مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های سگمنتی برای بررسی رفتار لرزه‌ای آن‌ها در دستگاه میزلرزه 1G

محمد احمدی
دانشجوی دکتری عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
mo.ahmadi@iiees.ac.ir

عباس قلندرزاده
دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
aghaland@ut.ac.ir

علی فاخر
دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
afakher@ut.ac.ir

لیلا شفیعی چافی
دانشجوی دکتری مهندسی عمران، ، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
lshafiei@mail.kntu.ac.ir

کلیدواژه‌ها: *تونل سگمنتی، مدل‌سازی فیزیکی 1g، میزلرزه، رفتار لرزه‌ای*

چکیده

امروزه تونل‌ها به‌عنوان بخشی از شریان‌های حیاتی نقش مهمی در توسعه جوامع بشری پیدا کرده‌اند. طی چند دهه اخیر حفاری تونل‌های طویل با ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل (TBM) شتاب بسیار زیادی به توسعه این‌چنین تونل‌هایی داده است. ویژگی‌های منحصربه‌فرد استفاده از این روش باعث گردیده استفاده از آن در تونل‌های شهری روز به روز توسعه پیدا نماید. همچنین تونل‌های شهری اتومبیل‌رو، که معمولاً در خاک ساخته می‌شوند، اغلب تونل‌هایی با عمق دفن کم می‌باشند و قطر آن‌ها هم نسبتاً زیاد است. تاکنون مطالعات فیزیکی بسیار کمی درزمینه بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های سگمنتی انجام شده است. به دلیل بالا بودن خطر زلزله در ایران، رفتار لرزه‌ای تونل‌های کم‌عمق شهری که به‌صورت سگمنتی ساخته می‌شود، دارای اهمیت خواهد بود.

در این مقاله نحوه مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های قطعه‌ای جهت بررسی رفتار لرزه‌ای آن‌ها با استفاده از دستگاه میز لرزه در محیط ۱g تشریح می‌گردد. همچنین جزییات مدل‌سازی و انتخاب مصالح مناسب ارائه گردیده است. علاوه بر این مشاهدات پدیده‌های رخداده در حین لرزه بیان و تشریح می‌گردد. با توجه به بررسی اثر عمق استقرار تونل بر رفتار لرزه‌ای آن به بررسی این اثر نیز پرداخته شده است.

مقدمه

بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا بر روی مناطق لرزه‌خیز بنانهاده شده‌اند. با توسعه این شهرها، نیاز به ساخت هرچه بیشتر تونل‌ها برای حمل‌ونقل انسان و کالا بیشتر احساس می‌شود. بر همین اساس نیاز به دقیق‌تر نمودن طراحی و اجرای تونل‌های زیرزمینی و مقاوم ساختن آن‌ها در برابر زلزله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شریان‌های حیاتی است. امروزه ساخت تونل با استفاده از ماشین‌های حفاری تونل به علت اقتصادی بودن و همچنین سرعت بیشتر ساخت نسبت به روش‌های سنتی حفاری رشد چشمگیری داشته است. ویژگی منحصربه‌فرد حفاری مکانیزه نصب پوشش تونل به‌صورت پیش‌ساخته و قطعه‌ای اندکی پس از حفاری است. در پوشش قطعه‌ای (سگمنتال)، با اتصال قطعات پیش‌ساخته بتنی به یکدیگر یک حلقه کامل به وجود آمده و پوشش تونل تکمیل می‌گردد. این قطعات بتنی به‌وسیله بازوی مکانیکی مخصوصی در محل خود قرار می‌گیرند و ماشین حفار با تکیه بر این قطعات حفاری را ادامه داده و متناسب با پیشروی حفاری، سگمنت گذاری نیز انجام می‌پذیرد. به علت پیش‌ساخته و قطعه‌ای (سگمنتال) بودن این تونل‌ها، نحوه‌ی رفتار آن‌ها نسبت به زلزله احتمالی می‌تواند متفاوت باشد. درواقع در این روش حفاری قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) با کمک اتصالاتی به یکدیگر متصل می‌شوند لذا می‌توان گفت رفتار این‌گونه تونل در زلزله می‌تواند متفاوت از رفتار

تونل‌های با پوشش یکپارچه باشند. همچنین تونل‌های شهری عموماً تونل‌های کم‌عمق و با قطر نسبتاً زیادی هستند و همین مسئله نیز می‌تواند آسیب‌های احتمالی وارده به سازه آن‌ها و یا سازه‌های مجاور را متفاوت از تونل با پوشش یکپارچه و در عمق بیشتر نماید.

