

بررسی اثر انعطاف‌پذیری پوشش سازه‌ی زیرزمینی در پاسخ شتاب سطح زمین

محمدحسن بازاریار (استاد)

مسعود رابطی مقدم* (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

دانگ - سو کیم (استاد)

یون وولک چوو (استاد)
دانشگاه کابست کره جنوبی

در این نوشتار پس از صحت‌سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام‌شده بر روی یک تونل مترو، اثر انعطاف‌پذیری پوشش تونل در پاسخ شتاب سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مطالعه‌ی پارامتری نشان می‌دهد که دو سیستم با ضریب انعطاف‌پذیری یکسان، ولی با جنس متفاوت منجر به پاسخ یکسان شتاب در سطح زمین می‌شوند. پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری، پاسخ شتاب در سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این مسئله تحت تأثیر محتوای بسامدی حرکت ورودی و بسامد طبیعی سیستم است. پوشش سخت‌تر (با ضریب انعطاف‌پذیری کمتر) باعث بزرگ‌نمایی بیشتر پاسخ در دوره‌های تناوب پایین نسبت به پوشش‌های منعطف‌تر شده است، که می‌تواند برای ساختمان‌های کوتاه مجاور تونل مسئله‌ساز باشد. در حالی که پوشش منعطف‌تر منجر به پاسخ بیشتر شتاب در دوره‌های تناوب بلندتر نسبت به پوشش‌های سخت‌تر می‌شود، که سازه‌های بلند را تهدید می‌کند.

واژگان کلیدی: سازه‌ی زیرزمینی، ضریب انعطاف‌پذیری، پاسخ شتاب، سطح زمین، نرم‌افزار ۲D FLAC.

۱. مقدمه

از یاد جمعیت کلان‌شهرها منجر به کاهش فضاها و موجود در سطح شهرها شده و گسترش بیش از پیش فضاها و زیرزمینی نظیر: تونل‌های مترو، تونل‌های تأسیساتی، انبارهای زیرزمینی، تونل‌های انتقال آب و فاضلاب شهری را به دنبال داشته است. امروزه این قبیل فضاها از زیرساخت‌های اساسی شهرنشینی مدرن محسوب می‌شوند. عملکرد این‌گونه سازه‌ها در زمان بهره‌برداری و در مواقع بحران مورد توجه مهندسان و پژوهشگران بسیاری بوده است. هر چند در اذهان طراحان و مهندسان، این قبیل سازه‌ها از لحاظ عملکرد لرزه‌یی در دسته‌ی سازه‌های کم‌خطر در برابر زلزله تلقی می‌شدند، اما خسارات وارده به این قبیل سازه‌ها در حین زلزله‌ها (مانند خرابی ایستگاه مترو دایکی^۱ ژاپن در زلزله‌ی کوبه^۱) باعث شده است تا این مسئله به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.^[۲-۴] از سوی دیگر، تأثیر ساخت و وجود این قبیل فضاها و سازه‌ها در محیط پیرامون و عملکرد سازه‌های اطراف و بالعکس،^[۵] موضوعی است که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. این مسئله در شرایط استاتیکی در قالب بررسی نشست‌های سطح زمین ناشی از

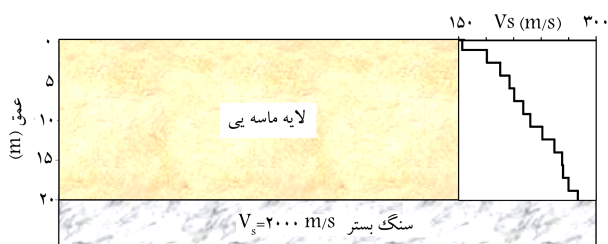
حفر فضاها و زیرزمینی مورد مطالعه و بررسی نسبتاً وسیعی قرار گرفته است.^[۶] با وجود اثبات اثر حضور این قبیل سازه‌ها در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین، اثر اندرکنشی این قبیل سازه‌ها در محیط مجاور و سازه‌های اطراف در حالت لرزه‌یی کمتر مورد توجه پژوهشگران و آیین‌نامه‌ها واقع شده است.^[۷] غالب مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه به صورت حل‌های تحلیلی یا مدل‌های عددی با فرضیات ساده‌شده‌یی مانند حل در محیط‌های کشسان بوده است.^[۸-۱۴]

به دلیل وجود متغیرهای متعدد مؤثر در مسئله‌ی اثر سازه‌ی زیرزمینی در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین از قبیل: عمق، هندسه و ابعاد سازه‌ی زیرزمینی، مشخصات تحریک ورودی، رفتار خطی و غیرخطی خاک و انعطاف‌پذیری پوشش سازه‌ی زیرزمینی تاکنون جمع‌بندی مشخصی در این زمینه در ادبیات فنی وجود ندارد. از جمله پارامترهای مؤثر در مسئله‌ی انعطاف‌پذیری پوشش سازه‌ی زیرزمینی است، که توسط مطالعات پیشین به‌طور خاص بررسی نشده و در این مطالعه به بررسی این پارامتر در یک مطالعه‌ی عددی غیرخطی پرداخته شده است.

