مقایسه عددی تحلیل‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی گسلش سطحی نرمال و معکوس در خاک ماسه‌ای

معصومه وکیلی[۱]، محمد چرختاب بسیم[۲]، آرش اکبری حامد[۳]، صادق قوامی جمال[٤]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲ و ۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

٤- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

akbarihamed.a@sut.ac.ir

چکیده

گسلش سطحی ناشی از زمین‌لرزه می‌تواند موجب تغییرشکل‌های دائمی قابل‌توجه در خاک شده و تهدیدی جدی برای سازه‌های مجاور گسل‌های فعال ایجاد کند. در حالی‌که این پدیده اغلب به‌صورت شبه‌استاتیکی مدل‌سازی می‌شود، شواهد آزمایشگاهی نشان می‌دهد نرخ لغزش گسل و اثرات اینرسی نقش مهمی در نحوه انتشار گسیختگی دارند. در این پژوهش، گسلش سطحی نرمال و معکوس در خاک‌های ماسه‌ای شل و متراکم با استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد. تحلیل‌ها در دو حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی انجام گرفت و به‌منظور ارزیابی دقت مدل، نتایج با داده‌های آزمایش‌های سانتریفیوژ پیشین مقایسه گردید. نتایج نشان داد در بارگذاری دینامیکی، نوار برشی با نزدیک شدن به سطح زمین پخش شده و در بسیاری موارد پیش از رسیدن به سطح آزاد مستهلک می‌شود، در حالی‌که در تحلیل شبه‌استاتیکی، گسیختگی متمرکزتری شکل گرفته و با احتمال بیشتری به سطح می‌رسد. همچنین افزایش زاویه گسل از ۴۵ به ۶۰ درجه موجب تمرکز بیشتر کرنش پلاستیک و موضعی‌تر شدن گسیختگی شد. مقایسه خاک شل و متراکم نیز نشان داد در خاک متراکم مسیر گسیختگی با شیب ملایم‌تری به سطح می‌رسد. این نتایج اهمیت در نظر گرفتن اثرات دینامیکی در ارزیابی گسلش سطحی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: گسلش سطحی زلزله، جابجایی دائمی گسل، تحلیل شبه‌استاتیکی، تحلیل دینامیکی، خاک ماسه‌ای

۱- مقدمه

گسلش سطحی ناشی از زمین‌لرزه یکی از مهم‌ترین مخاطرات در نواحی مجاور گسل‌های فعال به شمار می‌رود و می‌تواند موجب تغییرشکل‌های دائمی قابل توجه در توده خاک و در نتیجه آسیب جدی به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی شود. برخلاف ارتعاشات گذرای زمین که ماهیتی نوسانی دارند، گسلش سطحی با جابجایی ماندگار همراه است و همین موضوع پیش‌بینی نحوه انتشار آن در لایه‌های خاکی را به یکی از چالش‌های مهم مهندسی تبدیل کرده است.

تحلیل گسلش سطحی معمولاً به‌صورت شبه‌استاتیکی انجام می‌شود؛ در این روش جابجایی گسل به‌آرامی و بدون در نظر گرفتن اثرات اینرسی و وابستگی زمانی اعمال می‌شود. با وجود سادگی و کاربرد گسترده این رویکرد، نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که نرخ لغزش و دینامیک گسیختگی گسل می‌تواند بر الگوی گسترش گسیختگی، زاویه انتشار گسل، میزان تمرکز کرنش در خاک و حتی میزان خرابی موردانتظار سازه‌های واقع در نزدیکی گسل تأثیر قابل توجهی داشته باشد [۱، ۲]. همچنین گزارش شده است که سرعت متوسط حرکت سطح زمین در حین جابجایی گسل- که با عنوان fling-step (مولفه جابجایی دائمی حرکت نزدیک‌گسل) شناخته می‌شود - معمولاً در بازه ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه قرار دارد [۳-۵]؛ مقداری که نشان می‌دهد اثرات دینامیکی لغزش گسل در پاسخ خاک می‌توانند قابل توجه باشند.

آزمایش‌های سانتریفیوژ از جمله ابزارهای مهم برای بررسی رفتار خاک در برابر گسلش سطحی محسوب می‌شوند. مطالعات راس و همکاران [۱] نشان داد که در خاک‌های ماسه‌ای، اعمال سریع لغزش گسل منجر به پخش‌شدگی بیشتر نوار برشی و کاهش تمرکز گسیختگی در نزدیکی سطح زمین می‌شود، در حالی که در حالت اعمال آرام جابجایی، گسیختگی متمرکزتری توسعه یافته و در بسیاری از موارد تا سطح آزاد خاک گسترش می‌یابد. با

این حال، انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ پرهزینه بوده و به شرایط آزمایشگاهی خاص محدود است؛ از این‌رو، استفاده از مدل‌های عددی به‌عنوان ابزاری مکمل یا جایگزین برای بررسی گسلش سطحی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این پژوهش با بررسی عددی تأثیر نرخ گسیختگی گسل بر نحوه گسترش گسیختگی در خاک تحت شرایط مختلف خاکی، به درک عمیق‌تر این پدیده کمک می‌کند.

