

چکیده

روش حفاری تمام مکانیزه‌ی تونل، لایننگ‌های سگمندی را ترویج نموده است. یکی از انواع تغییر شکل‌های بزرگ و ماندگار زمین، گسلش است. تونل‌ها به جهت طول زیاد در معرض خطر گسلش هستند. رفتار تونل‌ها در ناحیه‌ی گسل یکی از مسائلی است که کمتر مطالعه شده است. در این مقاله، جزئیات روش مدل‌سازی گسلش زمین و تونل سگمندی حفر شده در خاک در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بیان شده و نتایج شش آزمایش گسلش شیب‌لغز نرمال با تونل سگمندی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی ارائه گردیده است. نتایج بیانگر موفقیت در مدل‌سازی است؛ لذا مکانیسم‌های گسیختگی ممکن مشخص گردید. این مکانیسم‌ها تابع میزان جابه‌جایی گسل است. با افزایش جابه‌جایی در گسل، تغییر شکل در مقطع عرضی تونل و در نهایت گسیختگی در پوشش تونل و ریزش خاک داخل آن اتفاق می‌افتد. نظر به اینکه تونل‌های مورد مطالعه تونل‌های کم‌عمق شهری لحاظ گردیده‌اند، لذا ریزش خاک به داخل تونل منجر به شکل‌گیری فروچاله در سطح زمین می‌شود. نتایج آزمایش‌ها با سربارهای مختلف نشان داد که با افزایش سربار تونل، آستانه‌ی تحمل تونل در مقابل ریزش خاک به داخل تونل در اثر گسلش افزایش می‌یابد. با وجود اعمال گسلش زیاد، آسیب‌های سازه‌ای در سگمندی‌ها به دلیل عملکرد مناسب هندسی سگمندی‌ها و اتصالات آنها اندک بوده و تنها آسیب‌هایی موضعی در آنها مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: تونل، لایننگ سگمندی (قطعه‌ای)، گسل شیب‌لغز، گسل نرمال، سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، مدل‌سازی فیزیکی

مدل‌سازی گسلش نرمال و تونل قطعه‌ای در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

مجید کیانی (نویسنده مسؤل)

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه تبریز،
kiani@tabrizu.ac.ir

عباس قلندرزاده

دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس
دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

توحید اخلاقی

دانشیار مهندسی عمران، دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۱- مقدمه

مسیر یک گسل فعال همیشه مقدور نیست. در این حالت تونل باید تا حد امکان توان تحمل جابه‌جایی ناشی از گسل را داشته باشد و تنها دچار خرابی‌های ناچیزی شود. عبور تونل از گسل مهم‌ترین بخش طراحی تونل در مواجهه با گسیختگی‌های زمین است. گسل‌ها در صورت فعالیت زیاد می‌توانند خرابی‌های بسیاری را در تونل‌ها به وجود آورند. مطالعه‌ی رفتار تونل در عبور از گسل در زمان زلزله موضوع تقریباً ناشناخته‌ای است. در این تحقیق سعی گردیده، پدیده‌ی گسلش زمین و تونل قطعه‌ای حفر شده در خاک مدل‌سازی شود برای این منظور از مدل‌سازی فیزیکی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی استفاده شده است در این مقاله جزئیات روش مدل‌سازی فیزیکی گسلش و تونل قطعه‌ای

امروزه کاربرد تونل‌ها در جوامع شهری رو به گسترش است. تونل‌های راه، راه آهن، مترو، جمع‌آوری فاضلاب، کابل‌های فشارقوی برق و انتقال آب شرب که به‌عنوان شریان‌های حیاتی شناخته می‌شوند، از جمله کاربردهای تونل‌ها به‌شمار می‌آید. بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا بر روی نهشته‌های رسوبی و مناطق گسل‌خورده بنا نهاده شده‌اند. از دیدگاه فنی ساخت تونل‌ها در شهرها با چالش‌های ویژه‌ای همراه است. بسیاری از استانداردهای مطرح دنیا تنها اجتناب کردن از ساخت سازه‌ها در مجاورت گسل‌های فعال را به‌عنوان یک راهکار مهندسی توصیه نموده‌اند [۱-۲]. بعضاً اتفاق می‌افتد که امتداد تونل چاره‌ای جز عبور از مسیر یک گسل را ندارد. لذا اجتناب از عبور تونل از

در سانتریفویژ بیان گردیده است. علاوه بر آن، نتایج پنج آزمایش گسلش شیب لغز نرمال با تونل قطعه ای ارائه گردیده و الگوهای مختلف خرابی مشاهده شده، تشریح شده است.

۲- مخاطرات پدیده گسلش

در طول رخداد یک زلزله دو گونه احتمال آسیب به سازه‌های روزمینی و زیرزمینی محتمل است. الف) خسارات ناشی از لرزش زمین و موج ناشی از زلزله ب) خسارات ناشی از جابه‌جایی دو سطح گسل و ایجاد جابه‌جایی دائمی زمین^۱. گسل نوعی ناپیوستگی در توده‌های عظیم سنگ بستر است که دو سطح آن می‌تواند نسبت به یکدیگر حرکت نماید. در اثر زلزله‌های نسبتاً شدید گاهی این جابه‌جایی‌ها امکان دارد به سطح زمین رسیده و شکستگی‌هایی را در سطح زمین ایجاد نماید که آن را گسلش سطحی نامند. در صورت برخورد گسلش‌های سطحی با سازه‌های روزمینی همچون ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و سایر ابنیه و یا سازه‌های زیرزمینی همچون تونل‌ها و خطوط انتقال، خسارت‌های بسیار زیادی به آنها وارد می‌شود. شواهد تاریخی و نمونه‌های اخیر در سه زلزله معروف ۱۹۹۹ در قوجالی (Kocaeli) و دوزچی (Duzcci) ترکیه و چی-چی (Chi-Chi) تایوان نشان می‌دهد که میزان گسلش سطحی تا چندین متر نیز بوده که باعث ایجاد خسارت‌های بسیار شدید به سازه‌ها گردیده است. تا قبل از این زلزله‌ها، کانون توجه‌ها به خسارت‌های ناشی از موج زلزله متمرکز بود و تحقیقات نسبتاً جامعی تاکنون برای شناخت این پدیده انجام شده است. تحقیق‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که در مناطق با خطر گسلش، توجه به طراحی‌های ویژه برای پیشگیری از آسیب‌های ناشی از جابه‌جایی زمین از اهمیت بالایی برخوردار است. با اینکه تحقیق‌های گوناگونی در زمینه‌ی اثر گسلش بر سازه‌های ساخته‌شده انجام گردیده، تمرکز این مسئله بر روی سازه‌های روی سطح زمین بیشتر است. این در حالی است که سازه‌های زیرزمینی همچون تونل‌ها دارای اهمیت زیادی می‌باشند و کمتر مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته‌اند.

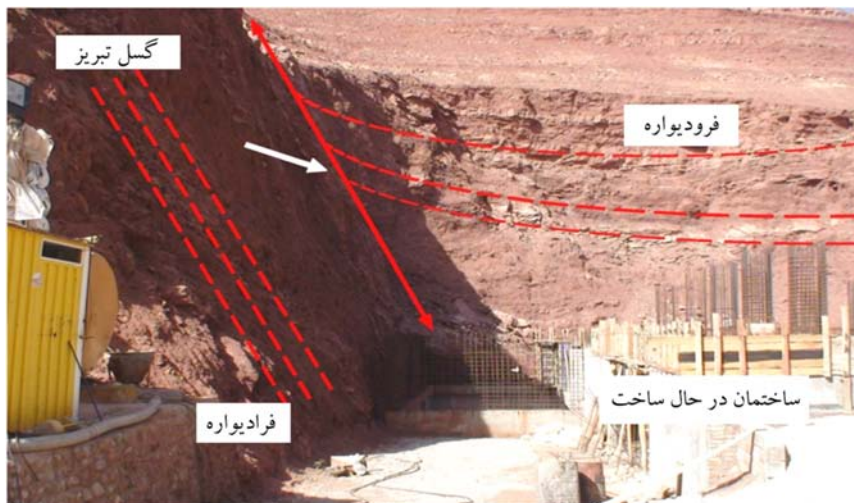
کشور ایران به‌عنوان یکی از مناطق لرزه‌خیز دنیا پتانسیل بالایی برای وقوع گسل‌های سطحی دارد. از جمله شهرهای بزرگ

لرزه‌خیز ایران می‌توان شهرهای تهران و تبریز و مشهد را نام برد که گسل‌های شناخته‌شده‌ی فراوانی در آنها وجود دارد. به‌عنوان نمونه، گسل شمال تبریز که از نواحی شمال غربی، شمال و شمال شرقی این شهر عبور می‌کند و یکی از معروف‌ترین گسل‌های فعال ایران است که امروزه به علت توسعه این شهر، از میان شهرک‌های تازه تأسیس شمال این شهر عبور می‌کند. از طرفی دیگر تمامی گسل‌های موجود در یک محل، شناخته‌شده نبوده و در هنگام وقوع زلزله فعال گردیده و مشخص می‌شوند. در مواردی نیز هنگام حفاری‌های ژئوتکنیکی این گسل‌های پنهان شناسایی شده‌اند. امروزه بخش‌های فراوانی از توسعه‌ی این شهر بر روی بسترهای گسلی این منطقه واقع شده‌اند. از طرفی لزوم ایجاد سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی زیرزمینی در چنین شهرهایی حفر تونل را الزامی نموده است. لذا خطر پدیده‌ی گسلش، سازه‌های زیرزمینی همچون تونل‌های مترو و راه‌آهن را در چنین شهرهایی تهدید می‌کند [۳]. شکل (۱) رخنمون سطحی گسل تبریز در شمال شرقی شهر تبریز را نشان می‌دهد. شکل (۲) نقشه‌ی خط ۲ متروی شهر تبریز را بر روی نقشه ماهواره‌ای نشان می‌دهد که احتمال عبور تونل خط ۲ متروی این شهر از ناحیه‌ی گسلی شرق شهر وجود دارد.

