار	مسیر	تاریخ تصویر اول و تصویر دوم	فاصله عمودی (متر)	فاصله زمانی (روز)
زمین‌لرزه اول	بالاگذر	۲۰۲۰/۰۲/۲۳ (۱۵:۰۰) - ۲۰۲۰/۰۲/۲۳ (۱۵:۰۰)	۳۲	۱۲
زمین‌لرزه دوم	بالاگذر	۲۰۲۰/۰۲/۲۳ (۱۵:۰۰) - ۲۰۲۰/۰۳/۰۳ (۱۵:۰۱)	۳	۱۲
	پایین‌گذر	۲۰۲۰/۰۲/۲۳ (۰۷:۳۱) - ۲۰۲۰/۰۲/۲۹ (۰۳:۰۹)	۱۲۴	۶



شکل ۲- میدان جابه‌جایی هم‌لرزه در راستای خط دید ماهواره. (الف) تداخل نگار فاز بازایی نشده و (ب) تداخل نگار فاز بازایی شده حاصل از تصاویر سنتینل ۱ در راستای بالاگذر. مقادیر مثبت حرکت سطح به‌سوی ماهواره و مقادیر منفی دور شدن سطح از ماهواره را نشان می‌دهد.

با توجه به این که تداخل نگار ناپیوستگی ندارد اما در طول صفحه گسل مسبب درهم‌رفتنی فاز به چشم می‌خورد؛ بنابراین، گسل مسبب زمین‌لرزه دوم به سطح نرسیده‌است اما عمق لبه بالای گسل کم است. با توجه به شکل ۳ (ج و د) جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به ترتیب ۲۵ و ۱۵ سانتی‌متر برای گذر بالا و گذر پایین است. الگوی تغییر شکل در هر دو تداخل نگار بالاگذر و پایین‌گذر نامتقارن است. با مقایسه تداخل نگار فاز

میدان جابه‌جایی سطحی تداخل نگار گذر بالا در راستای خط دید ماهواره در حدود ۵ سانتی‌متر است در حالی که تداخل نگار تشکیل شده گذر پایین هیچ جابه‌جایی خاصی را نشان نمی‌دهد. با توجه به اینکه میدان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده زمین‌لرزه اول بسیار کوچک و در حدود ۴ سانتی‌متر بود، از مدل‌سازی این زمین‌لرزه صرف نظر گردید.



شکل ۱- پوشش مکانی تصاویر سنتینل ۱ در محدوده مورد مطالعه

شکل ۳ میدان جابه‌جایی هم‌لرزه در راستای خط دید ماهواره مربوط به زمین‌لرزه دوم را نمایش می‌دهد. زمین‌لرزه دوم در تاریخ ۲۰۲۰/۰۲/۲۳ ساعت ۱۶:۰۰ رخ داده‌است و تصویر بالاگذر قبل از این زمین‌لرزه یک ساعت قبل از رخ دادن زمین‌لرزه از منطقه گرفته شده است؛ بنابراین، تداخل نگار هم‌لرزه تشکیل شده فقط مرتبط با جابه‌جایی سطحی زمین‌لرزه دوم است. با توجه به شکل ۳ (الف و ب) شکل پروانه‌ای فرینج‌های تداخل نگارها در هر دو گذر بالا و پایین نشان می‌دهد که حرکت گسل مسبب زمین‌لرزه امتدادلغز است و گسیختگی سطحی ایجاد نکرده‌است.