۲- کلیات مدل‌سازی عددی

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نرم‌افزار ABAQUS، مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM)، به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی انتشار گسیختگی گسل در خاک مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی ارائه کرده است [۶–۸]. بر این اساس، در پژوهش حاضر از نرم‌افزار ABAQUS برای بررسی عددی گسلش سطحی استفاده شده است. با توجه به حاکم بودن شرایط کرنش مسطح در مدل‌های آزمایشگاهی به‌کاررفته برای صحت‌سنجی، و همچنین به‌منظور کاهش هزینه و زمان محاسباتی، تمامی مدل‌های عددی ارائه‌شده در این مطالعه به‌صورت دوبعدی توسعه داده شده‌اند. روش تحلیل صریح دینامیک برای هر دو حالت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی استفاده شده تا بتوان اثر زمان را در مدل‌سازی‌ها مدنظر قرار داد. برای تعریف مدل رفتاری خاک از مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهرکولمب و نرم‌شوندگی کرنش استفاده می‌شود.

خاک ماسه‌ای با استفاده از مش پیوسته مربعی چهارگرهی مدل‌سازی شده و در مرز تماس خاک–سنگ‌بستر و همچنین مرزهای جانبی محیط خاک، شرایط مرزی جابجایی صلب اعمال شده است. این نوع شرایط مرزی برای تحلیل شبه‌استاتیکی گسلش مناسب تلقی می‌شود؛ با این حال، در تحلیل‌های دینامیکی، استفاده از مرزهای صلب می‌تواند منجر به بازتاب امواج و ایجاد اثرات مصنوعی در پاسخ مدل شود. به‌منظور کاهش این اثرات، ابعاد محیط خاک به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است؛ به‌طوری‌که طول مدل در راستای افقی حداقل برابر با هفت برابر ضخامت لایه خاک انتخاب گردید تا بازگشت امواج از مرزها به حداقل برسد [۲].

در حالت کلی، برای تحلیل‌های دینامیکی توصیه می‌شود از شرایط مرزی میدان آزاد در مرزهای جانبی خاک استفاده شود. در این روش، ستون‌های خاک یک‌بعدی در طرفین مدل قرار داده شده و تنش‌های معادل ناشی از حرکت میدان آزاد به محیط اصلی خاک اعمال می‌گردد تا اثر انتشار امواج خروجی به‌درستی لحاظ شود [۹، ۱۰]. با این حال، با توجه به اینکه در مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش، ارتعاشات دینامیکی گذرای زلزله اعمال نشده و بارگذاری دینامیکی صرفاً ناشی از لغزش دائمی گسل است، استفاده از مرزهای جابجایی صلب با فاصله مناسب از محل گسل، بدون ایجاد بازتاب قابل توجه امواج، امکان شبیه‌سازی مناسب فرآیند گسلش سطحی را فراهم کرده است.

بر این مبنا، پیش از شروع فرآیند گسلش، جابجایی افقی در مرزهای جانبی محیط خاک مقید شده و مرز افقی سنگ‌بستر به‌صورت تکیه‌گاه مفصلی مدل‌سازی می‌شود. در مرحله اعمال لغزش گسل، جابجایی نسبی گسل در مرز جانبی و مرز پایینی ناحیه فرادیواره، به‌صورت جابجایی کنترل‌شده و منطبق با هندسه و نرخ لغزش گسل، به محیط خاک اعمال می‌گردد.

در ناحیه بسیار نزدیک گسل، حرکت زمین عمدتاً توسط جابجایی دائمی ناشی از گسیختگی سطحی گسل (fling-step) کنترل می‌شود و سهم مؤلفه‌های نوسانی نسبتاً محدود است. این جابجایی دائمی به‌صورت یک رمپ نرم در زمان رخ می‌دهد که متناظر با یک پالس سرعت یک‌طرفه و شتاب گذرا است. به دلیل کمبود داده‌های میدانی در فاصله‌های نزدیک به گسل، مشخصات این نوع حرکت زمین در این مطالعه بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های جنبشی گسل تعیین شده است. به‌طور مشخص، تحریک اعمال‌شده مطابق با مدل پیشنهادی آبراهامسون [۵] تعریف شده است که در آن شتاب به‌صورت یک موج سینوسی هموار مدل‌سازی شده و تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابجایی متناظر با آن به ترتیب به‌صورت پالس یک‌طرفه و رمپ نرم حاصل می‌شوند. طبق مطالعات پیشین مبتنی بر شبیه‌سازی‌های جنبشی و تحلیل رکوردهای نزدیک گسل، سرعت متوسط لغزش گسل معمولاً در بازه حدود ۰/۶ تا ۰/۸ متر بر ثانیه برآورد شده است [۳، ۵]. همچنین، میزان جابجایی گسل در بستر سنگی، در بازه ۰/۳ تا ۱ متر لحاظ شده که متناظر با زلزله‌هایی با بزرگی تقریبی $M_w \approx$ ۶/۵ تا ۷ می‌باشد [۱۱].

رابطه پیشنهادی آبراهامسون [۵] برای سرعت لغزش زمین بدون لحاظ مؤلفه ارتعاشی زلزله بصورت رابطه (۱) می‌باشد که بصورت یک پالس سرعت یکطرفه است:

$$V(t) = V_{avg}\left[1 - cos\left(2\pi \frac{t}{D/V_{avg}}\right)\right] \qquad for\ 0 \le t \le D/V_{avg} \qquad (۱)$$

که در آن $V(t)$ سرعت لغزش گسل به عنوان تابعی از زمان؛ V_{avg} میانگین سرعت لغزش گسل؛ و D جابجایی دائمی در جهت موردنظر است.

به منظور بررسی عملکرد صحیح نرم افزار ABAQUS و صحت‌سنجی مدل عددی، از نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ راس و همکاران [۱] استفاده می‌شود. سپس در بخش بعدی، تحلیل‌ها برای مقادیر مختلف پارامترهای خاک و گسل انجام می‌گیرد.