از میان مطالعات عددی، کامل‌ترین مطالعه‌ی صورت‌گرفته در خصوص پارامترهای مؤثر در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین ناشی از حضور سازه‌ی زیرزمینی، مطالعه‌یی است که در سال ۲۰۰۷ در یونان انجام شده است.^[۱۵] و در آن تأثیر پارامترهایی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۱۰/۱۳۹۲، اصلاحیه ۱۸/۱۲/۱۳۹۲، پذیرش ۲۷/۱۲/۱۳۹۲.



شکل ۱. شرایط ژئوتکنیکی در محل مسئله‌ی مورد مطالعه‌ی مدل شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ.

(PGA) در آزمایش‌ها استفاده شده است. در شکل ۱، شرایط ژئوتکنیکی در محل مسئله‌ی مورد مطالعه‌ی مدل شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ مشاهده می‌شود، که متشکل از یک لایه‌ی ۲۰ متری ماسه‌ی خشک است، که روی سنگ بستر با سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه واقع شده است. خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها، خاک ماسه‌یی خشک سیلیکاته است، که پروفیل سرعت موج برشی آن در برابر عمق در شکل ۱ ترسیم شده است. بارگذاری دینامیکی از طریق یک میز لرزه در حین چرخش سانتریفیوژ به مدل اعمال شده است. جزئیات کامل آزمایش‌های مذکور در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،^[۱۶] گزارش شده است.

۱.۲. مشخصات دستگاه سانتریفیوژ کایست

سانتریفیوژ کایست با بازوی ۵ متر، ظرفیت (g-ton) ۲۴۰ دارد، که شتاب بیشینه‌ی آن در حالت استاتیکی برابر ۱۳۰ g است. این سانتریفیوژ مجهز به یک میز لرزه است، که در حین چرخش عمل می‌کند. این میز توانایی ایجاد شتاب ۰/۵ g در مقیاس نمونه‌ی اصلی (پروتوتایپ)^۳ را دارد. هم‌چنین بسامد اعمالی از طرف میز در محدوده‌ی ۴۰ الی ۳۰۰ هرتز در مقیاس مدل است. مشخصات کامل دستگاه سانتریفیوژ مذکور در پژوهشی در سال ۲۰۱۳،^[۱۷] ارائه شده است. هم‌چنین به‌منظور شبیه‌سازی مرز نیمه بی‌نهایت در اطراف محفظه‌ی مدل از یک جعبه‌ی ESB^۴ (تیر برشی معادل) استفاده شده و عملکرد لرزه‌یی جعبه‌ی ESB مذکور، در پژوهش دیگری در همان سال،^[۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۲. فهرست آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده

فهرست آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده به همراه مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.^[۱۶]

از میان آزمایش‌های انجام شده، آزمایش شماره‌ی T۲-۱ برای این مطالعه انتخاب شده است. هندسه‌ی مدل شماره‌ی T۲-۱ در مقیاس پروتوتایپ در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل شامل تونل جعبه‌یی از نوع کُند و پوش واقع بر سنگ بستر، خاکریزهای جانبی و فوقانی تونل است. در این نوشتار، مدل‌سازی عددی این آزمایش تشریح و نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج آزمایش سانتریفیوژ معرفی شده، صحت‌سنجی شده است.

۳.۲. مشخصات مهندسی ماسه‌ی مورد استفاده

خاک ماسه‌یی در آزمایش‌ها به صورت خشک مورد استفاده قرار گرفته و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات غیرخطی این ماسه (منحنی تغییرات G/G_{max} و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی) که از آزمایش‌های

نظیر: عمق بدون بُعد، بسامد بدون بُعد و ضریب انعطاف‌پذیری پوشش تونل در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته و درخصوص پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری پوشش تونل این نتیجه به دست آمده است که پوشش‌های سخت‌تر تونل، اثر حضور تونل در پاسخ زمین را کاهش می‌دهند. هر چند در مطالعه‌ی مذکور به بررسی پارامترهای مختلف مؤثر در مسئله پرداخته شده است، اما اعتبار نتایج حاصله در آن محدود به محیطی با رفتار کشسان خواهد بود.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه محدود است. مطالعات سانتریفیوژی وسیعی در سال ۲۰۱۱ در دانشگاه کمبریج بر روی رفتار لرزه‌یی تونل‌های زیرزمینی صورت گرفته است،^[۱۴] ولیکن تمرکز اصلی مطالعات ذکر شده بر رفتار لرزه‌یی خود تونل در شرایط زلزله معطوف بوده است. با این حال، تأثیر حضور تونل در پاسخ سطح زمین نیز توسط آن‌ها مورد بررسی اجمالی قرار گرفته است. هم‌چنین در مطالعه‌ی مذکور تأثیر پارامترهایی از جمله: عمق قرارگیری تونل، انعطاف‌پذیری پوشش تونل و مشخصه‌های تحریک ورودی در رفتار لرزه‌یی دو نوع تونل مربعی و دایره‌یی مورد بررسی قرار گرفته و درخصوص پارامتر انعطاف‌پذیری پوشش تونل چنین نتیجه‌گیری شده است که میزان بزرگ‌نمایی برای تونل انعطاف‌پذیر و صلب متفاوت است، که به معنای رفتار لرزه‌یی متفاوت دو نوع تونل با ضریب انعطاف‌پذیری متفاوت است. هم‌چنین پوشش تونل انعطاف‌پذیر، پاسخ بیشتری در دوره‌های تناوب بلندتر نسبت به تونل صلب دارد، که به معنی بسامد طبیعی کمتر تونل انعطاف‌پذیر نسبت به تونل صلب است.