بازیابی نشده^۱ با تداخل نگار فاز بازیابی شده^۲ هر دو گذر مشاهده می‌شود که مقادیر جابه‌جایی لوب^۳ سمت چپ در گذر بالا بیشتر از گذر پایین است. با در نظر گرفتن جهت حرکت ماهواره، می‌توان به این نتیجه رسید که لوب‌های سمت چپ و ماهواره به سمت همدیگر حرکت می‌کنند؛ یعنی اگر صفحه گسل و جهت حرکت ماهواره مخالف همدیگر باشد، مقدار جابه‌جایی مشاهده شده بزرگ‌تر از زمانی خواهد بود که هر دو در یک جهت حرکت کنند؛ بنابراین، این حرکت نسبی دلیل وجود تفاوت بین مقادیر میدان جابه‌جایی تداخل‌نگارها است. از طرفی با توجه به سازوکار کانونی این زمین‌لرزه، دو صفحه در راستای شمال شرقی-جنوب غربی یا جنوب شرقی-شمال غربی می‌توانند صفحه گسل مسبب باشند. با فرض راستای شمال شرقی-جنوب غربی برای گسل مسبب، سازوکار آن امتدادلغز چپ بر خواهد بود در حالی که اگر راستای جنوب شرقی-شمال غربی را راستای گسل مسبب در نظر بگیریم سازوکار گسل راست‌بر خواهد بود. با توجه به سازوکار کانونی و میدان جابه‌جایی و دلایل ذکر شده، پیشنهاد می‌شود راستای شمال شرقی-جنوب غربی برای گسل مسبب در نظر گرفته شود و سازوکار گسل امتدادلغز چپ بر فرض شود.

با تجزیه میدان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره به دو مؤلفه افقی و عمودی (شکل ۳ (ه و و)) ملاحظه می‌شود که مقدار جابه‌جایی در راستای عمودی بسیار کوچک‌تر از مؤلفه افقی است و این موضوع تأییدی بر سازوکار امتدادلغز زمین‌لرزه است. همچنین، وجود مؤلفه عمودی در حد چند سانتی‌متر در قسمت چپ گسل نشان‌دهنده این است که زاویه شیب گسل دقیقاً ۹۰ درجه نیست. علاوه بر این، با توجه به مؤلفه افقی قسمت چپ گسل جابه‌جایی بیشتری نسبت به قسمت راست داشته و بدین ترتیب قسمت چپ فرو دیواره^۴ است؛ بنابراین، الگوی جابه‌جایی بیانگر گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال در راستای شمال شرقی-جنوب غربی و با پرشیب و کم‌عمق است.

۴- مدل‌سازی

محاسبه پارامترهای یک گسل با استفاده از مشاهدات تغییر شکل سطحی، یک مسئله معکوس است. مسئله مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه به دو مرحله مدل‌سازی مستقیم و معکوس تقسیم می‌شود. در مرحله اول، هندسه صفحه گسل با فرض یکنواخت بودن لغزش بر روی صفحه گسل تخمین زده می‌شود. سپس در مرحله دوم با تکه‌بندی صفحه گسل، لغزش بر روی هر تکه برای یک هندسه ثابت تخمین زده می‌شود. مرحله اول مرحله معکوس‌سازی غیرخطی یا مدل‌سازی مستقیم و مرحله دوم معکوس‌سازی خطی نامیده می‌شود. ارتباط بین مشاهدات میدان جابه‌جایی سطحی زمین با پارامترهای هندسی گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا [۷] برقرار می‌گردد. پارامترهای گسل یا مجهولات مسئله در مرحله اول شامل طول، عرض، عمق قفل‌شدگی، شیب، راستا، مقدار لغزش یکنواخت، زاویه لغزش و مختصات نقطه‌ای از گسل است. از آنجا که تعداد مشاهدات به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری بسیار زیاد است، بهتر است تا تعدادی از مشاهدات حذف شود. به عبارتی، مناسب‌تر است تا از مشاهداتی بیشتر استفاده شود که مربوط به مناطقی هستند که بیشترین تغییر شکل را نشان می‌دهند. در این پژوهش از تکنیک Quadtree استفاده شده‌است [۶]. در تکنیک Quadtree بیشترین نمونه‌برداری تنها از مناطقی انجام می‌شود که بیشترین میزان تغییر شکل را دارند. از آنجا که در نزدیکی گسل میزان تغییر شکل بیشتر است بنابراین، داده‌های کمتری حذف می‌شوند و در نزدیکی خط گسل رزولوشن داده‌ها بیشتر است. در این پژوهش از نرم‌افزار GBIS برای مدل‌سازی غیرخطی استفاده شده‌است [۱]. در شکل ۴ مشاهدات میدان جابه‌جایی حاصل از اینسار ۴ (الف و د)، مدل حاصل از مدل‌سازی مستقیم ۴ (ب و ه) و باقیمانده حاصل از مرحله اول از مدل‌سازی ۴ (ج و و) به ترتیب برای بالا-گذر و پایین‌گذر نمایش داده شده‌است. نتایج به دست آمده در مدل‌سازی مرحله اول نشان‌دهنده یک گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه و مقدار لغزش ۱/۱ متر است. مقادیر باقیمانده در مدل‌سازی با لغزش یکنواخت به ترتیب تقریباً ۶ و ۹ سانتی‌متر برای گذر بالا و گذر پایین به‌دست

