

مدل‌سازی اندرکنش گسلش با تونل‌های زیرزمینی و پی‌های سطحی با دستگاه سانتریفیوژ

صادق قوامی جمال*، فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
علیرضا سعیدی عزیزکندی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
محمدحسن بازاریار، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
مهرداد رجبی حران، سرپرست آزمایشگاه مکانیک خاک، مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی،
گرمسار

Email: s_ghavamijamal@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

چکیده

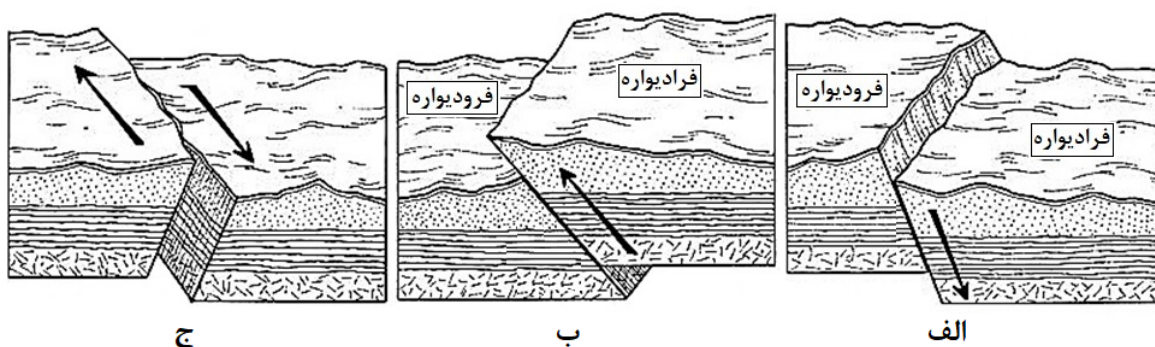
با توجه به مشکلات و هزینه زیاد مطالعات تجربی در مقیاس واقعی از یک سو و قابلیت مدل‌های کوچک‌مقیاس در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی در برقراری تشابه فیزیکی و لحاظ نمودن تنش‌های واقعی در مدل برای درک صحیح از تغییر شکل‌ها و مکانیزم‌های گسیختگی از سوی دیگر، عمده مطالعات آزمایشگاهی پدیده گسلش سطحی با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی انجام شده است. در این تحقیق، مفهوم مدل‌سازی فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، قوانین مقیاس، محدودیت‌ها و منابع خطا در شبیه‌سازی اندرکنش گسلش شیب‌لغز با تونل‌های زیرزمینی و پی‌های سطحی بررسی شده است. در پایان، با به حداقل رساندن خطاهای مدل‌سازی، اندرکنش گسل معکوس با پی سطحی و تونل‌های زیرزمینی به عنوان زیرساخت‌های حیاتی در حوزه حمل‌ونقل شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که در انتشار گسل معکوس در خاک ماسه‌ای، با رسیدن گسیختگی به سطح، زاویه شیب آن کاهش می‌یابد و در سطح زمین، گسیختگی‌ها و ترک‌های کششی ایجاد می‌شود که می‌تواند به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی خسارت وارد کند. حضور تونل در مسیر گسیختگی ناشی از گسل معکوس موجب تغییر مسیر گسلش و افزایش محدوده تحت تأثیر آن در سطح زمین می‌شود. بنابراین، در مناطق شهری، در صورت لرزه‌خیز بودن منطقه و وجود گسل‌ها، تأثیر وجود تونل بر عملکرد سازه‌های سطحی و همچنین سازه‌های مدفون مجاور تونل باید مدنظر قرار گرفته شود. در انتشار گسیختگی ناشی از گسل معکوس با حضور سازه، فشار سربار سازه موجب انحراف مسیر گسیختگی به گوشه سمت راست پی و دوران آن می‌گردد. همچنین، در سمت راست پی، بالادگی مشاهده شد که منطبق با مشاهدات میدانی در زلزله‌های پیشین همراه با گسلش سطحی بود.

واژه‌های کلیدی: سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، مدل‌سازی فیزیکی، گسلش سطحی، تونل زیرزمینی، پی سطحی

۱. مقدمه

طولانی را طی کرده و در سطح وسیعی تأثیر می‌گذارند. در حالی که جابجایی‌های دائمی گسل تنها در محل اثر گسل و با رسیدن گسلش به سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهند بود. سه نوع اصلی گسل‌ها براساس جابجایی نسبی بلوک‌های طرفین گسل عبارتند از گسل نرمال، گسل معکوس و گسل امتداد لغز که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. مصالح بالای صفحه گسل مایل، فرادیواره و مصالح پایین صفحه گسل، فرودیواره نامیده می‌شود.

زلزله یکی از مخاطرات غیرقابل پیشگیری است که وقوع آن در مناطق پرجمعیت نتایج فاجعه‌باری را به دنبال دارد. خسارات ناشی از زلزله‌ها بر سازه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شود: (۱) خسارات ناشی از گسیختگی زمین مانند روانگرایی و زمین لغزش، (۲) خسارات ناشی از جابجایی‌های دائمی ناشی از حرکت دو لبه گسل و انتشار گسلش به سطح زمین و (۳) خسارات ناشی از لرزش زمین (دودینگ و روزن، ۱۹۷۸). امواج لرزه‌ای فواصل



شکل ۱. انواع گسل: الف) نرمال، ب) معکوس و ج) امتداد لغز

تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی زیرزمینی از جمله راهکارهای حل مشکلات ترافیکی و استفاده بهینه از زمین است (قوامی و همکاران، ۲۰۱۹a). با توجه به موارد مطرح شده، ضرورت دارد اندرکنش گسل با پی‌های سطحی و تونل‌های زیرزمینی بررسی شود و پارامترهای مؤثر بر این اندرکنش با انجام مطالعه پارامتریک مشخص و تأثیر آنها ارزیابی گردد تا در طراحی‌های مهندسی مورد توجه قرار گیرد.