تحقیقات پیشین در مدل‌سازی تونل سگمنتی

با جستجویی در تحقیقات انجام‌شده درزمینه مدل‌سازی فیزیکی تونل، می‌توان دریافت که این مسئله موردتوجه محققین زیادی قرارگرفته است. بااین‌حال مدل‌سازی فیزیکی جهت بررسی اثر لرزه بر تونل‌ها نسبتاً کم است. تونل‌هایی که تاکنون موردمطالعه قرارگرفته‌اند از جنبه شکل هندسی به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول تونل‌های با مقطع مستطیلی (که در مدل‌سازی ایستگاه‌ها نیز مورداستفاده قرار می‌گیرند) و دسته دوم تونل‌های رایج دایروی شکل و یا نزدیک به دایره هستند. در این میان با توجه به جدید بودن فنّاوری ساخت مکانیزه تونل، به نظر می‌رسد تحقیقات نسبتاً کمی درزمینه مدل‌سازی فیزیکی تونل سگمنتی و بررسی اثرات لرزه‌ای بر روی آن انجام شده است و این در حالی است که مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های یکپارچه در حوزه‌های مختلف ژئوتکنیکی انجام پذیرفته است.

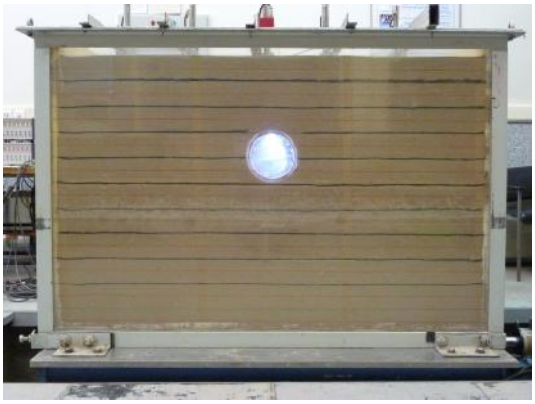
یکی از رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های یکپارچه، استفاده از لوله است. با توجه به رفتار یکپارچه تونل‌های یکپارچه و باتوجه به مدل‌سازی بر اساس قوانین مقیاس در محیط 1g، که باعث می‌گردند مصالح مدل بسیار نرم‌تر از مصالح مورداستفاده در واقعیت انتخاب گردند، استفاده از لوله‌های موجود در بازار بسیار کاربردی است. محققین مصالح گوناگونی را برای مدل‌سازی تونل مورداستفاده قرار داده‌اند. البته اکثر این تحقیقات به بررسی اثر لرزه بر تونل‌ها اختصاص نداشته است. تاماری برای مدل‌سازی تونل مستطیل شکل خود از ورق‌های آلومینیوم استفاده نمود. این آزمایش در ابعاد نسبتاً بزرگ و برای بررسی اثر لرزه‌ای تونل‌های مستطیل شکل طرح گردیده است (Tamari, 2003). کروساریول نیز برای مدل کردن تونل مستطیلی خود از پلکسی‌گلاس استفاده نمود (Crosariol, 2010). لین و همکاران ورق‌های مقوا را برای مدل‌سازی رفتار تونل در اثر اعمال گسلش به تونل دایره‌ای انتخاب نمودند (Lin et al, 2007). همچنین سکی از لوله‌های PVC برای مدل‌سازی تونل‌های دایره‌ای خود جهت بررسی اثر پدیده بالازدگی در تونل‌ها بهره گرفت (Seki et al, 2008). کیم و همکاران جهت بررسی اثر ساخت تونل جدید، در دو حالت موازی و همچنین عمود بر تونل قبلی، از یک لوله فولادی بسیار نازک، با ضخامت بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ میلی‌متر و با قطر ۷۰ میلی‌متر، برای مدل‌سازی تونل موردبررسی استفاده کردند (Kim et al, 1998).

اما شاید بتوان به تحقیق انجام‌شده توسط «هی» و «کویزومی» به‌عنوان یکی از معدود تحقیقات انجام‌شده درزمینه بررسی رفتار لرزه‌ای بر روی تونل‌های سگمنتی اشاره نمود. در این تحقیق برای مدل کردن درزها و اتصالات، ضخامت لوله را در محل‌های اتصالات آن کاهش دادند. با کاهش ضخامت آن نقطه و درنتیجه کاهش سختی آن، تا حدی رفتار تونل‌های سگمنتی قابل شبیه‌سازی بوده است (HE & Koizumi, 2000)، (Koizumi & HE, 2000). بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد که بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های سگمنتی به‌صورت ساخت مدل فیزیکی کمتر موردتوجه بوده است.