۱ Wrapped Interferogram

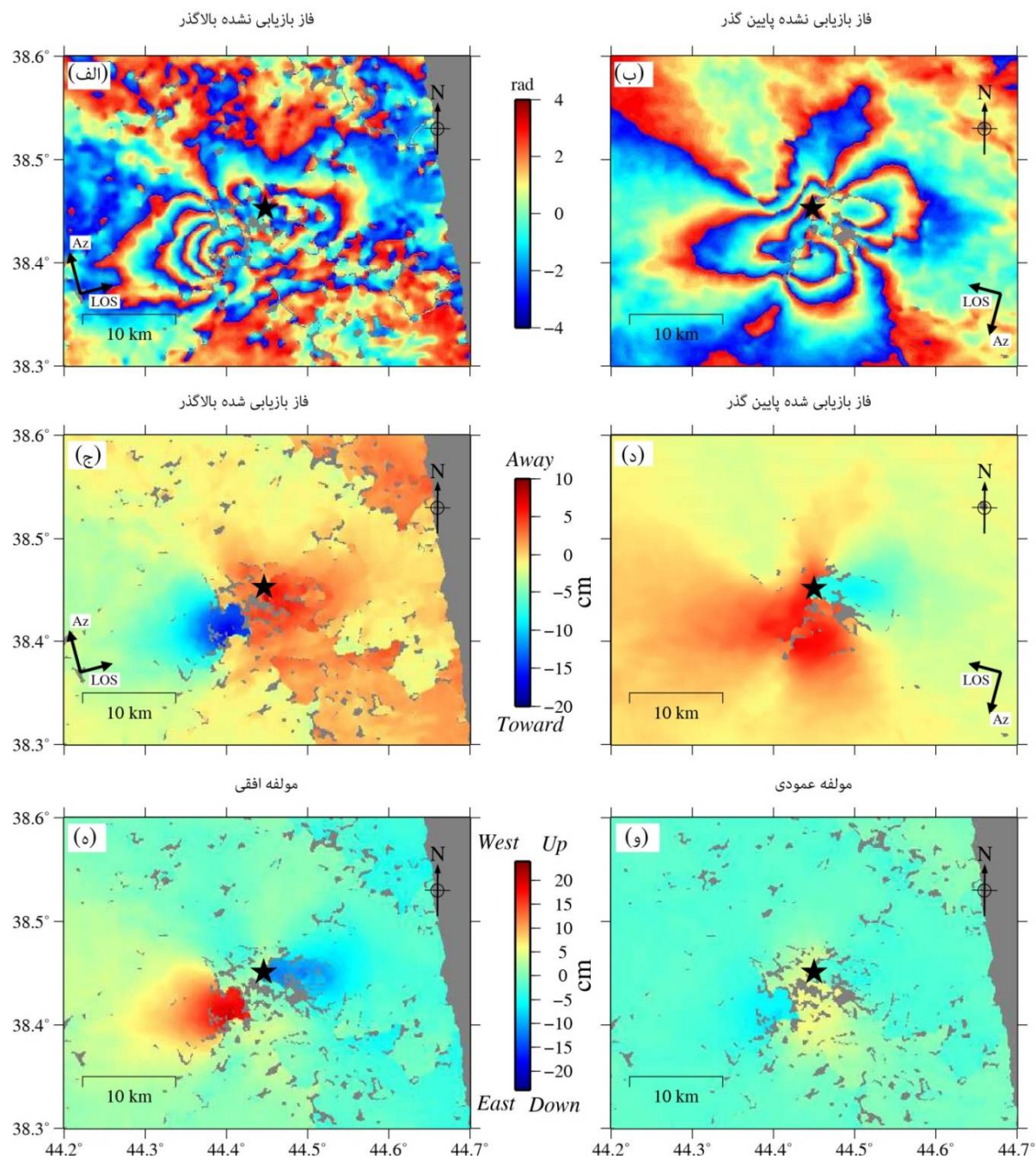
۲ Unwrapped Interferogram

۳ Lobe

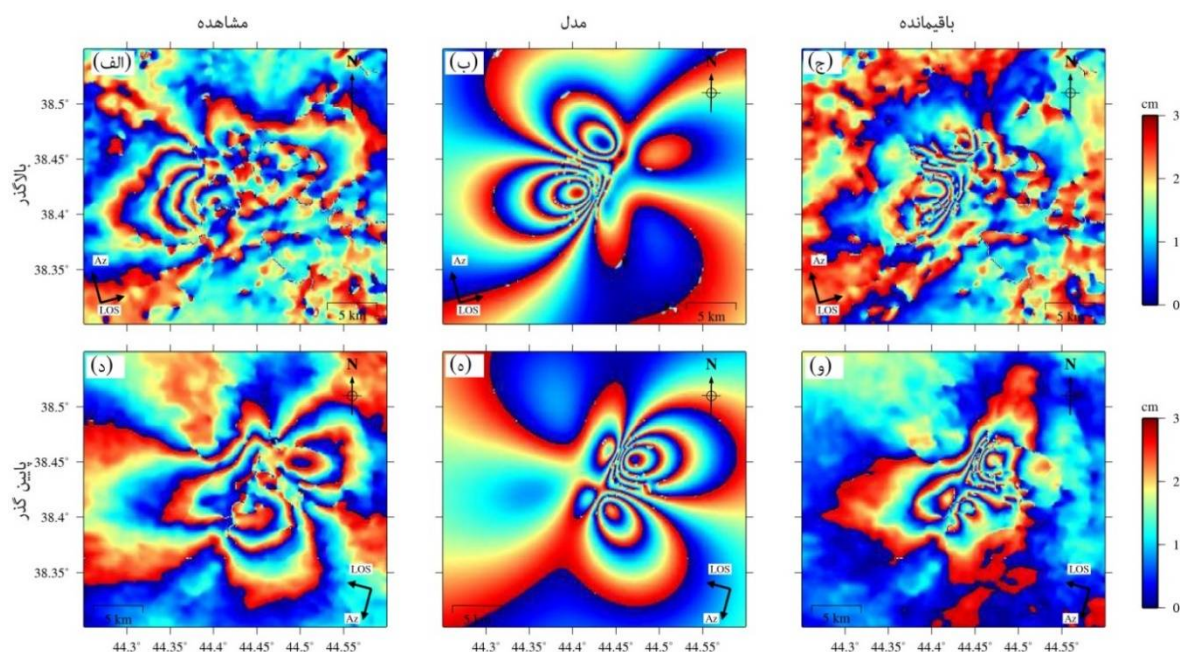
۴ Footwall

آمده‌است. در جدول ۲ حد بالا و پایین بازه تغییرات و نتایج حاصل از معکوس سازی مشترک میدان‌های

جابه‌جایی بالاگذر و پایین گذر و پارامترهای هندسی برآورد شده ارائه شده‌است.



شکل ۳- میدان جابه‌جایی هم لرزه در راستای خط دید ماهواره. تداخل نگارهای فاز بازیابی نشده و فاز بازیابی شده حاصل از تصاویر سنتینل ۱ به ترتیب در راستای بالاگذر (الف و ج) و پایین گذر (ب و د). مقادیر منفی حرکت در راستای خط دید به‌سوی ماهواره و مقادیر مثبت دور شدن سطح از ماهواره را نشان می‌دهد. محل رخداد زمین‌لرزه با ستاره سیاه نشان داده شده‌است. شکل (ه) مؤلفه افقی و (و) مؤلفه عمودی میدان جابه‌جایی هم لرزه. مقادیر مثبت در مؤلفه افقی حرکت به سمت غرب و مقادیر منفی حرکت به سمت شرق و مقادیر مثبت در مؤلفه عمودی حرکت به سمت بالا و مقادیر منفی حرکت به سمت پایین را نشان می‌دهد.



