

آثار شرایط مرزی در دقت و کارایی روش المان محدود برای تحلیل نابه‌جایی گسل درون نیم فضای ارتجاعی همگن

حسین اسدی حیه^۱، پویا زکیان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

* p-zakian@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۳/۳۱

تاریخ دریافت ۹۸/۱۰/۱

چکیده

در این پژوهش، میدان جابه‌جایی سطح آزاد زمین بر اثر نابه‌جایی گسل در نیم‌فضای همگن ارتجاعی با روش المان محدود بررسی شده است. مرزها روی نتایج حاصل از روش المان محدود تاثیر شایانی دارند، به‌ویژه اگر دامنه مسئله دارای مرزهایی بی‌نهایت باشد. بنابراین باید تدابیر مناسبی برای افزایش کارایی و دقت روش اندیشیده شود. برای دستیابی به نتایج جامع در این زمینه، مدل‌سازی مرزها در این مقاله با دو رویکرد انجام شده است. رویکرد اول از المان‌های رایج برای مرزها استفاده می‌کند، اما رویکرد دوم از المان‌های نامحدود بهره می‌جوید. برای راستی‌آزمایی نتایج، هر مسئله با چند شبکه گوناگون بررسی شده است و همچنین پاسخ‌های عددی با نتایج روابط تحلیلی اوکادا مقایسه می‌شود. در کنار آثار نوع مدل‌سازی مرزها، تاثیر شبکه نیز دیده شده تا بتوان بر این اساس به رویکرد مناسب مدل‌سازی که با تعداد المان کمتری منجر به نتیجه مطلوبی می‌شود، دست پیدا کرد. در روند مدل‌سازی برای شبیه‌سازی نابه‌جایی گسل، از المان‌های تماسی استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استفاده از المان نامحدود نه تنها برای مسائل نابه‌جایی لازم است بلکه موجب افزایش کارایی و دقت روش المان محدود می‌شود، به گونه‌ای که با شبکه‌های درشت‌تر می‌تواند به نتیجه مناسبی منجر شود.

واژگان کلیدی: نابه‌جایی گسل، شبیه‌سازی عددی، المان نامحدود، نیم‌فضای ارتجاعی، روش المان محدود.

۱- مقدمه

با شناسایی گسل‌ها و یافتن پاسخ زمین در اثر وقوع نابه‌جایی (یا دررفتگی) گسل می‌توان سناریوهای مناسبی را برای کاهش خطرپذیری زمین‌لرزه ارائه داد. مسئله نابه‌جایی (Dislocation) اولین بار زمانی مورد توجه قرار گرفت که ولترا در سال ۱۹۰۷ یک دسته راه حل تحلیلی را برای دررفتگی محیط‌های الاستیک ارائه کرد، فرض ولترا بر این بود که دو طرف نابه‌جایی یک محیط

زمین‌لرزه پدیده‌ای است که بارها در پوسته زمین رخ می‌دهد و در اثر وقوع این رخداد طبیعی، خسارت‌های قابل توجهی به سازه‌ها، شریان‌های حیاتی و زندگی بشری وارد می‌شود. از این رو داشتن دانش کافی پیرامون منشا ایجاد زمین‌لرزه‌ها (گسل) موجب شناسایی نواحی دارای پتانسیل وقوع زمین‌لرزه می‌شود.

جابه‌جایی ایجاد شده در سطح آزاد زمین، برای نمونه گسلی در ایتالیا بررسی کنند. لاوکچیا و همکاران [11] به شیوه حل وارون مسئله نابه‌جایی گسل توانستند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای میدان لغزش گسل را پیدا کنند. زکیان و همکاران [12] از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برپایه روش المان محدود برای بررسی تاثیر عدم قطعیت هندسه گسل در نابه‌جایی بهره جستند. کندلا و همکاران [13] از روش المان محدود برای مطالعه روی تغییر شکل زمین و میدان تنش در ناحیه آپنینی جنوبی ایتالیا استفاده کردند. کاتین و همکاران [14] اثر لایه‌های سطحی را روی جابه‌جایی‌های هم‌لرز گسل شیب‌لغز بررسی کردند. رضایی و خاجی به روش سینماتیکی با بهره‌گیری از مدل موانع ویژه توانستند گسل مولد زلزله لاکوئیلای ایتالیا را شبیه‌سازی کنند [15]. تاکنون از روش المان محدود برای مسئله نابه‌جایی موجود در نیم‌فضای ارتجاعی استفاده وسیعی شده است [16-18]؛ اما بررسی جامعی پیرامون کفایت ابعادی دامنه مسئله، اندازه المان‌ها و تاثیر به‌کارگیری المان‌های نامحدود در حل عددی مسائل نابه‌جایی گسل با روش المان محدود انجام نشده است. در این مقاله، با استفاده از سه نمونه عددی با تحلیل استاتیکی نابه‌جایی (شبه‌استاتیکی) به بررسی این پارامترها خواهیم پرداخت. هر نمونه از شبکه‌های گوناگون بهره‌جسته و مرزهای نامتناهی را در دو حالت در نظر می‌گیرد. در حالت اول این مرزها بدون المان‌های نامحدود و در حالت دوم با المان‌های نامحدود مدل می‌شوند. همچنین نتایج هر سه نمونه با حل تحلیلی اوکادا مقایسه شده‌اند.

۲- تعریف مسئله

داشتن درک درستی از مسئله در دست پژوهش منجر به مدل‌سازی عددی مناسب آن خواهد شد. برای این منظور نخست با توجه به فیزیک مسئله، معادله حاکم بر آن بدست خواهد آمد. سپس با توجه به معادله حاکم بر مسئله ناپوستگی موجود (گسل) در نیم‌فضای ارتجاعی به مدل‌سازی عددی آن پرداخته می‌شود. این بخش به معرفی فرمول‌های ریاضی مسئله مورد مطالعه خواهد پرداخت. هدف یافتن میدان جابه‌جایی u در دامنه