تحقیقات پیشین نشان داده است که نوع گسل، زاویه شیب گسل، موقعیت پی نسبت به رخنمون گسل در سطح زمین و عمق مدفون پی از پارامترهای مؤثر بر اندرکنش گسلش با پی‌های سطحی و میزان دوران پی می‌باشند (بازیار و همکاران، ۲۰۱۴a؛ آشتیانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ تهرانی‌زاده و مرادی‌شاقی، ۲۰۱۷). تمامی این تحقیقات بر پی سازه‌ها انجام شده و اثر روسازه در

زلزله‌های شدید در کوجالی و دوزجه (ترکیه، سال ۱۹۹۹)، چی چی (تایوان، سال ۱۹۹۹)، ونچوان (چین، سال ۲۰۰۸) و کوماموتو (ژاپن، سال ۲۰۱۶) نشان دادند که جابجایی‌های دائمی ناشی از گسلش و انتشار آن در خاک می‌تواند به سازه‌های سطحی و زیرسطحی خسارات جدی وارد کند (بری، ۲۰۰۱؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیوتا و همکاران، ۲۰۱۷). در کشور ایران، گسل‌های فعال زیادی وجود دارد که متأسفانه تعدادی از شهرهای پر جمعیت کشور در مجاورت یا روی آنها بنا شده‌اند. شهرهای بزرگی مانند تهران، تبریز و مشهد نمونه‌ای از شهرهایی هستند که مواجه با خطر گسلش سطحی در پهنه شهری می‌باشند. شکل ۲، نمونه‌هایی از ساخت‌وساز در پهنه گسل در شهرهای بزرگ ایران را نشان می‌دهد. در این شهرها، با افزایش تقاضای سفرهای درون شهری و افزایش حجم تردد خودروها، استفاده از

در زمینه اندرکنش تونل‌های پیوسته متقاطع با گسل‌های نرمال و معکوس با زاویه شیب ۶۰ درجه نشان داد که این تونل‌ها در برابر گسل نرمال آسیب‌پذیری بیشتری دارند و جابجایی حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر ناشی از گسلش می‌تواند ترک‌های اولیه در پوشش تونل ایجاد کند. هرگونه افزایش جابجایی می‌تواند منجر به گسترش ترک‌ها شده و رسیدن جابجایی به ۵۰ سانتی‌متر، ریزش خاک و سنگ به داخل تونل و در نتیجه انسداد آن را به دنبال خواهد داشت. گسیختگی در تونل‌های پیوسته ناشی از گسلش معکوس ناگهانی نیست و پوشش تونل قادر به تحمل بخشی از جابجایی‌های ناشی از گسلش است. بازیار و همکاران (۲۰۱۴b) با بررسی اندرکنش تونل موازی با صفحه گسل معکوس با زاویه شیب ۶۰ درجه به این نتیجه رسیدند که موقعیت تونل نسبت به گسل و عمق مدفون تونل از پارامترهای مؤثر بر اندرکنش گسل و تونل هستند.

محاسبات دوران سازه و تأثیر سینماتیک آن به دلیل جابجایی افقی مرکز جرم ساختمان بر اندرکنش گسلش سطحی با پی در نظر گرفته نشده است. به عنوان یکی از نوآوری‌های این پژوهش، ضمن رعایت فشار باربری پی، موقعیت مرکز جرم نیز مشابه با نمونه واقعی ساختمان مدل شده و در محاسبات لحاظ می‌گردد.

حضور تونل‌های زیرزمینی در مناطق شهری می‌تواند با تأثیر بر اندرکنش گسل‌های شیب‌لغز با سازه‌های سطحی، موجب تشدید آسیب وارد بر ساختمان‌ها شود (قوامی و همکاران، ۲۰۱۹b)؛ سعیدی عزیزکندی و همکاران، ۲۰۱۹). تونل‌های مترو در شهرهای واقع شده بر مناطق لرزه‌خیز با توجه به طویل بودن می‌توانند متقاطع با صفحه گسل یا موازی با آن باشند. برای مثال، از مقایسه نقشه گسل‌های تهران با خطوط مترو مشخص می‌شود که در برخی نواحی، تونل‌های مترو موازی با صفحه گسل در این مناطق است. مطالعات صباغ و قلندرزاده (۲۰۲۰a,b)



شکل ۲. نمونه‌ای از ساخت‌وساز در پهنه گسل در شهرهای لرزه‌خیز ایران. الف) ساخت‌وساز در شهرک باغمیشه روی پهنه گسله در شیب دامنه محل عبور گسل شمال تبریز، ب) مجاورت گسل با برج‌های ونک پارک واقع در تقاطع همت - شیخ بهائی در شهر تهران (عکس از علی بیت‌اللهی)

بازیار و همکاران، ۲۰۱۴b؛ آشتیانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کای و همکاران، ۲۰۱۹؛ صباغ و قلندرزاده، ۲۰۲۰a, b؛ سعیدی عزیزکندی و همکاران، ۲۰۲۱) که g شتاب گرانژ زمین است. اما در این مدل‌سازی‌های فیزیکی، کمتر به محدودیت‌ها و منابع خطا در شبیه‌سازی

با توجه به قابلیت‌های فراوان مدل‌سازی فیزیکی در دستگاه ساترئیفیوژ ژئوتکنیکی، عمده مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر پدیده گسلش سطحی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در ساترئیفیوژ ژئوتکنیکی تحت شتاب Ng بوده است (برنسی و همکاران ۲۰۰۸؛

اندرکنش گسلش با سازه‌ها اشاره شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، مفهوم مدل‌سازی فیزیکی با دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، قوانین مقیاس، محدودیت‌ها و منابع خطا در شبیه‌سازی اندرکنش گسلش شیب‌لغز با تونل‌های زیرزمینی و پی‌های سطحی با در نظر گرفتن اثر روسازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان، با به حداقل رساندن خطاهای مدل‌سازی، اندرکنش گسل معکوس با تونل زیرزمینی و پی سطحی با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران تحت شتاب 50 g شبیه‌سازی می‌گردد.

۲. مفهوم مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک

با دستگاه سانتریفیوژ

موضوع مهمی که در مدل‌سازی پدیده‌های ژئوتکنیک باید مورد توجه قرار گیرد، ضرورت شبیه‌سازی رفتار خاک در شرایط واقعی است. وجود لایه‌های مختلف خاک با خصوصیات و تاریخچه تنش متفاوت در یک ساختگاه موجب می‌شود در مهندسی ژئوتکنیک با محدوده گسترده‌ای از مدل‌های رفتاری مختلف برای خاک مواجه شد. یکی از دلایل کاربرد عمده مدل‌سازی سانتریفیوژ در مهندسی ژئوتکنیک همین موضوع است. مدل‌های خاک که در انتهای بازوی سانتریفیوژ قرار می‌گیرند تحت یک میدان شتاب شعاعی هستند که شبیه به میدان شتاب ثقل، اما به مراتب بزرگتر از آن است. در سطح خاک، تنشی وجود ندارد. اما در توده خاک، با افزایش عمق، بسته به دانسیته خاک و میدان شتاب، مقدار

تنش افزایش می‌یابد.

