

مدل سازی عددی گسل جبهه کوهستان (MFF) در رخداد زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب به روش عنصر مرزی

سید یادگار هوشیار^{۱*}، ایمان عشایری^۲ و محسن کمالیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳)

چکیده

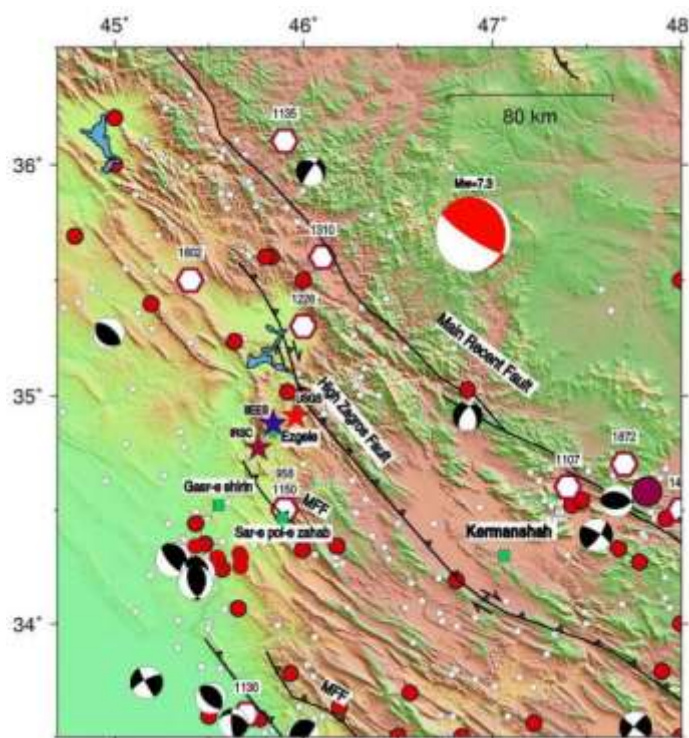
در اثر زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب با بزرگای $M_w=7/3$ تغییر مکان‌های سطحی به‌ویژه زمین لغزش بسیار بزرگ مله‌کبود و پس‌لرزه‌های زیادی به صورت خوشه‌های پراکنده در منطقه رخ داد. وقوع پس‌لرزه‌ها به صورت خوشه‌ای نشانی از فعالیت گسل‌های کوچک از قبل موجود می‌باشد. در مطالعه حاضر گسل مسبب زلزله اصلی (گسل جبهه کوهستان (MFF)) با استفاده از کد عنصر مرزی سه‌بعدی 3d-def مدل سازی شد و میزان تغییر مکان‌های سطحی به‌ویژه جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله‌کبود و همچنین محل گسل‌های ثانویه با استفاده از میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه به‌عنوان معیاری برای تعیین محل گسل‌های ثانویه استخراج گردید. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل سازی برای جابه‌جایی‌ها، از مقایسه نتایج با داده‌های به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و روش ترکیبی ردیابی افست (combined offset tracking) مشاهده شد که نتایج دو روش تقریباً به‌همدیگر نزدیک می‌باشند و اختلافاتی نیز در موقعیت جابه‌جایی‌ها و دامنه تغییرات آنها در دو روش دیده می‌شود به‌گونه‌ای که دامنه تغییرات جابه‌جایی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای در منطقه زلزله، ۳۵- تا ۸۰ سانتی‌متر است در حالی که این محدوده برای نتایج حاصل از مدل سازی انجام شده، ۱۵- تا ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین برای محل گسل‌های ثانویه، میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدل سازی تقریباً در محل‌های دارای تراکم پس‌لرزه به‌ویژه در قسمت جنوبی گسل بیشینه می‌باشد و عمق‌های با بیشترین میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه با عمق‌هایی که تراکم پس‌لرزه زیاد است، به‌جز در عمق ۱۳ کیلومتری به پایین تقریباً یکی می‌باشند. علاوه بر این برای تعیین میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام شد که در نتیجه آن تغییرات پارامترهای شیب و عرض گسل، بیشترین اثر را بر خروجی جابه‌جایی و همچنین تغییرات پارامترهای مدول یانگ و طول گسل بیشترین اثر را بر خروجی میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه داشتند.

واژه‌های کلیدی: زلزله سرپل ذهاب، زمین لغزش مله‌کبود، پس‌لرزه‌ها، گسل MFF، گسل‌های ثانویه

۱ مقدمه

رومرکز زلزله ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری ۷/۳ (مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹۶) در غرب ایران و میان دو گسل MFF و زاگرس مرتفع (HZF) از زون لرزه زمین‌ساختی زاگرس واقع می‌گردد که مربوط به گسیختگی گسل MFF در ناحیه سرپل‌ذهاب می‌باشد (زارع و همکاران، ۲۰۱۷). موقعیت رومرکز زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب و گسل‌های فعال منطقه در شکل ۱

نشان داده شده است. سازوکار کانونی این زمین‌لرزه دارای یک گسلش معکوس کم‌شیب با راستای شمال شمال غرب-جنوب جنوب شرق با شیب ۱۶ درجه به سمت شرق شمال شرق است. مطالعات صورت گرفته در این زمینه بر وجود بیشینه لغزش حدود ۵ متر در عمق ۱۸ کیلومتر دلالت دارند (فتحیان، ۲۰۱۸؛ تولومی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تاتار و یمنی‌فرد، ۱۳۹۷).



شکل ۱. موقعیت رومرکز زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب (ستاره‌های قرمز، بنفش و آبی) مطابق با گزارش‌های مختلف (سازمان نقشه‌برداری‌های زمین‌شناسی آمریکا، ۲۰۱۷؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۹۶؛ مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹۶) و گسل‌های فعال منطقه (حسامی‌آذر و همکاران، ۱۳۸۲). شش ضلعی‌ها زلزله‌های تاریخی (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) و دایره‌های سفید، قرمز و صورتی به ترتیب زلزله‌های دستگامی (۱۹۰۰-۲۰۱۷) با بزرگای کمتر از ۵، بین ۵ و ۶، ۶ تا ۷ را بر اساس کاتالگ مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله نشان می‌دهند.

بزرگ مله‌کبود در دامنه شمالی کوه شاهنشین که مهم‌ترین و بزرگ‌ترین زمین‌لغزش روی داده در زمین‌لرزه فوق است (حق‌شناس و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین تحلیل‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی نشان می‌دهد که این زمین‌لغزش بزرگ در امتداد یک گسل امتداد لغز از

زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب باعث شد تا ناپایداری‌های گسترده‌ای از نوع ریزش‌ها و بهمن‌های سنگی متعدد، لغزش‌های خاکی و سنگی و گسیختگی گسترشی در تاج تپه‌های تشکیل‌شده از مصالح سست روی دهد. یکی از این ناپایداری‌ها، لغزش مشهور و بسیار

محاسبات کمتری نسبت به سایر روش‌های عددی برخوردار است، روش عنصر مرزی یا معادله انتگرال مرزی یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی است که به صورت گسترده برای حل مسائل فیزیکی و مهندسی استفاده شده است (بیسکر، ۱۹۸۷؛ بیسکر، ۱۹۹۷؛ بوچن و سانچز، ۲۰۰۷) و کاربرد زیادی در شبیه‌سازی عددی دینامیک گسل دارد که نتایج آن یک دید وسیعی از فیزیک و گسیختگی زلزله را فراهم می‌کند. در این روش معادلات دیفرانسیلی حاکم به معادلات انتگرالی تبدیل و روی مرز مسئله اعمال می‌شوند که این یک بعد از ابعاد مسئله را کم می‌کند؛ به عنوان مثال، یک مسئله الاستودینامیک تعریف شده در یک فضای دوبعدی (2D)، با یک مسئله معادله انتگرالی تعریف شده در مرزهای آن جایگزین می‌شود، که یک بعدی (1D) است. در صورتی که مسئله در یک فضای سه بعدی با یک مسئله معادله انتگرالی دوبعدی (2D) جایگزین می‌شود. سپس مرز به قطعات مرزی (المان‌های مرزی) تقسیم بندی می‌شود و انتگرال گیری عددی بر روی المان‌های مرزی انجام می‌شود که از حل آن می‌توان به جواب یکنای مسئله رسید. روش عنصر مرزی را می‌توان به راحتی بر روی مرزهای با هندسه پیچیده همچون گسل به کار برد.

برای اندازه گیری جابه‌جایی سطحی حاصل از زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب و همچنین پارامترهای گسل MFF در تعداد زیادی از مطالعات محققین از تکنیک InSAR استفاده شده است به گونه‌ای که فننگ و همکاران (۲۰۱۸) به اندازه گیری جابه‌جایی سطحی و همچنین توزیع لغزش گسل MFF با استفاده از تکنیک معکوس جابه‌جایی سطح زمین پرداختند و بیشینه لغزش سطح گسل را ۶ متر پیش-بینی کردند، چن و همکاران (۲۰۱۸) نیز بیشینه لغزش سطح گسل MFF را حدود ۵ متر به دست آوردند، بارنهارت و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مشاهدات InSAR گسیختگی روی گسل MFF با شیب ۱۹-۱۴

پیش موجود می‌باشد (واجدیان و همکاران، ۲۰۱۸). یکی دیگر از اثرات زلزله ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب گسترش و فعال شدن گسل‌های کوچک از پیش موجود یا ثانویه است؛ فعال شدن گسل‌های ثانویه مربوط به آشفتگی تنش ایجاد شده در اثر گسیختگی بر روی گسل اصلی می‌باشد (ماترن و همکاران، ۲۰۰۲). معیاری که برای تعیین محل گسل‌های ثانویه استفاده شده است، معیار میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه می‌باشد، طبق این معیار مکان‌هایی که دارای بیشترین مقدار میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در اثر زلزله اصلی هستند، نشان از محل گسل‌های ثانویه یا محل پس لرزه‌ها می‌باشند (جاجر و کووک، ۱۹۷۹؛ چیلدز و همکاران، ۱۹۹۵؛ کریدر و پولارد، ۱۹۹۸).