پیوسته دارای جابه‌جایی صلب‌گونه‌ای نسبت به هم هستند [1]. این موضوع در شبیه‌سازی سینماتیکی گسل برای مدل‌سازی دینامیکی مسئله که در آن با انتشار امواج ناشی از گسلس، میدان‌های جابه‌جایی و تنش ایجاد شده در سطح زمین را بدست می‌آورند، کاربرد فراوانی دارد [2, 3]. در این زمینه، اوکادا دسته‌ای از حل‌های تحلیلی را با فرضیاتی همچون محیط همگن، همسانگرد و یکنواخت پیشنهاد کرد [4, 5]. از آن سو که شرایط فیزیکی محیط‌های واقعی بسیار پیچیده‌تر از فرضیات اوکادا هستند، باید به دنبال راه‌حلی بود که این محدودیت‌ها را برداشته و تا جای ممکن بتواند هر نوع مسئله‌ای را پوشش دهد. روش‌های عددی تا حد خوبی توانسته‌اند بر این محدودیت‌ها چیره شده و نتایج رضایت‌بخشی را برای مسائل الاستواستاتیک و الاستودینامیک ارائه دهند [6, 1]. روش المان محدود از روش‌های عددی پرکاربرد در این زمینه است و توسعه‌های گوناگونی از آن در زمینه مکانیک شکست وجود دارد. اما در زمینه شبیه‌سازی نابه‌جایی، نخست ملوش و رافسکی [7] توانستند روشی کارآمد را برای حل مسئله نابه‌جایی گسل به شیوه عددی مبتنی بر روش المان محدود توسعه دهند، این روش که امروزه هم به عنوان یک ابزار پرکاربرد استفاده می‌شود، روش گره مشترک نام دارد. در روند حل مسئله نابه‌جایی گسل به کمک روش المان محدود، دو رویکرد حل مستقیم و حل وارون وجود دارد. در حل مستقیم، با اعمال لغزش‌های معلوم می‌توان به میدان جابه‌جایی ایجاد شده در سطح زمین دست پیدا کرد. از سویی دیگر در روند حل وارون مسئله، از روی میدان جابه‌جایی ایجاد شده در سطح زمین می‌توان به رژیم لغزش گسل مورد نظر رسید. میراشرفی و خاجی [8] به شیوه حل وارون با استفاده از ماتریس عملگر توابع گرین به رژیم لغزش گسل مورد نظر رسیدند. برای شبیه‌سازی توزیع لغزش گسل، مگنا و همکاران [9] با مقایسه نتایج حاصل از روش حل تحلیلی و روش حل عددی برای نمونه گسلی شیب‌دار، توانستند توانایی و قابلیت نتایج روش المان محدود را در حل مسئله نابه‌جایی نشان دهند. به دلیل آنکه روش عددی، محدود به همگنی لایه‌های زمین‌شناسی نیست، مگنا و همکاران [10] با استفاده از روش حل عددی المان محدود، توانستند تاثیر میزان ناهمگنی لایه‌های زمین‌شناسی را روی میدان

دارای شیب باشد، که به مسئله موردنظر بستگی دارد. به طور فیزیکی، لغزش عمودی و مماسی به ترتیب باعث به وجود آمدن مود بازشدگی و مود برشی صفحه نابه‌جایی خواهند شد [1]. معادله (۱-ج) تعادل تنش را با تعریف تفاضل تنش نرمال صفر روی صفحه نابه‌جایی \mathcal{F} بیان می‌کند. معادلات (۱-د) و (۱-ه) بیانگر شرایط مرزی دامنه مسئله هستند، که در Γ_1 سطح آزاد تنش و در Γ_2 جابه‌جایی صفر را داریم. دامنه مسئله Ω ممکن است متناهی یا نامتناهی باشد. همچنین سطح Γ_1 می‌تواند تخت، منحنی و یا شکلی نامنظم به خود بگیرد. برای نمونه، شکل (۱) Γ_1 را در سطح آزاد مدل زمین نشان داده است، این در حالی است که Γ_2 وجود ندارد. به بیان بهتر، Γ_1 یک سطح تخت است و Γ_2 به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، از این رو این مدل زمین را، مدل نیم‌فضای نامتناهی می‌نامند. معادله حاکم را می‌توان با روش تحلیلی اوکادا و روش عددی المان محدود حل کرد. باید یادآور شد که حل تحلیلی تنها برای برخی از شرایط مسئله دارای اعتبار است [2,3].

۳- مدل‌سازی نابه‌جایی گسل با روش المان محدود

در این بخش به مدل‌سازی عددی نابه‌جایی گسل در نیم‌فضای ارتجاعی پرداخته می‌شود. فرآیند شبیه‌سازی عددی مسئله به کمک نرم‌افزار آباکوس بر مبنای بخش پیشین انجام شده است. مطابق با تعریف مسئله، شکل (۲) صفحه نابه‌جایی را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی عددی آن لازم است نابه‌جایی صفحه (گسل) به شیوه مناسبی لحاظ شود، که از المان‌های تماسی برای این هدف استفاده شده است. میزان لغزش گسل برابر بردار لغزش صفحه نابه‌جایی است، از آنجا که المان‌های موجود در دامنه شبکه‌بندی شده به یکدیگر وابسته هستند، وجود ناپیوستگی موجود این اصل را برقرار نمی‌سازد، از این رو لازم است ترتیبی اندیشیده شود تا خلل ایجاد شده را پوشش دهد، روش المان محدود به خوبی توانسته با استفاده از المان‌های تماسی روی خط گسل، خلل موجود را جبران نماید. همچنین برای افزایش دقت حل در پیرامون تکینگی موجود در نوک خط گسل، از المان‌های ریز برای پیرامون گسل استفاده شده است. برای شبیه‌سازی شرایط مرزی جابه‌جایی نیز در فرآیند مدل‌سازی دو رویکرد

Ω است. مرز مسئله شامل $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ بوده که Γ_1 نشان‌دهنده شرایط مرزی از نوع نیرویی و نماینده سطح آزاد تنش است. Γ_2 شرایط مرزی از نوع جابه‌جایی است که روی جابه‌جایی مسئله اعمال می‌شود. \mathcal{F} صفحه نابه‌جایی است که با بردار نرمال ν ، درون دامنه Ω قرار گرفته و \mathbf{b} بردار لغزش صفحه نابه‌جایی بوده که می‌تواند در سرتاسر این صفحه مقدار متفاوتی داشته باشد. شکل (۱) طرح کلی مسئله نابه‌جایی یک محیط پیوسته دارای ناپیوستگی را نشان می‌دهد که در آن $\sigma(\mathbf{u})$ میدان تنشی است که در محیط پیوسته Ω/\mathcal{F} در تعادل است. دستگاه معادلات حاکم بر مسئله نابه‌جایی به قرار زیر است:

$$\text{div } \sigma(\mathbf{u}) + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega/\mathcal{F} \quad \text{الف-۱}$$

$$[[\mathbf{u}]] = \mathbf{b} \quad \text{on } \mathcal{F} \quad \text{ب-۱}$$

$$[[\sigma_\nu(\mathbf{u})]] = \mathbf{0} \quad \text{on } \mathcal{F} \quad \text{ج-۱}$$

$$\sigma_n(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \text{د-۱}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad \text{ه-۱}$$

شکل ۱. طرح کلی نابه‌جایی موجود در یک محیط پیوسته

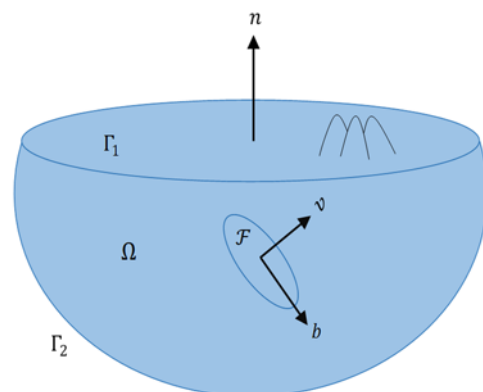


Fig. 1. Schematic of dislocation within a continuum structure.

معادله (الف-۱) فرم استاندارد رابطه تعادل استاتیکی است. معادله (ب-۱) گویای این مطلب است که جابه‌جایی به وجود آمده در صفحه نابه‌جایی برابر با بردار لغزش \mathbf{b} است، که این بردار لغزش می‌تواند بر صفحه نابه‌جایی \mathcal{F} مماس، عمود و یا

شکل ۲. مدل سازی نابه جایی گسل موجود در دامنه با روش المان محدود: خط قرمز گسل را نشان می دهد.