شکل ۴- به ترتیب نشان‌دهنده (الف و د) مشاهدات، (ب و ه) مدل و (ج و و) باقیمانده مستخرج از مدل‌سازی مستقیم مربوط به گذر بالا و گذر پایین

جدول ۱- بازه تغییرات تعیین‌شده برای پارامترهای گسل و پارامترهای برآورد شده گسل مسبب زمین‌لرزه قطور. لازم به ذکر است در این مطالعه و در جدول زیر پارامتر عمق برای لبه بالای گسل برآورد شده است.

پارامتر	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول (کیلومتر)	عرض (کیلومتر)	عمق (کیلومتر)	راستا (درجه)	شیب (درجه)	مؤلفه عمودی لغزش یکنواخت (متر)	مؤلفه افقی لغزش یکنواخت (متر)	زاویه لغزش (درجه)
حد پایین پارامتر	۴۴/۳	۳۸/۳	۴۵	۳	۱/۵	۱۰	۶۵	-۰/۱۰	-۳/۰۰	-
حد بالا پارامتر	۴۴/۸	۳۸/۶	۱۲	۱۵	۵	۴۵	۹۰	۰/۵۰	۰/۰۰	-
مقدار بهینه	۴۴/۴۵ ±۰/۰۰۱	۳۸/۴۵ ±۰/۰۰۱	۵/۳ ±۰/۰۲	۷/۲ ±۰/۰۳	۱/۵ ±۰/۰۴	۲۴/۴ ±۰/۰۳	۸۶ ±۰/۰۳	۰/۰۷ ±۰/۰۲	-۱/۱۱ ±۰/۰۱	-۳/۵