روش‌هایی که محققین برای محاسبه جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های حاصل از زلزله استفاده کرده‌اند شامل روش‌های میدانی و دورسنجی و همچنین روش‌های مدل‌سازی عددی می‌باشد (هونگ و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های میدانی مانند نصب GPS و ابزارهای دقیق ژئوتکنیکی دارای معایبی همچون مشکلات نصب، کمبود فضا و هزینه زیاد هستند. روش‌های دورسنجی یا تداخل‌سنجی راداری بر بسیاری از محدودیت‌های روش‌های میدانی غلبه می‌کنند و قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در مقیاس میلی‌متر تا دسی‌متر است (کارنی و همکاران، ۱۹۹۶؛ بین و همکاران، ۲۰۱۰). یکی دیگر از روش‌های محاسبه تغییر مکان و میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه رخ داده در اثر زمین لرزه‌ها روش مدل‌سازی عددی است که اخیراً محبوبیت زیادی در میان محققین دارد و دارای مزیت‌های بیشتری از لحاظ هزینه و زمان نسبت به سایر روش‌های فوق می‌باشد. روش‌های متداول برای مدل‌سازی عددی روش تفاضل محدود، روش المان محدود و روش عنصر مرزی می‌باشد که روش عنصر مرزی از دقت بالاتر و حجم

زدند، وانگ و برگمن (۲۰۲۰) در مطالعه خود تخمین زدند که بیشترین گشتاور لرزه‌ای در عمق بین ۱۵ تا ۲۱ کیلومتری آزاد شده است و گورابی (۲۰۲۰) از تکنیک InSAR برای اندازه‌گیری کمی ارتفاع محلی، حجم توده لغزشی و ضخامت رسوب همراه با زمین لغزش مله کبود استفاده کرده است. در جدول ۱ نیز مطالعات فوق همراه با روش و کمیت‌های مورد مطالعه در آنها ارائه شده است.

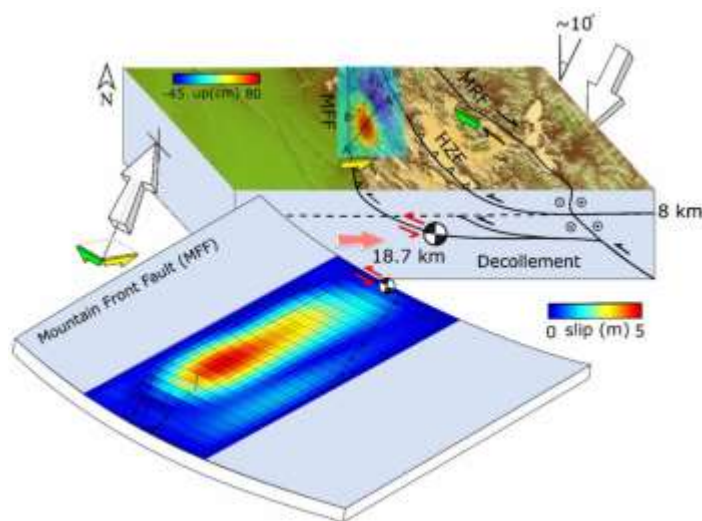
در این مطالعه میزان تغییر مکان سطح زمین در منطقه زمین لرزه به‌ویژه جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله کبود و همچنین محل گسل‌های ثانویه با استفاده از کد 3d-def که یک روش عنصر مرزی سه‌بعدی برای تعیین تنش‌ها، کرنش‌ها و جابه‌جایی‌ها، درون و روی سطح یک نیم‌فضای الاستیک می‌باشد، تعیین می‌شود و به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی برای جابه‌جایی‌ها، از مقایسه نتایج با داده‌های به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری برای جابه‌جایی منطقه زمین لرزه و روش ترکیبی ردیابی افست برای جابه‌جایی حاصل زمین لغزش مله کبود استفاده خواهد شد (واجدیان و همکاران، ۲۰۱۸)، همچنین برای محل گسل‌های ثانویه، مقادیر بیشینه میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه با تراکم پس‌لرزه‌ها مقایسه می‌شود و در نهایت برای تعیین میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام خواهد شد.

۲ مدل‌سازی عددی

۲-۱ روش مدل‌سازی

گسل‌های مسبب زلزله که روی آنها گسیختگی اتفاق می‌افتد، به‌صورت مرزهای محیط اطراف عمل می‌کنند، به‌دلیل این‌که جابه‌جایی در سراسر آنها ناپیوسته است، بنابراین در این پژوهش از روش المان مرزی برای

درجه را در عمق ۲۲-۱۲ کیلومتر پیش‌بینی کردند، دینگ و همکاران (۲۰۱۸) بیشینه جابه‌جایی سطحی افقی و قائم را به‌ترتیب ۴۵ و ۹۰ سانتی‌متر به‌دست آوردند، وانگ و همکاران (۲۰۱۸) ابتدا توسط تکنیک InSAR تغییر مکان هم‌لرزه را تعیین کردند، سپس با استفاده از روش معکوس تغییر مکان سطحی، هندسه و توزیع لغزش گسل MFF را بر اساس تئوری جداشدگی الاستیک استخراج کردند، وانگ و همکاران (۲۰۱۸) بیشترین بال‌آمدگی و فرونشست در سطح زمین را به‌ترتیب ۱۰۰ و ۳۰ سانتی‌متر تخمین زدند، واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود با استفاده از تکنیک InSAR جابه‌جایی سطحی را اندازه‌گیری کردند و توسط روش معکوس جابه‌جایی سطحی توزیع لغزش گسل را تخمین زدند، همچنین مدل منبع و گسیختگی روی گسل را در عمق بین ۱۴ تا ۲۰ کیلومتری پیش‌بینی کردند، این نتایج در شکل ۲ ارائه شده است که در آن محدوده جابه‌جایی قائم ارائه شده ۴۵- تا ۸۰ سانتی‌متر و محدوده لغزش روی صفحه گسل ۵ تا ۵ متر است. علاوه‌بر این ایشان به اندازه‌گیری جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله کبود با استفاده از روش ترکیبی ردیابی افست پرداختند و میزان جابه‌جایی افقی و قائم حاصل از زمین لغزش مله کبود را به‌ترتیب ۳۴ و ۱۰ متر تخمین زدند، واجدیان و متاق (۲۰۱۸) پارامترهای هندسی گسل MFF را با استفاده از روش معکوس غیرخطی استخراج کردند، والکانتیز و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش ترکیبی ردیابی افست به جزئیات زمین لغزش مله کبود و اندازه‌گیری جابه‌جایی حاصل از آن پرداختند و مساحت زمین لغزش را حدود ۴/۴ کیلومتر مربع با طول ۳/۸ و عرض ۱/۷ کیلومتر تخمین زدند، نیسن و همکاران (۲۰۱۹) لغزش گسل MFF را به‌صورت مایل و با سرعت کند ۲ km/s پیش‌بینی کردند، کویا‌یاشی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تکنیک InSAR بیشینه جابه‌جایی سطحی افقی و قائم را به‌ترتیب ۵۰ و ۹۰ سانتی‌متر تخمین



شکل ۲. نتایج پژوهش واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) شامل: جابه‌جایی قائم سطحی حاصل از تکنیک InSAR و توزیع لغزش روی صفحه گسل که از تکنیک برگردان جابه‌جایی به‌دست‌آمده است، می‌باشد. محدوده جابه‌جایی قائم به‌دست‌آمده ۴۵- تا ۸۰ سانتی‌متر و محدوده لغزش روی صفحه گسل ۰ تا ۵ متر می‌باشد. محل گسیختگی گسل و مکانیزم کانونی زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب در عمق ۱۸۷ کیلومتری نشان داده شده است. پیکان‌های سفید نیز جهت N10E همگرایی صفحه عربستان نسبت به صفحه اورآسیا را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مطالعات محققین مختلف شامل روش مورد مطالعه و کمیت اندازه‌گیری شده در زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب.

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	روش مورد مطالعه	کمیت‌های اندازه‌گیری‌شده
۱	فنگ و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و معکوس جابه‌جایی سطحی	تغییر مکان سطح زمین و توزیع لغزش گسل MFF
۲	چن و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و معکوس تغییر مکان سطح زمین	بیشینه لغزش سطح گسل MFF
۳	بارنهارت و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR)	عمق گسیختگی و شیب گسل MFF
۴	دینگ و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR)	بیشینه جابه‌جایی افقی و قائم در سطح زمین
۵	یانگ و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و معکوس تغییر مکان سطح زمین	پارامترهای هندسی و لغزش گسل MFF
۶	وانگ و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR)	بیشینه فرونشست و بالا آمدگی سطح زمین
۷	واجدیان و همکاران	۲۰۱۸	تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و روش ترکیبی ردیابی افسست (combined offset tracking)	جابه‌جایی سطحی و جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله‌کیود
۸	واجدیان و متاق	۲۰۱۸	روش معکوس غیر خطی جابه‌جایی سطحی حاصل از روش InSAR	پارامترهای هندسی گسل
۹	والکانیتز و همکاران	۲۰۱۸	روش ترکیبی ردیابی افسست (combined offset tracking)	مساحت و جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله‌کیود
۱۰	نیسن و همکاران	۲۰۱۹	معکوس تغییر مکان سطح زمین حاصل از روش InSAR	سرعت و جهت لغزش گسل MFF
۱۱	کوبایاشی و همکاران	۲۰۱۹	تداخل‌سنجی راداری (InSAR)	بیشینه جابه‌جایی افقی و قائم در سطح زمین
۱۲	وانگ و برگمن	۲۰۲۰	معکوس تغییر مکان سطح زمین حاصل از روش InSAR	عمق بیشینه گشتاور لرزه‌ای
۱۳	گورابی	۲۰۲۰	تداخل‌سنجی راداری (InSAR)	ارتفاع محلی، حجم توده لغزشی و ضخامت رسوب همراه با زمین لغزش مله‌کیود

فایل‌های متنی که نام آن قبلاً توسط کاربر تعیین گردیده ذخیره می‌کند. در مدل عنصر مرزی گسل‌ها به صورت جداشدگی‌های مستطیلی یا مثلثی صفحه‌ای در نیم‌فضای الاستیک همگن تحت عنوان المان شناخته می‌شوند. جداشدگی یا لغزش روی المان‌ها را می‌توان با روش‌های متعددی شامل اعمال تنش، کرنش یا تنسور گرادینان جابه‌جایی با اعمال شرایط مرزی مناطق دور یا با اعمال جابه‌جایی یا تنش روی المان‌های گسل ایجاد کرد. امکان استفاده از شرایط مرزی ترکیبی نیز وجود دارد (ماترن و همکاران، ۲۰۱۴). در شکل ۳، یک مدل عنصر مرزی گسل با شرایط مرزی اعمال شده در مرکز المان به صورت تنش و ناپیوستگی جابه‌جایی یا لغزش در سه جهت امتداد، شیب و نرمال گسل ارائه شده است.