در تحقیق حاضر تونل سگمنتی، که تمامی سگمنت‌های آن ابتدا از یکدیگر جدا بوده و سپس با کمک اتصالاتی به یکدیگر متصل شده‌اند، ساخته شد و سپس رفتار لرزه‌ای آن در عمق‌های مختلف استقرار تونل‌های کم‌عمق مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌سازی فیزیکی

امروزه استفاده از مدل‌های فیزیکی برای درک رفتار ابنیه ژئوتکنیکی به‌عنوان یک ابزار علمی قابل‌اعتماد علاوه بر یافتن رفتار واقعی نمونه اصلی، برای ارزیابی و صحت سنجی مدل‌های عددی و تحلیلی نیز کاربرد دارند. آزمایش‌های میزلرزه عمدتاً در میدان جاذبه 1g به‌منظور درک رفتار لرزه‌ای خاک و سازه روی آن انجام می‌شود. *شکل ۱* نمایی از مدل آماده آزمایش را بر روی دستگاه میزلرزه آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران نشان می‌دهد.



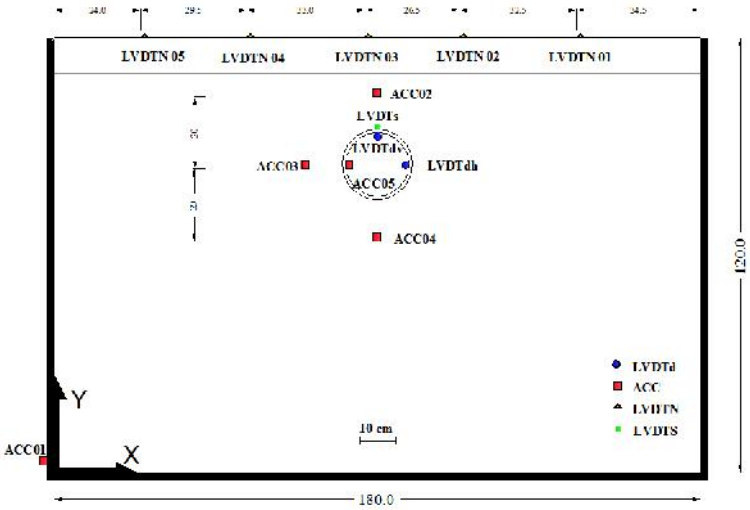
شکل ۱: مدل آماده‌شده بر روی دستگاه میزلرزه قبل از انجام آزمایش

مخزن خاک

مدل‌ها داخل مخزن شفافی از پلکسی‌گلاس ساخته‌شده‌اند تا بتوان تغییر شکل‌های تونل و خاک در اثر لرزه وارده را به‌راحتی مشاهده نمود. ابعاد جعبه مورداستفاده برابر با ۱۸۰ سانتی‌متر طول، ۸۰ سانتی‌متر عرض و ۱۲۰ سانتی‌متر ارتفاع است.

ابزاربندی

در این آزمایش‌ها با توجه به ماهیت بررسی رفتار تغییرشکلی تونل در حین زلزله بیشتر از حسگرهای جابجایی سنج استفاده گردیده است. از پنج عدد LVDT برای ثبت پروفیل تغییر شکل سطح زمین در حین زلزله استفاده گردید. همچنین دو عدد LVDT نیز به‌صورت عمود بر هم در داخل تونل تعبیه گردید به‌طوری‌که یکی از آن‌ها بتواند تغییر قطر تونل در حین زلزله در راستای قائم و دیگری در راستای افقی را اندازه‌گیری نماید. داده‌های حاصل از این LVDTها می‌تواند رفتار تغییر شکلی تونل را در حین لرزه وارده تشریح نماید. همچنین یک عدد LVDT کابلی نیز به تونل متصل گردیده تا بتوان به‌وسیله آن میزان جابجایی‌های سازه تونل را ثبت نمود. همچنین علاوه بر این حسگرها از ۴ عدد شتاب سنج در داخل مدل استفاده گردیدند که سه تای آن‌ها در ترازهای بالا و پایین تونل و همچنین هم‌تراز با مرکز تونل در خاک تعبیه گردیدند و شتاب سنج چهارم نیز در داخل تونل و متصل به پوشش آن نصب گردید. از داده‌های حاصل از این حسگرها می‌توان اثرات اندرکنشی بین سازه پوشش تونل و خاک را بررسی نمود. علاوه بر آن‌ها حسگر پنجم شتاب نیز به‌عنوان ثبت‌کننده لرزه ورودی در بیرون مخزن خاک به آن متصل گردید. برای ثبت رفتار تغییر شکل تونل در حین لرزه از یک عدد دوربین باکیفیت بالا در داخل تونل که به بخش پایینی پوشش تونل متصل است، نیز استفاده گردیده است. همچنین دوربین دیگری بیرون از مخزن خاک نصب گردیده تا بتوان تغییر شکل‌ها و پدیده‌های مشاهده‌شده در خاک را ثبت نمود. *شکل ۲* محل قرارگیری حسگرهای مورداستفاده در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲: هندسه مدل موردمطالعه و محل قرارگیری حسگرها