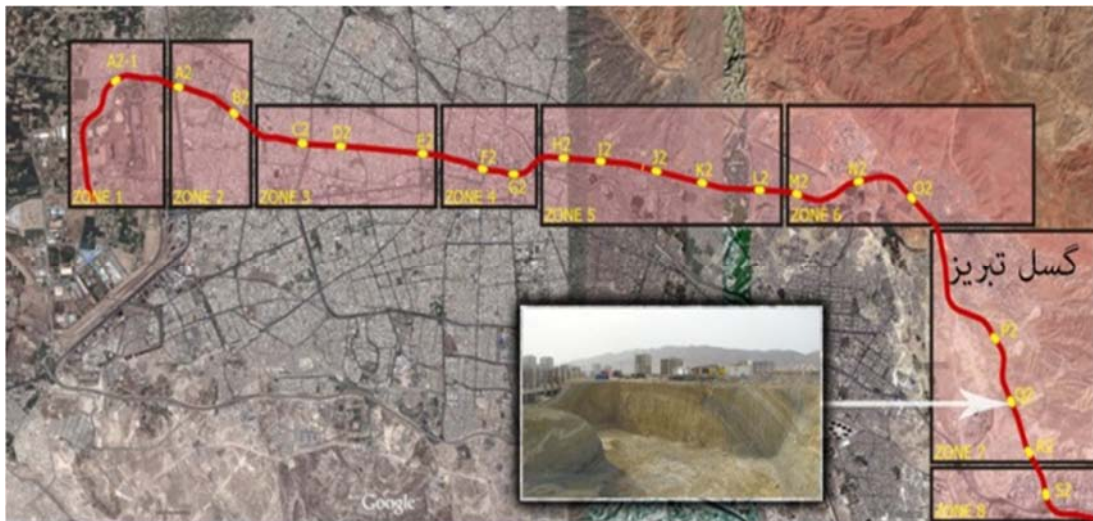
بدیهی است نیاز به خطوط مترو بر اساس نیازمندی‌های ترافیکی ناشی از توسعه‌ی مناطق مسکونی ایجاد می‌شود. این رویداد در بسیاری از شهرهای بزرگ زلزله‌خیز می‌تواند اتفاق بیافتد. به‌طور کلی تونل‌های شهری بسیار زیادی نیز وجود دارد که در مناطق گسلی ساخته شده‌اند.

۳- آسیب‌های وارد شده به تونل‌ها

به لحاظ تاریخی تأسیسات زیرزمینی در مقابل زلزله نرخ پایین‌تری از خرابی را نسبت به سازه‌های روزمینی تجربه کرده‌اند. با وجود این، بعضی از سازه‌های زیرزمینی در زلزله‌های بزرگ اخیر دچار خسارات قابل توجهی شده‌اند [۴]. جستجو در ادبیات فنی موارد فراوانی را از خرابی تونل‌ها در اثر گسلش نشان می‌دهد. از جمله‌ی آن می‌توان به تونل تانا (Tanna) در زلزله‌ی ۱۹۳۰ ژاپن، تونل ایناتور (Inatori) در زلزله‌ی ۱۹۷۸ ژاپن، تونل



شکل (۱): رخنمون سطحی گسل در شهر تبریز در کنار یک ساختمان بلندمرتبه در حال ساخت [۳]



شکل (۲): مسیر خط ۲ متروی شهر تبریز بر روی نقشه ماهواره‌ای و موقعیت گسل تبریز در سمت راست



شکل (۳): خرابی ایجادشده در تونل شی گنگ در زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان [۷]

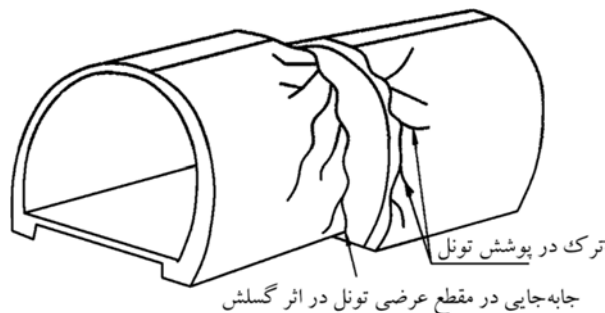
خروجی دومین ایستگاه برق آبی کاکوندا (Kakkonda) در زلزله‌ی ۱۹۹۸ ژاپن، تونل آبگیر سد شی گنگ (Shih-gang) در زلزله‌ی ۱۹۹۹ چی چی تایوان، شکل‌های (۳-۴) [۵-۶]، تونل آبگیر سد اومیا (Omiya) در زلزله‌ی ۲۰۰۰ ژاپن [۷] تونل رایتس (Wrights) در سانفرانسیسکو در زلزله‌ی ۱۹۰۶ [۸]، تونل کرن کانتی (Kern Country) در زلزله‌ی سال ۱۹۵۲، تونل روکو (Rokko) در زلزله‌ی ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، تونل بلو (Bolu) ترکیه در زلزله‌ی ۱۹۹۹ دوزچی (Duzcce) [۹]، تونل شیویا-دانیگاساوا (Shioya-Danigawa) در ژاپن در زلزله‌ی ۱۹۹۵، تونل توتوری (Tottori) در ژاپن در زلزله‌ی ۲۰۰۰، تونل معدن

جهت پیش‌بینی پاسخ یک طول نامحدودی از تونل برای طراحی آن به کار گرفته شده است. از جمله محدودیت‌های این آزمایش این است که جعبه‌ی شبیه‌سازی گسلش به ابعاد ۴۹ سانتی‌متر طول، ۲۱ سانتی‌متر عرض، ۱۹ سانتی‌متر ارتفاع، تنها قادر به شبیه‌سازی گسلش معکوس با زاویه‌ی ۴۵ درجه بوده است. تونل مورد مطالعه‌ی آنها تونل متروی شهر لس‌آنجلس بود که به صورت پوشش بتن مسلح پیش‌ساخته (سگمتی ۶ تایپ) در حال ساخت بود و گسل‌های معکوس با زاویه ۴۵ درجه این تونل‌ها را قطع کرده بودند. به دلیل پیچیده بودن و دشواری‌های فراوان مدل‌سازی پوشش تونل به صورت قطعه ای، از یک لوله‌ی آلومینیومی استوانه‌ای معادل و دارای مقطع عرضی یکنواخت برای مدل‌سازی استفاده نمودند. هدف آنها در آزمایش‌ها کمی کردن لنگرهای خمشی و تنش‌های ایجادشده در تونل واقعی تحت شرایط بارگذاری طراحی بود. لذا با فرض رفتار الاستیک خطی، رفتار الگوی شکست تونل مدل نشده است و شرایط غیر شکست باعث شده بود که آلومینیم بهترین انتخاب مصالح باشد.

کالفیلد و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۰۵ روش طراحی مقابله با پدیده‌ی گسلش بر روی تونل انتقال آب را شرح داد. در این روش قطر تونل در منطقه‌ی عبور از گسل به‌اندازه‌ای بزرگ طراحی گردید که در صورت وقوع گسلش لوله آب عبوری از این تونل تنها دچار چرخش مجاز شده و آسیب جدی به آن وارد نگردد.

یوهانسون و کوناگای [۲۹] در سال ۲۰۰۶ در مطالعه‌ی خود نتایج گسلش آزاد در خاک مرطوب و خشک و تأثیر آن در سازه‌های حفاری یا احداث شده در خاک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر افزایش عرض ناحیه‌ی متأثر شده از گسلش و کاهش طول فعال سازه‌ی مدفون (همچون تونل و لوله‌ها) و به تبع آن افزایش تغییر مکان سازه‌ها در خاک مرطوب نسبت به خاک خشک بود. در این حالت خسارات بیشتری به سازه‌ی زیرزمینی وارد می‌گردد. با این حال در این تحقیق هیچ سازه‌ی زیرزمینی و تونلی برای بررسی اثر گسلش مدل نگردید.

ماجننگ (Mathjabeng) در آفریقای جنوبی [۱۰]، تونل لانگچی (Longchi) در چین در زلزله‌ی ۲۰۰۸ ونچوان (Wenchuan) چین به همراه چند تونل دیگر در این زلزله [۱۱] اشاره نمود.



شکل (۴): نمایی از نحوه خرابی تونل شی گنگ در زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان [۶]

۴- تحقیقات قبلی در حوزه‌ی گسلش سطحی

مروری بر مطالعات قبلی در این حوزه نشان می‌دهد که تحقیقات نسبتاً وسیعی در این زمینه انجام شده است [۱۲-۲۶]. با این حال بخش نسبتاً کمی از این تحقیقات به بررسی اثر گسلش بر روی تونل‌ها پرداخته است. در ادامه سعی می‌شود مهم‌ترین تحقیق‌های انجام‌شده مرتبط با تونل به‌طور اجمال مورد بررسی قرار گیرد.