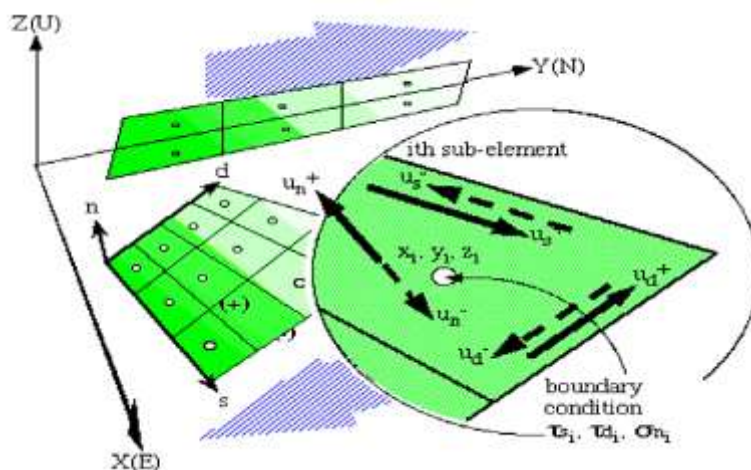
۲-۲ مدل گسل

پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدل‌سازی گسل شامل دو دسته اطلاعات گسلی است که به صورت یک فایل ورودی به مدل داده می‌شود و در آن تنظیمات خروجی‌های مورد نیاز نیز توسط کاربر مشخص می‌گردد. دسته اول اطلاعات هندسی قطعات گسل شامل: مختصات

مدل‌سازی گسل MFF در رخداد زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب استفاده شده است. بدین منظور کد 3d-def که یک برنامه عنصر مرزی سه‌بعدی می‌باشد و این قابلیت را به کاربر می‌دهد که تنش‌ها، کرنش‌ها و جابه‌جایی‌ها را درون و روی سطح یک نیم‌فضای الاستیک محاسبه نماید، به کار برده شده است، این کد به زبان برنامه‌نویسی فرترن ۹۰ نوشته شده است. برنامه 3d-def توسط گمبرگ و ایس (۱۹۹۳) به منظور مدل‌سازی حرکات تکنونیکي مناطق لرزه خیز طراحی و استفاده گردید.

ساختار برنامه 3d-def به طور کلی شامل چهار بخش اصلی که به صورت فایل متنی و به زبان فرترن هستند، می‌باشد. این چهار بخش عبارت‌اند از: 3d_main, okada_sub, xyz_output و vector_output.

مشخص کردن پارامترهای ورودی در بخش 3d_main انجام می‌گیرد. بخش okada_sub همان‌طور که از نام آن مشخص است، پارامترهای میدان تغییر شکل را با استفاده از مدل اکادا ۹۲ (اکادا، ۱۹۹۲)، محاسبه می‌نماید. به‌طور کلی کلیه توابع محاسباتی این برنامه در دو بخش فوق قرار دارند. دو بخش xyz_output و vector_output پارامترهای خروجی را آماده‌سازی کرده و آن را در قالب



شکل ۳. مدل عنصر مرزی گسل همراه با شرایط مرزی اعمال شده در مرکز المان به صورت تنش و ناپیوستگی جابه‌جایی (گمبرگ و ایس ۱۹۹۳).

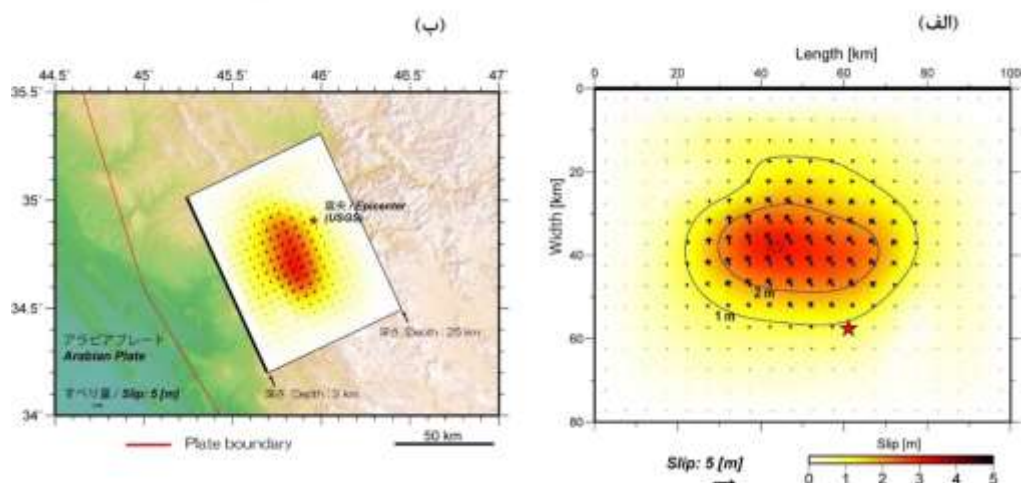
اطلاعات زمین فضای ژاپن (GSI) (۲۰۱۹)، نشان داده شده است. توزیع لغزش بر اساس معکوس تغییر شکل پوسته‌ای اندازه‌گیری شده به کمک داده‌های InSAR محاسبه شده است. اما در مدل نوع سوم به منظور به دست آوردن جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله کبود، گسل MFF به همراه ناپیوستگی موجود در محل زمین لغزش مله کبود که با توجه به مطالعه واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) و همچنین تحلیل‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی این ناپیوستگی یک گسل امتداد لغز از پیش موجود می‌باشد، مدل شده است. شرایط مرزی اعمال شده در مدل سوم، لغزش رخ داده در سطح گسل MFF به همراه گرادیان جابه‌جایی از راه دور به عنوان تغییر شکل زمینه می‌باشد، مقادیر گرادیان جابه‌جایی اعمال شده به عنوان شرط مرزی با توجه به نتایج کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر گرادیان جابه‌جایی اعمال شده به عنوان شرط مرزی مدل سوم.

$dUx/dx/dy/dz,$	$dUy/dx/dy/dz,$ $/dy/dz$	dUz/dx
-2e-1 0 0	0 -1.5e-2 0	0 0 -0.1e-2

شیب گسل و المان‌بندی صفحه گسل می‌باشد و دسته دوم نیز مربوط به پارامترهای مکانیکی قطعات گسل و نواحی مورد مطالعه است که عبارت‌اند از: نسبت پواسون، مدول یانگ و ضریب اصطکاک داخلی نواحی مورد مطالعه و همچنین شرایط مرزی المان‌های مرزی یا همان لغزش و تنش‌های مشخص شده بر روی المان‌های مرزی به عنوان شرط مرزی.

در این مقاله سه نوع مدلسازی جداگانه انجام شده است که در دو نوع آن به منظور استخراج جابه‌جایی منطقه زمین‌لرزه و میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه برای پیش‌بینی محل پس‌لرزه‌ها، گسل MFF به تنهایی مدل شده است و شرط مرزی اعمال شده در این دو مدل، لغزش رخ داده در سطح گسل MFF می‌باشد که برای اعمال شرایط مرزی ابتدا باید سطح گسل المان‌بندی شود. در این مطالعه سطح گسل MFF به 20×16 المان مربعی به ابعاد 5×5 کیلومتر مربع المان‌بندی شده است سپس شرایط مرزی در مرکز هر المان به صورت لغزش اعمال می‌گردد. در شکل ۴ (الف وب) مدل توزیع لغزش گسل محاسبه شده توسط کوبایاشی و همکاران (۲۰۱۹) و ارائه شده توسط سازمان



شکل ۴. مدل محاسبه شده برای توزیع لغزش سطح گسل زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب. (الف) سطح گسل را در صفحه افقی و (ب) سطح گسل را در عمق نشان می‌دهد. (کوبایاشی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سازمان اطلاعات زمین فضای ژاپن، ۲۰۱۹).

جدول ۳. پارامترهای مربوط به گسل‌ها (سازمان نقشه‌برداری‌های زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، ۲۰۱۷؛ واجدیان و همکاران، ۲۰۱۸).

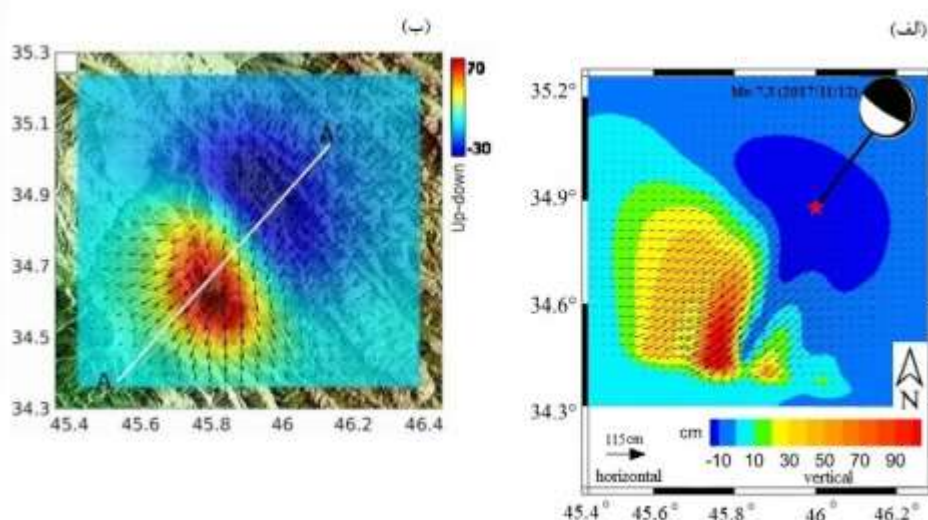
گسل	X ₀ (km)	Y ₀ (km)	Z ₀ (km)	Length (km)	Width (km)	Strike (°)	Dip (°)
MFF	564416	3795642	-3.0	100	80	351	16
امتداد مله کبود	550612	3795557	0.0	6	4	351	16

معنادار بودن خروجی‌های مدل به حل مجدد مثال‌های حل‌شده با کد 3d-def توسط گمبرگ و ایس (۱۹۹۳) پرداخته شد، سپس نتایج با خروجی‌های گمبرگ و ایس (۱۹۹۳) مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج تقریباً بر همدیگر منطبق و یکی هستند. پس از صحت‌سنجی مدل عددی 3d-def، مدل‌سازی گسل‌های مورد نظر در این مطالعه انجام شد که نتایج آنها در ادامه آورده شده است.