USGS	۴۴/۳۷	۳۸/۴۹	-	-	۱۰	۳۰	۷۴	-	-	-۴
(تایماز و همکاران، ۲۰۲۲)	۴۴/۵۲	۳۸/۴۴	-	-	۱۴	۲۹۷	۸۵	-	-	۱۶۸

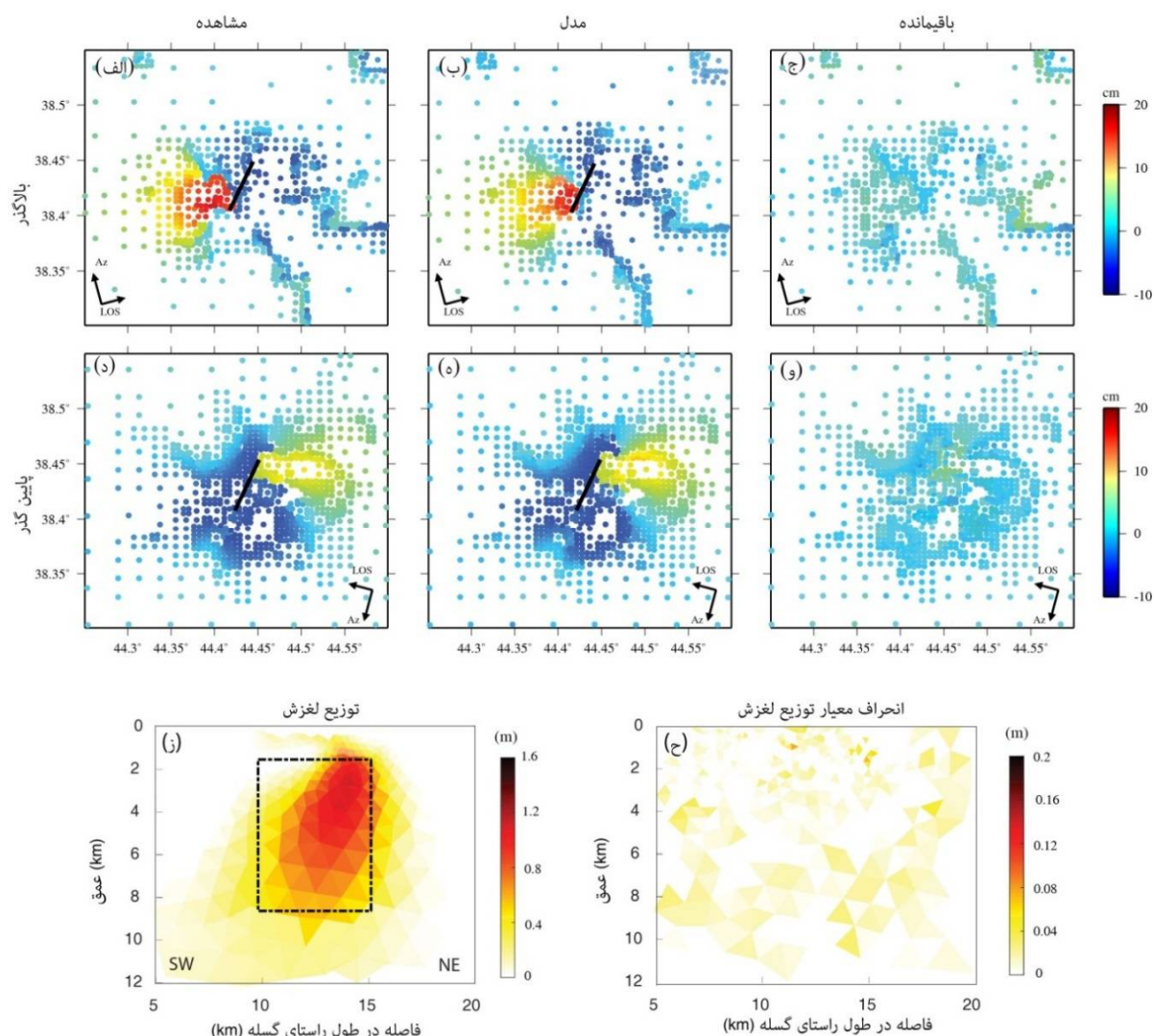
در مرحله دوم مدل‌سازی و به‌منظور برآورد توزیع لغزش بر روی صفحه گسل، از نتایج مدل‌سازی غیرخطی به‌عنوان مقادیر معلوم استفاده می‌شود. در این مرحله صفحه گسل باید به تکه‌های کوچکی تقسیم شود تا به آرامی و پیوستگی مقدار لغزش به سمت مقدار صفر میل کند. پس از برآورد هندسه گسل با لغزش یکنواخت و به‌منظور برآورد توزیع لغزش، صفحه گسل در راستای طول ۲۰ کیلومتر و در راستای عرض ۱۲ کیلومتر گسترش داده شد. سپس سطح گسل به ۱۲۹۱ تکه تقسیم‌بندی شد. به‌منظور مدل‌سازی خطی از روش کمترین مربعات مقید شده تیخانوف استفاده گردید. در این پژوهش از نسخه