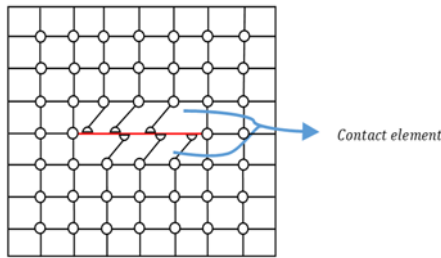


Fig. 2. Finite element method for dislocation modeling: red line shows the fault.

شکل ۳. المان های نامحدود برای مرزهای جانبی نامتناهی دامنه

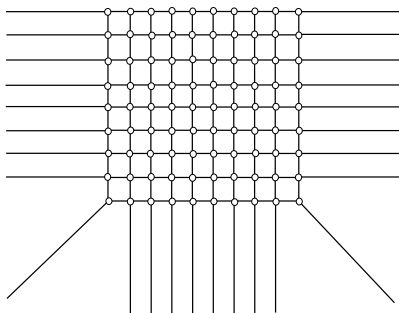


Fig. 3. Infinite elements for infinite boundaries.

شکل ۴. نمونه شبکه المان محدود: خط قرمز گسل را نشان داده و خط سبز شرایط مرزی نامتناهی را نشان می دهد.

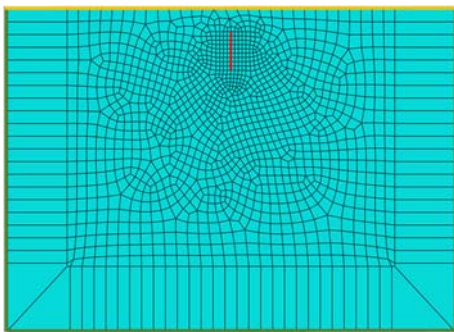


Fig. 4. FEM mesh: red line shows a fault, and green lines represent infinite boundaries.

شکل ۵. المان نامحدود دوبعدی؛ ξ و η محورهای سیستم مختصات طبیعی هستند.

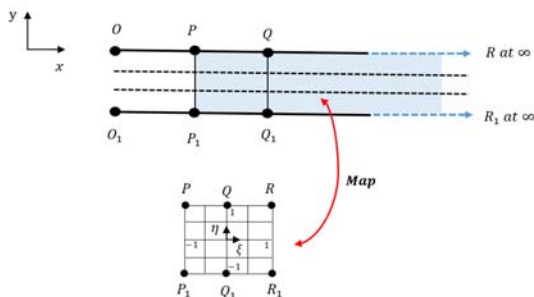


Fig. 5. Infinite element in 2-D; ξ and η are the natural coordinates.

مدنظر است. در رویکرد نخست اعمال جابه جایی صفر روی این مرزها شرایط موجود را برقرار می سازد اما رویکرد دوم مطابق شکل (۳) با استفاده از المان های نامحدود نامتناهی بودن مرزها را نشان می دهد. تابع شکلی که برای المان های نامحدود استفاده می شود به گونه ای است که نامتناهی بودن آن را در یک راستا به خوبی پوشش می دهد. همچنین شرایط مرزی در سطح آزاد زمین در مدل ساخته شده نمایان شرایط مرزی نیرویی مسئله است. بر این اساس مدل عددی دو بعدی ساخته شده بر اساس رویکرد دوم در شکل (۴) آمده است، المان های متصل به خطوط سبز نشان دهنده المان نامحدود و خط زرد نمایان شرط مرزی نیرویی مسئله است. برای درک بهتر تابع شکل المان نامحدود، شکل (۵) المان دو بعدی را نشان می دهد که در جهت مثبت x به سمت بی نهایت میل می کند [19]. برای یافتن تابع شکل این المان، از سیستم مختصات طبیعی استفاده می شود که نیازمند تقریب

$$r = x - x_0 \quad (2)$$

$$\xi = 1 - \frac{x_Q - x_0}{x - x_0} = 1 - \frac{x_Q - x_0}{r} \quad (3)$$

$$u = \alpha_0 + \alpha_1 \xi + \alpha_2 \xi^2 + \alpha_3 \xi^3 + \dots \quad (4)$$

هندسه مسئله بر اساس این سیستم مختصاتی است. x_Q و x_0 موجود در رابطه های (۲) و (۳)، مختصات گره های المان هستند. به عنوان نمونه به ازای $\xi = 0$ و $\eta = 1$ بر پایه شکل (۵) به $x = x_Q$ می رسمیم. از سویی دیگر، با $\xi = 1$ ، x به بی نهایت میل می کند که همان مرز نامتناهی است. این کار به کمک تابع نگاهت انجام می شود. بنابراین می توان میدان جابه جایی را با رابطه (۴) نشان داد که برای تابع شکل خطی، تا جمله متناسب با ξ نیاز است. برای حالت دو بعدی، x را می توان برحسب رابطه (۵) نوشت. O_1 و O نقاط مبدأ برای تعیین مختصات گره های المان هستند. برای سهولت در تعیین تابع شکل المان $PP_1QQ_1RR_1$ در شکل (۵) از سیستم مختصات طبیعی نشان داده شده، استفاده می شود. این نمونه نمایانگر حالتی است که از سمت راست مرز به بی نهایت میل می کند. روشن است که برای مرزهایی که در سمت های دیگر قرار دارند، روند مشابه است.

از سه سو نامتناهی است، هنگام استفاده از المان نامحدود نیاز به بزرگ کردن دامنه نیست. به بیان بهتر، المان‌های نامحدود نیاز مرزهای نامتناهی را فراهم می‌کنند در نتیجه تعداد المان‌های به کار رفته در شبکه بندی کاهش می‌یابد. کلیه مدل‌های ارائه شده از المان‌های تماسی پیرامون خط گسل بهره می‌برند. همچنین به علت آنکه بعد عمود بر صفحه بی‌نهایت است، پس کرنش طولی ناچیز بوده و وضعیت کرنش مسطح بر جسم حاکم است به همین خاطر میدان جابه‌جایی جسم در سطح مقطع عرضی (دو بعدی) مورد نظر است. در نتیجه برای المان‌های سایر نواحی از المان‌های چهارضلعی در حالت کرنش مسطح استفاده شده است. نکته قابل توجه آن است که اندازه مشخصه المان‌ها پیرامون خط گسل و سایر نواحی در سه شبکه به کار رفته برای هر دو رویکرد برابر است، به عبارت بهتر تفاوت شبکه‌ها در دو رویکرد، تنها در اندازه و نوع المان‌های به کار رفته در مرزها است.