۲-۳ نتایج مدل‌سازی عددی

پس از اطمینان از درستی اجرای کد 3d-def، برای دستیابی به اهداف این مقاله مدل‌سازی‌های مذکور در بخش ۲-۲ برای گسل MFF و گسل امتداد لغز موجود در محل زمین‌لغزش مله کبود انجام شدند. به منظور به دست آوردن تغییر مکان به وجود آمده در منطقه زمین‌لرزه گسل

پارامترهای هندسی گسل MFF و گسل امتداد لغز مذکور در محل زمین‌لغزش مله کبود بر اساس مطالعات لرزه‌شناسی و زمین‌شناسی سایر محققین در جدول ۳ ارائه شده است (سازمان نقشه‌برداری‌های زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، ۲۰۱۷؛ واجدیان و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین جهت‌یافتگی گسل‌ها به صورت شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد که در مدل‌سازی لحاظ می‌گردد. علاوه بر پارامترهای هندسی، پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی، نسبت پواسون، مدول یانگ و ضریب اصطکاک داخلی می‌باشند که مقادیر آنها به ترتیب برابر ۰/۲۵، $10^5 \times 7/5$ بار و ۰/۴ است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ کوبایاشی و همکاران، ۲۰۱۹). پس از مشخص شدن پارامترهای هندسی و مکانیکی برای ورود به مدل عنصر مرزی 3d-def، به منظور اطمینان از درستی و



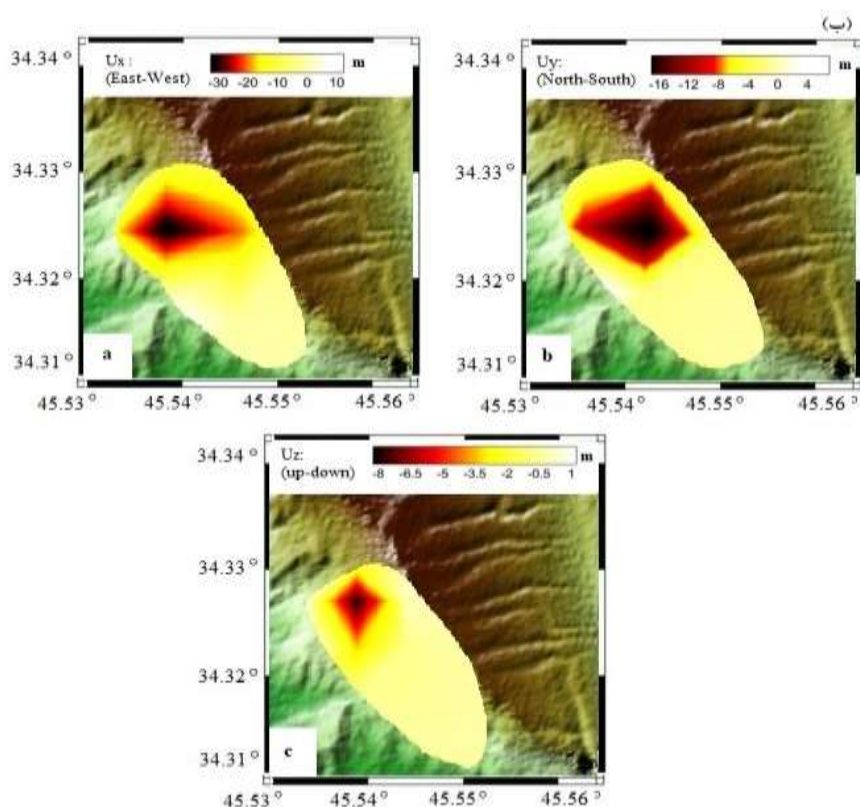
شکل ۵. مقایسه جابه‌جایی قائم (رنگی) و افقی (بیکان‌ها) حاصل از مدل‌سازی (الف) با نتایج حاصل از کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) (ب). جابه‌جایی‌ها بر حسب سانتی‌متر می‌باشند و ستاره قرمز در شکل سمت راست محل رومرکز زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ همراه با سازوکار کانونی را نشان می‌دهد.

یکسان است؛ اما برای پیش‌بینی درست موقعیت جابه‌جایی‌ها باید جهت‌یافتگی گسل در مدلسازی لحاظ گردد.

همچنین به‌منظور پیش‌بینی جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود که بزرگ‌ترین زمین‌لغزش رخ داده در اثر زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب بود، گسل MFF و گسل امتداد لغز موجود در محل زمین‌لغزش مله‌کبود با استفاده از کد 3d-def شبیه‌سازی شدند. خروجی این شبیه‌سازی به‌صورت جابه‌جایی افقی با مؤلفه‌های شرق-غرب و شمال-جنوب و جابه‌جایی قائم در شکل ۶-ب ارائه و با جابه‌جایی حاصل از تحلیل داده‌های ماهواره‌ای یا روش ترکیبی ردیابی افست (شکل ۶-الف) مقایسه شده است. با مقایسه نتایج در شکل ۶، دیده می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده توسط کد 3d-def به نتایج ارائه شده در کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش ترکیبی ردیابی افست تقریباً نزدیک می‌باشد و این نزدیکی در قسمت شمال‌غربی زمین‌لغزش که بیشترین جابه‌جایی در آنجا رخ داده است، بیشتر می‌باشد؛ اما در بقیه نواحی هماهنگی کمتر است، به‌گونه‌ای که در مدلسازی با کد 3d-def بیشینه جابه‌جایی افقی و قائم به ترتیب ۳۲/۲۵ متر و ۸/۵ متر می‌باشد و این مقادیر در کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش ترکیبی ردیابی افست به ترتیب ۳۴ و ۱۰ متر می‌باشد که تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. علاوه بر این با توجه به شکل ۶، میزان فرونشست زمین در محل پیشانی زمین‌لغزش مله‌کبود بیشینه می‌باشد و کاهش کلی ارتفاع و فرونشست بر روی دامنه در محدوده زمین-لغزش مله‌کبود دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در این نواحی لغزش بزرگ رخ داده خود باعث ایجاد تغییر مکان‌های غیرالاستیک در ناحیه زمین‌لغزش نیز شده است که این تغییر مکان‌ها در برخی مناطق خیلی زیاد می‌باشد.

MFF مدلسازی شد، نتایج حاصل از این مدلسازی در شکل ۵-الف نشان داده شده است و به‌منظور صحت‌سنجی آن، با جابه‌جایی اندازه‌گیری شده از روش InSAR (شکل ۵-ب) توسط واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) مقایسه گردیده است. در شکل ۵ (الف و ب) مقادیر مثبت نشان از بالاآمدگی زمین و مقادیر منفی فرونشست زمین را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از مدلسازی عددی به نتایج کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸)، توسط روش InSAR تقریباً نزدیک می‌باشد، البته اختلافاتی در موقعیت جابه‌جایی‌ها به‌خصوص در نواحی جنوب‌شرقی دیده می‌شود و دامنه‌تغییرات جابه‌جایی‌ها نیز در دو روش دارای اختلافاتی می‌باشد به‌گونه‌ای که دامنه‌تغییرات جابه‌جایی در کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸)، ۳۵- تا ۸۰ سانتی‌متر است؛ در حالی که این محدوده برای نتایج حاصل از مدلسازی انجام شده، ۱۵- تا ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. بیشترین مقدار جابه‌جایی قائم در کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸)، حدود ۸۰ سانتی‌متر و این مقدار در شکل مربوط به مدلسازی با کد 3d-def، حدود ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. علاوه بر این در شکل ۵ (الف و ب) جابه‌جایی افقی نیز به‌صورت پیکان بر حسب سانتی‌متر نشان داده شده است؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی با توجه به اندازه پیکان‌ها در محدوده گسل می‌باشد و بیشینه جابه‌جایی حاصل از مدلسازی عددی در جنوب‌غربی رومرکز زلزله رخ داده است که مقدار آن در شکل ۵-الف، ۱۱۵ سانتی‌متر می‌باشد و هرچه از صفحه گسل دورتر می‌شویم، مقدار جابه‌جایی افقی و در نتیجه اندازه پیکان‌ها کوچک‌تر می‌گردد. علاوه بر این تأثیر جهت‌یافتگی گسل در مدلسازی به این گونه است که با و بدون در نظر گرفتن آن مقادیر جابه‌جایی‌های حاصل



شکل ۶. مقایسه نتایج کار واجدیان و همکاران (۲۰۱۸) توسط روش ترکیبی ردیابی افست (combined offset tracking) (الف-ب، c) با نتایج به دست آمده از مدل سازی با کد 3d-def (ب- c, b, a). در شکل الف و ب، a: مؤلفه شرق-غرب، b: مؤلفه شمال-جنوب و c: مؤلفه قائم جابه‌جایی می‌باشد.