هم‌چنین، در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،^[۱۵] با مدل‌سازی سانتریفیوژی کالورت‌های مربعی به بررسی اثر پارامترهایی نظیر: ضخامت کالورت، تراکم خاک، دامنه‌ی شتاب ورودی و اثر حضور روسازه در شتاب ثبت شده در اطراف کالورت‌ها پرداخته شده است. نتایج ارائه شده از مطالعه‌ی مذکور بسیار محدود بوده و نتایج آن نشان داده است که وجود سازه‌ی مدفون، مقادیر شتاب‌های بیشینه‌ی سطح زمین را کاهش می‌دهد. دلیل این امر عدم تبعیت حرکت سازه با حرکت خاک اطراف آن ذکر شده است، که باعث کاهش پاسخ زمین در بالای سازه‌ی زیرزمینی نسبت به منطقه‌ی میدان آزاد می‌شود. هم‌چنین مشاهده شده است که با افزایش مقدار شتاب بیشینه‌ی موج ورودی در پایین مدل، اثر کاهندگی وجود حفره در امواج نمایان‌تر شده و نیز جمع‌بندی مشخصی درخصوص تأثیر ضخامت کالورت (انعطاف‌پذیری پوشش) در نتایج صورت نگرفته است.

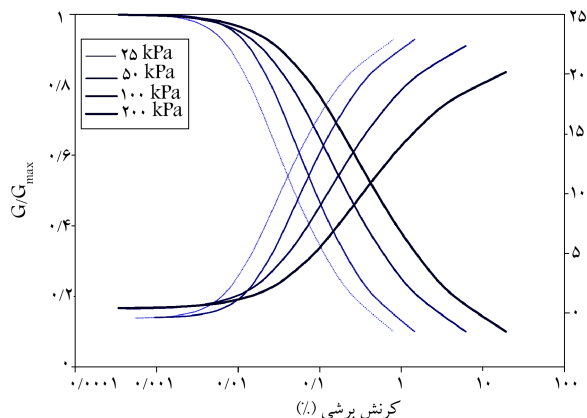
در این نوشتار، تأثیر پارامتر انعطاف‌پذیری پوشش تونل در پاسخ شتاب سطح زمین در حالت رفتار غیرخطی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک مدل عددی غیرخطی به کمک نرم‌افزار FLAC ۲D با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ صورت‌گرفته در دانشگاه کایست^۲ کره‌ی جنوبی، که به منظور مطالعه‌ی لرزه‌یی رفتار تونل زیرزمینی مترو صورت گرفته است، صحت‌سنجی شده است. سپس تأثیر انعطاف‌پذیری پوشش تونل در پاسخ شتاب سطح زمین در یک مطالعه‌ی پارامتری با فرض ۳ جنس مختلف (۳ ضریب انعطاف‌پذیری متفاوت) برای پوشش تونل مورد بررسی و تحلیل واقع شده است.

۲. آزمایش‌های سانتریفیوژ

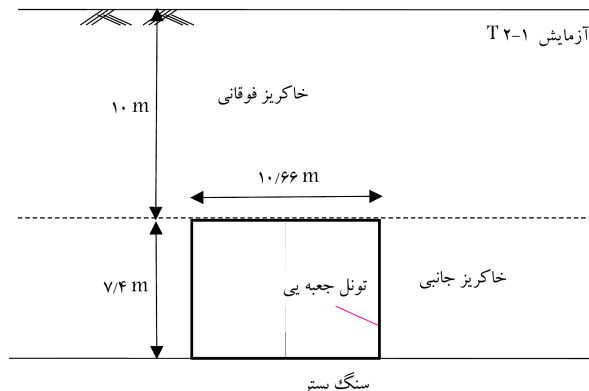
مجموعه‌یی از آزمایش‌های سانتریفیوژ دینامیکی در دانشگاه کایست کره‌ی جنوبی به‌منظور مطالعه‌ی رفتار لرزه‌یی تونل جعبه‌یی شکل مترو در شتاب سانتریفیوژی ۴۰ g انجام و در آن‌ها از تحریک ورودی با مقادیر بیشینه‌ی شتاب‌های مختلف

جدول ۱. فهرست آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده. [۱۶]

شناسه‌ی آزمایش	هدف آزمایش	شرایط خاک		تحریک ورودی
		ضخامت خاکریز جانبی (متر)	ضخامت خاکریز فوقانی (متر)	
FF	پاسخ میدان آزاد	یک لایه ماسه به ضخامت ۱۷٫۴ متر		زلزله‌های کوبه و
T۱	پاسخ تونل جعبه‌یی شکل	۷٫۴	۵	نورتریج با
T۲-۱	پاسخ تونل جعبه‌یی شکل	۷٫۴	۱۰	PGAهای مختلف
T۲-۲	پاسخ تونل جعبه‌یی شکل	۷٫۴	۱۰	



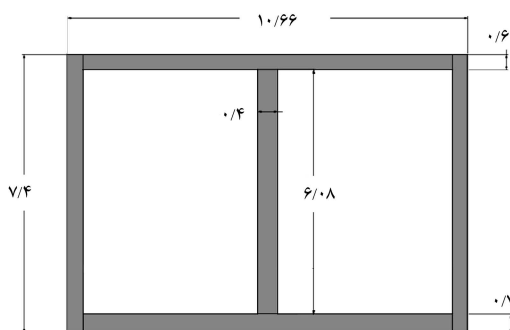
شکل ۳. تغییرات منحنی G/G_{max} و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی ماسه‌ی مورد آزمایش.