خاک مدل شده

استفاده از ماسه‌های استاندارد جهت اطمینان از یکنواختی مدل ساخته‌شده در آزمایش‌های ژئوتکنیکی رایج است. ماسه‌های تمیز با D_{50} کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در مطالعات زیادی مورداستفاده قرارگرفته است. ماسه تویورا در ژاپن و ماسه نوادا در آمریکا نمونه‌هایی از ماسه‌های استاندارد مورداستفاده در مدل‌سازی‌های فیزیکی در این کشورها است. در ایران ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ که به لحاظ دانه‌بندی و مشخصات دیگر، شباهت بسیاری به ماسه‌های نام‌برده شده دارد، در مطالعات مدل مورداستفاده قرار می‌گیرد. با توجه به معرفی این ماسه توسط آزمایشگاه خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، امروزه تقریباً در تمام مطالعات مشابه در ایران این ماسه مورداستفاده قرار می‌گیرد. (احمدی، ۱۳۹۰) در *جدول ۱* مشخصات فیزیکی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه بیان گردیده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ مورداستفاده در آزمایش (احمدی، ۱۳۹۰)

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50}(mm)	درصد ریزدانه (٪)	φ	C
۲.۶۵۸	۰.۹۴۳	۰.۶۰۳	۰.۳	صفر	۳۷ درجه	صفر

تونل مدل شده

با توجه به آنالیز ابعادی انجام‌شده و بر اساس ابعاد متداول تونل‌های حفرشده ماشین‌روی شهری، برای مدل نمودن تونل از لوله نیمه قوی PVC به مشخصات ارائه‌شده در *جدول ۲* استفاده گردید. با توجه به قطعه‌ای بودن تونل، لوله تهیه‌شده برای مدل نمودن آن باید به قطعات مناسب تبدیل گردد. پس از بررسی‌های انجام‌شده، روش برشکاری با اتخاذ تدابیر ویژه‌ای برای تبدیل لوله پیوسته به سگمنت‌ها انتخاب گردید. پس از تراشکاری، این قطعات با استفاده از اتصالاتی به یکدیگر متصل و درنهایت تونل سگمنتی موردنظر را ایجاد نمودند. *شکل ۳* تصویری از قطعات ساخته‌شده و همچنین تونل سگمنتی مدل شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی لوله استفاده شده برای مدل‌سازی تونل در مدل

جنس لوله	قطر لوله	ضخامت لوله	عرض سگمنت	تعداد سگمنت در هر حلقه
PVC نیمه قوی	۱۹۵ میلی‌متر	۵ میلی‌متر	۵۰ میلی‌متر	۵ عدد

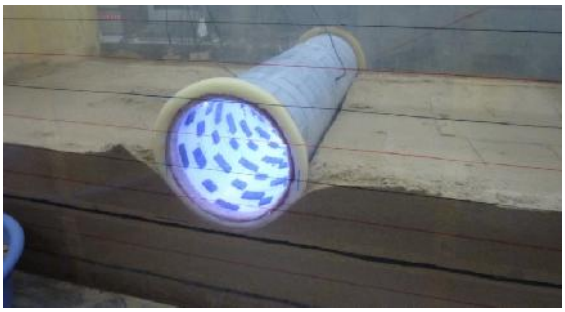
شکل ۳: سمت چپ، قطعات آماده‌شده پوشش تونل؛ سمت راست، بخشی از تونل سگمنتی مدل شده