پژوهش انجام‌شده توسط بورلیج و همکاران در سال ۱۹۸۹ [۲۷] شاید اولین تحقیق مدونی باشد که در آن رفتار تونل‌ها در اثر عبور گسلش با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش با توجه به امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری آن زمان و در یک حوزه‌ی محدودتری صورت گرفته است. پژوهش مذکور با هدف بررسی اثرات گسل‌های واقع در مسیر تونل متروی شهر لس‌آنجلس انجام شده است. در این پژوهش سعی گردیده تغییر مکان‌ها و تنش‌های ایجادشده در اثر عبور گسل توسط آزمایش‌های صورت گرفته در سانتریفیوژ در طول محدودی از تونل مدل شده و اندازه‌گیری شود. سپس نتایج سانتریفیوژ جهت کالیبراسیون مدل یک‌بعدی المان محدود تونل برای بررسی اثرات اندرکنش تونل و خاک مورد استفاده قرار گرفته و مدل عددی

آنچه به‌وضوح از بررسی تحقیقات در زمینه‌ی گسلش و اثرات آن بر روی تونل‌ها می‌توان استنباط نمود این است که در مقایسه با سازه‌های رو زمینی تحقیقات کمتری بر روی این موضوع صورت گرفته است که این امر به علت دشواری مدل‌سازی فیزیکی تونل‌ها است. در این تحقیق سعی شده، پدیده‌ی گسلش زمین و تونل قطعه‌ای در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی مدل‌سازی شود. در این مقاله ضمن بیان جزئیات مدل‌سازی فیزیکی گسلش و تونل نتایج پنج آزمایش گسلش شیب‌لغز نرمال با تونل قطعه‌ای ارائه گردیده است. هدف اصلی از این مدل‌سازی درک و شناخت الگوهای خرابی ممکن بوده است. استخراج این الگوها به همراه مطالعه‌ی برخی پارامترهای تأثیرگذار از قبیل سربار تونل می‌تواند در درک و شناخت پدیده و طراحی پوشش قطعه‌ای مفید واقع شود. سعی بر آن بوده که قطر تونل مدل نزدیک به قطر متداول در تونل‌های دوقلوی مترو انتخاب گردد. لازم به ذکر است قطر اغلب تونل‌های مترو در ایران اعم از شهرهای تبریز، شیراز، اصفهان و اهواز حدود ۵ متر بوده و ضخامت سگمنت‌های پوشش آنها در حدود ۳۰ سانتی‌متر است.

۵- مدل‌سازی فیزیکی

رفتار خاک به‌شدت تابع تنش محصورکننده‌ی آن است. نکته‌ی مهم در مدل‌سازی ژئوتکنیکی یکسان نمودن تنش خاک در مدل و مقیاس واقعی است. مهم‌ترین هدف دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، برطرف نمودن ضعف مدل‌سازی در محیط‌های ۱g به دلیل کاهش تنش‌های محصورکننده در خاک است. به عبارتی در مدل‌سازی ۱g با کوچک ساختن مدل مورد مطالعه در آزمایشگاه به نسبت n برابر، تنش‌های همه‌جانبه نیز به همین نسبت کاهش می‌یابد. در مدل‌سازی با سانتریفیوژ ژئوتکنیکی این ضعف با وارد نمودن نیروی جانب مرکز در اثر چرخاندن نمونه‌ی مورد آزمایش حول یک محور ثابت جبران می‌گردد. لذا سرعت چرخش نمونه به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که شتاب وارد بر آن برابر با نسبت تشابه مدل بزرگ مقیاس به مدل کوچک مقیاس گردد.

تحقیق لین و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۰۷ بررسی اثرات گسلش بر تونل‌ها با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در محیط ۱g بوده است. راستای محور تونل موازی با محور گسلش در نظر گرفته شده بود. یکپارچه بودن پوشش تونل نیز از جمله دیگر ویژگی‌های این تحقیق است. علاوه بر مدل‌سازی فیزیکی، از مدل‌سازی عددی نیز برای بررسی این پدیده در تحقیق مذکور استفاده شده است. جزئیات نحوه‌ی مدل‌سازی فیزیکی تونل مورد نظر به‌طور کامل شرح داده نشده و مدل‌سازی تونل با پوشش یکپارچه در این حوزه در نظر گرفته شده است. با این حال در مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در این آزمایش رفتار درزا و اتصالات آن مدل گردیده است.

گرگور و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۰۷ به بررسی رفتار تونل دوقلوی راه در کالیفرنیا در اثر جابه‌جایی احتمالی گسل کورونادو با استفاده از روش عددی پرداختند. ایشان در این تحقیق اثر گسلش را بر این تونل دوقلو به دو صورت تونل حفاری شده و تونل ساخته شده با روش کند و پوش انجام دادند.

آناستوپولوس و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۰۸ در بخشی از تحقیق خود به تحلیل عددی اثر گسلش بر روی یک تونل مستغرق پرداختند. همچنین وی و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۰ رفتار تونل دوقلوی ساخته شده با روش کند و پوش در اثر زلزله را با مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند.

بررسی استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر در منطقه‌ی گسله توسط ونگ و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل عددی، کارایی این شیوه طراحی برای کاهش آسیب وارد به تونل در اثر گسلش مورد بررسی قرار گرفت.

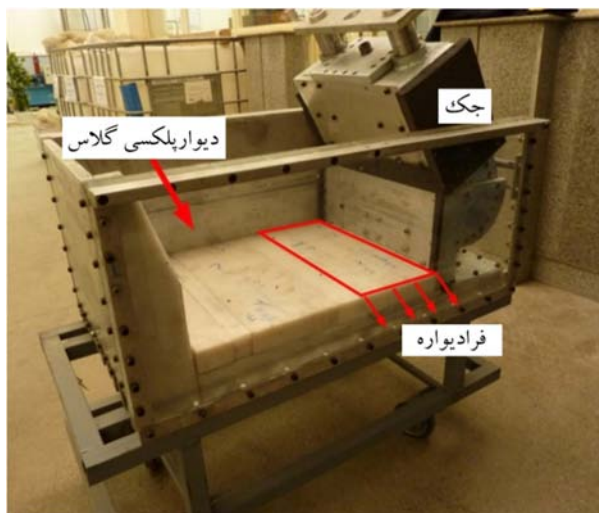
بازیار و همکاران [۳۵] نیز در سال ۲۰۱۴ با انجام چند آزمایش سانتریفیوژ به بررسی اندرکنش گسلش معکوس و تونل پرداخته‌اند. در این تحقیق همانند کار لین و همکاران [۳۰] محور تونل و محور گسل هم‌راستا است. در این تحقیق هدف بررسی مود خرابی نبوده و بیشتر بررسی تأثیر موقعیت قرارگیری تونل و سربار در روند توسعه گسلش معکوس با زاویه‌ی ۶۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۵].

۵-۱- سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

ناحیه‌ی فرادیواره را مهیا می‌سازد. این پیستون هیدرولیکی می‌تواند باری به‌اندازه‌ی ۲۰ تن و جابه‌جایی حداکثری برابر با ۵ سانتی‌متر در راستای قائم را به نمونه وارد نماید. کف این جعبه به‌گونه‌ای طراحی شده که در اثر اعمال گسلش معکوس و نرمال هیچ‌گونه فضایی برای خروج ماسه از جعبه ایجاد نگردد. جنس جعبه از فولاد و آلومینیم آلیاژی است و دارای ۷۰ سانتی‌متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض و ۴۰ سانتی‌متر عمق است، شکل (۷).

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران استفاده گردیده است. این دستگاه از نوع سانتریفیوژهای تیری با سبد معلق بوده و طول بازوی دستگاه ۳ متر می‌باشد. تصاویر این دستگاه در شکل (۵) ارائه شده است. این دستگاه قادر به اعمال شتابی بین ۵ تا ۱۳۰ برابر شتاب جاذبه زمین است.

۵-۲- جعبه شبیه‌ساز گسلش

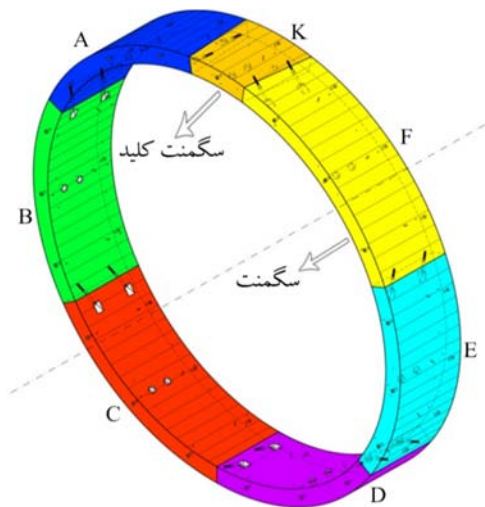


شکل (۶): جعبه‌ی شبیه‌ساز گسلش ساخته شده

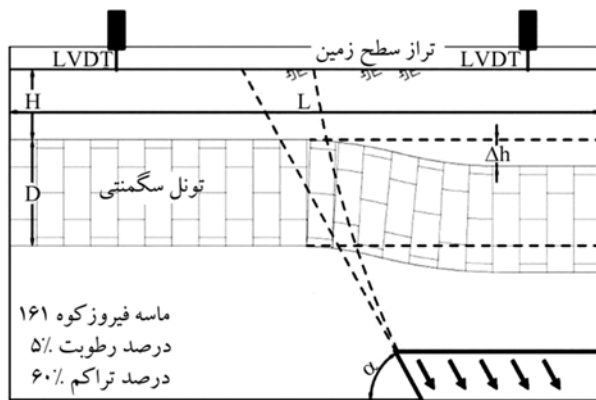
برای انجام هر مطالعه‌ای در سانتریفیوژ یک مخزن خاک ویژه نیاز است. جهت مدل‌سازی پدیده گسلش به یک جعبه شبیه‌ساز گسل نیاز است. این جعبه باید شامل خاک، سازه‌ی مورد مطالعه و سیستم اعمال جابه‌جایی باشد. برای انجام آزمایش‌های این تحقیق جعبه‌ی شبیه‌ساز ویژه‌ای طراحی و ساخته شد. نوع طراحی جعبه به‌گونه‌ای است که بتوان هر دو نوع گسلش شیب‌لغز (نرمال و معکوس) را در آزمایش‌ها اعمال نمود. برای رسیدن به این امر، مطابق شکل (۶) پیستون هیدرولیکی اعمال‌کننده‌ی جابه‌جایی در ضلع کناری جعبه قرار گرفته است. این طراحی امکان اعمال گسلش فقط از زیر مخزن و در