شکل ۲. آزمایش T۲-۱ در مقیاس پروتوتایپ.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی مورد استفاده.

پارامتر	واحد	مقدار
نام خاک بر حسب طبقه‌بندی متحد	-	SP
وزن مخصوص خشک بیشینه	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۶٫۱
وزن مخصوص خشک کمینه	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۲٫۲
وزن مخصوص طبیعی	کیلو نیوتن بر مترمکعب	۱۵٫۴
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۴۵
چسبندگی	کیلو پاسکال	۰
تراکم	%	۸۴
نسبت پواسون	-	۰٫۳



شکل ۴. مقطع تونل مدل شده در آزمایش‌ها در مقیاس پروتوتایپ (ابعاد بر حسب متر).

ستون تشدید در ۴ فشار همه‌جانبه‌ی ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به دست آمده است، در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵.۲. ابزارگذاری مدل‌ها

از ابزار شتاب‌سنج مینیاتوری به منظور ثبت شتاب افقی در آزمایش‌ها استفاده شده است. برای مدل T۲-۱، ۱۵ شتاب‌سنج مطابق شکل ۵ جهت ثبت شتاب در داخل خاک روی سازه و روی جعبه به کار رفته است. شتاب‌سنج A۲۰ به عنوان شتاب ورودی آزمایش T۲-۱ در مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

۶.۲. تحریک‌های ورودی به مدل‌ها

از دو نوع موج ورودی (زلزله‌ی کوبه و نورتریج) با PGAهای مختلف (تا بیشینه‌ی $g \cdot 0.225$) در آزمایش‌های سانتریفیوژی استفاده شده است. شکل ۶، تاریخچه‌ی زمانی شتاب این دو زلزله را نشان می‌دهد. مشخصات این دو زلزله در جدول ۳ ارائه شده است. بسامد غالب زلزله‌ی کوبه و نورتریج به ترتیب برابر ۱٫۴ و ۳ هرتز است.

۴.۲. مشخصات تونل زیرزمینی

سازه‌ی زیرزمینی مدل شده در آزمایش‌ها از میان تونل‌های جعبه‌یی شکل متروی سئول کره‌ی جنوبی، که به صورت کند و پوش اجرا شد، انتخاب شده است. تونل جعبه‌یی در مقیاس پروتوتایپ به صورت تونل دو دهانه بوده است، که مقطعی مستطیلی با عرض ۱٫۰۶۶ متر، ارتفاع ۷٫۴ متر، و طول ۱۹٫۶ متر دارد. مابین دو دهانه، ستون‌هایی به فواصل مختلف از یکدیگر در طول تونل واقع شده‌اند. مقطع این تونل جعبه‌یی شکل در شکل ۴ نشان داده شده است. تونل پروتوتایپ از جنس بتن با مدول کشسانی ۲۴ گیگاپاسکال بوده است. این تونل جعبه‌یی با در نظر گرفتن قوانین مقیاسی در مدل سانتریفیوژی با جعبه‌یی از جنس آلومینیوم و در مقیاس یک چهلم ساخته شده است.

۱.۳. المان بندی مدل

در مدل سازی های عددی، ابعاد المان باید به نحوی انتخاب شود تا این شرط (به ویژه شرط سوم) برآورده شوند:

۱. دقت تحلیل: ابعاد ریزتر المان تا یک میزان به منزله دقت بیشتر تحلیل خواهد بود.

۲. سرعت تحلیل: با کاهش ابعاد المان سرعت تحلیل به ویژه در مسائل دینامیکی کاهش خواهد یافت.

۳. انتشار صحیح موج در محیط: بیشینه اندازه المان در مسائل دینامیکی انتشار موج باید طوری باشد تا انتشار موج در محیط به درستی صورت گیرد. به منظور انتشار صحیح موج در محیط، کولمر و لیسمر (۱۹۷۳)،^[۱۹] بیشینه ابعاد المان (Δl) را به رابطه ۱ محدود کرده اند:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1)$$