۳- صحت‌سنجی مدل عددی

در مطالعه راس و همکاران [۱]، رفتار دو نوع ماسه شل و متراکم اوتاوا تحت شرایط گسلش معکوس در دستگاه سانتریفیوژ بررسی شده است. این آزمایش‌ها در مقیاس شتابی ۵۰g انجام شدند و هدف از آن‌ها ارزیابی تأثیر نرخ جابجایی گسل و نیز ویژگی‌های مکانیکی لایه خاک بر نحوه گسترش گسلش در توده خاک بوده است. بدین منظور دو نرخ جابجایی کم (اعمال جابجایی کل در چند ثانیه) و زیاد (اعمال جابجایی کل در چند میلی ثانیه) در گسلش لحاظ شد. با توجه به اینکه اعمال لغزش به فرادیواره به سمت بالا بدلیل شتاب زیاد دستگاه سانتریفیوژ امکان پذیر نبود، راس و همکاران در آزمایش گسل معکوس، لغزش را به سمت پایین و به فرودیواره اعمال کردند. نشان داده شده که برای سرعت‌های لغزش پایین، به دلیل کم بودن اثرات اینرسی، تفاوت در نتایج دو مکانیزم بسیار کم خواهد بود. اما در سرعت لغزش بالا ممکن است میدان تنش در دو مکانیزم اعمال لغزش متفاوت باشد و در نتیجه منجر به دو الگوی شکست متفاوت شود. پاسخ این سوال طی یک مطالعه عددی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که برای سرعت اعمال لغزش تا ۲/۵ متر بر ثانیه، رفتار خاک در دو مکانیزم اعمال لغزش تقریباً یکسان خواهد بود [۱].

ابعاد خاک داخل جعبه آزمایش ۷×۸×۱۹ اینچ (حدوداً ۰/۱۸×۰/۲×۰/۴۸ متر) بوده که با در نظر گرفتن شتاب آزمایش ۵۰g، ارتفاع لایه خاک در مقیاس واقعی معادل با حدوداً ۳۰ فوت (۸/۸۹ متر) خواهد بود. طول محیط خاک در مدل‌سازی عددی ۸۰ متر (معادل حدود ۹ برابر ارتفاع لایه خاک) لحاظ شده است تا از اثرات مرزها جلوگیری شود. جابجایی قائم حداکثر ۴ فوتی (۱/۲۱۹۲ متر) به پایین لایه خاک اعمال گردید. این میزان جابجایی در دو نرخ لغزش متفاوت به مدل وارد شد؛ به‌گونه‌ای که در حالت دینامیکی طی حدود ۲۰ میلی‌ثانیه و در حالت شبه‌استاتیکی با فرض بازه زمانی ۲ ثانیه اعمال شد. شایان ذکر است در مقاله راس و همکاران زمان دقیق اعمال لغزش در حالت شبه‌استاتیکی تصریح نشده و تنها به اعمال آن در «چند ثانیه» اشاره شده است.

از آنجا که تاریخچه زمانی تحریک در مطالعه راس و همکاران ارائه نشده است، در این پژوهش از رابطه پیشنهادی آبراهامسون (رابطه (۱)) برای تعریف تابع زمانی بارگذاری استفاده شد. با فرض اعمال جابجایی ۰/۰۲۴۳۸۴ متر در مقیاس آزمایشگاهی طی مدت ۲۰ میلی‌ثانیه (معادل ۴ فوت یا ۱/۲۱۹۲ متر در مقیاس واقعی طی مدت ۱ ثانیه)، میانگین سرعت لغزش گسل در حالت دینامیکی برابر با ۱/۲۱۹۲ متر بر ثانیه خواهد بود. در مقابل، در حالت شبه‌استاتیکی و با فرض اعمال همین جابجایی در مدت ۲ ثانیه، میانگین سرعت لغزش برابر با ۰/۰۱۲۱۹۲ متر بر ثانیه به دست می‌آید. بر این مبنا، تاریخچه زمانی جابجایی اعمال‌شده به مدل، به‌ترتیب برای حالت‌های سرعت لغزش زیاد و کم، مطابق روابط (۲) و (۳) تعریف می‌گردد.

$$D_{fast}(t) = 1.2192\left[t - \frac{1}{2\pi}sin(2\pi t)\right] \qquad for\ 0 \le t \le 1 \qquad (۲)$$

$$D_{slow}(t) = 0.012192\left[t - \frac{100}{2\pi}sin\left(\frac{2\pi t}{100}\right)\right] \qquad for\ 0 \le t \le 100 \qquad (۳)$$

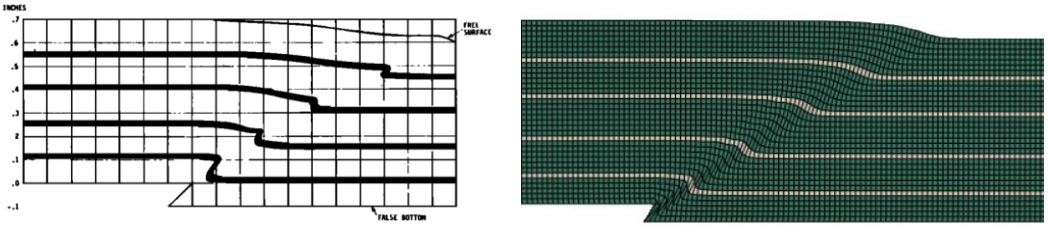
در این پژوهش، سهم عمده استهلاک انرژی ناشی از رفتار غیرخطی و بروز تغییرشکل‌های پلاستیک در خاک بوده است. علاوه بر این، مقدار اندکی میرایی رایلی با هدف کاهش نوسانات فرکانس بالا و محدود کردن اثرات عددی ناخواسته به مدل اختصاص داده شد. این میرایی نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی کلی تغییرشکل‌های دائمی زمین نداشته است.