هندسه مدل

همان‌طور که اشاره گردید هدف از تحقیق حاصل، ابتدا مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های سگمنتی به شکل صحیح و اصولی بوده است و پس‌از آن رفتار لرزه‌ای و اثر عمق استقرار تونل موردمطالعه قرارگرفته است. در این تحقیق محور تونل عمود بر لرزه وارده به آن در نظر گرفته‌شده است. به نظر می‌رسد این حالت می‌تواند خسارات بسیار بیشتری به سازه تونل وارد نماید. همچنین با توجه به اینکه بررسی رفتار تغییر شکلی تونل در این تحقیق از اهمیت خاصی برخوردار است، به دلیل امکان مشاهده تغییر شکل مقطع تونل، این حالت انتخاب گردید. تونل در اعماق ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری از سطح زمین، که برابر با ۰.۷۵، ۱ و ۱.۵ برابر قطر خود بوده است، در خاک قرار داده شد. با مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها می‌توان اثر عمق بر رفتار لرزه‌ای تونل را موردمطالعه قرار داد. همچنین در دو جداره کناری مخزن از لایه‌های اسفنج مانند استفاده گردیده تا حتی‌الامکان از بازتاب موج ناشی از زلزله و تأثیر آن بر نتایج آزمایش بکاهد.

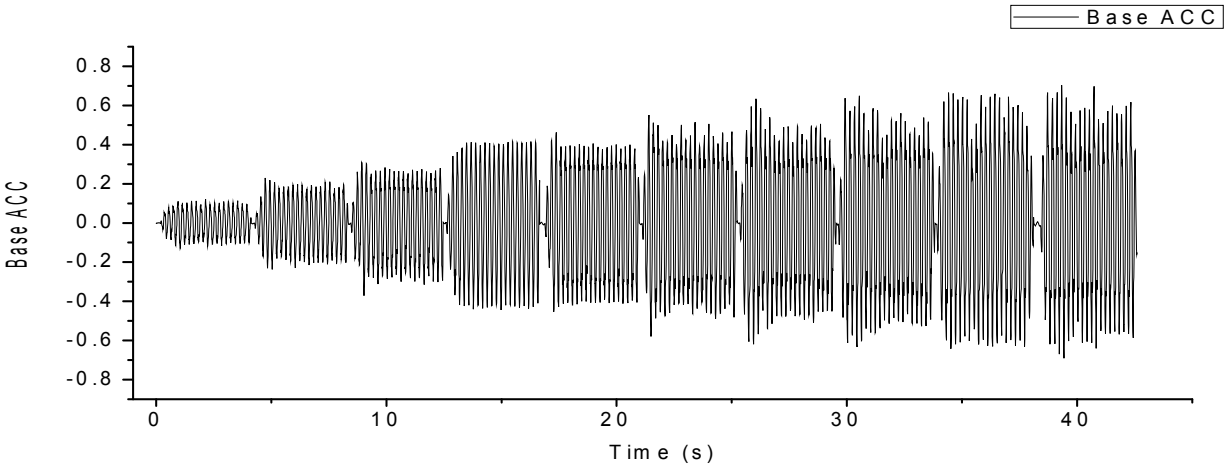
ساخت مدل و انجام آزمایش

برای خاک‌ریزی از روش تراکم مرطوب استفاده شده است. در این روش برای رسیدن به تراکم موردنظر، به خاک حدود ۵ درصد رطوبت اضافه گشته و با آن به‌صورت یکنواخت مخلوط می‌گردد تا مصالحی یکنواخت تهیه گردد. سپس به ازای حجم مشخصی از مخزن، که در آزمایش حاضر به ازای هر ۵ سانتی‌متر خاک‌ریزی در ارتفاع بوده است، جرم خاک موردنیاز محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از کوبه‌های مخصوص تعدادی ضربه‌ی یکنواخت به مدل وارد می‌گردد تا این مقدار خاک در حجم مشخص‌شده متراکم گردد. با این روش می‌توان یک نمونه یکنواخت و با درصد تراکم موردنیاز را ایجاد نمود. در این آزمایش‌ها، تراکم ۵۰ درصد به‌عنوان تراکم مناسب برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. همچنین برای بهتر دیده شدن تغییرشکل‌های رخ‌داده در خاک، از لایه‌های ماسه رنگی در جداره بیرونی مخزن استفاده گردید. پس از رسیدن به تراز مرکز تونل، محل قرارگیری تونل با دقت بسیار بالا حفر گشته و سازه تونل در آن محل قرار می‌گیرد و سپس خاک‌ریزی با دقت بیشتر تا تراز نهایی سطح زمین انجام می‌شود. *شکل ۴* نحوه قراردادن تونل در محل معین در داخل خاک را نشان می‌دهد. پس از اتمام خاک‌ریزی گام انتهایی آزمایش، اعمال لرزه موردنظر به مدل و ثبت داده‌ها به کمک حسگرهای مورداستفاده در آزمایش است.