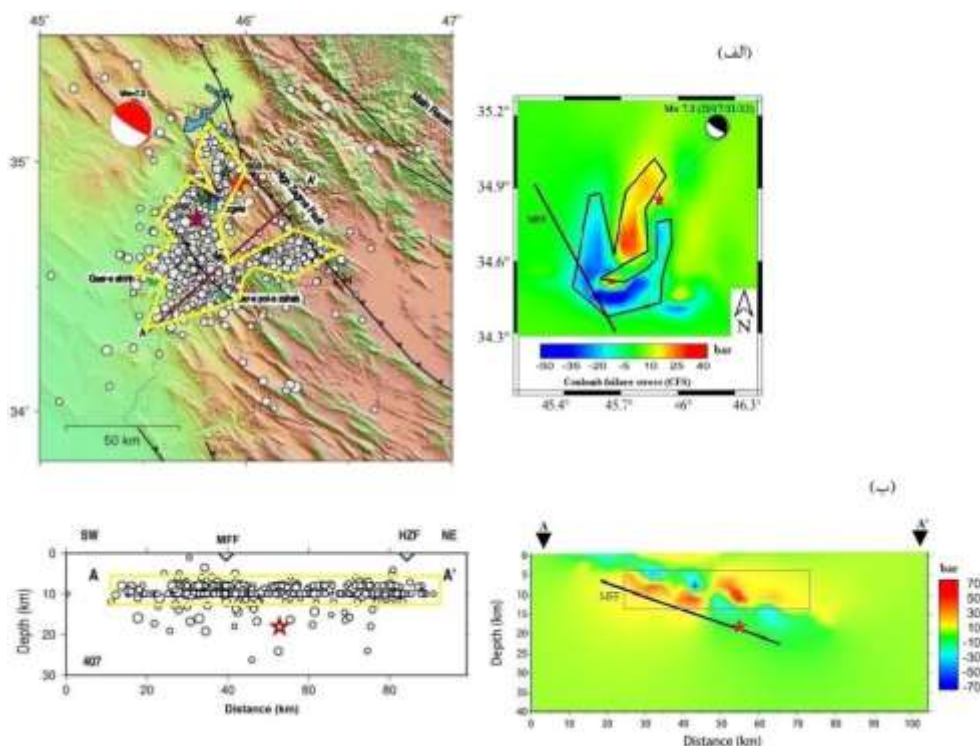
کشوری، ۱۳۹۶) که نشانی از محل گسل‌های ثانویه است، مقایسه شده است؛ موقعیت پس‌لرزه‌ها در سطح و عمق زمین توسط تاتار و یمنی فرد (تاتار و یمنی فرد، ۱۳۹۷) در شکل ۷ ((الف و ب) سمت چپ) نشان داده شده است. شکل ۷-الف و ۷-ب میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدل‌سازی گسل MFF را به ترتیب در سطح زمین و مقطع AA' را نشان می‌دهد؛ مقطع AA' در شکل ۷-الف (سمت چپ) مشخص شده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد محل‌هایی که بیشترین مقادیر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه را دارا هستند، محل پس‌لرزه‌ها می‌باشند. در شکل ۷-الف (سمت راست) دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی بین ۵۰- تا ۴۰ بار می‌باشد و بیشترین مقادیر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه مربوط به قسمت جنوبی گسل می‌باشد.

یکی دیگر از اهداف این مقاله پیش‌بینی محل گسل‌های ثانویه فعال‌شده در اثر زلزله اصلی می‌باشد. توسعه و فعال‌شدن گسل‌های ثانویه مربوط به آشفته‌گی تنش تولیدشده توسط جابه‌جایی یا لغزش اتفاق افتاده بر روی گسل اصلی است (مائرتن و همکاران، ۲۰۰۲)؛ در این مقاله از میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه به عنوان معیاری برای تعیین محل گسل‌های ثانویه یا تراکم گسل استفاده شده است، بنابراین به منظور پیش‌بینی محل گسل‌های ثانویه گسل MFF توسط کد 3d-def مدل‌سازی و میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه، به عنوان خروجی مدل تعیین شد. میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدل‌سازی در شکل ۷ (الف و ب) ارائه شده و با محل وقوع پس‌لرزه‌های تعیین‌شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) (مرکز لرزه‌نگاری

در شکل ۷-ب، دیده می‌شود که بیشترین مقادیر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه مربوط به عمق ۵ تا ۱۴ کیلومتری در فاصله ۲۵ تا ۷۰ کیلومتری است و در شکل سمت چپ تراکم پس لرزه‌ها در عمق ۵ تا ۱۳ کیلومتری در فاصله ۲۵ تا ۸۰ کیلومتری رخ داده است که این نشان می‌دهد عمق‌هایی که بیشترین میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه را دارند با عمق‌هایی که تراکم پس لرزه زیاد است، به جز در عمق ۱۳ کیلومتری به پایین و فاصله بیشتر از ۷۵ کیلومتر تقریباً یکسان می‌باشند. به گونه‌ای که عمق‌هایی در شکل سمت راست مربوط به مدلسازی گسل MFF که دارای بیشترین مقدار میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه هستند، در شکل سمت چپ همان محل‌ها دارای تراکم پس لرزه می‌باشند.

همچنین در شکل ۷-ب (سمت راست) دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه مقطع AA' بین ۷۰- تا ۷۰ بار می‌باشد.

با توجه به شکل ۷-الف، تقریباً هماهنگی بین محل‌هایی که بیشترین میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه را دارند با محل‌هایی که تراکم پس لرزه زیاد است، دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که محل‌هایی در شکل سمت راست مربوط به مدلسازی گسل MFF که دارای بیشترین مقدار میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه هستند، در شکل سمت چپ تقریباً همان محل‌ها دارای تراکم پس لرزه می‌باشند و این هماهنگی در قسمت جنوبی گسل که میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حدود ۳۵- تا ۵۰- بار می‌باشد بیشتر است و در سایر قسمت‌ها هماهنگی کمتر است. همچنین



شکل ۷. مقایسه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدلسازی گسل MFF توسط کد 3d-def با محل تراکم پس لرزه‌های زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب که توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) (مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹۶) ارائه و موقعیت آنها در عمق زمین توسط تاتار و یمینی فرد (تاتار و یمینی فرد، ۱۳۹۷) در شکل ۷ (الف و ب) سمت چپ) نشان داده شده است. شکل الف: مقایسه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدلسازی گسل در سطح زمین (سمت راست) با محل تراکم پس لرزه‌ها (سمت چپ) (تاتار و یمینی فرد، ۱۳۹۷) و شکل ب: مقایسه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدلسازی گسل در مقطع AA' (سمت راست) با محل تراکم پس لرزه‌ها (سمت چپ) (تاتار و یمینی فرد، ۱۳۹۷). در شکل‌ها محل حداکثر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه و تراکم پس لرزه‌ها تعیین شده‌اند.

۳ تحلیل حساسیت

تعیین پارامترهای یک زمین لرزه همواره با یک سری عدم قطعیت‌هایی روبه‌رو است، بنابراین برای مدل تحلیل حساسیت انجام می‌شود. هدف از انجام تحلیل حساسیت، این است که مشخص شود حساسیت خروجی مدل نسبت به کدام پارامتر ورودی بیشتر از بقیه است و یا به عبارت بهتر تغییرات کدام پارامتر در مدل، خروجی مدل را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ادامه به بررسی اثر تغییر پارامترهای مدل‌سازی گسل روی مقادیر جابه‌جایی‌های حاصل از زمین لغزش مله‌کبود و میانگین تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه پرداخته می‌شود. برای انجام تحلیل حساسیت در هر مرحله تحلیل، کلیه پارامترها به غیر از یکی ثابت در نظر گرفته می‌شود و مقادیر پارامتر مورد تحلیل تغییر داده می‌شود و تغییرات خروجی مدل با نتایج مدل مرجع مقایسه می‌گردد. مدل مرجع در اینجا مدل گسل ارائه‌شده در بخش ۲-۲ می‌باشد که نتایج آن در فوق ارائه شده است.

۳-۱ تحلیل حساسیت مقادیر جابه‌جایی حاصل

از زمین لغزش مله‌کبود به پارامترهای مدل‌سازی

برای تحلیل حساسیت مقادیر جابه‌جایی حاصل از زمین لغزش مله‌کبود به پارامترهای مدل‌سازی، تغییرات روی پارامترهای فیزیکی همچون طول، عرض، شیب و لغزش گسل و پارامترهای مکانیکی چون نسبت پواسون، ضریب اصطکاک داخلی و مدول یانگ اعمال شد و نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی‌های گسل‌ها با استفاده از کد 3d-def برای پارامترهای فوق به ترتیب در پیوست الف و جدول‌های الف-۱ تا الف-۷ ارائه شده است. پارامترهای مدل اصلی در این جداول به صورت پرننگ به همراه نتایج مدل‌سازی‌ها آورده شده است. در جدول‌های الف-۱ تا الف-۷، ستون اول پارامتر ورودی، ستون دوم دامنه تغییرات جابه‌جایی بر حسب متر حاصل از مدل‌سازی‌ها،

ستون سوم میانگین قدرمطلق دامنه تغییرات جابه‌جایی در ستون دوم، ستون چهارم قدرمطلق اختلاف اعداد ستون سوم با مدل مرجع و ستون پنجم میانگین اعداد ستون چهارم می‌باشد.

با توجه به جداول پیوست الف، در مورد پارامترهای فیزیکی گسل، هرچه مقادیر طول، عرض، شیب و لغزش گسل کمتر از مقادیر در نظر گرفته شده برای مدل مرجع باشد مقادیر جابه‌جایی حاصل نیز کمتر از مقادیر مدل مرجع به دست می‌آید و برعکس. در مورد پارامترهای مکانیکی نیز هر چه نسبت پواسون کمتر از مقدار در نظر گرفته شده برای مدل مرجع باشد، مقادیر جابه‌جایی به دست آمده بیشتر از نتایج مدل مرجع است و برعکس. اما تغییرات ضریب اصطکاک داخلی و مدول یانگ هیچ تأثیری در نتایج ندارد و مقادیر جابه‌جایی حاصل از مدل‌های مربوط به تغییرات آنها با نتایج مدل مرجع یکی است. علاوه بر این میزان حساسیت نتایج با توجه به مقدار میانگین اختلاف‌ها که در ستون پنجم جداول الف-۱ تا الف-۷ نشان داده شده است، ارزیابی شد. حساسیت جابه‌جایی در جهت x ، y و z به پارامترهای فوق در جدول ۴ نشان داده شده است. میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول ۴ جابه‌جایی در جهت x بیشترین حساسیت را به عرض گسل و کمترین حساسیت را به مدول یانگ و ضریب اصطکاک داخلی دارد که در واقع هیچ گونه حساسیتی به این دو پارامتر ندارد. و جابه‌جایی در جهت y بیشترین حساسیت را به شیب و عرض گسل و کمترین حساسیت را به مدول یانگ و ضریب اصطکاک داخلی دارد که در واقع هیچ گونه حساسیتی به این دو پارامتر ندارد؛ همچنین جابه‌جایی در جهت z بیشترین حساسیت را به عرض گسل و کمترین حساسیت را به مدول یانگ و ضریب اصطکاک داخلی دارد که در واقع هیچ گونه حساسیتی به این دو پارامتر ندارد.