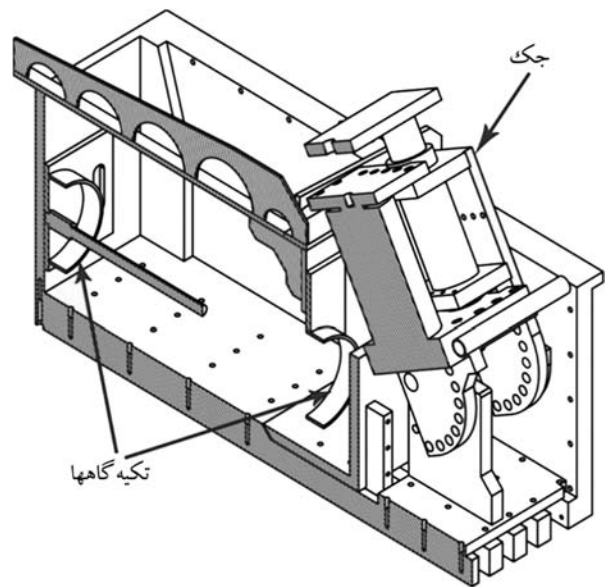
شکل (۵): تصاویر دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران



شکل (۸): نمایی از مقطع پوشش قطعه‌ای تونل خط ۷ متروی تهران



شکل (۹): تصویر شماتیک مدل و حسگرهای مورد استفاده در آزمایش



مقطع عرضی جعبه گسلش

شکل (۷): نمایی از جعبه‌ی شبیه‌ساز گسلش ساخته شده

برای یکی از دیواره‌های این جعبه از پلکسی گلاس (شیشه‌ای) استفاده شده تا بتوان تغییر شکل‌های رخ داده در اعماق مختلف در اثر گسلش را مشاهده نمود. همچنین در این جعبه مکان‌های ویژه‌ای برای قرارگیری دوربین‌های ویژه‌ی عکس‌برداری و سایر حسگرهای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها در سطح زمین تعبیه شده است [۱۲].

۳-۵- هندسه مدل

در این تحقیق برخلاف تحقیق لین و همکاران [۳۰] که محور تونل موازی با محور گسلش بوده است، محور تونل در این تحقیق عمود بر محور گسلش است؛ لذا لزوماً گسل تونل را قطع می‌کند. پوشش تونل مدل در این تحقیق از نوع قطعه‌ای (سگمنتال) انتخاب گردیده است. به عنوان مثال شکل (۸) مقطع و نمایی حلقه‌ی قطعه‌ای (رینگ سگمندی) خط ۷ متروی تهران را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است هر رینگ از شش سگمنت اصلی و یک سگمنت کلید تشکیل گردیده است. این قطعات با استفاده از اتصالات مناسب به هم متصل گردیده و پوشش نهایی تونل را تشکیل داده‌اند. تصویر شماتیک مدل مورد مطالعه در شکل (۹) ارائه شده است.

۴-۵- طراحی مدل

مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی فیزیکی، استفاده‌ی صحیح از قوانین مقیاس است. قوانین مقیاس روابط تشابه بین مدل و مقیاس واقعی را بیان می‌کند. روابط تشابه در مدل‌سازی فیزیکی در سانتریفیوژ در منابع معتبر ارائه شده است [۳۶]. از آنجایی که در تحقیق حاضر نسبت تشابه برابر با ۵۰g در نظر گرفته شده است، لذا شتاب وارد بر نمونه در دستگاه سانتریفیوژ نیز باید برابر ۵۰g باشد. نکته‌ی مهمی که برای مدل‌سازی پوشش تونل باید توجه نمود، نسبت سختی خمشی در واحد طول نمونه‌ی کوچک مقیاس با مقیاس واقعی است. این ضرایب در جدول (۱) ارائه شده است. این مسئله لزوم توجه به انتخاب مصالح مناسب برای پوشش تونل را در مدل کوچک مقیاس نشان می‌دهد.

جدول (۱): نسبت تشابه ابعادی در ساترفیوژ

پارامتر	نسبت تشابه	میزان تشابه
طول	N	۵۰
چگالی	۱	۱
کرنش	۱	۱
جابه جایی	N	۵۰
سختی خمشی	N ^۴	۵۰ ^۴

جدول (۲): روابط تشابه ابعادی مدل سازی تحقیق

پارامتر	نسبت تشابه	میزان تشابه	مدل کوچک مقیاس (سانتی متر)	مدل واقعی (متر)
ابعاد محیط خاکی	N	۵۰	۷۰*۴۰*۴۰	۳۵*۲۰*۲۰
طول تونل مدل	N	۵۰	۷۰	۳۵
قطر خارجی	N	۵۰	۱۱/۸	۵/۶
قطر داخلی	N	۵۰	۱۰	۵
ضخامت سگمنت	N	۵۰	۰/۹	۰/۳۰
عرض سگمنت ها	N	۵۰	۲/۳	۱/۱۵
اتصالات سگمنت	N	۵۰	۰/۸	۰/۴۰

کاهش ابعاد هندسی مدل واقعی، لزوماً امکان مدل سازی را مهیا نمی سازد؛ لذا می توان با تغییر جنس مصالح مدل، مدل سازی منطبق با قوانین مقیاس را انجام داد. در خصوص انتخاب مصالح مناسب برای مدل سازی پوشش قطعه ای، بدیهی است در صورتی که از مصالح مشابه پروتوتیپ برای مدل سازی استفاده می شد ضخامت پوشش تونل نیز بر اساس شتاب مورد نظر برای آزمایش، کوچک تر محاسبه می گردید. لذا امکان ساخت قطعات بتنی کوچک مقیاس (سگمنت) در ابعاد کوچک تر مهیا نبود، با بررسی های صورت گرفته لوله آزیست-سیمانی مورد استفاده قرار گرفت. این لوله ها مدول الاستیسیته ای حدود ۲۰ گیگاپاسکال دارد مدول الاستیسیته بتن مسلح مورد استفاده در سگمنت ها حدود ۳۴ گیگاپاسکال می باشد. ضخامت سگمنت های پروتوتیپ ۳۰ سانتی متر لحاظ گردیده است و با در نظر گرفتن تفاوت مدول الاستیسیته مصالح مدل و پروتوتیپ و با استفاده از روابط تشابه ضخامت سگمنت های مدل حدود ۹ میلی متر برآورد شده است.

۵-۵- ساخت مدل فیزیکی

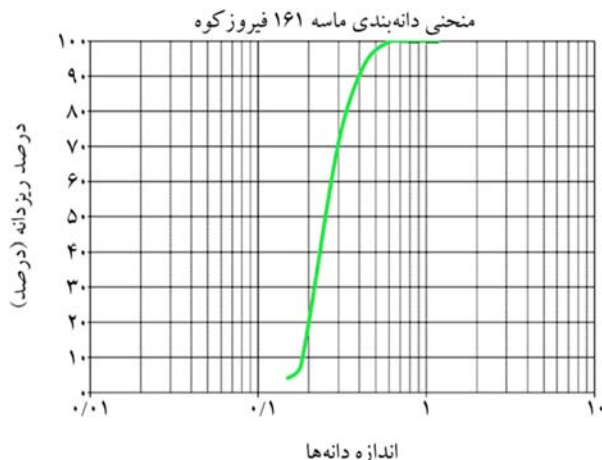
ماسه های تمیز با D_{50} کمتر از ۰/۳ میلی متر در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال ماسه ی تویورا در ژاپن و ماسه ی نوادا در آمریکا بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. در ایران ماسه ی فیروز کوه شماره ۱۶۱ که به لحاظ دانه بندی و مشخصات دیگر، شباهت بسیاری به ماسه های نام برده دارد با توجه به معرفی این ماسه توسط آزمایشگاه خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، امروزه تقریباً در بسیاری از مطالعات مشابه در ایران مورد استفاده قرار می گیرد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این ماسه در جدول (۳) ذکر گردیده است. همچنین منحنی دانه بندی آن نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۳): مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه مورد استفاده

نام ماسه	ماسه ۱۶۱ فیروز کوه
G_s	۲/۶۵۸
e_{max}	۰/۸۷۴
e_{min}	۰/۵۴۸
$D_{50}(mm)$	۰/۲۷۰
%FC	صفر
Φ	۳۷ درجه
C	صفر

به علت اعمال مرحله ای جابه جایی گسل و سرعت اندک آن اثرات اینرسی می تواند قابل چشم پوشی باشد. جزییات ابعاد و مصالح استفاده شده برای پوشش تونل در بخش ساخت مدل ارائه شده است. جدول (۲) جزییات مدل و معادل واقعی آن در تحقیق حاضر را نشان می دهد. با توجه به محدودیت ابعاد مخزن برای مدل سازی طول تونل، از تکیه گاه های ویژه ای استفاده شده که تأثیر طول محدود تونل در مدل به حداقل برسد.