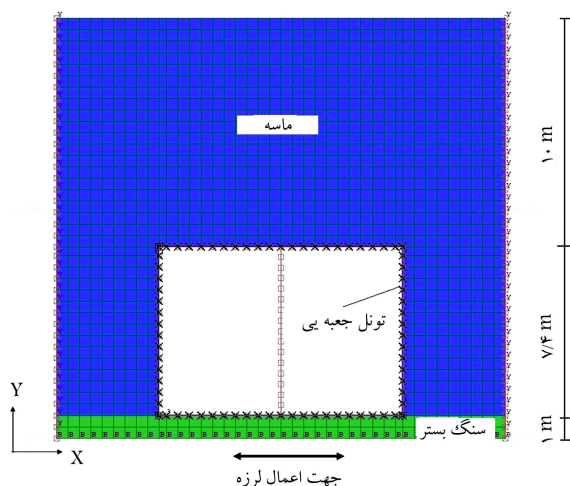
که در آن، λ طول موج انتشار یافته در محیط است که با کمینه سرعت موج برشی در محیط (V_{smin}) و بیشینه بسامد تحریک ورودی (f_{max}) به صورت رابطه ۲ آمده است:

$$\lambda_{min} = V_{smin} / f_{max} \quad (2)$$

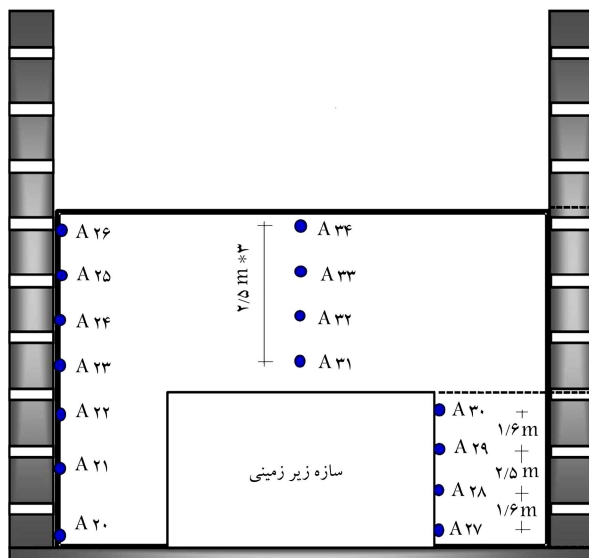
طبق دو رابطه ذکر شده، بیشینه ابعاد المان ها به منظور انتشار صحیح موج در محیط به صورت رابطه ۳ تعیین می شود:

$$\Delta l \leq \frac{V_{smin}}{10 \times f_{max}} \quad (3)$$

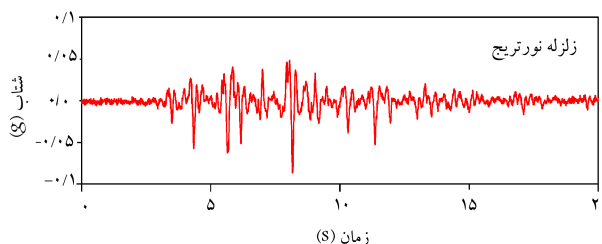
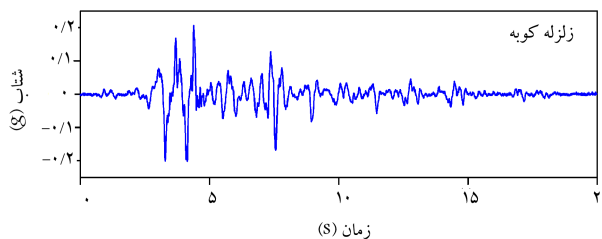
با توجه به کمینه سرعت موج برشی خاک ماسه بی مورد بررسی برابر با ۱۵۰ متر بر ثانیه و بسامد بیشینه زلزله برابر ۱۰ هرتز، بیشینه ابعاد المان طبق رابطه ۳ به ۱٫۷۵ متر محدود می شود. این تذکر لازم است که در تحلیل های عددی، بسامدهای بالاتر از ۱۰ هرتز امواج ورودی زلزله فیلتر شده اند. به منظور دقت در تحلیل های عددی صورت گرفته، از المان های ۴ ضلعی کرنش مسطح با بیشینه ابعاد ۰٫۷۵ متر استفاده شده است. المان بندی مدل T۲-۱ در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷. المان بندی مدل T۲-۱ در نرم افزار FLAC.



شکل ۵. ابزارگذاری مدل سانتریفیوژی شماره ۱-T۲.



شکل ۶. تاریخچه زمانی شتاب نگاشت های مورد استفاده.

جدول ۳. مشخصات زلزله های کوبه و نورتریج استفاده شده در آزمایش ها.

زلزله	سال وقوع	ایستگاه لرزه نگاری	بزرگا (MW)	فاصله از گسل مسیب (کیلومتر)
کوبه	۱۹۹۵	KJMA	۶٫۹	۰٫۶
نورتریج	۱۹۹۴	Anaheim	۶٫۷	۷۰

۳. مدل سازی عددی آزمایش T۲-۱

مدل سازی عددی آزمایش سانتریفیوژ انتخاب شده (آزمایش T۲-۱) با نرم افزار دو بعدی اختلاف محدود ۲D FLAC انجام شده است. نرم افزار مذکور توانایی انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه را دارد. آزمایش در مقیاس پروتوتایپ در نرم افزار مدل سازی شده و جزئیات آن در ادامه ارائه شده است.