جدول ۴. حساسیت جابه‌جایی در جهت x ، y و z به تغییر در پارامترهای مدلسازی، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

ردیف	پارامتر		
	U_x	U_y	U_z
۱	عرض گسل	شیب گسل	عرض گسل
۲	طول گسل	عرض گسل	طول گسل
۳	شیب گسل	طول گسل	شیب گسل
۴	نسبت پواسون	نسبت پواسون	نسبت پواسون
۵	میدان تغییر شکل (گرادیان جابه‌جایی) و لغزش گسل	میدان تغییر شکل (گرادیان جابه‌جایی) و لغزش گسل	میدان تغییر شکل (گرادیان جابه‌جایی) و لغزش گسل
۶	ضریب اصطکاک داخلی	ضریب اصطکاک داخلی	ضریب اصطکاک داخلی
۷	مدول یانگ	مدول یانگ	مدول یانگ

۲-۳ تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی

بیشینه و کمینه به پارامترهای مدلسازی

برای تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در سطح زمین و مقطع AA' به پارامترهای مدلسازی، مانند بخش ۳-۱ تغییرات روی پارامترهای فیزیکی همچون طول، عرض، شیب و لغزش گسل و پارامترهای مکانیکی چون نسبت پواسون، ضریب اصطکاک داخلی و مدول یانگ اعمال شد. نتایج عددی حاصل از مدلسازی‌های گسل در سطح زمین و مقطع AA' با استفاده از کد 3d-def برای پارامترهای فوق به ترتیب در پیوست‌های ب و ج در جدول‌های ب-۱ تا ب-۷ و ج-۱ تا ج-۷ ارائه شده است.

در مورد پارامترهای فیزیکی با توجه به جداول پیوست ب، دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی هم برای طول‌های کمتر و هم برای طول‌های بیشتر از طول گسل در نظر گرفته شده در مدل مرجع دارای مقادیر کمتری است. اما برای تغییرات لغزش و عرض گسل مقادیر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به دست آمده در تمام موارد بیشتر از مقادیر مربوط به مدل مرجع می‌باشد. و در مورد شیب گسل نیز مقادیر بیشینه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدل‌های مربوط به تغییرات آن بیشتر از نتایج مدل مرجع است.

همچنین در مورد پارامترهای مکانیکی میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در تحلیل‌های مربوط به تغییرات ضریب اصطکاک داخلی از مقادیر حاصل از مدل مرجع بیشتر است؛ اما برای نسبت پواسون و مدول یانگ میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه برای مقادیر کمتر از این دو پارامتر کمتر از این دو پارامتر کمتر از نتایج مدل مرجع بیشتر است. علاوه بر این در مقطع AA' برای تغییرات طول و شیب گسل مقادیر میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه به دست آمده در تمام موارد بیشتر از مقادیر مربوط به مدل مرجع می‌باشد. اما برای لغزش و عرض گسل دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه برای مقادیر کمتر از این دو پارامتر کمتر از نتایج مدل مرجع و برای مقادیر بیشتر نیز از نتایج مدل مرجع بیشتر است. همچنین در مورد پارامترهای مکانیکی میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه حاصل از مدل‌های مربوط به تغییرات ضریب اصطکاک داخلی، نسبت پواسون و مدول یانگ از مقادیر حاصل از مدل مرجع بیشتر است. با توجه به جداول پیوست ب و ج حساسیت مدل به پارامترهای فوق برای سطح زمین و مقطع AA' به ترتیب در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است. میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می‌یابد.

در مطالعه حاضر میزان تغییر مکان سطح زمین در منطقه زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب به ویژه جابه جایی حاصل از زمین لغزش مله کبود و همچنین محل گسل های ثانویه با استفاده از کد 3d-def که یک روش عنصر مرزی سه بعدی می باشد، مدل سازی شد سپس به منظور صحت سنجی نتایج مدل سازی برای جابه جایی ها، از مقایسه نتایج با داده های به دست آمده از روش تداخل سنجی راداری و روش ترکیبی ردیابی افست استفاده گردید و برای محل گسل های ثانویه، مقادیر بیشینه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه با تراکم پسلرزه ها مقایسه شد. در نهایت برای تعیین میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام شد. مقادیر بیشینه جابه جایی افقی و قائم زمین لغزش مله کبود که از مدل سازی به دست آمده است به ترتیب ۳۲/۲۵ و ۸/۵ متر می باشد. همچنین مقادیر بیشینه جابه جایی افقی و قائم سطح زمین در منطقه زلزله به ترتیب ۱۱۵ و ۱۰۰ سانتی متر پیش بینی شده است، نتایج حاصل از مدل سازی برای جابه جایی ها تقریباً به اندازه گیری داده های ماهواره ای نزدیک می باشد. علاوه بر این اکثر پس لرزه ها در عمق بین ۳ تا ۱۲ کیلومتر رخ داده است که میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه به دست آمده از مدل سازی با کد عنصر مرزی سه بعدی 3d-def در این اعماق نیز دارای بیشترین مقادیر بودند همچنین میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی حاصل در نواحی دارای تراکم پسلرزه، بیشترین مقادیر را داشت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات پارامترهای شیب و عرض گسل بیشترین اثر را بر خروجی جابه جایی و همچنین تغییرات پارامترهای مدول یانگ و طول گسل بیشترین اثر را بر خروجی میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه دارد. روش عنصر مرزی به کار برده شده در مقاله حاضر یکی از روش های مدل سازی عددی است که کاربرد زیادی در شبیه سازی عددی دینامیک گسل ها دارد و نتایج آن دید وسیعی از

همان طور که در جدول ۵ دیده می شود، میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی بیشترین حساسیت را به مدول یانگ و کمترین حساسیت را به عرض گسل دارد و با توجه به جدول ۶ مشاهده می شود که میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع 'AA' بیشترین حساسیت را به طول گسل و کمترین حساسیت را به لغزش گسل دارد.

جدول ۵. حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییر در پارامترهای مدل سازی، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می یابد.

ردیف	پارامتر
۱	مدول یانگ
۲	شیب گسل
۳	نسبت پواسون
۴	طول گسل
۵	لغزش
۶	ضریب اصطکاک داخلی
۷	عرض گسل

جدول ۶. حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع 'AA' به تغییر در پارامترهای مدل سازی، میزان حساسیت از بالا به پایین کاهش می یابد.

ردیف	پارامتر
۱	طول گسل
۲	شیب گسل
۳	نسبت پواسون
۴	مدول یانگ
۵	ضریب اصطکاک داخلی
۶	عرض گسل
۷	لغزش گسل

۴ نتیجه گیری

- Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, A history of Persian Earthquakes: Cambridge University Press.
- Barnhart, W. D., Brengman, C. M., Li, S. and Peterson, K. E., 2018, Ramp-flat basement structures of the Zagros Mountains inferred from co-seismic slip and afterslip of the 2017 Mw7. 3 Darbandikhan, Iran/Iraq earthquake: Earth and Planetary Science Letters, **496**, 96-107.
- Beskos, D. E., 1987, Boundary element methods in dynamic analysis: Appl. Mech. Rev. **40**, 1-23.
- Beskos, D. E., 1997, Boundary element methods in dynamic analysis: Part II (1986-1996), Appl. Mech. Rev. **50**, 149-197.
- Bouchon, M. and F. J., Sa'ñchez-Sesma., 2007, Boundary integral equations and boundary elements methods in elastodynamics: Adv. Geophys. **48**, 157-189.
- Carnec, C., Massonnet, D. and King, C., 1996, Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent: Geophysical research letters, **23** (24), 3579-3582.
- Chen, K., Xu, W., Mai, P. M., Gao, H., Zhang, L. and Ding, X., 2018, The 2017 Mw 3/7 Sarpol Zahāb Earthquake, Iran: A compact blind shallow-dipping thrust event in the mountain front fault basement: Tectonophysics, **747**, 108-114.
- Childs, C., Watterson, J. and Walsh, J. J., 1995, Fault overlap zones within developing normal fault systems. Journal of the Geological Society, 152 (3), 535-549.
- Crider, J. G. and Pollard, D. D., 1998, Fault linkage: Three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **103** (B10), 24373-24391.
- Ding, K., He, P., Wen, Y., Chen, Y., Wang, D., Li, S. and Wang, Q., 2018, The 2017 M w 3/7 Ezgeleh, Iran earthquake determined from InSAR measurements and teleseismic waveforms: Geophysical Journal International, **215** (3), 1728-1738.
- Fathian, a., 2018, Preliminary report on the investigations along Azgeleh (12 November 2017) and Tazehabad (25 August 2018) earthquakes, western Iran: GSI report.
- Feng, W., Samsonov, S., Almeida, R., Yassaghi, A., Li, J., Qiu, Q. and Zheng, W., 2018, Geodetic constraints of the 2017 Mw7. 3

فیزیک گسیختگی زلزله فراهم کرده است. همچنین سازگاری نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج روش تداخل‌سنجی راداری و روش ترکیبی ردیابی افسست در این مقاله نشان می‌دهد که روش عنصر مرزی روش مناسبی برای مدل‌سازی عددی گسل می‌باشد و مزیت دیگر آن نسبت به سایر روش‌ها صرفه‌جویی در زمان و هزینه است.

۵ مراجع

- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۷ آذر ماه ۱۳۹۶، گزارش مقدماتی زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب استان کرمانشاه با بزرگای گشتاوری ۷/۳ (ویرایش چهارم)
- تاتار، م.، یمینی فرد، ف.، ۱۳۹۷، بررسی جنبه‌های زلزله‌شناسی و توالی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب استان کرمانشاه با بزرگای گشتاوری ۷/۳: نخستین کنفرانس ملی نقش مهندسی عمران در کاهش مخاطرات، دانشگاه رازی، ۶ و ۷ دی ماه ۱۳۹۷.
- حسامی آذر، خ.، ۱۳۸۲، نقشه گسل‌های فعال ایران: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- حق‌شناس، ا.، رخشنده، م.، تاجیک، و.، ۱۳۹۷، خطر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در استان کرمانشاه با نگاه به زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب: نخستین کنفرانس ملی نقش مهندسی عمران در کاهش مخاطرات، دانشگاه رازی، ۶ و ۷ دی ماه ۱۳۹۷.
- مرکز لرزه‌نگاری کشوری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، آبان ماه ۱۳۹۶، گزارش اولیه زلزله ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب استان کرمانشاه: نخستین کنفرانس ملی نقش مهندسی عمران در کاهش مخاطرات، دانشگاه رازی، ۶ و ۷ دی ماه ۱۳۹۷.