با توجه به اینکه در مقاله راس و همکاران [۱]، مقادیر عددی بسیاری از پارامترهای مربوط به خاک‌های مورد آزمایش گزارش نشده است، بنابراین مقادیر تقریبی پارامترهای مربوطه از منابع معتبر [۱۲، ۱۳] استخراج گردید و مقادیر بهینه این پارامترها از طریق روش سعی و خطا و با هدف دستیابی به بیشترین انطباق بین نتایج این مطالعه و خروجی‌های مقاله مذکور تعیین شد.

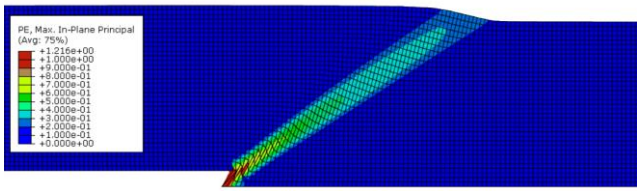
از آنجا که در مطالعه راس و همکاران تنها نتایج تغییرشکل برای حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی در ماسه متراکم و بارگذاری دینامیکی در ماسه شل گزارش شده است، در این پژوهش نیز صرفاً همین دو حالت برای خاک‌های متناظر مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصات لایه خاک مطابق جدول ۱ در مدل منظور شد. همچنین با توجه به اینکه در آزمایش سانتریفیوژ به‌منظور ردیابی مسیر حرکت خاک از لایه‌های رنگی استفاده شده است، در مدل عددی نیز توده خاک به‌صورت لایه‌بندی تعریف و لایه‌های رنگی شبیه‌سازی گردید. در نهایت، شکل تغییرشکل‌یافته توده خاک و کانتور کرنش پلاستیک برای خاک ماسه‌ای متراکم و شل به‌ترتیب در شکل‌های ۱و ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات هندسی و مکانیکی محیط خاک

نوع خاک	E(MPa)	ν	ρ(kg/m^3)	Φ_{peak}	Φ_{res}	Ψ	γ_f^p	c
ماسه متراکم	۷۰	۰/۳	۱۷۱۵	۴۱	۳۳	۱۵	۰/۰۶	۰
ماسه شل	۳۵	۰/۲۵	۱۴۱۰	۳۶	۳۳	۱۰	۰/۰۶	۰

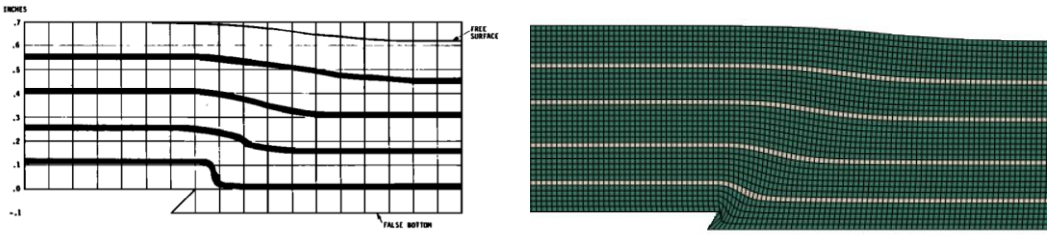


(ب) (الف)

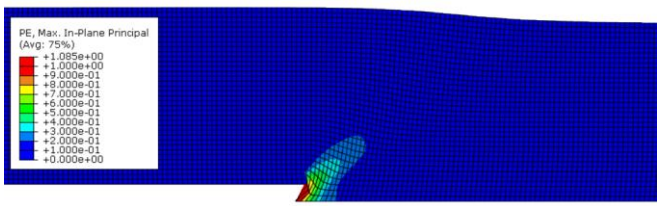


(ج)

شکل ۱- الف) شکل تغییرشکل یافته مدل عددی حاضر، ب) شکل تغییرشکل یافته مدل آزمایشگاهی راس و همکاران [۱]، ج) کانتور کرنش پلاستیک محیط خاک، برای حالت شبه استاتیکی لغزش در خاک ماسه‌ای متراکم



(ب) (الف)



(ج)

شکل ۲- الف) شکل تغییرشکل یافته مدل عددی حاضر، ب) شکل تغییرشکل یافته مدل آزمایشگاهی راس و همکاران [۱]، ج) کانتور کرنش پلاستیک محیط خاک، برای حالت دینامیکی لغزش در خاک ماسه‌ای شل

مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با مدل‌های فیزیکی راس و همکاران در اشکال ۱ و ۲، تطابق بسیار خوب نتایج را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر قابلیت مدل عددی حاضر جهت شبیه‌سازی گسلش معکوس در دو حالت بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی با دقت بالا است.