تراشکاری از ضخامت لوله‌ها کاسته شده و با برشکاری و سوراخ کاری به شش قطعه (سگمنت) جهت ایجاد حلقه‌های تونل مدل تبدیل گردید. در شکل (۱۱) مراحل تراشکاری، برشکاری، سوراخ کاری و مونتاژ تونل مدل ارائه شده است. برای تمامی آزمایش‌ها از خاک با تراکم ۶۰ درصد استفاده شده است. روش ساخت مدل، استفاده از روش تراکم مرطوب است. در این روش به ماسه‌ی خشک به میزان ۵٪ آب اضافه گردیده و با مخلوط کردن آن حاکی مرطوب و همگن به دست می‌آید. در تحقیق حاضر خاک در لایه‌های ۳ سانتی متری ریخته و به وسیله‌ی کوبه ساخته شده به صورت کاملاً همگن در طول مخزن خاک کوبیده می‌شود که تعداد کوبش برای رسیدن به تراکم مورد نظر در آزمایش‌های پایلوت به دست آمده‌اند. با انجام خاکریزی تا تراز محور تونل، عملیات خاکریزی متوقف شده و تونل درون خاک قرار می‌گیرد، شکل (۱۲). پس از قرار دادن تونل، خاکریزی تا تراز مورد نظر برای سطح زمین همچون گذشته ادامه پیدا می‌کند.



شکل (۱۰): منحنی دانه‌بندی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروز کوه

همان‌گونه که بیان شد برای مدل‌سازی تونل از لوله‌های آریست-سیمانی از نوع تحت فشار استفاده گردید. این لوله‌ها طبق استانداردهای ملی و بین‌المللی در کارخانه‌های مختلف تولید می‌شوند. این موضوع باعث اطمینان از یکنواختی مصالح مورد استفاده گردید. ضخامت تعیین شده بر اساس روابط تشابه برای تونل مدل، کمتر از ضخامت لوله‌های تولیدی بود؛ لذا با انجام عملیات



شکل (۱۱): تصاویری از ساخت تونل مدل قطعه‌ای از لوله آریست سیمانی

تصویربرداری می‌شود. سپس دوباره جابه‌جایی اعمال و تمامی مراحل مجدد تکرار می‌شود. این مراحل آنقدر انجام می‌شود تا جابه‌جایی حداکثر برنامه‌ریزی شده به نمونه وارد شود. در تمام این مراحل حسگرهای جابه‌جایی سنج سطح زمین و داخل تونل در حال ثبت و ذخیره‌ی اطلاعات می‌باشند. در نهایت پس از خارج نمودن مخزن خاک از درون سبد سانتریفیوژ با دقت بسیار بالا برش‌های طولی در خاک انجام شده تا بتوان نحوه‌ی جابه‌جایی ایجاد شده و عملکرد پوشش در مقابل گسلش را مشاهده نمود.



شکل (۱۲): قرار دادن تونل در مدل ساخته شده

۵-۶- ابزارگذاری

با توجه به اینکه بررسی رفتار تغییر شکلی مقطع تونل، الگوهای تغییر شکل طولی تونل، تعیین الگوی شکست و جابه‌جایی‌های سطحی رخ داده در اثر گسلش، جزو اصلی‌ترین هدف‌های این تحقیق است، لذا از سنسورهای جابه‌جایی در این تحقیق استفاده شده که در شکل (۹) محل قرارگیری آنها نشان داده شده است. یکی از حسگرهای استفاده شده حسگر تغییر مکان سنج (LVDT) برای سنجش جابه‌جایی قائم سطح زمین در طول تونل است که با توجه به آزمایش، یک یا دو عدد از آنها مورد استفاده قرار گرفته است. این حسگرها میزان جابه‌جایی اختلافی قائم دو صفحه گسل که به سطح زمین رسیده را اندازه می‌گیرند.

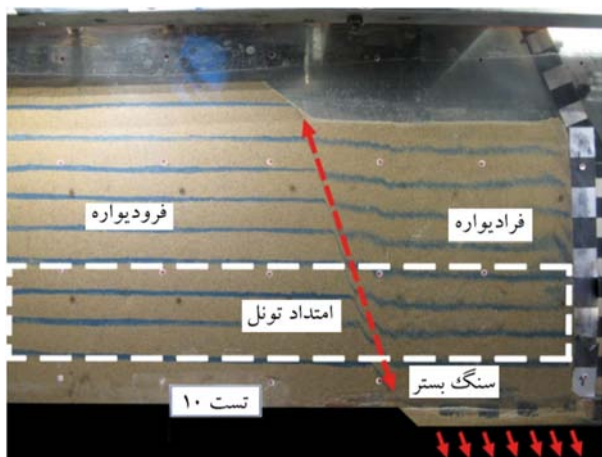
برای مشاهده‌ی کیفی تغییر شکل داخل تونل و همچنین مشاهده‌ی شکست‌های رخ داده و یا هرگونه پدیده‌ی دیگر در داخل تونل، از یک دستگاه دوربین فیلم‌برداری با کیفیت بالا استفاده گردید که در یکی از نقاط انتهایی تونل تعبیه شد.

همچنین برای مشاهده‌ی نحوه‌ی توسعه‌ی گسلش درون خاک و مشاهده‌ی جابه‌جایی‌های سطح زمین، در بیرون از مخزن خاک محل ویژه‌ای برای نصب دوربین عکاسی تعبیه شده که می‌تواند از دیواره‌ی پلکسی گلاس تصاویر مناسبی تهیه نماید. برای این که مشاهده‌ی تغییر شکل‌ها درون خاک راحت‌تر صورت پذیرد، از لایه‌های ماسه‌ی رنگی به صورت افقی و به فواصل شش سانتی‌متر از هم استفاده گردیده است. این لایه‌ها موضعی شدن کرنش و همچنین مسیر عبور گسل را به راحتی

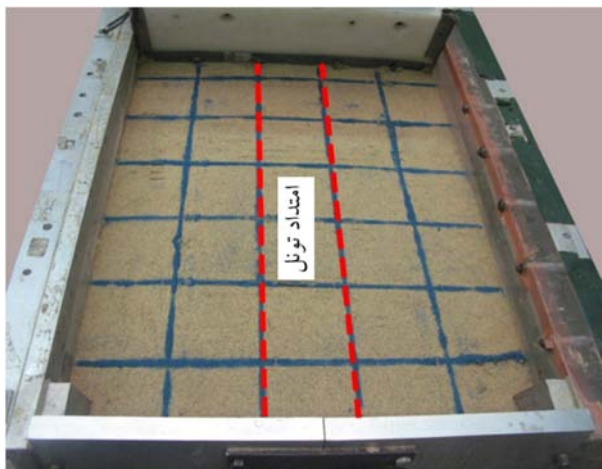
لزوم کنترل عملکرد حسگرهای داخل تونل و همچنین دوربین فیلم‌برداری داخل آن اهمیت فراوانی دارد زیرا پس از خاکریزی دیگر هیچ‌گونه دسترسی به داخل تونل وجود ندارد. به ازای هر دو لایه خاکریزی، در بخش متصل به دیواره‌ی پلکسی گلاس، از ماسه‌ی رنگی استفاده می‌شود تا بتوان نحوه‌ی توسعه‌ی گسلش را در حین آزمایش و پس از آن راحت‌تر مشاهده نمود.

پس از ساخت مدل در مخزن گسلش، جابه‌جایی‌سنج‌های سطح خاک در محل موردنظر نصب و صحت عملکرد آنها کنترل می‌شود. دوربین عکاسی برای ثبت مراحل مختلف گسلش در محلی در جلوی دیوار پلکسی گلاس نصب می‌گردد. کنترل‌های نهایی همچون درست عمل کردن حسگرها، دوربین عکاسی بیرون مخزن خاک و دوربین فیلم‌برداری داخل تونل و سیستم اعمال نیروی هیدرولیکی جک گسلش انجام می‌پذیرد. پس از این مرحله، مخزن خاک درون سبد سانتریفیوژ قرار می‌گیرد. با رساندن شتاب دستگاه به ۵۰g، مرحله‌ی نهایی آزمایش یعنی اعمال گسلش، فرا می‌رسد. با توجه به اینکه جابه‌جایی‌های عمالی به صورت شبه استاتیک به مدل وارد می‌شود، جابه‌جایی از طریق فرمان‌دهنده‌هایی به صورت پله‌ای به نمونه وارد می‌شود به طوری که در هر مرحله، جک هیدرولیکی جابه‌جایی را در راستای گسلش به نمونه وارد می‌کند. پس از اعمال هر پله جابه‌جایی، با استفاده از سیستم‌های کنترل از راه دور که بر روی دوربین عکاسی نصب گردیده از نحوه‌ی توسعه گسلش در بخش دیواره‌ی پلکسی گلاس

واقعیت بوده است. لازم به ذکر است که مقادیر اندازه‌گیری شده در واقعیت از ضربه نسبت تشابه در میزان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده به دست آمده است. جابه‌جایی‌های عملی در چند مرحله و با فرض رفتار شبه‌استاتیکی به نمونه وارد گردید، به طوری که سرعت جابه‌جایی دو سطح گسل در پله‌های بارگذاری بین ۰/۳۷ تا ۰/۴۵ متر بر ثانیه محاسبه شد. شکل (۱۳) نمای جانبی مدل آماده‌شده پس از اعمال گسلش را نشان می‌دهد. در این تصویر محدوده‌ی توسعه‌ی گسلش و موقعیت قرارگیری تونل و پروفیل تغییر یافته نهایی سطح زمین نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۴) نمایی از سطح مدل قبل از آزمایش و در شکل (۱۵) پس از آزمایش ارائه شده است.