۴-۱- گسل قائم با رخنمون

شکل (۶) دامنه مسئله را نشان می‌دهد که دارای گسلی قائم به طول ۳۰ متر (خارج صفحه)، پهنای ۶ متر (داخل صفحه)، شیب ۹۰ درجه و میزان لغزش وارد شده ۰/۲ متر است. دامنه مسئله دارای ضریب پواسون ۰/۲۵ و ضریب ارتجاعی ۱۲/۴ GPa است. همان‌گونه که در بخش پیش مطرح شد، برای حل به روش المان محدود، از دو رویکرد استفاده می‌شود. رویکرد نخست فقط از المان‌های معمولی کرنش مسطح با چهار شبکه گوناگون بهره می‌برد که در این حالت برای تعریف مناسب شرایط مرزی از تکیه‌گاه غلتکی ساده در مرزها استفاده می‌شود، اما در رویکرد دوم المان‌های نامحدود در نواحی نزدیک مرزهای نامتناهی به کار رفته است. لازم به یادآوری است که در اینگونه مسائل فقط سطح زمین مرز متناهی است و سه مرز دیگر نامتناهی هستند. جدول (۱ و ۲) مشخصات مربوط به شبکه مورد استفاده در هر رویکرد را نمایش می‌دهند. بر این اساس که اغلب شبکه ریزتر منجر به نتیجه مناسب‌تری می‌شود و اندازه مشخصه المان‌های هر شبکه برای هر دو رویکرد مطابق جدول (۳) یکسان است، می‌توان مشاهده کرد که رویکرد دوم دارای حساسیت کمتری نسبت به شبکه بوده و آثار مرز را به خوبی در نظر می‌گیرد. بنابراین برخلاف رویکرد نخست، در رویکرد دوم از سه شبکه

$$x = \frac{1+\eta}{2} \left[-\frac{\xi}{1-\xi} x_0 + \left(1 + \frac{\xi}{1-\xi} \right) x_Q \right] + \frac{1-\eta}{2} \left[-\frac{\xi}{1-\xi} x_{01} + \left(1 + \frac{\xi}{1-\xi} \right) x_{Q1} \right] \quad (5)$$

در روش المان محدود پس از آنکه هندسه مسئله تولید شد، شبکه بندی دامنه مسئله انجام و معادله‌ای که در پایان باید حل شود به قرار زیر است (معادله حاکم):

$$KU = F \quad (6)$$

که در آن K ماتریس سختی کل، F بردار نیروهای وارد شده و U بردار جابه‌جایی حاصل است. چگونگی رسیدن به این معادله و نیز اطلاعات بیشتر پیرامون المان‌های نامحدود را می‌توان از منبع [19] یافت. حلگر Abaqus/Standard موجود در نرم‌افزار آباکوس برای مسائل خطی یا غیرخطی اعم از استاتیکی یا شبه‌استاتیکی مناسب است. بر این اساس، حل معادله (۶) با این حلگر انجام شده است.

۴- نمونه‌های عددی

در این مطالعه سه نمونه گوناگون تحلیل نابه‌جایی در نیم‌فضای ارتجاعی با روش المان محدود به صورت دو بعدی حل می‌شود. دامنه هر مسئله همگن و همسانگرد است. با توجه به همسانگرد بودن، خواص ارتجاعی مصالح مستقل از راستا است. از آنجا که دامنه مسئله از سه سو نامتناهی و از یک سو متناهی (سطح زمین) است، برای دستیابی به نتایج رضایت‌بخش، بحث شرایط مرزی در مدل‌سازی بسیار مهم تلقی می‌شود. بنابراین هرکدام از نمونه‌ها با دو رویکرد متفاوت، برای بررسی تاثیر شرایط مرزی در نتایج، مدل‌سازی می‌شوند. تفاوت رویکردها نسبت به هم در نوع المان‌های به کار رفته برای مرزها است، چنانکه در رویکرد نخست از المان محدود (بدون المان نامحدود) و در رویکرد دوم از المان نامحدود برای مرزها استفاده خواهد شد. همچنین در کنار آثار مرزها، هر رویکرد با سه شبکه گوناگون (سه مدل) برای سنجیدن میزان حساسیت روش المان محدود به شبکه بندی متفاوت تحلیل شده است تا از این طریق بتوان به رویکرد مناسب‌تر برای افزایش دقت و کارایی روش المان محدود با تعداد المان کمتری رسید. از سویی دیگر برای آنکه دامنه مسئله

شکل ۶. دامنه نیم‌فضای همگن دارای گسل قائم با رخنمون

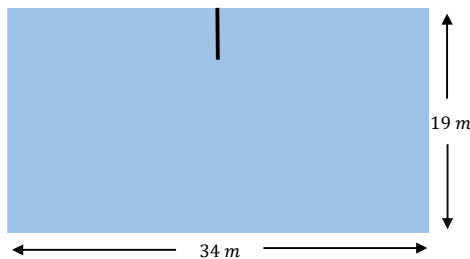


Fig. 6. A homogeneous half-space with a vertical outcropped fault.

جدول ۱. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده رویکرد اول

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Number of nodes	1976	4534	10039	21431
Number of elements	1881	4393	9830	21144

Table 1. Mesh details for the first approach

جدول ۲. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده رویکرد دوم

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3
Number of nodes	1814	3888	9279
Number of elements	1725	3756	9079
Size of infinite elements	2.4	2.12	1.41

Table 2. Mesh details for the second approach

جدول ۳. اندازه مشخصه (متر) المان‌های مورد استفاده در هر شبکه

Region/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Boundaries	0.675	0.450	0.300	0.250
Around fault	0.495	0.330	0.220	0.100
Other	0.675	0.450	0.300	0.250

Table 3. Characteristic length (m) of elements used in each mesh

جدول ۴. زمان تحلیل هر رویکرد (ثانیه) برای مثال اول

Time/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Without infinite element	10	12	12.8	14.3
With infinite element	9	11	12.8	-

Table 4. Elapsed time (sec) of the analyses for the first example

شکل ۷. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش

المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول (بدون المان نامحدود)

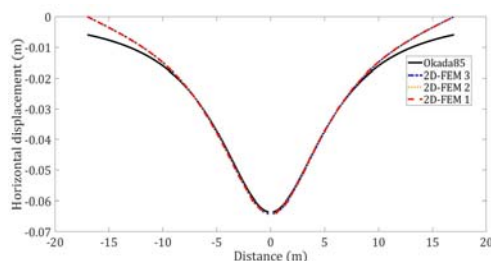


Fig. 7. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the first example (without infinite element).

استفاده شده است. با مقایسه زمان مربوط به تحلیل هر دو رویکرد، بهره‌وری بهتر رویکرد دوم با توجه به نتایج جدول (۴) قابل مشاهده است. برای راستی‌آزمایی نتایج عددی، روابط تحلیلی اوکادا [4, 5] که از فرضیات ساده شونده‌ای مانند همگن و همسانگرد بودن محیط استفاده می‌کنند نیز برای حل این مسئله به کار رفته‌اند. شکل‌های (۷ و ۸) جابه‌جایی‌های سطح زمین را، که ناشی از نابه‌جایی گسل است، نشان می‌دهند که به مقایسه حل‌های روش المان محدود در حالت بدون استفاده از المان نامحدود می‌پردازند. همانگونه که مشاهده می‌شود با ریزتر شدن شبکه‌ها حل عددی به حل تحلیلی نزدیکتر می‌شود. اما در نزدیکی مرزهای جانبی دامنه، حل‌های عددی با حل تحلیلی اوکادا هم‌خوانی کمتری دارند. در شکل‌های (۹ و ۱۰) که از المان‌های نامحدود در مرزها بهره می‌جویند، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد المان (شبکه ریزتر) حتی در نزدیکی مرزها هم‌خوانی خوبی میان نتایج عددی و تحلیلی وجود دارد. این نشانگر تاثیر ویژه استفاده آثار مرزهای نامتناهی در پاسخ یک نیم‌فضای ارتجاعی بر اثر نابه‌جایی است، ولواینکه مسئله از نوع دینامیکی نباشد (شبه‌استاتیکی). اکنون به بررسی تاثیر استفاده آثار مرزهای نامتناهی در بهره‌وری محاسباتی پرداخته تا تعداد المان استفاده شده در دو رویکرد مقایسه شود. برای این کار، شبکه چهارمی برای رویکرد نخست به گونه‌ای تعریف شده که پاسخ در نزدیکی مرزها نیز به دقت خوبی برسد تا نتایج ریزترین شبکه (شبکه سوم) رویکرد دوم با نتایج ریزترین شبکه رویکرد اول (شبکه چهارم) در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) مقایسه شوند. همان‌گونه که شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نشان می‌دهند، با وجود اینکه رویکرد بدون المان نامحدود نسبت به رویکرد با المان نامحدود از شبکه بسیار ریزتری (تعداد المان بیشتر) استفاده می‌کند، اما دقت رویکرد با المان نامحدود را در مقایسه با حل تحلیلی ندارد. بنابراین می‌توان با استفاده از المان‌های نامحدود در مرزها از شبکه درشت‌تری استفاده کرد و تعداد المان به کار رفته را بطور چشم‌گیری کاهش داد.