شکل ۴: قرار دادن تونل در محل استقرار آن

در هر یک از مدل‌های ساخته‌شده ابتدا بارگذاری سینوسی با شتاب ۰.۱g و فرکانس ۵ هرتز به مدت ۴ ثانیه به نمونه وارد گردیده و داده‌ها ثبت شدند. سپس مجدداً لرزه‌ای با مشخصات ذکرشده و تنها با افزایش ۰.۱g به شتاب اعمالی، به مدل وارد شده و دوباره داده‌ها ثبت می‌شدند. این عمل با افزایش شتاب به میزان ۰.۱g تا شتاب اسمی ۱g ادامه داشته است. البته شتاب واقعی وارد شده به مدل توسط حسگر واقع در بیرون مخزن ثبت می‌گردد. در هر بارگذاری ۲۰ سیکل رفت‌و برگشت به مدل وارد شده است. تاریخچه زمانی لرزه وارده در طی یک سری آزمایش همانند *شکل ۵* است. استفاده از چنین تاریخچه‌های زمانی در آزمایش‌های مدل‌های فیزیکی بسیار رایج است. یکی از دلایل استفاده آن‌ها کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز است. با این روش مقایسه هر سری آزمایش با سری آزمایش دیگر امکان‌پذیر است.



شکل ۵: تاریخچه زمانی شتاب وارده به مدل

برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق سه سری آزمایش با سربارهای مختلف برنامه‌ریزی گردید. همان‌طور که اشاره شد، در هر یک از سری آزمایش‌ها ۱۰ مرتبه لرزه با افزایش شتاب اعمالی به آن وارد گردید که درنتیجه شتاب اسمی بین ۰.۱ تا ۱ برابر شتاب گرانش به مدل وارد شد. *جدول ۳* مشخصات هر سری از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

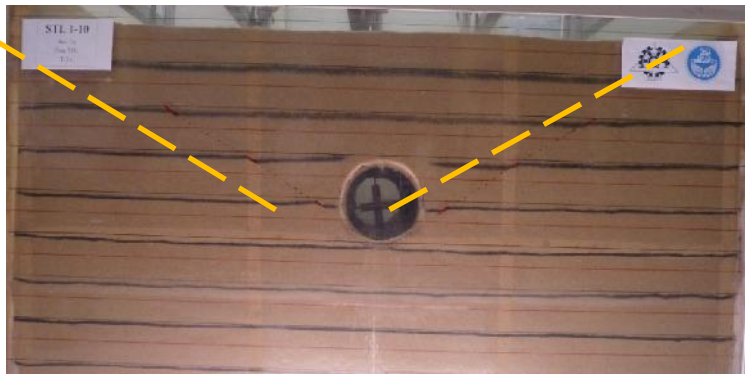
جدول ۳: مشخصات هر سری از آزمایش‌های انجام‌شده

نام آزمایش	سربار روی تونل در مدل (سانتی‌متر)	نسبت سربار به قطر تونل	شتاب اسمی اعمالی (g)	مدت‌زمان لرزه (s)	فرکانس (Hz)
STL 1	۳۰	۱.۵	۱-۰.۱	۴	۵
STL 2	۲۰	۱	۱-۰.۱	۴	۵
STL 3	۱۵	۰.۷۵	۱-۰.۱	۴	۵

مشاهدات آزمایش‌ها

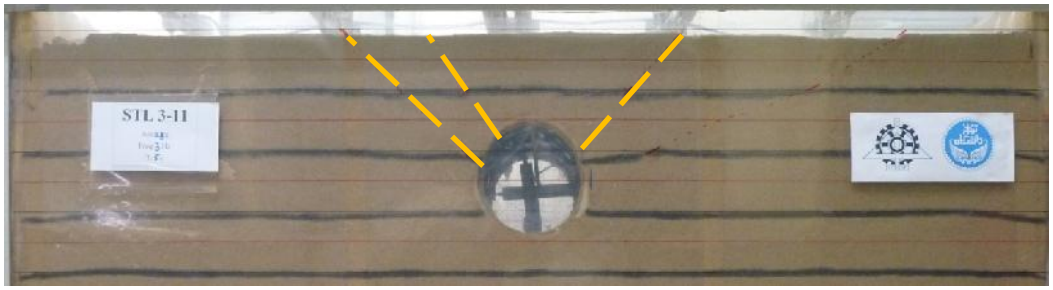
در این بخش برخی از مشاهدات انجام‌شده در آزمایش که در حین زلزله به وقع پیوست، ارائه می‌گردد. این مشاهدات می‌تواند مبنای مناسبی برای شناخت رفتار تونل‌های سگمنتی در برابر زلزله‌های وارده به آن باشد.