اگر خاک استفاده شده در مدل با نمونه واقعی یکسان بوده و آماده‌سازی نمونه به نحوی باشد که تاریخچه تنش مشابه با شرایط واقعی باشد، برای مدل سانتریفیوژ تحت شتاب Ng، تنش قائم در عمق h_m (اندیس m برای مدل) برابر با تنش در عمق h_p (اندیس p برای نمونه اصلی) در نمونه اصلی است که $h_p = N h_m$. این قانون مقیاس پایه مدل‌سازی سانتریفیوژ است که تنش‌های مشابه با استفاده از اعمال شتاب N برابر گرانش زمین (g) به یک مدل با مقیاس 1/N نمونه واقعی ایجاد می‌شود. اگر چگالی مصالح ρ باشد، تنش قائم σ_v در عمق h_m در مدل برابر است با:

$$\sigma_{vm} = \rho N g h_m \quad (1)$$

و در نمونه اصلی برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad (2)$$

بنابراین، برای حالتی که $\sigma_{vm} = \sigma_{vp}$ داریم $h_m = h_p N^{-1}$ و ضریب مقیاس $\left(\frac{\text{مدل}}{\text{نمونه واقعی}}\right)$ برای ابعاد خطی، 1/N است. از آنجا که مدل نشان‌دهنده مقیاس خطی از نمونه اصلی است، تغییرمکان‌ها نیز ضریب مقیاس 1/N دارند. بنابراین، کرنش‌ها ضریب مقیاس 1/1 دارند و می‌توان به این نتیجه رسید که بخشی از منحنی تنش-کرنش خاک که در مدل بسیج شده است، مشابه با نمونه اصلی خواهد بود. ضرایب مقیاس برای پدیده‌های مختلف استاتیک، دینامیک و انتشار در جدول ۱ آمده است (کرامر، ۱۹۹۶).

جدول ۱. ضرایب مقیاس برای مدل سازی ژئوتکنیکی (کرامر، ۱۹۹۶)

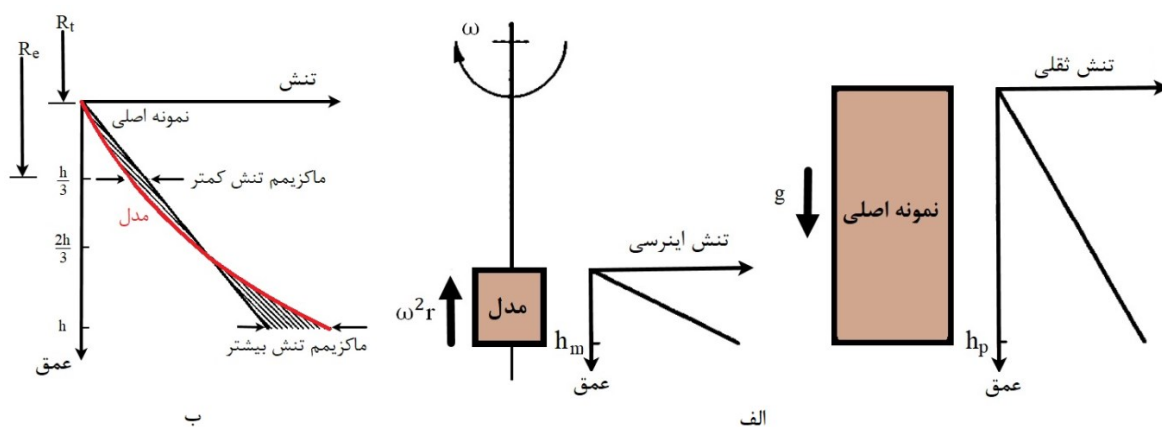
ابعاد مدل	پارامتر
ابعاد نمونه اصلی	
مسائل استاتیک	
1	تنش
1	کرنش
1/N	طول
1/N ³	جرم
1	دانسیته
1/N ²	نیرو
N	گرانش
مسائل دینامیک	
1/N	زمان
N	فرکانس
N	شتاب
N	نرخ کرنش
مسائل انتشار	
1/N ²	زمان
1/N ²	نرخ کرنش

تنش قائم در مقابل عمق متناظر، به طور مستقیم در شکل ۳- ب مقایسه شده‌اند. R_t شعاع دوران در بالای مدل و R_e شعاع مؤثر سانتریفیوژ برای مدل می‌باشد. یک قاعده مناسب برای حداقل کردن خطا در توزیع تنش، با برابر در نظر گرفتن مقادیر تنش کمتر و بیشتر نسبت به نمونه اصلی (شکل ۳- ب) به دست می‌آید. اگر نسبت حداکثر تنش کمتر به تنش نمونه اصلی با T_u ، و نسبت حداکثر تنش بیشتر به تنش در نمونه اصلی با r_0 نشان داده شود، با برابر قرار دادن آنها $r_u = r_0 = \frac{h_m}{6R_e}$ و $R_e = R_t + \frac{h_m}{3}$ خواهد بود (تیلور، ۲۰۰۵). بنابراین، تطابق دقیق تنش‌ها در مدل و نمونه اصلی در دو سوم عمق مدل است و شعاع مؤثر سانتریفیوژ باید از محور مرکزی تا یک سوم عمق مدل اندازه‌گیری شود.

۲-۱. تفاوت بین تنش واقعی و تقریب خطی تنش

در سانتریفیوژ

گرانش زمین برای محدوده کاربردی اعماق خاک در مهندسی عمران، یکنواخت است. هنگام استفاده از سانتریفیوژ به منظور ایجاد میدان شتاب بالا برای مدل سازی فیزیکی، تغییرات کمی در شتاب در مدل وجود دارد. علت این موضوع، میدان شتاب اینرسی است که برابر با $\omega^2 r$ می‌باشد (ω سرعت چرخشی زاویه‌ای سانتریفیوژ و r فاصله شعاعی تا هر المان در مدل خاک است). با دقت در انتخاب شعاعی که در آن ضریب مقیاس N تعیین می‌شود، این مسأله می‌تواند جزئی باشد. توزیع تنش قائم در مدل و نمونه اصلی متناظر با آن در شکل ۳- الف نشان داده شده است. این توزیع‌های



شکل ۳. الف) تنش‌های اینرسی در یک مدل سانتریفیوژ تحت چرخش حول یک محور ثابت متناظر با تنش‌های ثقلی در نمونه اصلی و ب) مقایسه تغییرات تنش با عمق در یک مدل سانتریفیوژ و نمونه اصلی متناظر با آن

۲-۲. اثرات مقیاس

از مسائل مطرح شده در مدل‌سازی‌های انجام شده در سانتریفیوژ، کاهش اندازه ذرات خاک با ضریب مقیاس N است. باید توجه داشت که با اعمال این ضریب، ممکن است ماسه ریز در یک مدل با مقیاس ۱ به ۱۰۰، نشان‌دهنده رفتار ذرات شن و به همین ترتیب خاک رس نشان‌دهنده رفتار ماسه ریزدانه باشد. این استدلال به صراحت نادرست است، زیرا رفتار تنش- کرنش در خاک‌های رسی با ماسه ریزدانه متفاوت است. اگر اندازه ذرات خاک قابل مقایسه با ابعاد مدل باشد، بعید است که منحنی تنش- کرنش خاک مشابه با شرایط واقعی باشد. بنابراین، جهت کاهش اثرات ناشی از اندازه ذرات خاک، باید نسبت بحرانی بُعد اصلی در مدل به قطر متوسط ذرات مورد توجه قرار گیرد. گارنیر و همکاران (۲۰۱۷) معیارهایی را جهت به حداقل رساندن تأثیر اندازه ذرات دانه‌ها بر اندرکنش بین سازه‌های مختلف (پی، تونل، لوله‌های مدفون و دیوار حائل) ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال، برای پی نواری، حداقل نسبت عرض پی به اندازه متوسط ذرات را ۳۵ و برای تونل، حداقل نسبت قطر تونل به متوسط ذرات را ۱۷۵ مشخص کرده‌اند.