شکل ۱۲. مقایسه نتایج دو رویکرد برای جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول

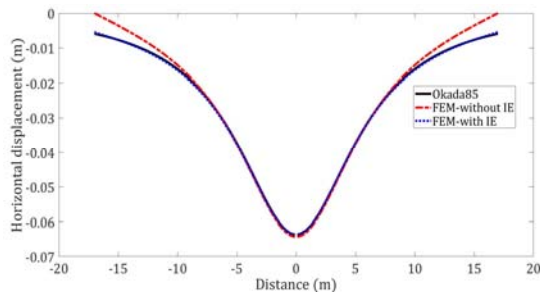


Fig. 12. Comparison of the two approaches for horizontal displacements at the surface due to Okada and FEM solutions for the first example

۴-۲- گسل مورب مدفون در دامنه بزرگ

شکل (۱۳) نمایانگر محیطی با ضریب پواسون 0.27 و ضریب ارتجاعی 100 GPa است که گسل مدفون موربی به طول 500 کیلومتر (خارج صفحه)، پهنای 10 کیلومتر (داخل صفحه)، شیب 40° درجه و با میزان لغزش وارد شده 1 متر درون آن موجود است [9]. آنچه در مدل‌سازی این مسئله اهمیت دارد، اندازه دامنه بسیار بزرگ مسئله است. این موضوع به ویژه زمانی چشم‌گیر می‌شود که بخواهیم اثر بهره محاسباتی روش المان محدود را برای مقایسه تعداد المان به‌کاررفته در مدل‌سازی مورد سنجش قرار دهیم. مانند نمونه پیشین، رویکرد نخست تکیه‌گاه‌های غلتکی ساده را در مرزها به کار می‌بندد. رویکرد دوم مرزهای نامتناهی را با المان‌های نامحدود شبیه‌سازی می‌کند. مشخصات شبکه‌های استفاده شده در جدول‌های (۵ و ۶) و اندازه مشخصه المان‌ها در جدول (۷) آمده‌اند. جدول (۸) مربوط به زمان تحلیل هر دو رویکرد بوده که گویای عملکرد مناسب رویکرد دوم است. در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نتایج حاصل از حل‌های روش المان محدود در حالت بدون استفاده از المان نامحدود آورده شده است که حاکی از هماهنگی اندک نتایج در نزدیکی مرزهای جانبی و قسمت‌های میانی دامنه هستند. شکل‌های (۱۶ و ۱۷) پاسخ نیم‌فضای ارتجاعی ناشی از نابه‌جایی گسل را پس از به‌کارگیری المان نامحدود در مرزها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ در این حالت افزون بر هم‌خوانی نتایج در نزدیکی مرزهای جانبی، در قسمت‌های میانی دامنه نیز همگرایی خوبی میان نتایج حل‌های روش المان محدود و حل تحلیلی وجود دارد. شکل‌های (۱۸ و ۱۹) با مقایسه یافته‌های ریزترین شبکه

شکل ۸. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول (بدون المان نامحدود)

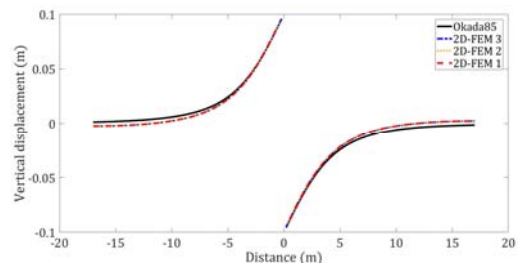


Fig. 8. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the first example (without infinite element).

شکل ۹. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول (با المان نامحدود)

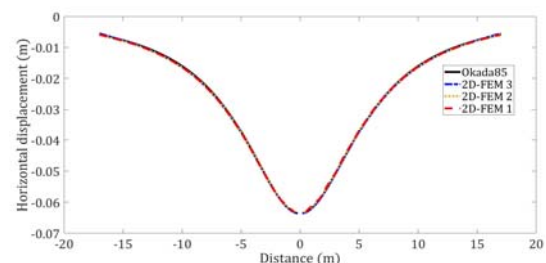


Fig. 9. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the first example (with infinite element).

شکل ۱۰. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول (با المان نامحدود)

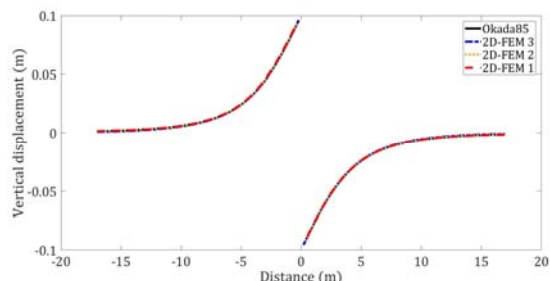


Fig. 10. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the first example (with infinite element).

شکل ۱۱. مقایسه نتایج دو رویکرد برای جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال اول

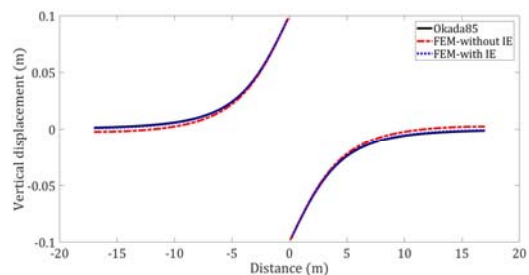


Fig. 11. Comparison of the two approaches for vertical displacements at the surface due to Okada and FEM solutions for the first example.

شکل ۱۵. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم (بدون المان نامحدود)

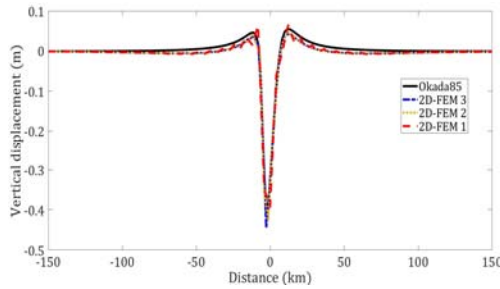


Fig. 15. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the second example (without infinite element).