۲.۳. شرایط مرزی مدل

صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژی، مستلزم مدل‌سازی صحیح شرایط مرزی مدل‌های سانتریفیوژی توسط مدل عددی است. شرایط مرزی مدل‌های سانتریفیوژی شامل مدل‌سازی مرز پایینی جعبه‌ی مدل و مرزهای جانبی جعبه‌ی ESB است. این مرزها در مدل عددی به این صورت مدل‌سازی شده است: تحریک ورودی در نرم‌افزار FLAC با فرض کف صلب و یا کف نرم^۵ به دو صورت قابل اعمال است:

(الف) در حالت کف صلب، تحریک ورودی به صورت تاریخچه‌ی زمانی شتاب به کف مدل اعمال می‌شود.

(ب) در حالت کف نرم، از یک مرز آرام^۶ در کف مدل استفاده شده و تحریک ورودی در قالب تاریخچه‌ی زمانی تنش به کف مدل اعمال می‌شود.^[۲۰]

در آزمایش‌های سانتریفیوژی، کف مدل به صورت یک مرز صلب عمل می‌کند و امواج ورودی همانند یک مرز صلب به داخل مدل منعکس می‌شود. بنابراین میرایی تشعشعی در این آزمایش‌ها مدل نمی‌شود. در مدل عددی، مرز کف به صورت مرز صلب در نظر گرفته شده و با یک لایه‌ی سنگی به ضخامت ۱ متر از جنس سنگ بستر محل مدل‌سازی شده است. تحریک ورودی به صورت تاریخچه‌ی زمانی شتاب به سراسر کف مدل اعمال شده است. این تذکر لازم است که مدل پروتوتایپ دارای شرایطی مشابه مدل سانتریفیوژی است، که در آن لایه‌ی ماسه‌یی بر سنگ بستر صلب واقع شده است.

فاصله از مرزهای جانبی برابر با ابعاد جعبه‌ی سانتریفیوژ در مقیاس نمونه‌ی واقعی (پروتوتایپ) در نظر گرفته شده است. ابعاد انتخابی مرزهای جانبی در مدل عددی براساس پژوهشی در سال ۲۰۱۱^[۲] که در آن به مدل‌سازی عددی آزمایش‌های سانتریفیوژ پرداخته شده است و هم‌چنین با ارزیابی نتایج دو مدل با مرزهای جانبی متفاوت (یک مدل با گسترش مرزهای جانبی تا مرز دور و مدل دیگر با مرزهای جانبی محدود برابر با ابعاد جعبه‌ی سانتریفیوژ در مقیاس پروتوتایپ) تا رسیدن به بهترین نتیجه در صحت‌سنجی نتایج بوده است.

مرزهای جانبی مدل سانتریفیوژی با در نظر گرفتن مشخصه‌ی اصلی جعبه‌ی ESB مدل‌سازی شده است. عملکرد مرزهای جانبی جعبه‌ی ESB طوری بوده است که تمام نقاط هم‌ارتفاع، با تغییر مکان یکسان و هم‌جهت در راستای اعمال لرزش (راستای افقی) بوده‌اند و در جهت قائم هیچ‌گونه تغییر مکانی نداشته‌اند. برای مدل‌سازی این مشخصه، از یک المان سازه‌یی (المان لاینر^۷ در FLAC) به ضخامت ناچیز ۱ میلی‌متر در مرز دو طرف مدل استفاده شده است. گره‌های این المان سازه‌یی به گره‌های خاک مقید شده است، به طوری که هیچ‌گونه لغزش و جدایی بین آنها اتفاق نیفتد. مدل کشسانی این المان‌ها با مدل کشسانی خاک یکسان در نظر گرفته شده است. سپس به کمک دستور SLAVE در نرم‌افزار FLAC، تغییر مکان افقی گره‌های هم‌ارتفاع دو طرف جعبه طوری به یکدیگر مقید شده‌اند که در هر لحظه، تغییر مکان یکسان و هم‌جهت با هم داشته باشند. این تذکر لازم است که المان لاینر فقط به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزهای جانبی جعبه‌ی ESB تعریف شده است، به همین دلیل مشخصات آن عیناً مشابه خاک فرض شده است. این شرایط مرزی در پژوهشی در سال ۲۰۱۰^[۲۱] جهت شبیه‌سازی عددی جعبه‌ی لمینار^۸ مشابه در آزمایش‌های میز لرزه استفاده شده است، که نتایج حاصل با نتایج آزمایش‌ها هم‌خوانی خوبی داشته است.

پس از بررسی نتایج حاصل شده، مدل عددی با ابعاد معرفی شده (شکل ۷) و با شرایط مرزی توضیح داده شده، به عنوان مناسب‌ترین مدل جهت پیش‌بینی مناسب نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ انتخاب شده است.

۳.۳. مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک

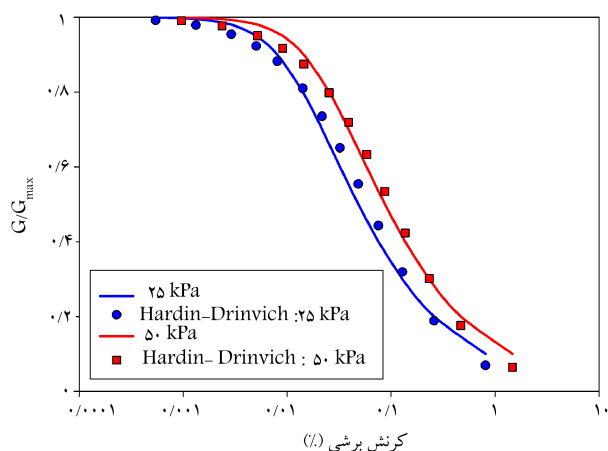
از مدل کشسان خمیری موهر کولمب برای مدل‌سازی رفتار خاک جهت تحلیل استاتیکی مدل استفاده شده است. مطابق شکل ۸، مدل کشسانی خاک تابعی از عمق است که به صورت متغیر با عمق به نرم‌افزار معرفی شده است. سایر پارامترهای این مدل مطابق مقادیر ارائه شده در جدول ۲ لحاظ شده‌اند.