۴- نتایج و تحلیل

در این بخش، نتایج تحلیل‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی مربوط به گسلش نرمال و معکوس در خاک‌های ماسه‌ای شل و متراکم ارائه می‌شود. به‌منظور مشاهده بهتر مسیر گسترش گسل در توده خاک و بررسی انحنای سطح گسیختگی، ضخامت لایه خاک در مدل‌ها برابر با ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. طول افقی محیط خاک نیز برابر با ۱۲۰ متر لحاظ شده است که ۸ برابر ارتفاع لایه خاک می‌باشد. همچنین میزان جابجایی حداکثر گسل در سنگ بستر

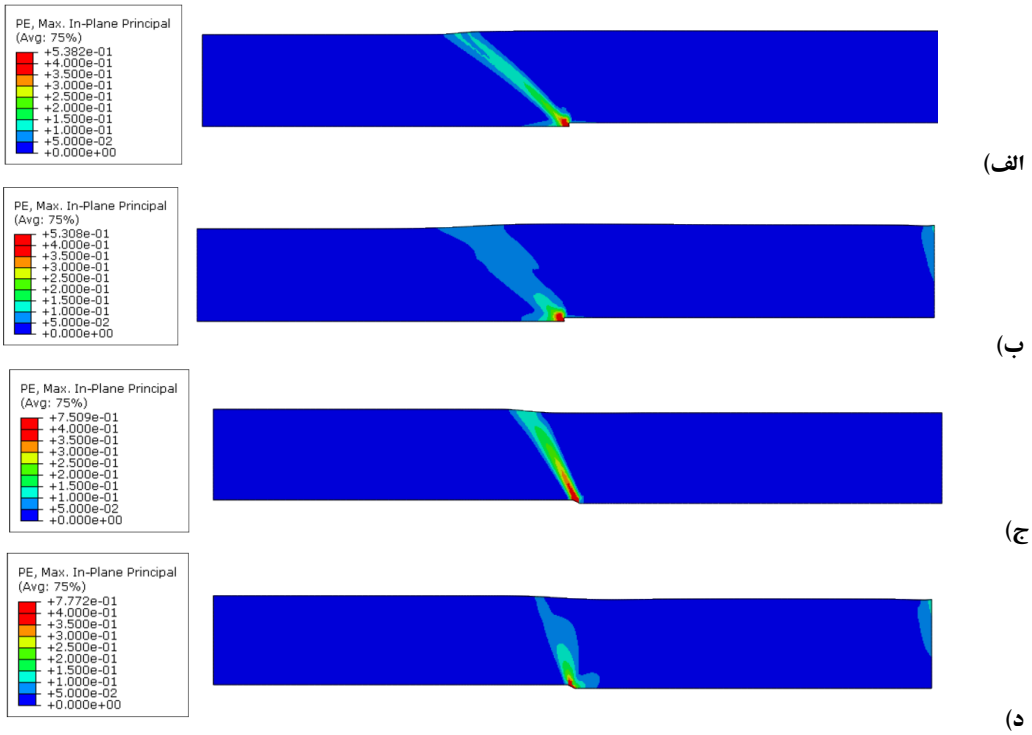
در جهت قائم ۰/۶ متر درنظر گرفته شد که این عدد در محدوده لغزش گسل برای زلزله‌های به بزرگای گشتاوری ۶/۵ تا ۷ می‌باشد. زاویه گسل نیز در دو حالت ۴۵ و ۶۰ درجه فرض شده است.

بر اساس توضیحات ارائه‌شده در بخش کلیات مدل‌سازی عددی، در این پژوهش سرعت متوسط لغزش گسل در حالت دینامیکی برابر با ۰/۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در حالت شبه‌استاتیکی، مدت زمان بارگذاری (نسبت جابجایی به سرعت متوسط) ده برابر حالت دینامیکی فرض شده است؛ از این‌رو، سرعت متوسط لغزش در این حالت برابر با ۰/۰۸ متر بر ثانیه خواهد بود. به این ترتیب، مؤلفه قائم جابجایی اعمالی به مرز پایینی محیط خاک بر اساس رابطه (۱) محاسبه شده و در این مطالعه به‌صورت روابط (۴) و (۵) به ترتیب برای حالت‌های بارگذاری سریع و کند بیان می‌شود.

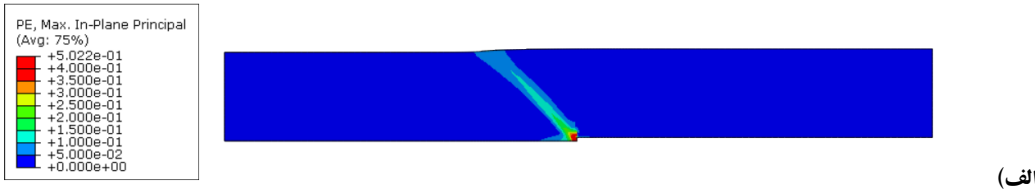
$$D_{fast}(t) = 0.8\left[t - \frac{0.75}{2\pi} sin\left(\frac{2\pi t}{0.75}\right)\right] \qquad for\ 0 \le t \le 0.75 \qquad (۴)$$