شکل ۱۶. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم (با المان نامحدود)

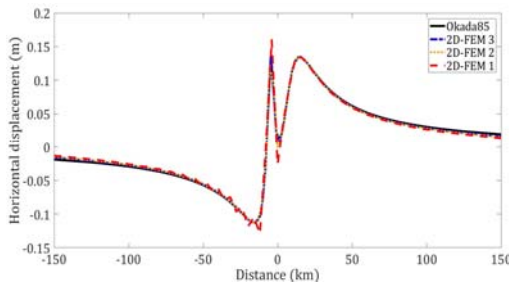


Fig. 16. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the second example (with infinite element).

شکل ۱۷. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم (با المان نامحدود)

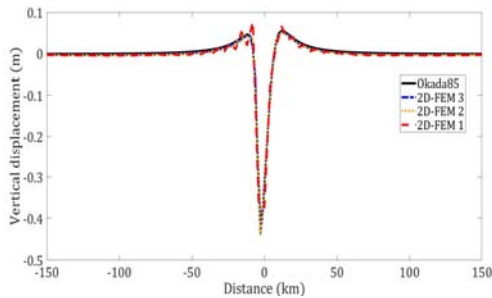


Fig. 17. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the second example (with infinite element).

شکل ۱۸. مقایسه نتایج دو رویکرد برای جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم

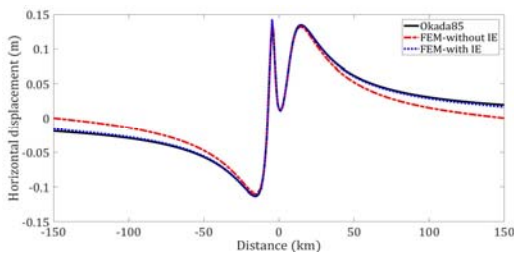


Fig. 18. Comparison of the two approaches for horizontal displacements at the surface due to Okada and FEM solutions for the second example.

رویکرد اول و رویکرد دوم، آثار مرزها را در کاهش تعداد المان به کار رفته نشان می‌دهند. این مقایسه حاکی از نقطه قوت رویکرد دوم در کاهش قابل توجه تعداد المان‌ها است.

شکل ۱۳. دامنه نیم‌فضای همگن دارای گسل مورب مدفون

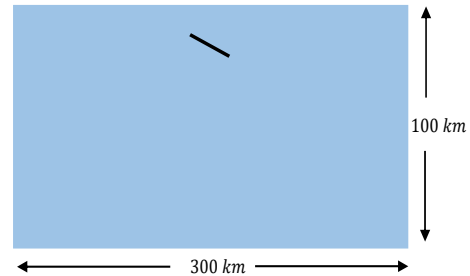


Fig. 13. A homogeneous half-space with a inclined embedded fault

جدول ۵. مشخصات شبکه‌های استفاده شده رویکرد اول

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Number of nodes	3051	7077	16061	95853
Number of elements	2933	6903	15801	95249

Table 5. Mesh details for the first approach

جدول ۶. مشخصات شبکه‌های استفاده شده رویکرد دوم

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3
Number of nodes	2556	5143	11147
Number of elements	2447	4989	10928
Size of infinite elements	21.21	28.28	35.36

Table 6. Mesh details for the second approach

جدول ۷. اندازه مشخصه (کیلومتر) المان‌های مورد استفاده در هر شبکه

Region/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Boundaries	4.05	2.7	1.8	0.8
Around fault	0.675	0.45	0.3	0.1
Other	4.05	2.7	1.8	0.8

Table 7. Characteristic length (km) of elements used in each mesh

جدول ۸. زمان تحلیل هر رویکرد (ثانیه) برای مثال دوم

Time/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Without infinite element	12.4	14.3	14.8	30
With infinite element	12	14.2	15	-

Table 8. Elapsed time (sec) of the analyses for the second example

شکل ۱۴. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم (بدون المان نامحدود)

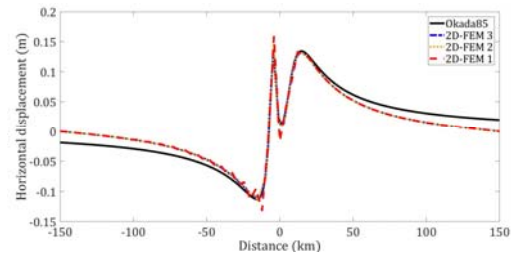


Fig. 14. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the second example (without infinite element).

چهارم رویکرد اول و شبکه سوم رویکرد دوم را در مقایسه با حل تحلیلی اوکادا نشان می‌دهند. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از شبکه درشت‌تر رویکرد دوم نسبت به رویکرد نخست نه تنها منجر به کاهش قابل ملاحظه تعداد المان می‌شود، بلکه منجر به افزایش دقت و کارایی روش المان محدود با در نظر گرفتن آثار مرزها می‌شود.

شکل ۲۰. دامنه نیم‌فضای همگن دارای گسل قائم مدفون

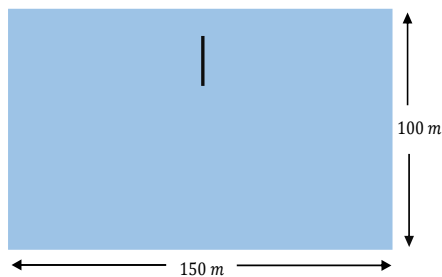


Fig. 20. A homogeneous half-space with a vertical embedded fault.

جدول ۹. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده رویکرد اول

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Number of nodes	4455	9618	21527	49991
Number of elements	4331	9434	21253	49614

Table 9. Mesh details for the first approach.

جدول ۱۰. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده رویکرد دوم

	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3
Number of nodes	3776	8305	18772
Number of elements	3662	8137	18519
Size of infinite elements	14.14	12.73	11.32

Table 10. Mesh details for the second approach.

جدول ۱۱. اندازه مشخصه (متر) المان‌های مورد استفاده در هر شبکه

Region/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Boundaries	2.25	1.5	1	0.8
Around fault	1.35	0.9	0.6	0.2
Other	2.25	1.5	1	0.8

Table 11. Characteristic length (m) of elements used in each mesh.

جدول ۱۲. زمان تحلیل هر رویکرد (ثانیه) برای مثال سوم

Time/Mesh	Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3	Mesh 4
Without infinite element	14.1	14.8	16	18
With infinite element	14	14.2	15	-

Table 12. Elapsed time (sec) of the analyses for the third example.

شکل ۱۹. مقایسه نتایج دو رویکرد برای جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال دوم

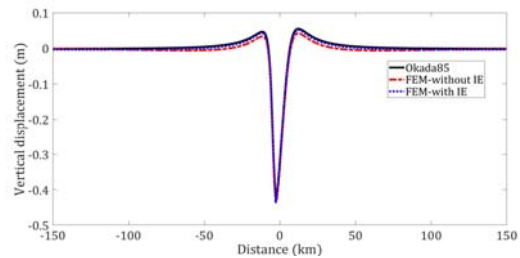


Fig. 19. Comparison of the two approaches for vertical displacements at the surface due to Okada and FEM solutions for the second example.