اصلاح شده FaultResampler 1.4 برای محاسبه توزیع لغزش استفاده شده است [۲]. نتایج حاصل از مرحله دوم مدل‌سازی به همراه برآورد توزیع لغزش بر روی صفحه گسل در شکل ۵ نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۵ (ج و و) مشاهده می‌شود، مقادیر باقیمانده به دست آمده در مرحله مدل‌سازی معکوس نسبت به مقادیر باقیمانده در مرحله مدل‌سازی مستقیم به ترتیب به ۳ و ۲ سانتی‌متر برای گذر بالا و گذر پایین کاهش پیدا کرده است. در نتیجه مدل‌سازی معکوس انجام شده در انطباق خوبی با مشاهده است. با توجه به توزیع لغزش محاسبه‌شده، بیشترین گسیختگی در عمق ۳

برآورد شد که این مقدار اندکی بیشتر از بزرگای گشتاوری تخمین زده شده توسط USGS (۵/۹۸ Mw) است.

کیلومتری و به میزان 97 ± 8 سانتی‌متر است. با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده، بزرگای گشتاوری ۶/۰۵ Mw



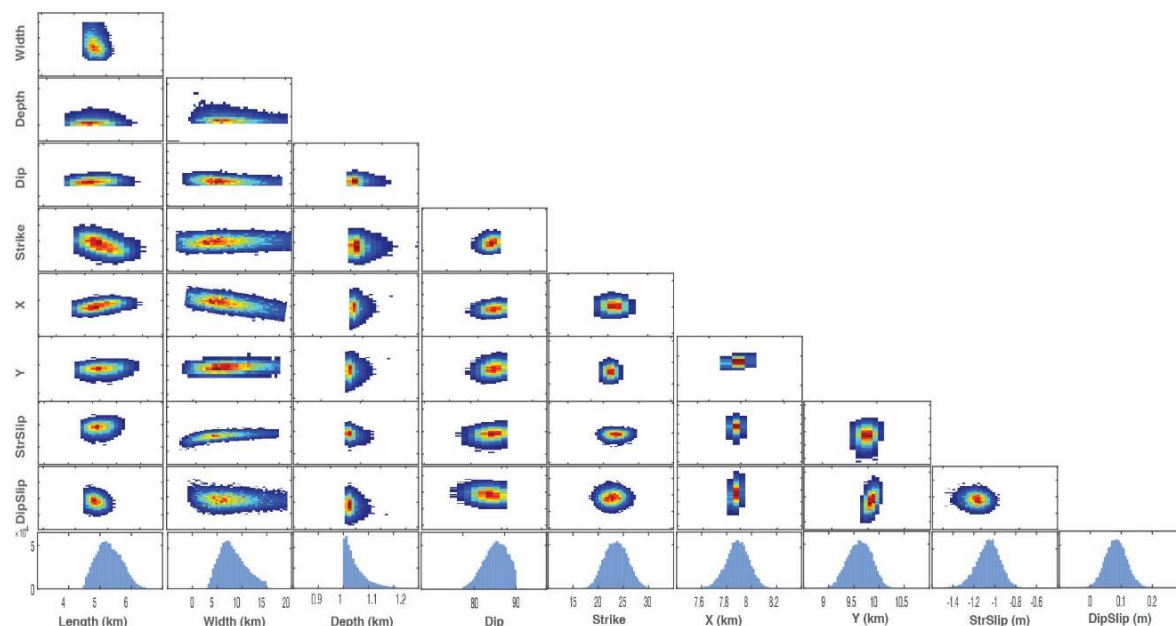
شکل ۵- به ترتیب نشان‌دهنده (الف و د) مشاهدات، (ب و ه) مدل، خط سیاه گسل تصویر شده بر روی سطح را نشان می‌دهد و (ج و و) باقیمانده مستخرج از مدل‌سازی معکوس مربوط به گذر بالا و گذر پایین، (ز) توزیع لغزش حاصل از مدل‌سازی معکوس مشاهدات اینسار؛ مستطیل خط‌چین سیاه محدوده گسل را نشان می‌دهد؛ (ح) انحراف معیار توزیع لغزش.

۴-۱- پخش خطا

اندازه‌گیری‌های InSAR همواره تحت تأثیر منابع مختلف نامعلومی قرار دارند. برای بررسی انتقال عدم قطعیت و پخش خطای داده به پارامترهای منبع در حل معادلات غیرخطی و خطی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\Sigma_m = G^{-1} \Sigma_d G^{-T}$$

که در آن Σ_d ماتریس واریانس کوریانس داده‌های مشاهده‌شده به‌عنوان ورودی برای یافتن ماتریس واریانس کوریانس Σ_m پارامترهای مدل است. پس از انجام معکوس سازی، نتایج می‌توانند به‌صورت جدول پراکندگی و هیستوگرام برای مشاهده نحوه پخش خطا ارائه شوند. شکل ۶ نحوه پخش خطای داده‌ها را در پارامترهای مدل و trade-offs بین پارامترهای پیش‌بینی شده گسل را نشان می‌دهد. این نمودارهای پراکندگی نشان می‌دهند که همه



شکل ۶- نحوه پخش خطا و عدم قطعیت داده‌ها در پارامترهای مدل

نظر گرفته شود و سازوکار گسل امتدادلغز چپ‌بر فرض شود. نتایج به دست آمده از مرحله اول مدل‌سازی نشان‌دهنده یک گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال با راستای ۲۴ درجه و شیب ۸۶ درجه است که با تحلیل‌های صورت گرفته سازگاری کامل داشت. پس از برآورد هندسه گسل با لغزش یکنواخت و به‌منظور برآورد توزیع لغزش، صفحه گسل در راستای طول و عرض گسترش داده شد. سپس سطح گسل به ۱۲۹۱ تکه تقسیم‌بندی شد. مقادیر باقیمانده در مرحله مدل‌سازی معکوس نسبت به مقادیر باقیمانده تخمین زده شده در مرحله مدل‌سازی مستقیم کاهش پیدا کرده‌است. با توجه به نتایج حاصل از توزیع لغزش، بیشترین گسبختگی در عمق ۳ کیلومتری و به میزان 97 ± 8 سانتی‌متر است. نتایج به دست آمده و داده‌های سازوکار کانونی حل شده بیانگر این است که گسل چپ‌گرد با مؤلفه نرمال و راستای شمال شرقی-جنوب غربی باشکلا، مسبب این رخداد بوده‌است.