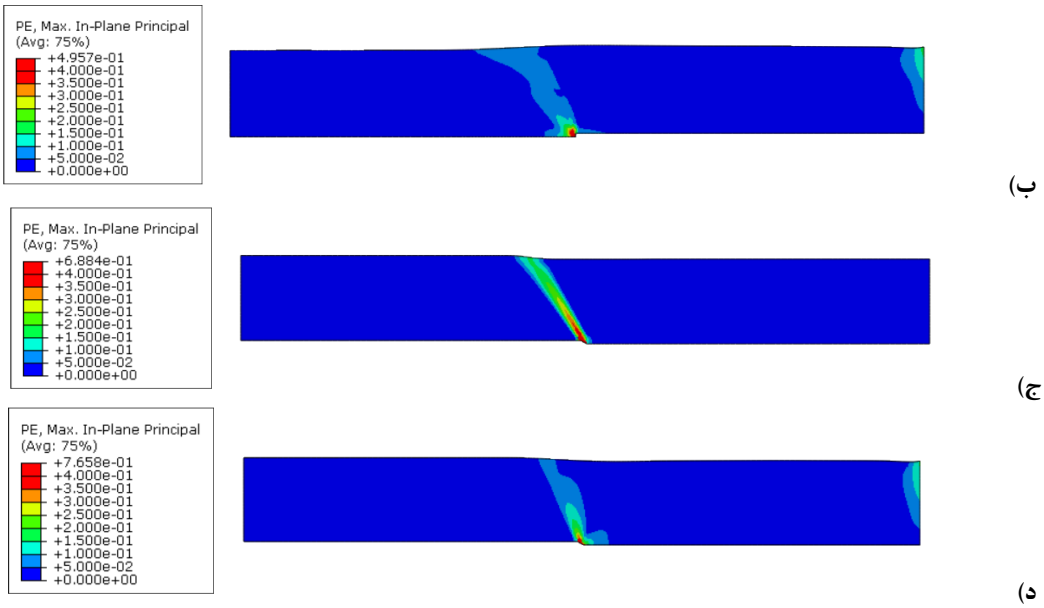
$$D_{slow}(t) = 0.08\left[t - \frac{7.5}{2\pi} sin\left(\frac{2\pi t}{7.5}\right)\right] \qquad for\ 0 \le t \le 7.5 \qquad (۵)$$

سایر مشخصات لایه خاک ماسه متراکم و شل همانند جدول ۱ لحاظ شده است. کانتورهای کرنش پلاستیک مربوط به خاک ماسه‌ای شل و متراکم برای زاویه گسل ۴۵ درجه در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. همچنین نتایج متناظر برای زاویه گسل ۶۰ درجه در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور مقایسه بهتر نتایج، کانتورهای کرنش پلاستیک تا مقدار ۰/۴ با گام‌های ۰/۱ تفکیک شده‌اند و مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۴ به‌صورت یکپارچه با رنگ قرمز نمایش داده شده‌اند.

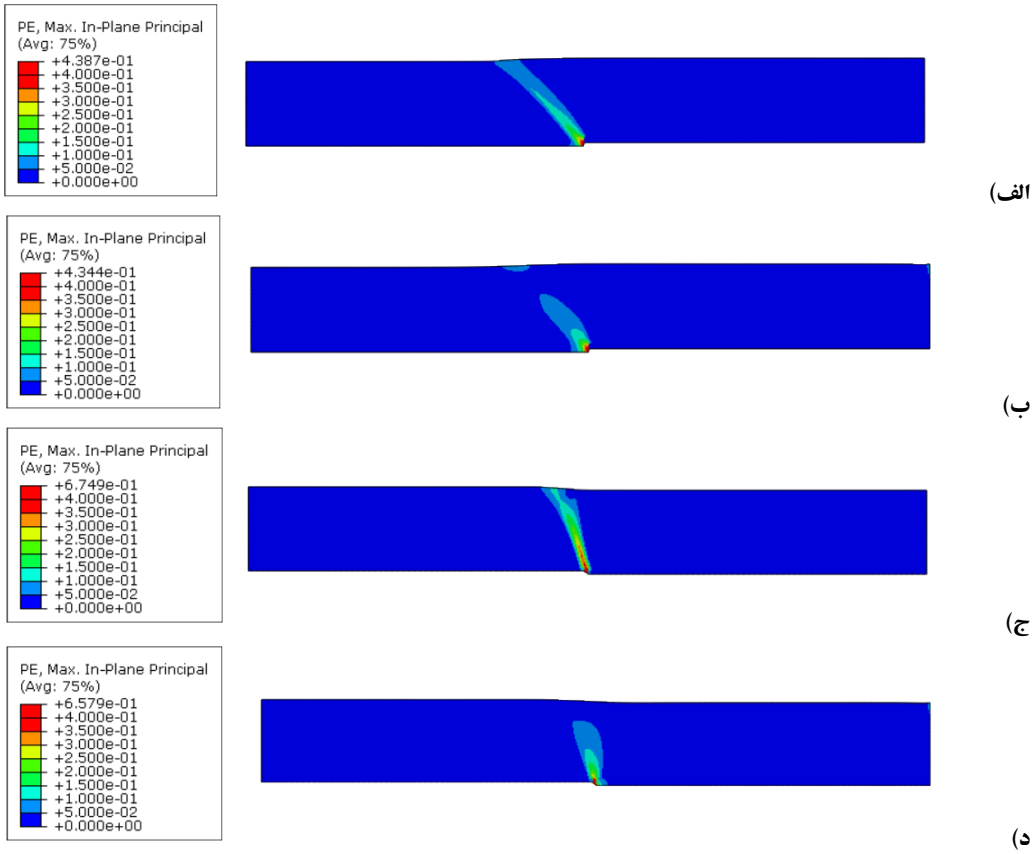


شکل ۳- کرنش برشی پلاستیک برای خاک ماسه‌ای متراکم و زاویه گسل ٤٥ درجه در حالت: الف) شبه‌استاتیکی گسل معکوس، ب) دینامیکی گسل معکوس، ج) شبه‌استاتیکی گسل نرمال و د) دینامیکی گسل نرمال.