به وجود آمدن سطح گسیختگی از تونل و امتداد آن تا سطح زمین ازجمله مهم‌ترین مشاهدات انجام‌شده است. در هر سه سری آزمایش پس از اعمال شتاب اسمی ۰.۶g ترک‌های بسیار کوچکی در سطح زمین نزدیک به مرزهای مخزن ایجاد می‌گردد. پس از اعمال لرزه با شتاب اسمی ۰.۷g دو سطح گسیختگی در مدل ایجاد می‌شود. این زوج سطح گسیختگی به‌صورت متقارن از زیر تونل آغاز گردیده و تا سطح زمین ادامه می‌یابد. ترک‌های مشاهده‌شده در سطح زمین ناشی از رسیدن این سطوح گسیختگی به سطح زمین است. این مسئله نشان می‌دهد که در اثر لرزه وارده به تونل‌های کم‌عمق و سگمنتی، که به دلیل ماهیت پوشش آن‌ها می‌توانند از انعطاف بیشتری در برابر لرزه برخوردار باشند، علاوه بر خرابی‌های احتمالی وارده به سازه تونل، ابنیه سطح زمین که در مجاورت تونل قرار دارد نیز می‌تواند مورد تهدید واقع شوند. این مسئله خود لزوم توجه به طراحی‌های ویژه چنین تونل‌هایی جهت کاهش خسارات وارد برسازه‌های روزمینی را نشان می‌دهد. دلیل ایجاد چنین پدیده‌ای را می‌توان نشست تونل در اثر زلزله و همچنین انعطاف‌پذیر بودن آن در مقایسه با تونل‌های یکپارچه دانست. این مسئله باعث می‌گردد نواحی بالای تونل بیشتر از سایر نواحی نشست نموده و درنتیجه آن یک سطح گسیختگی شکل بگیرد. شکل ۶ نمایی از سطوح گسیختگی ایجادشده در مدل را برای آزمایش شماره ۱ نشان می‌دهد. همچنین ترک‌های ایجادشده در سطح زمین نیز در شکل ۷ مشاهده می‌گردد. مشاهده گردید که با سطحی‌تر شدن عمق استقرار تونل سگمنتی، ترک‌های ایجادشده در محل‌هایی نزدیک‌تر به محور طولی تونل در سطح زمین ظاهر می‌شوند. شکل ۸ سطوح گسیختگی ایجادشده در آزمایش شماره ۳ که در آن تونل سطحی‌تر است نشان می‌دهد.



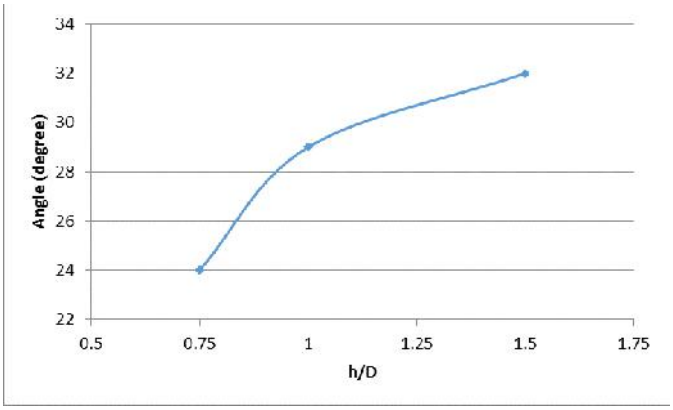
شکل ۶: ایجاد سطوح گسیختگی در مدل و رسیدن آن به سطح زمین

شکل ۷: ترک‌های ایجادشده در سطح زمین در اثر ایجاد سطوح گسیختگی



شکل ۸: افزایش تعداد سطوح گسیختگی فرعی در آزمایش شماره ۳ با سطحی‌تر شدن تونل و درنتیجه مشاهده ترک‌های سطحی در نزدیکی محور تونل

همچنین زاویه خطوط گسیختگی با سطحی شدن تونل (کاهش عمق آن) کاهش پیدا می‌کند. به‌عبارت‌دیگر با سطحی شدن تونل، زاویه خط‌های احتمالی گسیختگی با افق کمتر شده و درنتیجه سطح بیشتری از سطح زمین تحت تأثیر نشست‌های ناشی از زلزله در محل تونل قرار خواهد گرفت. شکل ۹ نشان تغییرات زاویه را برحسب نسبت سربار به قطر تونل نشان می‌دهد.