پارامترها به‌خوبی در محدوده‌های اولیه پیش‌فرض در این مطالعه برآورد شده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه از مشاهدات حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد. ارتباط بین مشاهدات میدان جابه‌جایی سطحی زمین با پارامترهای هندسی گسل با استفاده از مدل تحلیلی اکادا برقرار و مقادیر پارامترهای هندسی گسل تخمین زده شد. بازه تغییرات پارامترهای هندسی گسل با توجه به داده‌های زلزله‌شناسی و تفسیر بصری تداخل نگارها تعیین گردید. الگوی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه بیانگر گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه نرمال در راستای شمال شرقی-جنوب غربی و با پرشیب و کم‌عمق است. با توجه به سازوکار کانونی، توزیع پس‌لرزه‌ها و الگوی میدان جابه‌جایی، پیشنهاد شد تا راستای شمال شرقی-جنوب غربی برای گسل مسبب در

مراجع

- [۱] Bagnardi, Marco, and Andrew Hooper. "Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19, no. 7 (2018): 2194-2211.
- [۲] Barnhart, W. D., and R. B. Lohman. "Automated fault model discretization for inversions for coseismic slip distributions." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115, no. B10 (2010).

- [۳] Doin, Marie-Pierre, S. Guillaso, R. Jolivet, C. Lasserre, F. Lodge, Gabriel Ducret, and Raphael Grandin. "Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data." In Proceedings of the Fringe symposium, pp. 3434-3437. Frascati, Italy: ESA SP-697, 2011.
- [۴] Ghods, Abdolreza, Esmail Shabani, Eric Bergman, Mohammad Faridi, Stefanie Donner, Gholamreza Mortezaejad, and Asiyeh Aziz-Zanjani. "The Varzaghan-Ahar, Iran, Earthquake Doublet (M w 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran." *Geophysical Journal International* 203, no. 1 (2015): 522-540.
- [۵] Jackson, James, and Dan McKenzie. "Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan." *Geophysical Journal International* 77, no. 1 (1984): 185-264.
- [۶] Jónsson, Sigurjón, Howard Zebker, Paul Segall, and Falk Amelung. "Fault slip distribution of the 1999 M w 7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements." *Bulletin of the Seismological Society of America* 92, no. 4 (2002): 1377-1389.
- [۷] Okada, Yoshimitsu. "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space." *Bulletin of the seismological society of America* 75, no. 4 (1985): 1135-1154.
- [۸] Taymaz, Tuncay, Haluk Eyidoğan, and James Jackson. "Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey)." *Geophysical Journal International* 106, no. 3 (1991): 537-550.
- [۹] Taymaz, Tuncay, Athanassios Ganas, Manuel Berberian, Tuna Eken, T. Serkan Irmak, Vasilis Kapetanidis, Seda Yolsal-Çevikbilen et al. "The 23 February 2020 Qotur-Ravian earthquake doublet at the Iranian-Turkish border: Seismological and InSAR evidence for escape tectonics." *Tectonophysics* 838 (2022): 229482.
- [۱۰] Wessel, Paul, and Walter HF Smith. "New version of the generic mapping tools." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 76, no. 33 (1995): 329-329.
- [۱۱] Hanssen, Ramon F. "Radar interferometry: data interpretation and error analysis." Vol. 2. Springer Science & Business Media, (2001).
- [۱۲] Massonnet, Didier, and Kurt L. Feigl. "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of geophysics* 36, no. 4 (1998): 441-500.
- [۱۳] Funning, Gareth J., Barry Parsons, Tim J. Wright, James A. Jackson, and Eric J. Fielding. "Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110, no. B9 (2005).
- [۱۴] Vajedian, Sanaz, Mahdi Motagh, Zahra Mousavi, Khalil Motaghi, Eric J. Fielding, Bahman Akbari, Hans-Ulrich Wetzel, and Aliakbar Darabi. "Coseismic deformation field of the Mw 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations." *Remote Sensing* 10, no. 10 (2018): 1589.