۲-۳. اثرات میدان شتاب چرخشی

در مدل‌سازی فیزیکی با سانتریفیوژ، به منظور ایجاد میدان شتاب گرانشی بالا، مشکلاتی به موجب چرخش حول محور ثابت به وجود می‌آید. شتاب شعاعی به مقدار شعاع چرخش بستگی دارد و با عمق تغییر می‌کند. همچنین، جهت این شتاب به سمت مرکز چرخش است و در نتیجه در صفحه افق نسبت به صفحه قائم گذرنده از عرض مدل نیز مقدار شتاب تغییر می‌کند و مؤلفه جانبی شتاب وجود خواهد داشت. برای یک مدل با نیم‌پهنای ۲۰۰ میلی‌متر و شعاع مؤثر ۱/۶ متر، نسبت شتاب جانبی به شتاب قائم، حداکثر برابر یک هشتم خواهد بود، که اگر محدوده مورد بررسی، نزدیک دیواره محفظه مدل باشد، اثر شتاب جانبی می‌تواند کاملاً قابل توجه باشد (تیلور، ۲۰۰۵).

مسئله دیگری که ایجاد میدان شتاب با چرخش به وجود می‌آورد، شتاب کوریولیس است که وقتی جابجایی مدل در صفحه چرخش باشد، ایجاد می‌شود. این اثر، بیان‌کننده انحراف مسیر حرکت جسمی است که از دیدگاه یک دستگاه مختصات در حال دوران، دیده می‌شود. اگر سرعت شیء در مدل کمتر از ۵ درصد سرعت مدل در چرخش سانتریفیوژ باشد، اثر کوریولیس قابل صرف نظر کردن است.

۳. مدل سازی سانتریفیوژ

اعمال کنترل‌های الکتریکی، تزریق مایعات و گاز و همچنین امکان ارسال تصاویر و اطلاعات به خارج از محفظه مدل در حال چرخش وجود دارد. جدول ۲، مشخصات کلی دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران را نشان می‌دهد.

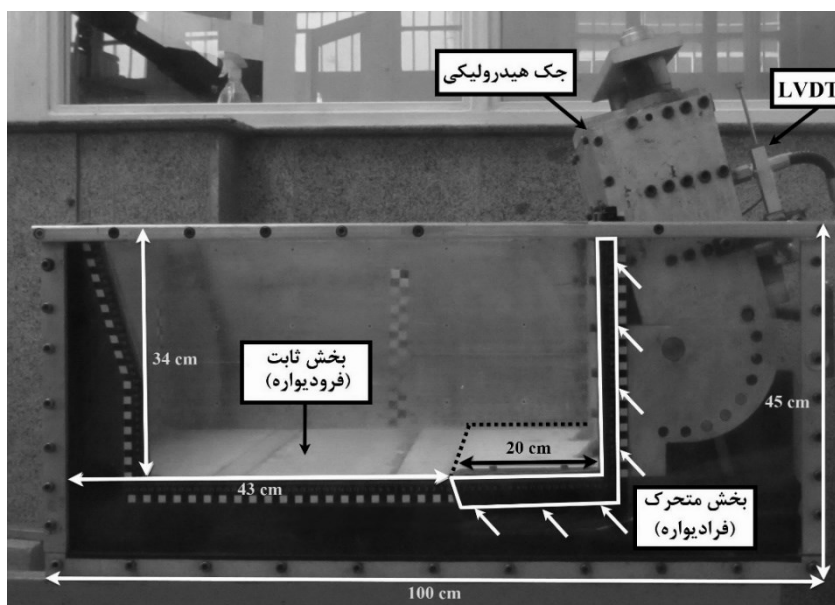
سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران از نوع بازویی بوده که دارای سکوی شناور می‌باشد. در حین انجام آزمایش، ثبت داده‌های مختلف در خصوص رفتار مدل، امکان‌پذیر است و امکان دسترسی به مدل در حال چرخش از طریق

جدول ۲. مشخصات کلی دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران

مقدار	واحد	مشخصه	
3	m	شعاع چرخش	مشخصات ابعادی
0.8	m	عرض سبده	
1	m	طول سبده	
0.8	m	ارتفاع سبده	
1.5	m	حداکثر ارتفاع قابل استفاده	
5-130	g	محدوده شتاب اعمالی	مشخصات عملکردی
± 0.2	g	دقت شتاب اعمالی	
1500	kg	حداکثر بار (نمونه) قابل تحمل	
850	kg	حداکثر بار قابل حمل در حداکثر شتاب	
± 40	kN	حداکثر غیر بالانسی	
38-208	rpm	محدوده سرعت چرخشی	

شکل ۴، تصویر دستگاه شبیه‌ساز گسل شیب‌لغز و ابعاد آن را نشان می‌دهد. ابعاد داخلی جعبه، ۳۴×۵۰×۶۳ سانتی‌متر است. این دستگاه قابلیت تغییر زاویه برای اعمال گسلش مختلف با زوایای مختلف را دارد. در آزمایش‌های انجام شده، گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه انتخاب شد که براساس گزارش‌های ارائه شده از گسل‌ها در ایران، دور از واقعیت نیست. حداکثر میزان جابجایی اعمالی توسط جک هیدرولیکی به ۵ سانتی‌متر محدود می‌شود. در این جک هیدرولیکی، با توجه به دبی ورودی روغن به جک، سرعت جابجایی حدود ۳ سانتی‌متر بر ثانیه است.

در بررسی تأثیر پدیده گسلش بر سازه‌های مختلف، انتشار گسیختگی ناشی از جابجایی سنگ بستر در خاک و نحوه برخورد آن با سازه اهمیت زیادی دارد. از این رو، انتشار گسیختگی در خاک باید آزادانه صورت بگیرد. بنابراین، برای شبیه‌سازی پدیده گسلش، دستگاه دارای یک بخش ثابت و یک بخش متحرک بوده که دیواره‌های کناری دستگاه ثابت است و تنها کف و دیواره قائم متصل به کف توسط جک هیدرولیکی نصب شده در کنار دستگاه، امکان جابجایی و مدل‌سازی گسل نرمال و معکوس را دارند. به منظور مشاهده نحوه انتشار گسیختگی ناشی از گسل و اندرکنش آن با سازه‌ها، صفحه شفاف پلکسی گلاس در دیواره دستگاه تعبیه شده است.