شکل (۱۳): نمایی از مدل گسلش و محدوده‌ی توسعه‌ی گسل در اندرکنش با تونل



شکل (۱۴): نمایی از سطح زمین مدل قبل از آزمایش

نمایان می‌کند. دوربین عکاسی کانن G7 با کیفیت تصاویر ۱۰ مگا پیکسل برای این امر مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به استفاده از قطعات الکترونیکی در دوربین‌ها، بسیاری از آنها در شتاب‌های بالاتر از ۱۰g کارکرد خود را از دست داده و تنها دوربین‌های خاصی برای عکس‌برداری در چنین شرایطی مناسب هستند. دوربین فوق‌پس از جستجوهای جامع انتخاب و مورد آزمایش قرار گرفته و پس از اطمینان از عملکرد در آزمایش‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۷- برنامه آزمایش‌ها

این مقاله بر اساس نتایج حاصل از پنج آزمایش سانتریفیوژ در گسلش نرمال ارائه گردیده است. یکی از اهداف اصلی تحقیق معرفی روش مدل‌سازی تونل قطعه‌ای در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی است. لذا برای آزمایش‌های اولیه جهت اطمینان از مدل‌سازی صحیح و تکرارپذیر بودن نتایج حاصل، آزمایش مجدد با شرایط مشابه صورت گرفته است. در این آزمایش‌ها از سربارهای مختلف ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲ برابر قطر خارجی تونل در زاویه‌ی گسلش ۶۰ درجه استفاده گردید. دو آزمایش برای کنترل تکرارپذیری آزمایش‌ها (آزمایش شماره ۹ و ۷) انجام گردید. در جدول (۴) مشخصات کامل آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول (۴): برنامه‌ی آزمایش‌ها

شماره آزمایش	۱۰ و ۹	۳۲ و ۷	۱۷
نسبت ارتفاع سربار به قطر	۰/۷۵	۱	۱/۲

۶- شرح نتایج آزمایش‌ها

۶-۱- آزمایش گسلش ۶۰ درجه با نسبت سربار ۰/۷۵D

در گسلش نرمال با زاویه‌ی ۶۰ درجه و نسبت سربار ۰/۷۵D دو آزمایش به شماره‌های ۹ و ۱۰ صورت پذیرفت. هر دو آزمایش دارای شرایط یکسانی در هندسه و ساخت نمونه بودند که داده‌های حاصل از این آزمایش‌ها برای بررسی تکرارپذیری آن مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش شماره ۱۰ میزان جابه‌جایی حداکثر وارده به تونل در راستای گسل ۲/۵ متر در

خرابی نهایی تونل در این آزمایش در جابه‌جایی قائم اعمال شده ۰/۷ متر به وقوع پیوست. همچنین در اثر هجوم خاک به درون تونل، مسدود شدن کامل آن اتفاق افتاده است. همانند آزمایش قبلی فروچاله در سطح زمین ایجاد گردید با این تفاوت که ابعاد آن از آزمایش با سربار ۰/۷۵D کوچک‌تر بود. بازشدگی حلقه‌های بحرانی سگمنت نیز در این آزمایش رخ داده که بیش‌ترین مقدار آن ۱۱۵ سانتی‌متر است. این جداسازی در سگمنت‌های بحرانی در تاج و در سگمنت‌های کناری بیشتر در کف تونل رخ می‌دهد که باعث ایجاد منحنی S مانند می‌گردد. همچنین بیضی‌شدگی در مقطع تونل همانند آزمایش قبلی اتفاق افتاده است. شکستگی‌هایی در محل اتصالات سگمنت‌ها مشاهده گردید. در سگمنت‌های بحرانی به دلیل ماهیت کششی پدیده، اتصالات از محل خود خارج شدند. در این آزمایش تغییر شکل‌ها در پوشش تونل با افزایش مقدار جابه‌جایی گسل افزایش یافته و در جابه‌جایی اعمال شده ۷۰ سانتی‌متر ریزش خاک به داخل تونل آغاز گردیده است.

۶-۳- آزمایش گسلش ۶۰ درجه با نسبت سربار ۱/۲D

نسبت سربار مورد استفاده برای این آزمایش بیش‌ترین نسبت سرباری است که با توجه به قطر تونل و ابعاد مخزن گسلش دستگاه سانتریفیوژ می‌توان مورد آزمایش قرارداد. ریزش کلی تونل در جابه‌جایی قائم ۸۰ سانتی‌متر در تونل رخ داد. چاله‌ی ایجاد شده در سطح زمین در اثر جدایش حلقه‌های سگمنت و ورود خاک به درون تونل به شکل بیضی بوده که در راستای محور تونل اندکی بیشتر توسعه یافته است. دو شکستگی مشخص در سطح زمین مشاهده می‌شود که یکی از آنها خط گسلش اصلی و دیگری ثانویه است. با توجه به سربار بیشتر، ورود خاک به درون تونل باعث انسداد کامل آن شده است.

مود خرابی مشاهده شده در این آزمایش نیز مشابه سایر آزمایش‌ها بوده با این تفاوت که خرابی‌ها در طول کمتری از تونل متمرکز شده، در نتیجه مقدار خرابی‌ها شدیدتر رخ داده است؛ به طوری که دو حلقه‌ی بحرانی از بخش‌های دیگر به‌طور



شکل (۱۵): سطح زمین مدل پس از آزمایش و فروچاله‌ی ایجاد شده

در این آزمایش با توجه به موقعیت قرارگیری تونل در جعبه‌ی شبیه‌ساز گسل و روباره‌ی آن (۰/۷۵D) مقدار نشست در راستای قائم در تراز سطح زمین حدود ۱۵ درصد کمتر از مقدار نشست اعمالی توسط جعبه‌ی شبیه‌ساز گسلش است.

توجه: اعداد در این بخش در مقیاس پروتوتیپ ذکر شده‌اند.

با اعمال گسلش به مدل، تغییر شکل‌های موضعی در پوشش تونل بیشتر شده به طوری که در جابه‌جایی قائم حدود ۵۰ سانتی‌متر اتصال بین حلقه‌های بحرانی (رینگهای بحرانی) از هم گسیخته و با ایجاد فاصله در دو حلقه، خاک به داخل آن هجوم آورده و باعث مسدود شدن تونل گردید. منظور از حلقه‌های بحرانی، حلقه‌های قطعه‌ای است که در اندرکنش با محدوده‌ی توسعه‌ی گسلش در خاک قرار گرفته‌اند و تغییر شکل‌ها و آسیب‌های اصلی به آن وارد می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به‌طور معمول دو و یا حداکثر ۳ حلقه سگمنت را می‌توان به‌عنوان سگمنت‌های بحرانی در نظر گرفت. این در حالی است که حلقه‌های سگمنتی در مجاورت آنها نیز دچار تغییر شکل و یا آسیب شده اما نسبت آسیب و تغییر شکل آنها به مراتب کمتر است.

۶-۲- آزمایش گسلش ۶۰ درجه با نسبت سربار ۱D

در این آزمایش تونل سرباری به‌اندازه‌ی قطر خود را تحمل نموده و توسعه‌ی گسل با زاویه‌ی ۶۰ درجه به آن وارد می‌شود.

پوشش تونل در فرادیواره‌ی^۲ گسل دچار جدایش گردیده‌اند. البته محل این جدایش همانند حلقه‌ی بحرانی در تاج نبوده و در کف تونل رخ داده است. لذا پروفیل تونل شکل S مانند به خود گرفته است. همچنین هیچ‌گونه خرابی و جداشدگی در سگمنت‌های واقع در بخش فرودیواره^۳ مشاهده نمی‌شود و این در حالی است که حلقه‌های بخش فرادیواره دچار آسیب‌های به‌مراتب سنگین‌تری شده‌اند.

بیشترین بازشدگی حلقه‌های سگمنت نسبت به یکدیگر در تاج تونل رخ داده است که مقدار آن برای تمامی آزمایش‌ها ۱۱۵ سانتی‌متر در پروتوتیپ بوده است.

نکته‌ی دیگر اینکه بیش‌ترین آسیب در حلقه‌های قطعه‌ای مربوط به حلقه‌هایی بوده است که باند برشی ناشی از توسعه گسل در خاک با تونل برخورد کرده است که باعث ایجاد تغییر شکل‌های شدید در مقطع تونل شده است. از طرف دیگر این تغییر شکل‌های طولی عملاً به حلقه‌های واقع در فرودیواره‌ی گسل منتقل نشده ولی حلقه‌های سگمنت واقع در فرودیواره دچار تغییر شکل‌هایی هرچند اندک شده‌اند.

۲-۲- بررسی تغییر شکل در مقطع تونل

با بررسی حلقه‌های قطعه‌ای که در محدوده‌ی گسلش قرار گرفته‌اند، مشاهده شد بیضی‌شدگی دائمی در حلقه‌های مزبور رخ داده است. این بیضی‌شدگی با کاهش ارتفاع مقطع تونل و افزایش عرض آن همراه بوده است. این موضوع به‌وضوح در شکل (۱۷) ارائه گردیده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد به لحاظ عملکردی، انرژی گسلش در سازه‌ی تونل با تغییر شکل بسیار زیاد

کامل جدا شده‌اند. این جدایش به‌گونه‌ای است که آسیب خاصی به سازه‌ی سگمنت‌ها وارد نشده و تنها جدایش اتصالات آنها به‌وضوح مشاهده می‌شود.