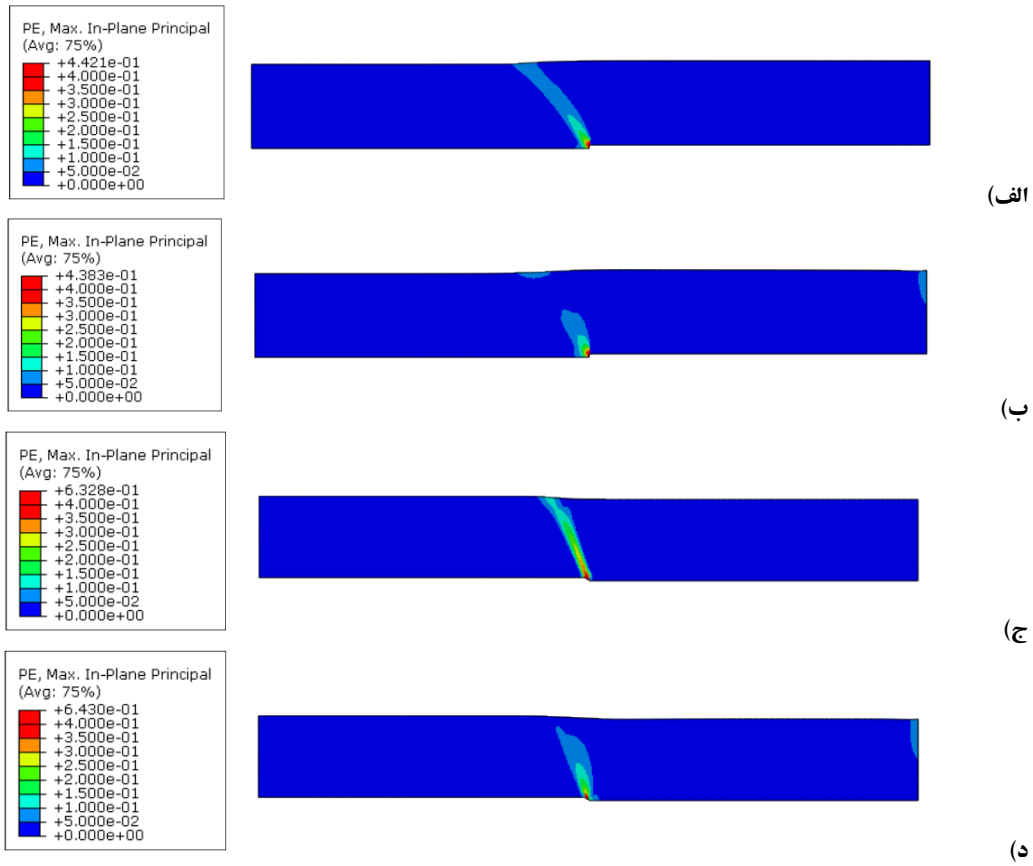




شکل ٤- کرنش برشی پلاستیک برای خاک ماسه‌ای شل و زاویه گسل ٤٥ درجه در حالت: الف) شبه‌استاتیکی گسل معکوس، ب) دینامیکی گسل معکوس، ج) شبه‌استاتیکی گسل نرمال و د) دینامیکی گسل نرمال.



شکل ٥- کرنش برشی پلاستیک برای خاک ماسه‌ای متراکم و زاویه گسل ٦٠ درجه در حالت: الف) شبه‌استاتیکی گسل معکوس، ب) دینامیکی گسل معکوس، ج) شبه‌استاتیکی گسل نرمال و د) دینامیکی گسل نرمال.



شکل ٦- کرنش برشی پلاستیک برای خاک ماسه‌ای شل و زاویه گسل ٦٠ درجه در حالت: الف) شبه‌استاتیکی گسل معکوس، ب) دینامیکی گسل معکوس، ج) شبه‌استاتیکی گسل نرمال و د) دینامیکی گسل نرمال.

در مقایسه حالت‌های بارگذاری، نتایج نشان می‌دهد که در تحلیل‌های دینامیکی نوار برشی با نزدیک شدن به ترازهای فوقانی خاک دچار پخش‌شدگی شده و در بسیاری از موارد پیش از رسیدن به سطح آزاد تا حدی مستهلک می‌شود؛ ازاین‌رو گسیختگی متمرکز سطحی به‌صورت واضح شکل نمی‌گیرد. در مقابل، در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی نوار برشی باریک‌تر و متمرکزتری ایجاد شده و عموماً تا سطح خاک گسترش می‌یابد که منجر به بروز تغییرشکل سطحی مشخص‌تری می‌شود. این تفاوت در نحوه توزیع کرنش پلاستیک و شکل تغییرشکل‌یافته مدل‌ها ÷تر باقی مانده و با شیب تندتری به سمت بالا پیشروی می‌کند. به بیان دیگر، کاهش نرخ اعمال جابجایی موجب شکل‌گیری مسیرهای کم‌شیب‌تر و گسترش افقی‌تر گسیختگی در نزدیکی سطح زمین می‌شود.

تراکم خاک نیز نقش قابل توجهی در الگوی انتشار گسل ایفا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در ماسه‌های متراکم، مسیر گسیختگی تمایل بیشتری به شیب‌های ملایم‌تر و گسترش افقی‌تر دارد، در حالی‌که در ماسه‌های شل، گسل با شیبی تندتر به سمت سطح پیشروی می‌کند. این رفتار را می‌توان به خاصیت اتساعی و صلبیت بیشتر ماسه متراکم نسبت داد که موجب افزایش مقاومت برشی و هدایت صفحه گسیختگی به مسیرهای کم‌شیب‌تر می‌شود، در حالی‌که در ماسه شل به دلیل مقاومت کمتر، تمرکز تغییرشکل در مسیرهای تندتر رخ می‌دهد.