شکل ۴. دستگاه شبیه‌ساز گسل شیب لغز و ابعاد آن

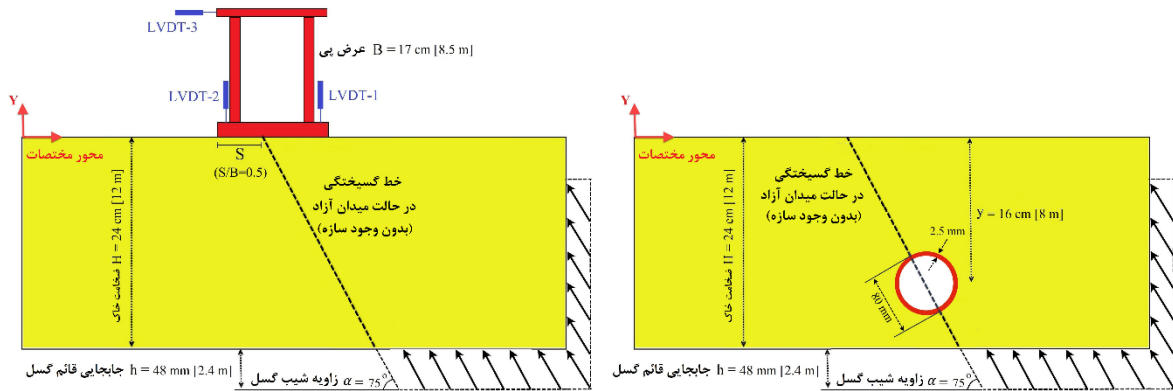
صفحات فولادی استفاده شد. جهت محاسبه دقیق‌تر دوران ساختمان‌ها تحت گسل معکوس، سازه صلب با یک درجه آزادی با فشار باربری ۱۰۰ کیلوپاسکال (معادل یک ساختمان ۱۰ طبقه) در نظر گرفته شد. به عنوان یکی از نوآوری‌های این پژوهش، ضمن رعایت فشار باربری پی، موقعیت مرکز جرم نیز مشابه با نمونه واقعی یک ساختمان ده طبقه مدل شده است. از لوله با جنس آلومینیوم برای مدل‌سازی تونل استفاده شد. لوله آلومینیوم دارای قطر خارجی ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر است. با استفاده از قوانین تشابه ابعادی، این لوله آلومینیومی در شتاب 50g معادل تونل بتنی با قطر ۴/۳۶ متر و ضخامت ۰/۳ متر می‌باشد.

جهت اندازه‌گیری تغییر مکان جک هیدرولیکی و جابجایی و دوران سازه در آزمایش‌ها، از ۴ عدد تغییر مکان‌سنج خطی (LVDT) استفاده شد. یکی از LVDT ها به صورت مستقیم بر بخش متحرک دستگاه تعبیه شده است تا تغییر مکان جک را ثبت کند (شکل ۴) و سه LVDT دیگر روی سازه نصب شدند که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای تحلیل تصاویر به دست آمده از آزمایش سانتریفیوژ و تعیین جابجایی‌ها، از تکنیک اندازه‌گیری سرعت تصویر ذرات (PIV) استفاده

در این تحقیق، پس از انجام آزمایش در میدان آزاد (بدون وجود سازه)، اندرکنش گسل معکوس با تونل‌های زیرزمینی و پی‌های سطحی به صورت جداگانه بررسی می‌گردد. از نتایج حاصل از آزمایش انتشار گسیختگی ناشی از گسل معکوس در خاک در شرایط میدان آزاد، جهت دستیابی به جانمایی مناسب تونل در داخل خاک و همچنین تعیین محل بیرون‌زدگی گسلش در سطح زمین به منظور تعیین موقعیت سازه (S/B) نسبت به آن استفاده می‌شود. پارامتر S فاصله گوشه سمت چپ پی تا محل رخنمون گسل در حالت میدان آزاد است. شکل ۵، شمای کلی از مسأله مورد مطالعه را نشان می‌دهد. لایه خاک ماسه‌ای با ضخامت ۲۴ سانتی‌متر روی گسل معکوس با زاویه شیب ۷۵ درجه نسبت به افق قرار گرفته است. خاک مورد استفاده در آزمایش‌های انجام شده، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت است. تراکم نسبی ماسه در مدل‌های خاک، حدود ۶۰ درصد معادل با وزن مخصوص خشک ۱۵/۲۸ کیلونیوتن بر متر مکعب است. در آزمایش‌ها، خاک به روش تراکم مرطوب با رطوبت ۵ درصد و تراکم نسبی حدود ۶۰ درصد معادل با وزن مخصوص مرطوب ۱۶/۰۵ کیلونیوتن بر متر مکعب آماده‌سازی شد. به منظور تأمین فشار مورد نیاز پی از

استفاده، کد متلب با عنوان GeoPIV می‌باشد که توسط وایت و همکاران (۲۰۰۳) ابداع شده است.

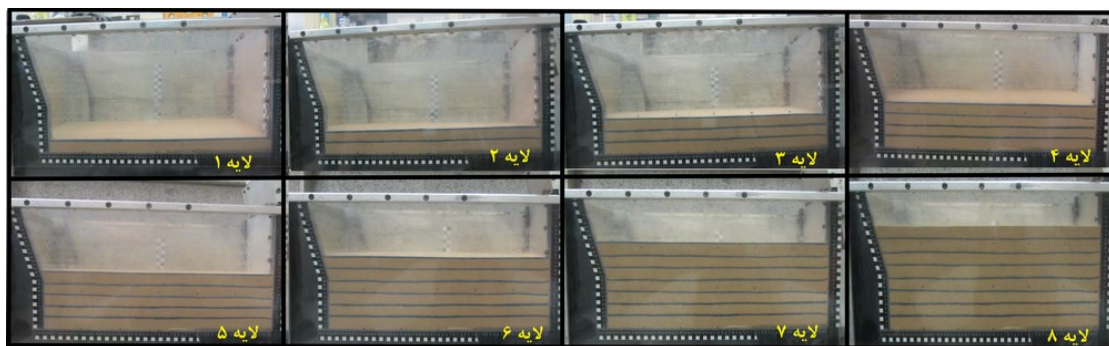
شد که جابجایی‌های یک قطعه کوچک را از طریق آنالیز آماری با یک الگوریتم مناسب، با استفاده از تصاویر دیجیتال متوالی از مدل اندازه‌گیری می‌کند. برنامه مورد



شکل ۵. تصویر شماتیک از مسائل مورد مطالعه

حین خاکریزی داخل جعبه، با رسیدن خاک به تراز کف لوله، لوله آلومینیومی به صورت موازی با خط گسل قرار داده می‌شود، به طوری که مرکز تونل بر مسیر گسیختگی در عمق ۱۶ سانتی‌متری از سطح خاک قرار می‌گیرد و ریختن لایه‌ها تا ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر ادامه می‌یابد. همچنین، به منظور بررسی اندرکنش گسل با پی سطحی، پس از اتمام خاکریزی، سازه در موقعیت مورد نظر (۰/۵) قرار داده می‌شود.