۷- تشریح نتایج

۱-۷- بررسی الگوی خرابی طولی تونل

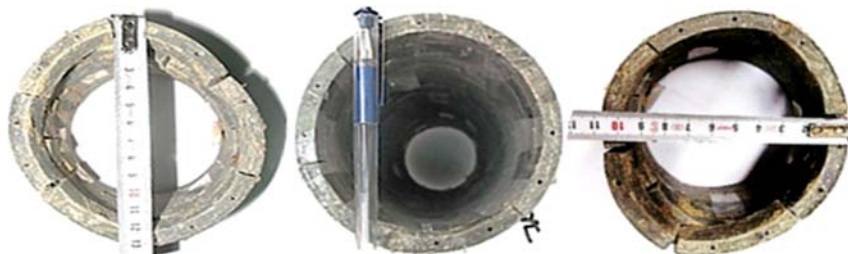
یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین نتایجی که از آزمایش‌های گسلش بر روی تونل قطعه‌ای می‌توان دریافت، شناخت الگوهای خرابی در چنین تونل‌هایی است. با به دست آوردن الگوهای خرابی می‌توان نقاط حساس و آسیب‌پذیر را در چنین تونل‌هایی را تعیین کرده و در صورت نیاز برای مقابله و کاهش خسارات وارده بر آنها، روشهای طراحی را به‌روز نمود. شکل (۱۶) نمایی از نحوه‌ی تغییر شکل طولی تونل در اثر اعمال گسلش نرمال را نشان می‌دهد.



تست ۱۷، $H=1/2D$

شکل (۱۶): الگوی خرابی طولی تونل و محدوده‌ی تأثیر گسلش نرمال

با توجه به ماهیت کششی گسلش نرمال، بازشدگی سگمنت در تاج تونل و در محل برخورد با گسل به‌وضوح مشاهده می‌شود. همچنین علاوه بر حلقه‌های بحرانی، حلقه‌های دیگری نیز از



شکل (۱۷): بیضی‌شدگی در مقطع تالافی تونل و گسل بعد از اعمال گسلش نرمال

حلقه‌ها نسبت به یکدیگر و سگمنت‌های درون هر حلقه توسط تونل جذب گردیده است. این مسئله خود را در کاهش تعداد خرابی‌های سگمنت نشان می‌دهد. عمده‌ی خرابی‌ها در سگمنت‌ها مربوط به محل اتصالات است که دلیل آن تمرکز تنش ناشی از وجود اتصالات می‌باشد. این حلقه‌های قطعه‌ای در محدوده‌ای آسیب دیدند که باند برشی ناشی از توسعه‌ی گسل با سازی تونل تلاقی داشته است.

۳-۷- بررسی اثر سربار بر الگوی طولی خرابی تونل

با بررسی مقاطع طولی تونل، در آزمایش‌های مختلف می‌توان چنین تحلیل نمود که با افزایش سربار، گسلش در محل تقاطع گسل و تونل متمرکز گردیده و مود خرابی تونل متفاوت شده است. به‌طور کلی با افزایش سربار تعداد حلقه‌های کمتری از تونل درگیر گسلش شده‌اند. در این راستا پارامتری به‌عنوان نسبت طول متأثر تونل از گسلش به قطر خارجی تونل (L_e) تعریف گردید و مقادیر این پارامتر در آزمایش‌های مختلف در جدول (۵) ارائه گردیده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش سربار مقدار L_e کاهش پیدا نموده که این موضوع ناشی از موضعی شدن بیشتر کرنش برشی در این آزمایش‌ها می‌باشد. همین امر باعث افزایش شدت خرابی در سگمنت‌های بحرانی گردیده است.

جدول (۵): مقادیر L_e برای آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نسبت سربار	L_e
۱۰	۰/۷۵	۱/۶D
۳۲	۱	۱/۳۶D
۱۷	۱/۲	۱/۱۷D

۴-۷- بررسی اثر سربار بر خرابی کامل تونل

از آنجایی که در این آزمایش‌ها جابه‌جایی‌های وارد شده به تونل به‌اندازه‌ای بوده که خرابی کلی در آن، که به‌صورت ریزش خاک به درون تونل بوده، رخ دهد؛ لذا لحظه‌ی ورود خاک به درون تونل می‌تواند به‌عنوان یک مرجع قابل مقایسه از رفتار آن در مقابل گسلش بیان شود. جدول (۶) مقدار جابه‌جایی قائم را که در آن

جدول (۶): مقادیر جابه‌جایی قائم منجر به فروریزش در تونل

شماره آزمایش	نسبت سربار	PGD_f
۱۰	۰/۷۵	۰/۵
۳۲	۱	۰/۷
۱۷	۱/۲	۰/۸

۵-۷- بررسی چاله‌های سطح زمین

همان‌طور که در شکل (۱۸) مشخص است، پس از اعمال گسلش نهایی و خرابی در پوشش تونل، ریزش ماسه به درون



شکل (۱۸): چاله‌های ایجادشده در سطح زمین در آزمایش‌های مختلف

۱. قطر در مقطع تونل و نهایتاً خرابی در پوشش تونل و ریزش خاک داخل آن اتفاق می‌افتد.

۲. نتایج آزمایش‌ها با سربارهای مختلف نشان داد که پوشش قطعه‌ای نشان داد که پوشش قطعه‌ای تونل توانایی تحمل بخشی از گسلش را بدون خرابی و ریزش به درون تونل دارد. با افزایش سربار تونل، آستانه تحمل تونل در مقابل ریزش خاک به داخل تونل در اثر گسلش افزایش می‌یابد. این آستانه تحمل پوشش تونل (PGD) با افزایش سربار از $0.75D$ تا $1.2D$ از 0.5 متر تا 0.8 متر افزایش یافته است.

۳. با افزایش سربار تونل خمیدگی طولی تونل، که با پارامتر e مشخص گردیده است، از مقدار $1/6D$ تا $1/17D$ کاهش یافته است. عبارتی با افزایش سربار تونل تغییر شکل طولی تونل ناشی از نیروی گسلش در طول کوچکتری از تونل متمرکز شده است.

۴. با وجود اعمال گسلش با میزان جابه‌جایی زیاد، آسیب‌های سازه‌ای در سگمنت‌ها به دلیل عملکرد مناسب هندسی سگمنت‌ها و اتصالات آنها بسیار اندک بوده و تنها در محل اتصالات آسیب‌هایی موضعی مشاهده گردیده است.

۵. فروچاله ناشی از ریزش خاک به درون تونل محتمل است. ابعاد فروچاله با افزایش سربار تونل کاهش می‌یابد. لذا تهدیدهای ناشی از آن بر سازه‌های روزمینی در اطراف مسیر تونل باید توجه ویژه لحاظ گردد.

۶. عمده خرابی‌های ایجادشده و همچنین ریزش خاک به درون تونل ناشی از بازشدگی حلقه‌های سگمنت از محل اتصالات

تونل اتفاق می‌افتد که این موضوع با توجه به سطحی بودن تونل‌های مورد مطالعه تا سطح زمین ادامه می‌یابد و باعث ایجاد فروچاله در سطح زمین می‌گردد. با افزایش سربار تونل در آزمایش‌های مختلف ابعاد فروچاله‌ی ایجادشده در سطح زمین کاهش پیدا کرده است. تحلیل این موضوع می‌تواند برای جانمایی بهتر سازه‌های مهم در محل احتمالی تقاطع گسل و تونل‌های شهری مفید واقع شود. ابعاد چاله‌ی ایجادشده در این آزمایش‌ها نشان می‌دهد سازه‌های مجاور سطحی می‌تواند دچار خسارت‌های شدید در اثر این پدیده قرار گیرد. این مسئله برای سازه‌های بلندتر می‌تواند از اهمیت بیش‌تری برخوردار باشد. وجود چنین پدیده‌ای نشان می‌دهد خرابی‌های تونل در اثر گسلش می‌تواند محدود به خود سازه‌ی تونل نبوده و سازه‌های روزمینی را نیز تهدید نماید.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش مدل‌سازی گسلش نرمال و تونل قطعه‌ای حفرشده در خاک با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ با موفقیت آزمایش و ارائه گردید. با در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده در بخش مدل‌سازی شامل محدودیت طول مدل، زوایای مختلف گسل، سربار تونل، نوع خاک و شرایط ساخت مدل می‌توان نتایج ذیل را به‌عنوان عمده نتایج حاصل از این تحقیق بیان نمود.

۱. بر اساس نتایج حاصل خرابی محتمل تونل‌های قطعه‌ای مشاهده شدند. خرابی‌های مشاهده‌شده تابع میزان جابه‌جایی گسل است که با افزایش جابه‌جایی به صورت مرحله‌ای تغییر

7. Konagai, K. and Hori, M. (2006) *Key Points for Rational Design for Civil-Infrastructures near Seismic Faults Reflecting Soil-Structure Interaction Features*. Report of JSPS Research Project.
8. Prentice, C. and Ponti, D. (1997) Coseismic deformation of the Wrights tunnel during the 1906 San Francisco earthquake: A key to understanding 1906 fault slip and 1989 surface ruptures in the southern Santa Cruz Mountains, California. *Journal of Geophysical Research*, **102**(B1), 635-648.
9. Kontogianni, V. and Stiros, S. (2003) Earthquakes and seismic faulting: effects on tunnels. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **12**, 153-156.
10. Bäckblom, G., Munier, G., and Hökmark, H. (2004) Earthquake data and modelling to study the effects of future earthquakes on a final repository of spent nuclear fuel in Sweden. *World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.
11. Wang, Z.Z., Gao, B., Jiang, Y., and Yuan, S. (2009) Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake. *Science in China Series E: Technological Sciences*, **52**(2), 546-558.
12. Kiani, M., Akhlaghi, T., and Ghalandarzadeh, A. (2016) Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**, 108-116.
13. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M., and Shafiee, A. (2010) Experimental investigation of reverse fault rupture-rigid shallow foundation interaction. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(2), 85-98.
14. Bray, J., Seed, R., Ciuff, L., and Seed, H. (1994) Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 543-561.
15. Pamuk, A., Kalkan, E., and Ling, H. (2005) Structural and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 581-589.