در نهایت، بررسی اثر زاویه گسل نشان می‌دهد که افزایش زاویه از ۴۵ به ۶۰ درجه منجر به تمرکز بیشتر کرنش پلاستیک و موضعی‌تر شدن ناحیه گسیختگی می‌شود، در حالی‌که در زاویه ۴۵ درجه گسیختگی تمایل به پخش‌شدگی و توزیع در گستره وسیع‌تری از توده خاک دارد. این تفاوت به‌ویژه در خاک‌های متراکم و در حالت گسل معکوس آشکارتر است؛ به‌گونه‌ای که در زاویه ۶۰ درجه نوار برشی باریک‌تر بوده و گسیختگی سطحی به‌صورت تیزتر و متمرکزتری ظاهر می‌شود، در مقابل زاویه ۴۵ درجه با ایجاد مسیری مایل‌تر و طولانی‌تر، باعث توزیع تغییرشکل در حجم بیشتری از خاک می‌گردد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که زاویه صفحه گسل در کنار نرخ بارگذاری و تراکم خاک، نقش مهمی در میزان تمرکز یا پخش‌شدگی گسیختگی سطحی ایفا می‌کند.

علاوه بر این، مقایسه مقادیر حداکثر کرنش پلاستیک نشان می‌دهد که در تمامی حالات، مقدار بیشینه کانتور در زاویه ۶۰ درجه اندکی کمتر از زاویه ۴۵ درجه است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده توزیع متفاوت انرژی تغییرشکل در هندسه‌های مختلف گسل بوده و به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در کاهش تمایل نوار برشی برای گسترش تا سطح آزاد در زاویه گسلش ۶۰ درجه مطرح شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پدیده گسلش سطحی نرمال و معکوس در خاک‌های ماسه‌ای شل و متراکم با استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت و رفتار خاک در دو حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی تحلیل شد. نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های آزمایش‌های سانتریفیوژ پیشین مقایسه گردید که تطابق مناسب بین آن‌ها، قابلیت رویکرد عددی به‌کاررفته در بازتولید پدیده گسلش سطحی را تأیید می‌کند.

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در حالت بارگذاری دینامیکی، با نزدیک شدن نوار برشی به سطح زمین، گسیختگی تمایل به پخش‌شدگی داشته و در بسیاری از موارد پیش از رسیدن به سطح آزاد مستهلک می‌شود؛ در حالی‌که در تحلیل شبه‌استاتیکی، گسیختگی متمرکزتری شکل گرفته و با احتمال بیشتری تا سطح زمین گسترش می‌یابد. همچنین افزایش زاویه گسل از ۴۵ به ۶۰ درجه موجب تمرکز بیشتر کرنش پلاستیک و موضعی‌تر شدن ناحیه گسیختگی شد. مقایسه خاک‌های شل و متراکم نشان داد که در خاک متراکم، مسیر گسیختگی با شیب ملایم‌تری به سطح زمین می‌رسد که بیانگر نقش مهم مشخصات مقاومتی خاک در کنترل الگوی انتشار گسلش سطحی است.

در این مطالعه تمرکز اصلی بر بررسی اثر نرخ لغزش گسل بوده و مؤلفه ارتعاشی حرکت زمین به‌طور مستقیم در مدل‌سازی لحاظ نشده است. از این‌رو، در مطالعات آتی می‌توان با در نظر گرفتن همزمان مؤلفه‌های ارتعاشی و جابجایی دائمی زمین، ارزیابی جامع‌تری از پاسخ خاک در مجاورت گسل‌های فعال ارائه داد. همچنین توسعه مدل‌های عددی به‌منظور شبیه‌سازی اندرکنش گسلش سطحی با سازه‌های سطحی و مدفون، می‌تواند درک دقیق‌تری از اثرات دینامیکی گسلش بر عملکرد سازه‌ها فراهم کرده و به بهبود معیارهای طراحی در نواحی نزدیک گسل کمک کند.

۶- مراجع

[1] Roth, W., Scott, R., and Austin, I. (1981). Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils. *Geophysical Research Letters*, 8(6), 561-564.
[2] Oettle, N.K. and Bray, J.D. (2013). Geotechnical mitigation strategies for earthquake surface fault rupture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(11), 1864-1874.
[3] Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 70(1), 59-80.
[4] Dreger, D., Hurtado, G., Chopra, A., and Larsen, S. (2011). Near-field across-fault seismic ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(1), 202-221.
[5] Abrahamson, N. (2001). Development of fling model for Diablo Canyon ISFSI. *Pacific Gas and Electric Company, Geosciences Department, Calc. No. GEO. DCPP*, 1.
[6] Nowkandeh, M.J. and Ashtiani, M. (2024). A novel mitigation measure for normal fault-induced deformations on pile-raft systems. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23(1), 15-33.
[7] Ghavami, S., and Hallaji, A. (2026). Influence of Underground Tunnels on Normal Fault–Foundation Interaction. Transportation Infrastructure Geotechnology, 13(2).
[8] Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M., Davies, M., Nahas, A.E., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., and Pecker, A. (2008). Numerical analyses of fault–foundation interaction. *Bulletin of earthquake engineering*, 6, 645-675.
[9] Zienkiewicz, O., Bicanic, N., and Shen, F.(1989). *Earthquake input definition and the trasmitting boundary conditions*, in *Advances in computational nonlinear mechanics*. Springer. p. 109-138.
[10] Novak, M. (1992). Soil-structure-interaction analysis in time domain, by John P. Wolf, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1988. No of pages: 446. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(4), 363-363.
[11] Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.
[12] Schanz, T. and Vermeer, P. (1996). Angles of friction and dilatancy of sand. *Géotechnique*, 46(1), 145-151.
[13] Das, B. (2011). Principles of geotechnical engineering/Braja M. *Das, Cengage Learning, Stamford, CT*.