برای آماده‌سازی نمونه خاک در مدل، از روش تراکم نمودن مرطوب استفاده شد. ماسه با ۵ درصد آب مخلوط شد و با استفاده از روابط وزنی-حجمی، مقدار خاک مرطوب با تراکم نسبی ۶۰ درصد برای هر ۳ سانتی‌متر لایه خاک به دست آمد. پس از ریختن هر لایه ۳ سانتی‌متری، از ماسه رنگی در امتداد صفحه پلکسی گلاس استفاده شد تا مسیر گسلش در خاک ماسه‌ای مشخص گردد. مراحل ریختن لایه‌ها و کوبیدن آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. برای جای‌گذاری تونل، در



شکل ۶. مراحل ریختن لایه‌های خاک با ضخامت ۳ سانتی‌متر

دست می‌آید. در این تحقیق، مقدار hm/R_e کمتر از ۰/۱ است و در نتیجه حداکثر خطا در پروفیل تنش جزئی بوده و کمتر از ۱/۵ درصد تنش در نمونه اصلی است.

۱-۳. بررسی اثرات مدل‌سازی در مقیاس کوچک در شبیه‌سازی اندرکنش گسلش

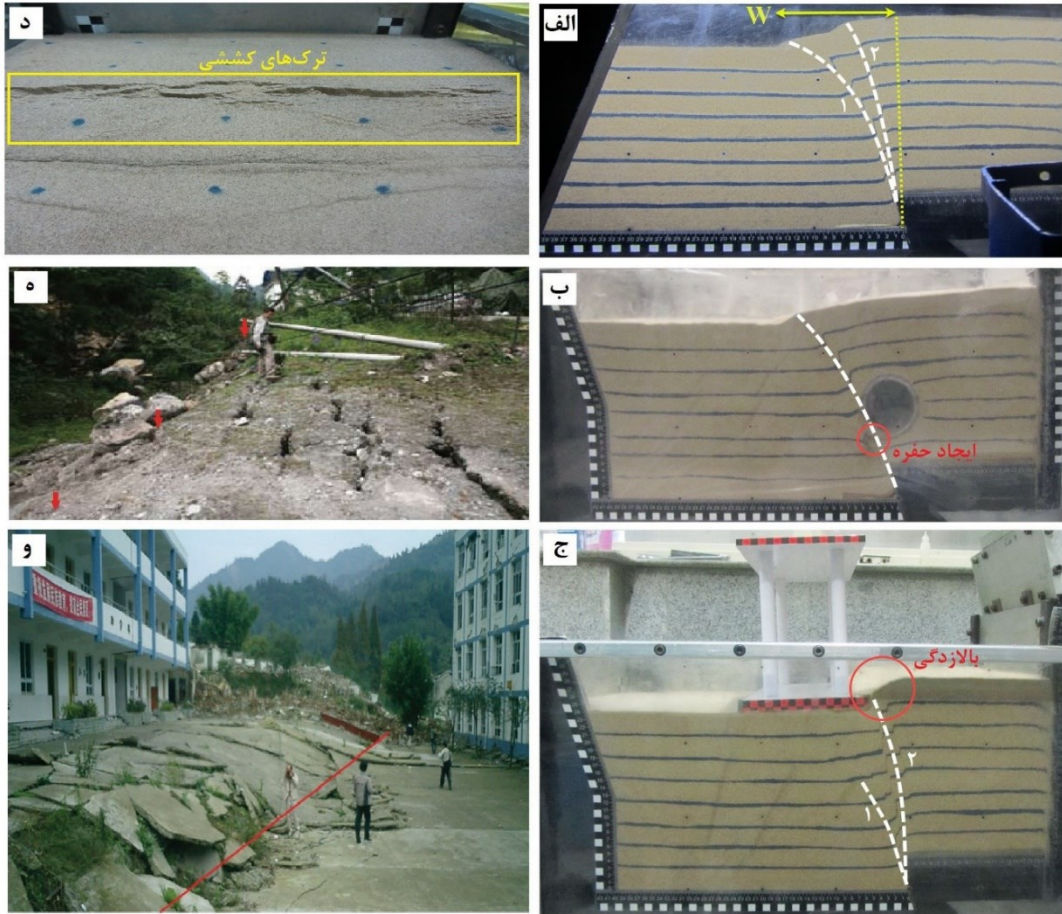
در رابطه با تفاوت بین تنش واقعی و تقریب خطی تنش در سانتی‌فیوژ، حداکثر خطا با معادله $r_{u1} = r_o = \frac{hm}{6R_e}$ به

و مسیر گسلش در نزدیکی سطح زمین با فاصله از خط گسل و در نزدیکی فرود یواره است. این الگوی انتشار گسیختگی با نتایج ارائه شده توسط بری (۲۰۰۱)، برنسی و همکاران (۲۰۰۸) و لین و همکاران (۲۰۰۷) انطباق دارد. با پیشروی گسیختگی و جابجایی گسلش، ابتدا شاخه‌ای از گسیختگی به سطح زمین می‌رسد و با افزایش جابجایی قائم گسل به ۴۸ میلی‌متر، شاخه دوم گسیختگی در سمت راست شاخه اول شکل می‌گیرد. شکل ۷-د نشان می‌دهد که در سطح زمین، گسیختگی‌ها و ترک‌های کششی ایجاد می‌شود که می‌تواند به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی خسارت وارد کند. ایجاد ترک‌های کششی در سطح زمین ناشی از گسلش معکوس در زلزله‌های مختلف مشاهده شده است که نمونه‌ای از آن در شکل ۷-ه آورده شده است. اگر فاصله افقی رخنمون گسل در سطح زمین تا خط گسل در سنگ بستر را با W نشان دهیم، این مقدار در آزمایش انجام شده برابر با ۱۵ سانتی‌متر است. لین و همکاران (۲۰۰۶) محدوده تغییرات W/H برای گسل با زاویه‌های مختلف را گزارش کرده‌اند (H ضخامت پروفیل خاک است). برای گسل با زاویه شیب ۷۵ درجه این محدوده بین ۱/۱ و ۰/۴ قرار دارد که مقدار W/H برابر با ۰/۶۲۵ در مدل‌سازی فیزیکی انجام شده در این بازه است. شکل ۸، تغییر مکان سطحی زمین را تحت گسل معکوس نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، مشخص است که محدوده‌ای از سطح زمین که تحت تأثیر گسلش در حالت آزاد قرار گرفته حدود ۲۴ سانتی‌متر (۱۲ متر در شرایط واقعی) است.