شکل ۹: نمودار تغییرات زاویه سطوح گسیختگی با سطح زمین. محور افقی نسبت سربار تونل به قطر آن، محور عمودی زاویه سطوح گسیختگی با سطح زمین برحسب درجه

بررسی داده‌های تغییر قطر تونل در حین لرزه وارده نشان می‌دهد که به علت انعطاف‌پذیر بودن سازه تونل نسبت به محیط پیرامون، افزایش قطر در یکی از راستاها باعث کاهش قطر تونل در راستای دیگر می‌شود این تغییر قطرها یکسان نیستند و می‌توانند باعث تغییر حجم تونل شوند. در این حالت خاک بالای آن تمایل به نشست داشته و می‌توان این تغییر حجم را مرتبط با نشست سطح زمین در نظر گرفت. هر چه شدت لرزه بیشتر گردد، اختلاف ثبت‌شده بین قطرها بیشتر و به نظر می‌رسد تغییر حجم تونل نیز بیشتر گردد. این مسئله خود می‌تواند تا حدی ایجاد نشست‌های نسبتاً زیاد در شتاب‌های بالا و درنتیجه توسعه سطوح گسیختگی تا سطح زمین را توجیه نماید.

نتیجه‌گیری

۱- مدل‌سازی تونل‌های سگمنتی جهت بررسی اثرات لرزه‌ای، بر اساس قوانین مقیاس و اصول ساخت مدل فیزیکی در محیط 1g با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت.
۲- در اثر لرزه وارده، سطوح گسیختگی به‌صورت متقارن از ناحیه زیر تونل شکل گرفته و تا سطح زمین توسعه پیدا نموده است.
۳- رسیدن این سطوح گسیختگی به سطح زمین باعث ایجاد ترک‌هایی در آن گردیده است.
۴- هر چه تونل سطحی‌تر شده است، ناحیه بیشتری از سطح زمین می‌تواند تحت تأثیر اثرات ناشی از نشست به دلیل مجاورت با تونل سگمنتی قرار بگیرد.
۵- تغییر حجم اندک تونل در حین لرزه‌های اعمالی می‌تواند عامل نشست سطح زمین در بالای تونل و درنتیجه به وجود آمدن سطوح گسیختگی باشد.
۶- هر چه شدت لرزه وارده بیشتر باشد، تغییر قطر تونل در راستای افقی و عمودی بیشتر می‌گردد.

مراجع

احمدی م (۱۳۹۰) بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های اجراشده در خاک با پوشش قطعه‌ای با استفاده از آزمایش‌های میزلرزه 1g، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران، ایران

Crosariol V (2010) *Scale Model Shaking Table Testing of Underground Structures in Soft Clay*. Msc Thesis, California Polytechnic State University

HE C& KoizumiA. (2000) Dynamic Behavior in Transverse Direction of Shield Tunnel with Considering Effect of Segment Joints. *12 World Conference of earthquake Engineering (12 WCEE)*

Kim S, Burd H & Milligan G (1998) Model testing of closely spaced tunnels in clay. *Geotechnique, 48*(3), 375–388

Koizumi A & HE C (2000) Dynamic Behavior in Longitudinal Direction of Shield Tunnel Located at Irregular Ground With Considering Effect of Secondary Lining. *12 World Conference of earthquake Engineering (12 WCEE)*

Lin M, Chung C, Jeng F & Yao T (2007) The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels. *Engineering Geology, 92*, 110-132. doi:10.1016/j.enggeo.2007.03.008

Seki S, Kaise S, Morisaki Y, Azetaka S & Jiang Y (2008) Model experiments for examining heaving phenomenon in tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology, 23*, 128–138

Tamari T (2003) *Shaking Table Model Tests on Dynamic Interaction between Cross Section of Flexible Underground Structures and Liquefied Soil*. Phd Thesis, University of Tokyo