۴-۳- گسل قائم مدفون

برای رسیدن به یک قضاوت مورد اطمینان از شیوه مدل‌سازی در انتخاب رویکرد مناسب، گسل قائم مدفونی به طول ۱۲۰ متر (خارج صفحه)، پهنای ۱۲ متر (داخل صفحه)، شیب ۹۰ درجه و میزان لغزش ۰/۳ متر درون دامنه‌ای به طول ۱۵۰ متر و عرض ۱۰۰ متر مطابق شکل (۲۰) شبیه‌سازی خواهد شد. مشخصات مصالح استفاده شده دارای ضریب پواسون ۰/۲۸ و ضریب ارتجاعی ۱۰ GPa است. رویکردهای مدل‌سازی مشابه نمونه‌های پیشین هستند. مشخصات مربوط به شبکه استفاده شده در هر رویکرد در جدول (۹ و ۱۰) آمده است. همچنین اندازه مشخصه المان‌ها در جدول (۱۱) قابل مشاهده است. شایان ذکر است که رویکرد دوم با توجه به حساسیت کمتر به شبکه‌بندی تنها از سه شبکه استفاده می‌کند. مقایسه اثر زمان محاسباتی تحلیل با هر دو رویکرد، در جدول (۱۲) آمده که گویای پتانسیل بهتر رویکرد دوم است. از سویی دیگر، افزون بر تلاش محاسباتی که در مسائل بزرگ با تعداد المان‌های زیاد جلوه می‌کند، دقت حل به ویژه در نزدیکی مرزها هنگام استفاده از المان‌های نامحدود افزایش چشم‌گیری دارد. راستی‌آزمایی نتایج عددی مربوط به رویکرد نخست برای جابه‌جایی‌های سطح زمین، با روابط تحلیلی اوکادا در شکل‌های (۲۱ و ۲۲) قابل مشاهده است. چنانکه دیده می‌شود، نتایج بدست آمده در نزدیکی مرزهای جانبی دارای هماهنگی کمی با حل اوکادا هست. در شکل‌های (۲۳ و ۲۴) نتایج رویکرد دوم مشاهده می‌شود که در کلیه بخش‌های دامنه سازگاری قابل قبولی میان نتایج عددی و حل اوکادا برقرار است. شکل‌های (۲۵ و ۲۶) نتایج مربوط به شبکه

شکل ۲۵. مقایسه نتایج دو رویکرد برای جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال سوم

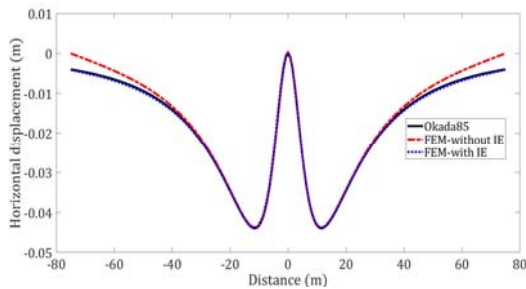


Fig. 25. Comparison of the two approaches for horizontal displacements at the surface due to Okada and FEM solutions for the third example.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش کنونی، توانایی روش المان محدود برای دستیابی به پاسخ سطح آزاد زمین ناشی از نابه‌جایی گسل به صورت دوبعدی ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی نابه‌جایی گسل از المان تماسی در حالت کرنش مسطح استفاده شده است. به دلیل آنکه دامنه مسئله در دست پژوهش از یک سو دارای سطح آزاد و از سه سوی دیگر مرزهای نامتناهی دارد، تاثیر مرزهای جانبی در نتایج گریزناپذیر است. بنابراین این پژوهش به کاوش آثار مرزها با دو رویکرد متفاوت پرداخته است. رویکرد نخست در شبیه‌سازی عددی، مرزها را بدون استفاده از المان نامحدود در نظر می‌گیرد، اما رویکرد دوم با المان نامحدود کار می‌کند. برای رسیدن به یک قضاوت عادلانه، اندازه مشخصه المانی یکسانی در دو رویکرد برای نمونه‌ها ارائه شده است. در اینجا نمونه‌های گوناگونی با شبکه‌بندی متفاوت ارائه و تفسیر شد تا بتوان به رویکرد شبیه‌سازی مناسبی با دقت بیشتر و تعداد المان به کار رفته کمتر دست یافت. شبیه‌سازی عددی ناپیوستگی صفحه نابه‌جایی با استفاده از المان تماسی روی خط گسل انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که رویکرد دوم (با المان‌های نامحدود) علاوه بر دقت بیشتر منجر به کاهش چشم‌گیر المان‌های استفاده شده نیز خواهد شد. این به دلیل آن است که اعمال شرایط مرزی جابه‌جایی صفر برای مرز نامتناهی حتی در مسائل استاتیکی مناسب نبوده و نیازمند بهبود کارایی با استفاده از مرزهایی همچون المان‌های نامحدود است. پس از به‌کارگیری المان‌های نامحدود، مشاهده می‌شود که با تعداد المان کمتر

شکل ۲۱. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال سوم (بدون المان نامحدود)

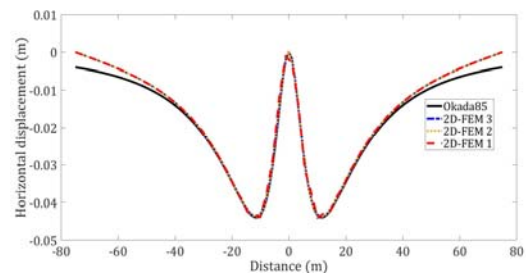


Fig. 21. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the third example (without infinite element).

شکل ۲۲. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال سوم (بدون المان نامحدود)

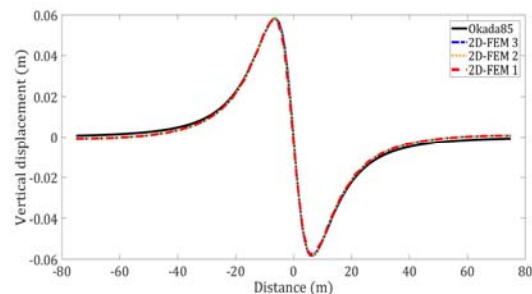


Fig. 22. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the third example (without infinite element).

شکل ۲۳. مقایسه جابه‌جایی‌های افقی سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال سوم (با المان نامحدود)

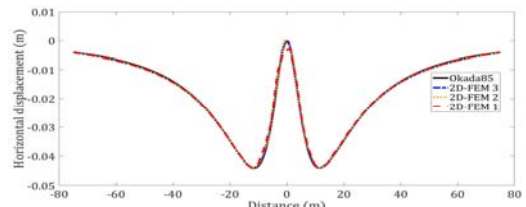


Fig. 23. Horizontal displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the third example (with infinite element)

شکل ۲۴. مقایسه جابه‌جایی‌های قائم سطح زمین حاصل از حل‌های روش المان محدود و روش اوکادا برای مثال سوم (با المان نامحدود)

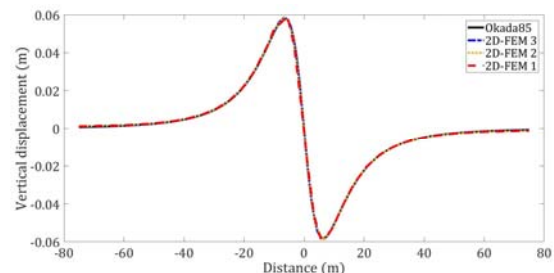


Fig. 24. Vertical displacements at the surface obtained by Okada and FEM solutions for the third example (with infinite element).

- Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(5), pp. 1391-1400.
- [8] Mirashrafi R., Khaji N. 2016 Determination of slippage field of strike-slip faults using inverse solution methods. *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(2), pp. 233-245. "(In Persian)"
- [9] Megna A., Barba S., Santini S. 2005 Normal-fault stress and displacement through finite-element analysis. *Annals of Geophysics*, 48(6), pp. 1009-1016.
- [10] Megna A., Barba S., Santini S., 2008 Dragoni M. Effects of geological complexities on coseismic displacement: hints from 2D numerical modelling. *Terra Nova*, 20(3), pp. 173-179.
- [11] Lavecchia G., Castaldo R., Nardis R. and et al. Ground deformation and source geometry of the 24 August 2016 Amatrice earthquake (Central Italy) investigated through analytical and numerical modeling of DInSAR measurements and structural-geological data. *Geophysical Research Letters*, 43(24) (2016).
- [12] Zakian P., Khaji N., Soltani M. 2017 A Monte Carlo adapted finite element method for dislocation simulation of faults with uncertain geometry. *Journal of Earth System Science*, 126(7), pp. 105.
- [13] Candela S., Mazzoli S., Megna A., Santini S. 2015 Finite element modelling of stress field perturbations and interseismic crustal deformation in the Val d'Agri region southern Apennines, Italy. *Tectonophysics*, 657, pp. 245-259.
- [14] Cattin R., Briole P., Lyon-Caen H., Bernard P., Pinettes P. 1999 Effects of superficial layers on coseismic displacements for a dip-slip fault and geophysical implications. *Geophysical Journal International*, 137(1), pp. 149-158.
- [15] Rezaei M.H., and Khaji N. 2018 Simulation of 2009 L'aquila Earthquake using Specific barrier model. *Modares Civil Engineering journal*, 18(2), p. 101-112. "(In Persian)"
- [16] Nabavi S.T., Alavi S.A., Mohammadi S., Ghassemi M.R. 2018 Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: Insights from 3D elasto-plastic finite element models. *Journal of Structural Geology*, 106, pp. 19-40.
- [17] Castaldo R., De Novellis V., Solaro G. and et al. 2017 Finite element modelling of the 2015 Gorkha earthquake through the joint
- می‌توان به نتایج شبکه ریزتر بدون المان نامحدود رسید. از سویی دیگر، هنگامی که از المان نامحدود استفاده می‌شود، نیازی به بزرگ نمودن دامنه به دلیل مرزهای نامتناهی نیست که این امر نیز منجر به کاهش تعداد المان‌های مورد نیاز خواهد شد و زمان تحلیل را کاهش می‌دهد. نتایج مثال‌های عددی نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های نامحدود با تلاش محاسباتی مناسب، دقت پاسخ‌ها را در نزدیکی مرزها به گونه چشم‌گیری بهبود می‌دهد. از دیگر دستاوردهای این پژوهش می‌توان چگونگی شبکه‌بندی مناسب مدل را نام برد که آن نیز راهگشای خوبی برای پژوهشگران به منظور ایجاد مدل‌سازی عددی مناسب است.

منابع

- [1] Zwieten G.J., Hanssen R.F., Gutiérrez M.A. 2013 Overview of a range of solution methods for elastic dislocation problems in geophysics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), pp. 1721-1732.
- [2] Zakian P., Khaji N. 2016 Spectral finite element simulation of seismic wave propagation and fault dislocation in elastic media. *Asian Journal of Civil Engineering*, 17(8), pp. 1189-1213.
- [3] Zakian P., Khaji N. 2019 A stochastic spectral finite element method for solution of faulting-induced wave propagation in materially random continua without explicitly modeled discontinuities. *Computational Mechanics*, 64(4), pp. 1017-1048.
- [4] Okada Y. 1992 Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), pp. 1018-1040.
- [5] Okada Y. 1985 Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), pp. 1135-1154.
- [6] Zakian P., Khaji N. 2016 Development of higher-order stochastic spectral finite element method for uncertainty analysis of 2D continua. *Modares Mechanical Engineering*, 16(7), pp. 51-60. "(In Persian)"
- [7] Melosh H., Raefsky A. 1981 A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations.

- exploitation of DInSAR measurements and geologic-structural information. *Tectonophysics*, 714, pp. 125-132.
- [18] Monshizadeh Naiin A., Seyedi Hosseinia E. 2018 Numerical Investigation of Reverse Faulting Effect on the Response of Buried Pipes. *Modares Civil Engineering journal*, 18(2), pp. 233-244.
- [19] Liu G.R., Quek S.S., Michael E., 2003 *The Finite Element Method: A Practical Course*. London, Butterworth-Heinemann.

The Effects of Boundary Conditions on Accuracy and Efficiency of Finite Element Analysis for Fault Dislocation within Homogeneous Elastic Half-Space

H. Asadi Hayeh¹, P. Zakian^{2*}

1- MSc Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

p-zakian@araku.ac.ir*

Abstract

Surface deformation of the earth's crust due to earthquake fault dislocation is an important subject to be studied for predicting future ground motions. There are many studies on kinematic modeling of earthquake faults utilizing both analytical and numerical methods. Analytical methods like Okada's solutions are fast and accurate, but in practice they can be used for a limited number of problems with specific governing equations and/or boundary conditions. On the other hand, numerical methods like finite element method can support various cases of these problems with desirable accuracy. However, a greater number of investigations on improving usefulness and efficiency of finite element method in fault dislocation applications are still necessary to be carried out by the relevant researchers. In this paper, the horizontal and vertical displacement fields at the free surface of homogeneous elastic half-space due to fault dislocation have been investigated by finite element method, emphasizing on the effects of mesh density and boundary conditions. The boundary conditions significantly affect the accuracy and computational cost of finite element analysis, especially when the domain of the problem has infinite boundaries (half-space). Therefore, appropriate modeling techniques should be considered to enhance the efficiency and accuracy of this method. In order to achieve a comprehensive study on this topic, the boundaries have been modeled with two approaches here. The first approach uses the common finite elements with zero-displacements at the infinite boundaries, while the second one uses the infinite elements for modeling those boundaries. To verify the results, each problem has been examined by several meshes and numerical solutions have been compared to those of Okada's analytical solutions. In addition to the effects of the boundary modeling, the finite element discretization effects have been investigated in order to find a suitable approach to reduce computational efforts and to increase the accuracy and efficiency of finite element method. In the dislocation models, the contact elements have been employed to impose the fault dislocation. Three numerical examples have been provided, and each of which has been solved with finite element analyses and Okada's analytical solutions. Outcropped and embedded faults with different inclination conditions (i.e., vertical and inclined cases) have been studied in these examples. Each example includes four finite element analyses without infinite elements and three finite element analyses with infinite elements such that their results are also compared together. The results show that not only infinite elements are necessary for quasi-static fault dislocation problems in an elastic medium, but also they improve the performance of finite element method so that with coarser meshes and smaller dimensions of a domain, analytical solutions can be captured by the numerical solutions while desirable accuracy is obtained with lower computational cost than the case without infinite elements.

Keywords: Fault dislocation; Numerical simulation; Infinite element; Elastic half-space; Finite element method.