در مورد اثرات مقیاس ذرات خاک در مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق، اندازه متوسط ذرات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه (D_{50}) برابر با ۰/۳ میلی‌متر، عرض پی (B) برابر با ۱۷ سانتی‌متر و قطر تونل (D) برابر با ۸ سانتی‌متر است و نسبت‌های D/D_{50} و B/D_{50} بسیار بیشتر از معیارهای ارائه شده توسط گارنیر و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد که در بخش ۲-۲ اشاره شد. لذا، ذرات خاک به میزان بی‌نهایت با تونل و کف پی در تماس هستند و خطایی از این جهت به مدل‌سازی‌های انجام شده وارد نمی‌گردد. با توجه به اینکه در این پژوهش، پهنای مدل حدود ۵۰ سانتی‌متر و شعاع چرخش سانتریفیوژ ۳ متر است، لذا شتاب جانبی بر لبه‌های خاک مدل ناچیز و کمتر از ۰/۱ شتاب قائم خواهد بود. همچنین، در مدل‌سازی‌های انجام شده، جابجایی افقی گسل عمود بر صفحه دوران بوده و اثر کوریولیس نخواهد داشت. جابجایی قائم گسل در صفحه دوران است. اما با توجه به اینکه جابجایی به صورت پله‌ای و با سرعت کم است، اثر کوریولیس قابل صرف نظر خواهد بود. اثر شتاب ثقل زمین نیز با توجه به ارتفاع مدل در جهت شتاب ثقل در مقایسه با شعاع چرخش، قابل توجه نیست.

۴. نتایج و تحلیل

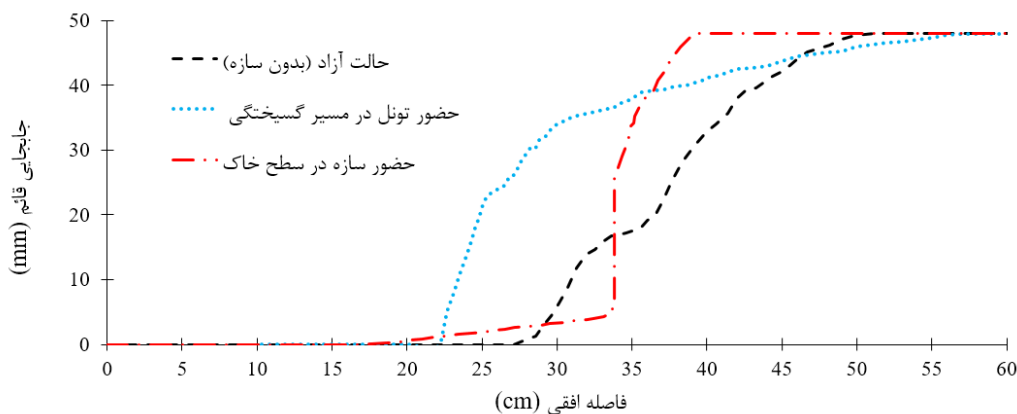
الگوی گسیختگی گسل در انتشار گسل معکوس در خاک ماسه‌ای در شرایط میدان آزاد برای جابجایی قائم ۴۸ میلی‌متر در شکل ۷-الف نشان داده شده است. با رسیدن گسیختگی به سطح زمین، زاویه شیب آن کاهش می‌یابد



شکل ۷. الف) الگوی گسیختگی در انتشار گسل معکوس با زاویه ۷۵ درجه در مدل فیزیکی، ب) اندرکنش گسل معکوس با تونل موجود در مسیر گسیختگی در مدل فیزیکی، ج) اندرکنش گسل معکوس با سازه سطحی در مدل فیزیکی، د) ترک‌های کششی ایجاد شده در سطح خاک در گسلش در میدان آزاد در مدل فیزیکی، ه) ترک‌های کششی ایجاد شده در گسل معکوس در زلزله ۲۰۰۸ ونچوان در چین (یو و همکاران، ۲۰۱۰) و و) بالازدگی گسل در کنار ساختمان در زلزله ۲۰۰۸ ونچوان در چین (بیروم و همکاران، ۲۰۱۰)

حفره شود. بنابراین، باید در طراحی‌ها، ایجاد این حفرات در اندرکنش گسل-تونل در نظر گرفته شود. وجود حفره در اطراف تونل در مسیر گسلش توسط لین و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش شده است. با مقایسه تغییر مکان سطحی در شکل ۸، مشخص است که با حضور تونل، محدوده بیشتری از سطح زمین تحت تأثیر گسلش قرار گرفته است.

اندرکنش گسل معکوس با تونل در شکل ۷-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور تونل موجب تغییر مسیر گسیختگی ناشی از گسل معکوس شده است و شاخه دوم گسیختگی به دلیل وجود تونل ایجاد نشده است. در واقع، شاخه دوم گسیختگی در حالت میدان آزاد به دلیل ایجاد فضای خالی بین تونل و خاک شکل نگرفته است. حفرات ایجاد شده در زیر تونل می‌تواند منجر به افزایش تنش خمشی در محدوده



شکل ۸. مقایسه‌ی تغییر مکان زمین در گسل معکوس در حالت آزاد، حضور تونل در مسیر گسیختگی و حضور سازه در سطح خاک

فیزیکی به خوبی توانسته است بالازدگی زمین و تغییر شکل سطحی را شبیه‌سازی کند.

جدول ۳. سطوح آسیب متناظر با دوران صلب پی (برد و

همکاران، ۲۰۰۶)

سطح آسیب	دوران صلب پی
کم	کمتر از ۰/۶ درجه
متوسط	بین ۰/۶ تا ۲/۳ درجه
شدید	بین ۲/۳ تا ۴/۶ درجه
عدم پایداری	بیشتر از ۴/۶ درجه

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مبانی مدل‌سازی اندرکنش گسیختگی ناشی از گسلش با تونلهای زیرزمینی و پی‌های سطحی با دستگاه سانتی‌فیوژ بررسی شد. سپس، تأثیر تونلهای زیرزمینی به عنوان زیرساخت‌های حیاتی در حوزه حمل‌ونقل بر مسیر گسلش معکوس و اندرکنش گسلش معکوس با سازه‌های سطحی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

- در مدل فیزیکی انجام شده، خطاهای ناشی از شبیه‌سازی در مقیاس کوچک و میدان شتاب ایجاد شده، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است.
- در انتشار گسل معکوس با زاویه ۷۵ درجه در خاک ماسه‌ای در شرایط میدان آزاد در مدل آزمایشگاهی، با رسیدن گسیختگی به سطح زمین، زاویه شیب آن

انتشار گسیختگی ناشی از گسل معکوس با حضور سازه در شکل ۷- ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر گسیختگی به گوشه سمت راست پی منحرف شده و موجب شده که سازه به میزان حدود ۲ درجه دوران کند. در جایی که تغییر شکل زمین باعث دوران صلب سیستم پی- سازه می‌شود، مهمترین عامل در تعیین سطح آسیب، قابل قبول بودن عملکرد سیستم است (برد و همکاران، ۲۰۰۶). جدول ۳، سطح آسیب به سازه را براساس دوران صلب پی نشان می‌دهد. دوران ۲ درجه سازه در این مطالعه ناشی از جابجایی قائم گوشه سمت راست پی در فرودیواره و ساکن ماندن گوشه سمت چپ پی در فرودیواره می‌باشد که مطابق با جدول ۳ باعث وارد شدن آسیب در سطح متوسط به سازه می‌گردد. شاخه اول گسیختگی که در میدان آزاد شکل گرفته بود، با حضور سازه تا میانه لایه خاک منتشر شده و به سطح نرسیده است. در این حالت بر خلاف شرایط میدان آزاد، ترک‌های کششی در سطح زمین مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در شکل ۷- ج مشاهده می‌شود، بالازدگی ناشی از گسلش در سمت راست پی رخ می‌دهد که میزان آن براساس تغییر مکان سطحی نشان داده شده در شکل ۸ برابر با ۲/۳ سانتی‌متر (۱/۱۵ متر در شرایط واقعی) است. مشاهدات میدانی از اندرکنش گسل معکوس با پی در زلزله ۲۰۰۸ چین (شکل ۷- و) نشان می‌دهد که مدل

می‌تواند منجر به افزایش تنش خمشی در محدوده فضای خالی ایجاد شده، شود که باید در طراحی‌های سازه‌ای مورد توجه قرار گیرد.