- instructs related organizations to clarify the conditions of land in Japan and that provides the results of surveys to help improve this land: <http://www.gsi.go.jp/cais/topic171115-index-e.html>.
- Tolomei, C., Sviggas, N., Baneh, A. F., Atzori, S. and Pezzo, G., 2018, Surface deformation and source modeling for the MW 3/7 Iran earthquake (November 12, 2017) exploiting sentinel-1 and ALOS-2 insar data: In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3063-3066). IEEE.
- U. S. Geological Survey, 2017, M3/7 – 30km S of Halabjar, Iraq. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000bmcg#executive> (accessed Dec.7, 2017).
- Vajedian, S., Motagh, M., Mousavi, Z., Motaghi, K., Fielding, E., Akbari, B. and Darabi, A., 2018, Coseismic deformation field of the Mw 3/7 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations: *Remote Sensing*, **10** (10), 1589.
- Vajedian, S. and Motagh, M., 2018, Coseismic displacement analysis of the 12 November 2017 Mw 3/7 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from SAR Interferometry, burst overlap interferometry and offset tracking: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4 (2018), Nr. 3, **4** (3), 205-209.
- Valkaniotis, S., Fomelis, M., de Michele, M., Ganas, A., Papathanassiou, G., 2018, Three-dimensional displacement field of a large co-seismic landslide (2017 Iraq-Iran earthquake) using optical-image correlation and SAR pixel offset-tracking: 9th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA), 25 – 27 June 2018, Possidi, Greece.
- Wang, K. and Bürgmann, R., 2020, Probing fault frictional properties during afterslip updip and downdip of the 2017 Mw 3/7 Sarpol-e Zahab earthquake with space geodesy: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125** (11), e2020JB020319.
- Wang, Z., Zhang, R., Wang, X. and Liu, G., 2018, Retrieving three-dimensional co-seismic Sarpol Zahab, Iran earthquake, and its implications on the structure and mechanics of the northwest Zagros thrust-fold belt: *Geophysical Research Letters*, **45** (14), 6853-6861.
- Gomberg, J. and Ellis, M., 1993, 3D-DEF: A user's manual (A three-dimensional, boundary element modeling program): Open-File Report 93-547. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- Goorabi, A., 2020, Detection of landslide induced by large earthquake using InSAR coherence techniques–Northwest Zagros, Iran: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **23** (2), 195-205.
- Huang, D., Gu, D. M., Song, Y. X., Cen, D. F. and Zeng, B., 2018, Towards a complete understanding of the triggering mechanism of a large reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir: *Engineering Geology*, **238**, 36-51.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W., 1979, *Fundamentals of Rock Mechanics*: Chapman and Hall. London. 593.
- Kobayashi, T., Morishita, Y., Yarai, H. and Fujiwara, S., 2019, InSAR-derived crustal deformation and reverse fault motion of the 2017 Iran-Iraq earthquake in the northwestern part of the Zagros Orogenic Belt: *Bulletin of the geospatial information authority of Japan*, **66** (2).
- Maerten, L., Gillespie, P. and Pollard, D. D., 2002, Effects of local stress perturbation on secondary fault development: *Journal of Structural Geology*, **24** (1), 145-153.
- Maerten, F., Maerten, L. and Pollard, D. D., 2014, iBem3D, a three-dimensional iterative boundary element method using angular dislocations for modeling geologic structures: *Computers & Geosciences*, **72**, 1-17.
- Nissen, E., Ghods, A., Karasözen, E., Elliott, J. R., Barnhart, W. D., Bergman, E. A. and Chen, L., 2019, The 12 November 2017 Mw 3/7 Ezgeleh-Sarpolzahab (Iran) earthquake and active tectonics of the Lurestan Arc: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **124** (2), 2124-2152.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bull. Seismol. Soc. Am.* **82**, 1018–1040.
- The Geospatial Information Authority of Japan (GSI), 2019, the national organization that conducts basic survey and mapping and

Yin, Y., Zheng, W., Liu, Y., Zhang, J. and Li, X., 2010, Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiaju landslide in Sichuan, China: Landslides, **7** (3), 359-365.

Zare, M., Kamranzad, F., Parcharidis, I. and Tsironi, V., 2017, Preliminary report of Mw7.3 Sarpol-e Zahab, Iran earthquake on November 12, 2017: EMSC report, 1.

deformation of the 2017 MW7.3 Iraq earthquake by multi-sensor SAR images: Remote Sensing, **10** (6), 857.

Yang, Y. H., Hu, J. C., Yassaghi, A., Tsai, M. C., Zare, M., Chen, Q. and Kamranzad, F., 2018, Midcrustal thrusting and vertical deformation partitioning constraint by 2017 M w 3/7 Sarpol Zahab earthquake in Zagros Mountain Belt, Iran: Seismological Research Letters, **89** (6), 2204-2213.

پیوست الف: در بخش ۳-۱ به این پیوست اشاره شده است.

جدول الف-۱. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کیود به تغییرات طول گسل.

طول گسل (km)	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
فرعی و MFF												
۴ ۹۰	-۱۳/۵ _ ۵/۵	-۱۱/۵ _ ۵/۵	-۶/۵ _ ۵/۵	۹/۵	۸/۵	۶	۱۱/۹	۳/۵	۱			
۵ ۹۵	-۱۹ _ ۹	-۱۵ _ ۷	-۷/۵ _ ۳/۵	۱۴	۱۱	۵/۵	۷/۴	۱	۰/۵			
۶ ۱۰۰	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	-	-	-	۸/۹	۲/۳	۲/۳
۷ ۱۰۵	-۴۲ _ ۱۲	-۱۹ _ ۷	-۸/۵ _ ۲/۵	۲۷	۱۳	۵/۵	۵/۶	۱	۰/۵			
۸ ۱۱۰	-۵۲ _ ۱۲	-۱۹ _ ۱۲	-۹ _ ۱۵	۳۲	۱۵/۵	۱۲	۱۰/۶	۳/۵	۷			

جدول الف-۲. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کیود به تغییرات عرض گسل.

عرض گسل (km)	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
فرعی و MFF												
۲ ۷۰	-۴/۵ _ ۷/۵	-۳/۷۵ _ ۳/۷۵	-۱/۷ _ ۱/۱	۶	۳/۷۵	۱/۴	۱۵/۴	۸/۳	۳/۶			
۳ ۷۵	-۱۵ _ ۹	-۱۰/۵ _ ۵/۵	-۳/۷۵ _ ۱/۲۵	۱۲	۸	۲/۵	۹/۴	۴	۲/۵	۱۰/۹	۴/۳	۵/۴
۴ ۸۰	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	-	-	-			
۵	-۴۷ _ ۱۲	-۱۹ _ ۹	-۱۳ _ ۹	۲۹/۵	۱۴	۱۱	۸/۱	۲	۶			

۸۵													
۶													
۹۰													

جدول الف-۳. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود به تغییرات شیب گسل.

شیب گسل (km)	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها			
	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	
فرعی و MF													
۵													
۵													
۱۰													
۱۰													
۱۶													
۱۶													
۲۰													
۲۰													
۲۵													
۲۵													

جدول الف-۴. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود به تغییرات میدان تغییر شکل زمینه و لغزش گسل.

میدان تغییر شکل زمینه (گرادیان جابه‌جایی) و لغزش گسل (km)	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها			
	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	U _x	U _y	U _z	
فرعی و MF													
$-1/8 \times 10^{-1}, -1/3 \times 10^{-2}, -0/8 \times 10^{-3}$													
۳													
$-1/9 \times 10^{-1}, -1/4 \times 10^{-2}, -0/9 \times 10^{-3}$													
۴													
$-2 \times 10^{-1}, -1/5 \times 10^{-2}, -0/1 \times 10^{-3}$													
۵													
$-2/1 \times 10^{-1}, -1/6 \times 10^{-2}, -0/2 \times 10^{-3}$													
۶													
$-2/2 \times 10^{-1}, -1/7 \times 10^{-2}, -0/3 \times 10^{-3}$													
۷													

جدول الف-۵. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود به تغییرات نسبت پواسون.

نسبت پواسون	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
۰/۱۵	-۳۷_۱۲	-۱۹_۷	-۷/۲_۲/۱	۲۴/۵	۱۳	۴/۶۵	۳/۱	۱	۰/۴			
۰/۲	-۳۲_۱۲	-۱۷_۷	-۷/۷_۱/۶	۲۲	۱۲	۴/۶۵	۰/۶	۰	۰/۴			
۰/۲۵	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	-	-	-	۱/۹	۰/۵	۰/۴
۰/۳	-۳۱_۹	-۱۷_۷	-۸/۲_۱/۱	۲۰	۱۲	۴/۶۵	۱/۴	۰	۰/۴			
۰/۳۵	-۲۹_۹	-۱۵_۷	-۸/۲_۱/۱	۱۹	۱۱	۴/۶۵	۲/۴	۱	۰/۴			

جدول الف-۶. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود به تغییرات ضریب اصطکاک داخلی.

ضریب اصطکاک داخلی	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
۰/۲	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰			
۰/۳	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰			
۰/۴	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	-	-	-	.	.	.
۰/۵	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰			
۰/۶	-۳۲/۲۵_۱۰/۵	-۱۷_۷	-۸/۵_۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰			

جدول الف-۷. تحلیل حساسیت جابه‌جایی حاصل از زمین‌لغزش مله‌کبود به تغییرات مدول یانگ.

مدول یانگ (bar)	دامنه تغییرات جابه‌جایی (m)			میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه			قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع			میانگین اختلاف‌ها		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z

$5/5 \times 10^{\circ}$	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰
$۶/۵ \times 10^{\circ}$	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰
$۷/۵ \times 10^{\circ}$	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	-	-	-
$۸/۵ \times 10^{\circ}$	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰
$۹/۵ \times 10^{\circ}$	-۳۲/۲۵ _ ۱۰/۵	-۱۷ _ ۷	-۸/۵ _ ۱/۵	۲۱/۴	۱۲	۵	۰	۰	۰

پیوست ب: در بخش ۳-۲ به این پیوست اشاره شده است.