میرایی واقعی در محیط‌های خاکی به صورت هیستریزیس است، لذا رفتار خاک در حالت دینامیکی در مدل غیرخطی در محدوده‌ی کشسان به صورت غیرخطی و با میرایی هیستریزیس مدل شده است. در نرم‌افزار FLAC از منحنی‌های کاهش مدول و میرایی، که در تحلیل‌های معادل خطی معمول است، به منظور مدل‌سازی میرایی هیستریزیس جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده می‌شود.^[۲۲] برای این منظور، منحنی تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی (γ) با پارامترهای یکی از مدل‌های هیستریزیس موجود در نرم‌افزار کالیبره و به نرم‌افزار معرفی می‌شود. در این مطالعه از مدل هاردین - درینوچ^۹ استفاده شده است، که در آن رابطه‌ی بین G/G_{max} و γ به صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \quad (4)$$

که در آن، γ_{ref} کرنش برشی مرجع است، و به میزان کرنش برشی در $G/G_{max} = 0.5$ اطلاق می‌شود. تمامی منحنی‌های G/G_{max} خاک ماسه‌یی ارائه شده در شکل ۳ با مدل هاردین - درینوچ کالیبره شده‌اند. شکل ۸، منحنی‌های کالیبره شده‌ی آزمایش‌ها با مدل هاردین - درینوچ را نشان می‌دهد. مدل هیستریزیس غیرخطی به لایه‌های مختلف خاک بر حسب تنش مؤثر متوسط در هر عمق معرفی شده است.

چرخه‌ی هیستریزیس تنش - کرنش غیرخطی برای یک المان در وسط مدل ناشی از ۱۰ سیکل بارگذاری هارمونیک با $g = 0.1$ و $PGA = 0.3$ هرتز در شکل ۹ نشان داده شده است. مساحت چرخه، مبین میرایی هیستریزیس است.



شکل ۸. منحنی‌های G/G_{max} کالیبره شده‌ی آزمایش‌ها با مدل هاردین - درینوچ.

جدول ۴. مشخصات المان رابط.

زاویه اصطکاک بین تونل و خاک (درجه)	سختی برشی (K_s) (پاسکال بر متر)	سختی نرمال (K_n) (پاسکال بر متر)
۳۰	$۱۰^۹$	$۱۰^۹$

۵.۳. تحلیل‌ها

پس از تعادل استاتیکی مدل تحت وزن خود، تحلیل دینامیکی با اعمال تاریخچه‌ی زمانی شتاب به کف مدل انجام شده است. گام زمانی تحلیل‌های دینامیکی برابر با ۵-۱۰ ثانیه به دست آمده است. در حین تحلیل‌های دینامیکی، تاریخچه‌ی زمانی شتاب در نقاط مختلف مدل‌های عددی در موقعیت‌های متناظر با محل شتاب‌سنج‌های آزمایش‌های سانتریفیوژی به عنوان خروجی مدل‌ها برداشت شده است.

۶.۳. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش T۲-۱ در قالب تاریخچه‌ی زمانی شتاب با مقادیر ثبت شده در مدل آزمایشگاهی (شتاب‌سنج‌های A۲۲ تا A۳۴) برای زلزله‌ی نورتریج با $g = 0.88$ و $PGA = 10$ مقایسه شده است. از مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های عددی با شتاب‌های ثبت شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ به خوبی مشاهده می‌شود که مدل عددی با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی دامنه و مسیر شتاب‌های ثبت شده در آزمایش T۲-۱ است. این تذکر لازم است که نتایج حاصله برای سایر مقادیر PGA حرکات ورودی نیز نتیجه‌ی مشابهی را به دنبال داشته است. بنابراین، مدل عددی غیرخطی مدل‌سازی شده با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ صحت‌سنجی خواهد شد و انجام مطالعات پارامتری با مدل عددی صحت‌سنجی شده معتبر خواهد بود.