- در انتشار گسیختگی ناشی از گسل معکوس با حضور سازه، فشار سربار سازه موجب انحراف مسیر گسیختگی به گوشه سمت راست پی و دوران آن می‌گردد. همچنین، در سمت راست پی، بالازدگی مشاهده شد که منطبق با مشاهدات میدانی در زلزله‌های پیشین همراه با گسلش سطحی بود.
- انتشار گسیختگی ناشی از گسلش در ساختگاه و اندرکنش آن با سازه‌های سطحی و زیرسطحی به خوبی با دستگاه ساتریفیوژ ژئوتکنیکی شبیه‌سازی می‌شود و نتایج انطباق خوبی با مشاهدات میدانی دارد.

کاهش می‌یابد و در سطح زمین، گسیختگی‌ها و ترک‌های کششی ایجاد می‌شود که می‌تواند به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی خسارت وارد کند. الگوی گسیختگی گسل و تغییرشکل‌های سطحی انطباق خوبی با مشاهدات میدانی دارد.

- حضور تونل در مسیر گسیختگی ناشی از گسل معکوس موجب تغییر مسیر انتشار گسیختگی و افزایش محدوده تحت تأثیر گسلش در سطح زمین می‌شود. بنابراین، در مناطق شهری در صورت لرزه‌خیز بودن منطقه و وجود گسل‌ها، تأثیر وجود تونل بر عملکرد سازه‌های سطحی و همچنین، سازه‌های مدفون مجاور تونل باید مدنظر قرار گرفته شود. همچنین، در مدل فیزیکی مشاهده شده که بر اثر برخورد گسلش با تونل، در زیر تونل جداشدگی بین خاک و تونل به وجود می‌آید. این جداشدگی

۶. مراجع

- Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A. and Towhata, I. 2016. "Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture". *Can. Geotech. J.*, 52(1): 1-15.
- Baziar, M. H., Nabizadeh, A. and Jabbari, M. 2014a. "Numerical modeling of interaction between dip-slip fault and shallow foundation". *Bull. Earthq. Eng.*, 13(6): 1613-1632.
- Baziar, M. H., Nabizadeh, A., Lee, C. J. and Hung, W. Y. 2014b. "Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 65: 151-164.
- Bird, J. F., Bommer, J. J., Crowley, H. and Pinho, R. 2006. "Modeling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(1): 15-30.
- Bjerrum, L. W., Atakan, K. and Sørensen, M. B. 2010. "Reconnaissance report and preliminary ground motion simulation of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake". *Bull. Earthq. Eng.*, 8(6): 1569-1601.
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., El Nahas, A. and Nagaoka, S. 2008. "Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction". *Bull. Earthq. Eng.*, 6(4): 607-628.
- Bray, J. D. 2001. "Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture". In: *Workshop on Seismic Fault-induced Failures*. Japan Society for the Promotion of Science, University of Tokyo, pp. 55-80.
- Cai, Q. P., Peng, J. M., Ng, C. W. W., Shi, J. W. and Chen, X. X. 2019. "Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand". *Comput. Geotech.*, 111: 137-146.
- Dowding, C. H. and Rozen, A. 1978. "Damage to rock tunnels from earthquake shaking". *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 104(GT2): 175-191.
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F. and Thorel, L. 2007. "Catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modelling". *Int. J. Phys. Modell. Geotech.*, 7(3): 1-24.
- Ghavami, S., Saeedi Azizkandi, A., Baziar, M. H. and Jahanbakhsh, H. 2019a. "Numerical study on interaction of normal fault with underground tunnels". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 5(4): 1-12.
- Ghavami, S., Saeedi Azizkandi, A., Baziar, M. H. and Rajabi, M. 2019b. "Interaction of underground tunnel and existing shallow foundations affected by normal faults". 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering.
- Kiyota, T., Ikeda, T., Konagai, K. and Shiga, M. 2017. "Geotechnical damage caused by the 2016 Kumamoto earthquake, Japan". *Int. J. Geoenviron. Case Histories*, 4(2): 78-95.

- Kramer, S. L. 1996. "Geotechnical earthquake engineering". Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Lin, M. L., Chung, C. F. and Jeng, F. S. 2006. "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip". Eng. Geol., 88: 70-89.
- Lin, M. L., Chung, C. F., Jeng, F. S. and Yao, T. C. 2007. "The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels". Eng. Geol., 92: 110-132.
- Sabagh, M. and Ghalandarzadeh, A. 2020a. "Centrifuge experiments for shallow tunnels at active reverse fault intersection". Front. Struct. Civ. Eng., 14: 731-745.
- Sabagh, M. and Ghalandarzadeh, A. 2020b. "Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection". Transport. Geotech., 22: 100325.
- Saeedi Azizkandi, A., Baziar, M. H., Ghavami, S. and Heidari Hasanaklou, S. 2021. "Use of vertical and inclined walls to mitigate the interaction of reverse faulting and shallow foundations: Centrifuge tests and numerical simulation". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 147(2): 04020155.
- Saeedi Azizkandi, A., Ghavami, S., Baziar, M. H. and Heidari Hasanaklou, S. 2019. "Assessment of damages in fault rupture-shallow foundation interaction due to the existence of underground structures". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 89: 222-237.
- Taylor, R. N. 2005. "Geotechnical centrifuge technology". Taylor & Francis, London, 326 p.
- Tehrani-zadeh, M. and Moradi Shaghghi, M. 2017. "Investigation on the effects of foundation stiffness on surface fault rupture in reverse dip-slip faults". Sharif J. Civ. Eng., 33.2(2.2): 61-67
- White, D. J., Take, W. A. and Bolton, M. D. 2003. "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry". Géotech., 53(7) :619-631.
- Yu, G., Xu, X., Klinger, Y., Diao, G., Chen, G., Feng, X., Li, C., Zhu, A., Yuan, R., Guo, T., Sun, X., Tan, X. and An, Y. 2010. "Fault-scarp features and cascading-rupture model for the Wenchuan earthquake (MW=7.9), eastern Tibetan Plateau, China". Bull. Seismol. Soc. Am., 100 (5B): 2590-2614.
- Yu, H., Chen, J., Bobet, A. and Yuan, Y. 2016. "Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 54: 102-116.