جدول ب-۱. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات طول گسل.

طول گسل (km)	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین اختلافها
۹۰	-۴۷ _ ۴۲	۴۴/۵	۰/۵	۳
۹۵	-۵۲ _ ۳۲	۴۲	۳	
۱۰۰	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-	
۱۰۵	-۴۷ _ ۴۲	۴۴/۵	۰/۵	
۱۱۰	-۴۲ _ ۳۲	۳۷	۸	

جدول ب-۲. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات عرض گسل.

عرض گسل (km)	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین اختلافها
۷۰	-۵۲ _ ۳۷	۴۴/۵	۰/۵	۱/۶
۷۵	-۵۲ _ ۴۲	۴۷	۲	
۸۰	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-	
۸۵	-۵۲ _ ۴۲	۴۷	۲	
۹۰	-۵۲ _ ۴۲	۴۷	۲	

جدول ب-۳. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات شیب گسل.

شیب گسل (deg)	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین اختلافها
۵	-۵۲ _ ۳۷	۴۴/۵	۰/۵	۴/۶
۱۰	-۵۲ _ ۳۲	۴۲	۳	
۱۶	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-	
۲۰	-۵۵ _ ۴۵	۵۰	۵	

۲۵	-۵۵ _ ۵۵	۵۵	۱۰
----	----------	----	----

جدول ب-۴. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات لغزش گسل.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	لغزش (m)
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۳
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۴
۲	-	۴۵	-۵۰ _ ۴۰	۵
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۶
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۷

جدول ب-۵. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات نسبت پواسون.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	نسبت پواسون
	۵/۵	۳۹/۵	-۴۲ _ ۳۷	۰/۱۵
	۳	۴۲	-۴۷ _ ۳۷	۰/۲
۳/۹	-	۴۵	-۵۰ _ ۴۰	۰/۲۵
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۰/۳
	۵	۵۰	-۵۵ _ ۴۵	۰/۳۵

جدول ب-۶. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات ضریب اصطکاک داخلی.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	ضریب اصطکاک داخلی
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۰/۲
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۰/۳
۲	-	۴۵	-۵۰ _ ۴۰	۰/۴
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۰/۵
	۲	۴۷	-۵۲ _ ۴۲	۰/۶

جدول ب-۷. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه سطحی به تغییرات مدول یانگ.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	مدول یانگ (bar)
	۱۳	۳۲	-۳۷ _ ۲۷	۵/۵×۱۰ ^۹
	۳	۴۲	-۴۷ _ ۳۷	۶/۵×۱۰ ^۹
۹	-	۴۵	-۵۰ _ ۴۰	۷/۵×۱۰ ^۹
	۵	۵۰	-۵۵ _ ۴۵	۸/۵×۱۰ ^۹
	۱۵	۶۰	-۶۵ _ ۵۵	۹/۵×۱۰ ^۹

پیوست ج: در بخش ۳-۲ به این پیوست اشاره شده است.

جدول ج-۱. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع AA' به تغییرات طول گسل.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	طول گسل (km)
	۱۵۰	۲۲۰	۱۷۰ _ -۲۷۰	۹۰
	۴۰	۱۱۰	۱۱۰ _ -۱۱۰	۹۵
۲۰۵	-	۷۰	۷۰ _ -۷۰	۱۰۰
	۰	۷۰	۵۵ _ -۸۵	۱۰۵
	۶۳۰	۷۰۰	۱۵۰ _ -۱۲۵۰	۱۱۰

جدول ج-۲. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع AA' به تغییرات عرض گسل.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	عرض گسل (km)
	۱۵	۵۵	۵۵ _ -۵۵	۷۰
	۱۵	۵۵	۵۵ _ -۵۵	۷۵
۲۸/۷۵	-	۷۰	۷۰ _ -۷۰	۸۰
	۵	۷۵	۹۵ _ -۵۵	۸۵
	۸۰	۱۵۰	۲۳۰ _ -۷۰	۹۰

جدول ج-۳. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع AA' به تغییرات شیب گسل.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	شیب گسل (deg)
	۴۰	۱۱۰	۹۰ _ -۱۳۰	۵
	۳۰	۱۰۰	۹۰ _ -۱۱۰	۱۰
۳۳/۷۵	-	۷۰	۷۰ _ -۷۰	۱۶
	۴۰	۱۱۰	۱۳۰ _ -۹۰	۲۰
	۲۵	۹۵	۹۵ _ -۹۵	۲۵

جدول ج-۴. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع AA' به تغییرات لغزش گسل.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین قدرمطلق کمینه و بیشینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه (bar)	لغزش (m)
	۱۰	۶۰	۷۵ _ -۴۵	۳
	۰	۷۰	۷۵ _ -۶۵	۴
۲۵	-	۷۰	۷۰ _ -۷۰	۵
	۳۰	۱۰۰	۷۰ _ -۱۳۰	۶
	۶۰	۱۳۰	۹۰ _ -۱۷۰	۷

جدول ج-۵. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمینه در مقطع AA' به تغییرات نسبت پواسون.

میانگین اختلافها	قدرمطلق اختلاف مقادیر	میانگین قدرمطلق کمینه	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و نسبت
------------------	-----------------------	-----------------------	---

پواسون	کمیته (bar)	و بیشینه	ستون سوم با مدل مرجع
۰/۱۵	-۷۵ _ ۶۵	۷۰	۲۵
۰/۲	-۷۵ _ ۶۵	۷۰	۲۵
۰/۲۵	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-
۰/۳	-۸۵ _ ۸۵	۸۵	۴۰
۰/۳۵	-۸۵ _ ۸۵	۸۵	۴۰

جدول ج-۶. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمیته در مقطع AA' به تغییرات ضریب اصطکاک داخلی.

ضریب اصطکاک داخلی	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمیته (bar)	میانگین قدرمطلق کمیته و بیشینه	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین اختلافها
۰/۲	-۷۵ _ ۷۵	۷۵	۳۰	
۰/۳	-۷۵ _ ۷۵	۷۵	۳۰	
۰/۴	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-	۳۰
۰/۵	-۷۵ _ ۷۵	۷۵	۳۰	
۰/۶	-۷۵ _ ۷۵	۷۵	۳۰	

جدول ج-۷. تحلیل حساسیت میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمیته در مقطع AA' به تغییرات مدول یانگ.

مدول یانگ (bar)	دامنه میانگین تنشهای اصلی بیشینه و کمیته (bar)	میانگین قدرمطلق کمیته و بیشینه	قدرمطلق اختلاف مقادیر ستون سوم با مدل مرجع	میانگین اختلافها
$۵/۵ \times ۱۰^۰$	-۵۵ _ ۵۵	۵۵	۱۰	
$۶/۵ \times ۱۰^۰$	-۶۵ _ ۶۵	۶۵	۲۰	
$۷/۵ \times ۱۰^۰$	-۵۰ _ ۴۰	۴۵	-	۳۰
$۸/۵ \times ۱۰^۰$	-۸۵ _ ۸۵	۸۵	۴۰	
$۹/۵ \times ۱۰^۰$	-۹۵ _ ۹۵	۹۵	۵۰	

Numerical modeling of mountain front fault (MFF) in the event of earthquake on November 12, 2017 Sarpol-e-Zahab by boundary element method

Sayed Yadegar Hoshiyar^{1*}, Iman Ashayeri² and Mohsen Kamalian³

¹ Ph.D. student in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

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

(Received: 16 September 2021, Accepted: 02 February 2022)

Summary

The earthquake of November 12, 2017 Mw=7.3 Sarpol-e-Zahab is located in western Iran and between the two faults of the Mountain Front (MFF) and the High Zagros (HZF) of the Zagros tectonic seismic zone, Which is related to the rupture of MFF fault in Sarpol-e-Zahab area. The focal mechanism of this earthquake has a reverse fault with a low slope (16 degree) to the northeast. Studies in this field indicate the existence of a maximum slip of about 5 meters at a depth of 18 km. Due to the earthquake on November 12, 2017, Mw=7.3 Sarpol-e-Zahab, surface displacements, especially very large landslide of Mela-Kabod and many aftershocks occurred in the form of scattered clusters in the region. The occurrence of aftershocks in clusters indicates the activity of small secondary faults. In the present study, the fault causing the main earthquake (Mountain Front Fault, (MFF)) was modeled using 3d-def three-dimensional boundary element code and the surface displacements, especially displacement due to the landslide of Mela-Kabod and also the location of secondary faults were extracted using average of maximum and minimum principal stresses as a criterion for determining the location of secondary faults. In order to validate the modeling results for the displacements, comparing the results with the data obtained from the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) method and the combined offset tracking method, it was observed that The results of the two methods are almost close to each other and there are differences in the position of the displacements and the amplitude of their changes in the two methods, so that the amplitude of the displacements resulting from satellite data in the earthquake zone, It is -35 to 80 cm, while this range is -15 to 100 cm for the results of the modeling. Also, for the location of secondary faults, the average of maximum and minimum principal Stresses resulting from modeling are almost maximal in areas with aftershock density, especially in the southern part of the fault, and the depths with the most average of maximum and minimum principal stresses with depths that The aftershocks are high, except at a depth of 13 km, those are almost the same. In addition, to determine the sensitivity of the model to the input parameters, sensitivity analysis was performed, As a result, changes in dip angle and width of fault had the greatest effect on displacement output and also changes in Young modulus and length of fault had the greatest effect on average of maximum and minimum principal stresses output. The boundary element method used in this paper is one of the numerical modeling methods that has many applications in numerical simulation of fault dynamics, and its results have provided a broad view of the physics of earthquake rupture. Also, the compatibility of numerical modeling results with the results of radar interferometry (InSAR) and combined offset tracking in this paper shows that the boundary element method is a suitable method for numerical modeling of faults.

Keywords: Sarpol-e-Zahab earthquake, Mela-Kabod landslide, aftershocks, MFF fault, secondary faults

*Corresponding author:

yadegar.hoshiar@gmail.com