آنها بوده که به علت غالب بودن نیروهای کششی ناشی از گسلش نرمال هست. بر این اساس می توان توصیه نمود که در فلسفه طراحی اتصالات به این نقش از اتصالات نیز توجه کافی صورت پذیرد.

تشکر و قدردانی

از گروه تخصصی قائم به جهت حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی می گردد. از آقایان مهندس احمدی، سلیمی، هدایتی و مهدوی بابت مساعدت در انجام آزمایشها و تدوین مقاله تشکر و قدردانی می گردد.

مراجع

1. Loukidis, D., Bouckovalas, G., and Papadimitriou, A. (2009) Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**, 1389-1404.
2. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007) Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bull. Earthquake Engineering*, **5**(3), 253-275.
3. Kiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Akhlaghi, T. (2013) Physical modelling of segmental tunnel interaction with 60° normal fault in geotechnical centrifuge. *10th Iranian Tunelling Conference*, Tehran, Iran.
4. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., and Yao, J.I.C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Tunneling and Underground Space Technology*, **16**(4), 247-293.
5. Sugimura, Y. Miura, S., and Konagai, K. (2001) Damage to shihkang dam inflicted by faulting in the september 1999 Chi-Chi earthquake. In *Seismic Fault Induced Failures*.
6. Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R., and Huang, T.H. (2001) Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **16**(3), 133-150.

- protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, (12), 473-486.
26. Rojhani, M., Moradi, M., Galandarzadeh, A., and Takada, S. (2012) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**, 659-670.
27. Burridge, P., Scott, R., and Hall, J. (1989) Centrifuge study of faulting effect on tunnel. *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**(10), 949-967.
28. Caulfield, R., Kieffer, D., Tsztoo, D., and Cain, B. (2005) Seismic design measures for the retrofit of the claremont tunnel. *In RETC Proceedings*.
29. Johansson, J. and Konagai, K. (2006) Fault induced permanent ground deformations-an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**, 45-53.
30. Lin, M., Chung, C., Jeng, F., and Yao, T. (2007) The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*.
31. Gregor, T., Garrod, B., and Young, D. (2007) Analyses of underground structures crossing an active fault in Coronado, California. *In Underground Space—the 4th Dimension of Metropolises*.
32. Anastasopoulos, I., Gerolymos, N., Drosos, V., Georgarakos, T., Kourkoulis, R., and Gazetas, G. (2008) Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking. *Bull. Earthquake Engineering*.
33. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2010) Analysis of cut-and-cover tunnels against large tectonic. *Bull. Earthquake Engineering*, (8), 283-307.
34. Wang, Z., Zhang, Z., and Gao, B. (2012) The seismic behavior of the tunnel across active fault. *in WCEE2012*.
35. Baziar, M., Nabizadeh, A., Lee, C., and Hung, W.
16. Anastasopoulos, I., Gazetas, M.G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., and Nahas, A.El. (2007) Fault rupture propagation through sand: finite-element. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
17. Lin, M., Chung, C., and Jeng, F. (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Engineering Geology*, **88**, 70-89.
18. Ng, C.W.W., Cai, Q.P., and Hu, P. (2012) Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(12), 1492-1502.
19. Oettle, N. and Bray, J. (2013) Fault rupture propagation through previously ruptured soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(10), 1637-1647.
20. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., Nahas, A.El., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A., and Rossignol, E. (2008) Numerical analyses of fault–foundation interaction, *Bull. Earthquake Eng.*
21. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007) Foundation–structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. *Bull Earthquake Engineering*, (5), 277-301.
22. Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and Nahas, A.El. (2008) Centrifuge modelling of normal fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Engineering*, (6), 585-605.
23. Bransby, M.F., Davies, M.C.R., Nahas, A.El., and Nagaoka, S. (2008) Centrifuge modelling of reverse fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Engineering*, (6), 607-628.
24. Gazetas, G., Pecker, A., Faccioli, E., Paolucci, R. and Anastasopoulos, I. (2008) Preliminary design recommendations for dip-slip fault–foundation interaction. *Bull. Earthquake Engineering*.
25. Fadaee, M., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Jafari, M., and Kamalian, M. (2013) Soil bentonite wall

(2014) Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **65**, 151-164.

36. Muir Wood, D. (2004) *Geotechnical Modelling*. Spon Press, London.

اصطلاحات فنی

Permanent Ground Displacement (PGD)	۱- جابه‌جایی دائمی زمین
Hanging Wall	۲- فرادیواره
Foot Wall	۳- فرودیواره

Modelling of Dip-Slip Normal Fault Rupture and Segmental Shallow Tunnel in Geotechnical Centrifuge

Majid Kiani¹, Abbass Ghalandarzadeh^{2*}, and Tohid Akhlaghi³

1. Ph.D. Graduate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran,
*Corresponding Author, e-mail: aghaland@ut.ac.ir

3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

The use of urban tunnels is increasing to accommodate lifelines such as roads, railroads, subways, sewer systems and high-voltage electrical cables. Many cities sit on sedimentary deposits and faulting zones, which presents challenges for the construction of these tunnels. One type of probable damage is that caused by permanent ground displacement (PGD). Severe earthquakes can cause such displacements to appear at the ground surface and cause fractures called surface faulting. The interaction of surface faulting at ground structures such as bridges, dams, and buildings or underground structures such as tunnels and pipelines can result in major damage to them. Comprehensive studies have been conducted to fully understand this phenomenon [1-11].

The building codes of many countries recommend avoiding construction in the vicinity of active faults, but at times the construction of a tunnel intersecting a fault is inevitable [4]. It is not always possible to avoid the construction of a tunnel near an active fault. Tunnels are at the risk of faulting due to their long length. This can affect the design of the tunnel lining. Such a tunnel must be capable of resisting fault displacement so that it will suffer only minor damage.

When designing tunnels located in the areas with the potential for surface fault rupture, it is necessary to consider the effects of loads caused by fault rupture in addition to other types of seismic loads [12]. Researchers have developed specific criteria to account for the effect of seismic wave loading. However, the effect of fault rupture loads has not been considered in comprehensive design methods.

Highly active faults can cause significant damage to a tunnel. Fault displacement can produce extreme stresses on the lining of the tunnel. The study of tunnel behavior passing through a fault zone during an earthquake is practically unknown because it has been experienced less study and investigations. Physical modeling by the use of geotechnical centrifuge provides the possibility of investigating the up-mentioned geotechnical phenomenon.

The current study investigated the effects of normal faulting on shallow segmental tunnels using physical modeling in a geotechnical centrifuge. This article describes the details of physical modeling of a normal fault, a segmental tunnel in a centrifuge, and the results of six centrifuge tests.

One of the most important and applicable results obtained from the faulting tests is an understanding of the failure modes. It was possible to discern vulnerable areas in the segmental tunnels by determining the failure modes and designing methods to mitigate tunnel damage. The present study conducted a series of centrifuge model tests on segmental tunnels subjected to normal faulting. Results indicate the probable rupture mechanisms. Results show that segmental tunnels can tolerate superficial faulting. However, as the faulting displacement increases, oval shapes in segmental ring occur in the faulting zone and finally tunnel collapse happen. However, the results indicated the absence of sudden collapse of segmental tunnels under normal faulting and improvement of function in response to an increase in the overburden of the tunnel. The angle of the fault affected tunnel behavior. Despite large displacement faulting, structural damage to the segments was very low because of the adequate geometric functioning of the segments and their joints. The length of the zone affected by faulting in the tunnel decreased as

the overburden increased, but the severity of damage increased in response to localization of fault displacement. Sinkhole formation upon the collapse of soil into the tunnel is likely at the ground surface. Special attention must be paid to the effect of sinkholes on ground structures in the vicinity of the tunnel.

The results of this paper can be used to determine the pattern of rupture where a tunnel intersects a fault. Obviously, the pattern derived from this modeling can play an important role in developing analytical analysis and numerical methods.

The results can be used for better understanding of segmental tunnel behavior where it intersects a fault zone; it can also be used to specify the locations affected by the faulting and to adopt preventive strategies as well.

Keywords: Segmental Tunnel; Normal Fault Rupture; Geotechnical Centrifuge; Physical Modeling

References

1. Bray, J., Seed, R., Ciuffi, L., and Seed, H. (1994) Earthquake fault rupture propagation through soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(3), 543-561.
2. Pamuk, A., Kalkan, E., and Ling, H. (2005) Structural and geotechnical impacts of surface rupture on highway structures during recent earthquakes in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 581-589.
3. Konagai, K., Hori, M. (2006) *Key Points for Rational Design for Civil-Infrastructures near Seismic Faults Reflecting Soil-Structure Interaction Features*. Report of JSPS research project.
4. Anastasopoulos, I., Gazetas, M.G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R, and El Nahas, A. (2007) Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(8), 943-958.
5. Lin, M., Chung, C., Jeng, F. and Yao, T. (2007) The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology*, **92**(3-4), 110-132.
6. Ng, C.W.W., Cai, Q.P., and Hu, P. (2012) Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(12), 1492-1502.
7. Oettle, N. and Bray, J. (2013) Fault rupture propagation through previously ruptured soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(10), 1637-1647.
8. Fadaee, M., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Jafari, M., and Kamalian, M. (2013) Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(3), 473-486.
9. Rojhani, M., Moradi, M., Galandarezadeh, A., and Takada, S. (2012) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(6), 659-670.
10. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M. and Shafiee, A. (2010) Experimental investigation of reverse fault rupture–rigid shallow foundation interaction. *International Journal of Civil Engineering*, **8**(2), 85-98.
11. Kiani, M., Akhlaghi, T. and Ghalandarezadeh, A. (2016) Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**, 108-119.