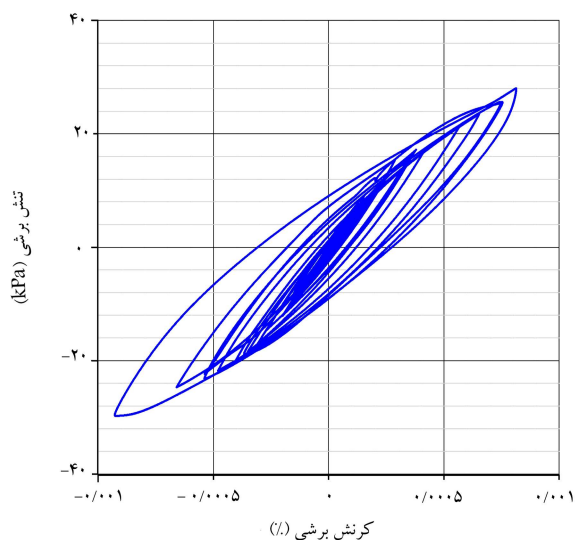
۴. مطالعه‌ی پارامتری

پس از صحت‌سنجی مدل عددی، یک مطالعه‌ی پارامتری به منظور بررسی اثر انعطاف‌پذیری سازی زیرزمینی در پاسخ شتاب سطح زمین انجام شده است. پارامتر بی‌بعد ضریب انعطاف‌پذیری (F) طبق رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود، که بیانگر میزان انعطاف‌پذیری تونل نسبت به خاک اطراف است (دستورالعمل طراحی و ساخت تونل‌های جاده‌یی، FHWA):^[۲۲]

$$F = (G_m / K_s) \cdot (W / H) \quad (۶)$$

که در آن، G_m مدول برشی متوسط خاک اطراف تونل متناسب با کرنش برشی؛ K_s سختی برشی پوشش تونل؛^[۱۲] H, W به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع سازی زیرزمینی؛ K_s سختی برشی پوشش تونل است، که از تحلیل مجزای قاب سازه‌یی تونل (شکل ۱۱) به دست می‌آید. بدین صورت که برای قاب سازه‌یی تونل با شرایط تکیه‌گاهی ساده‌ی کف، نیروی واحد نقطه‌یی در تراز سقف تونل اعمال و تغییرمکان افقی در تراز سقف تعیین می‌شود. سختی برشی (K_s) از تقسیم نیروی واحد اعمالی (P) بر تغییرمکان حاصله (Δ) به دست می‌آید ($K_s = P / \Delta$).

جهت تعیین K_s ، قاب سازه‌یی تونل بدون حضور خاک در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و با اختصاص مشخصات سازه‌یی به قاب (از قبیل سختی و ضخامت) و اعمال بار واحد، تغییرمکان افقی در تراز سقف قاب محاسبه و K_s تعیین شده است. پس



شکل ۹. چرخه‌ی هیستریزس تنش - کرنش المان در وسط مدل T۲-۱.

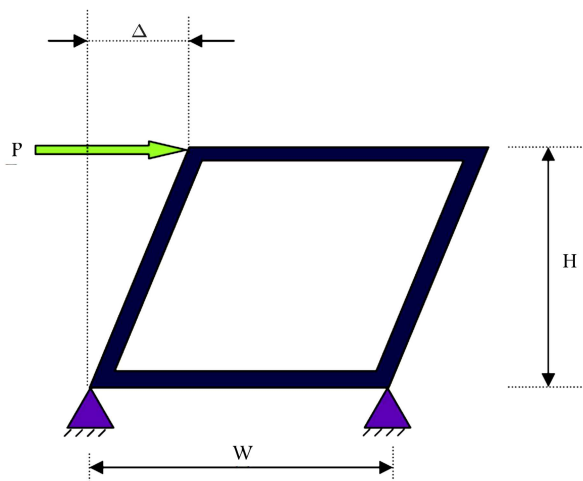
۴.۳. سازی زیرزمینی و اندرکنش خاک - سازه

از المان‌های تیر برای مدل‌سازی سازی تونل زیرزمینی استفاده شده است. اندرکنش بین تونل و محیط اطراف توسط المان رابط 10° با رفتار برشی موهر-کولمب مدل‌سازی شده است. مشخصات المان رابط شامل سختی برشی و قائم (K_s, K_n) و همچنین زاویه‌ی اصطکاک بین دو محیط (δ) -- که المان رابط‌هی واسطه بین آن دو است -- هستند. پارامترهای سختی المان رابط به توصیه‌ی آیتسکا^[۱۱]،^[۲۲] و طبق رابطه‌ی ۵ محاسبه شده است:

$$K_n = K_s = 10 \cdot \max \left[\frac{K + \frac{1}{3} G_{\max}}{\Delta l_{\min}} \right] \quad (۵)$$

که در آن، K مدول بالک محیط سخت‌تر و Δl_{\min} طول ریزترین المان در راستای عمود بر جهت المان رابط است، که برابر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. طبق رابطه‌ی ۵، مقادیر سختی برشی و نرمال برای المان رابط بین مصالح خاک و بتن، برابر با 4×10^{11} Pa/m به دست آمده است. طبق توصیه‌ی آیتسکا، استفاده از مقادیر بسیار بالای سختی برای المان رابط توصیه نمی‌شود؛ چرا که این مقادیر از سختی به شدت، مدت زمان تحلیل دینامیکی مسئله را افزایش می‌دهد. لذا با سعی و خطا مقادیر کمتر سختی برای المان رابط (10^9 Pa/m) انتخاب شده است، به طوری که کاهش سختی تا میزان مذکور، تأثیری در نتایج صحت‌سنجی نداشته است.

زاویه‌ی اصطکاک بین مصالح تونل از جنس بتن و خاک، از مطالعات گومز و همکاران (۲۰۰۳)^[۲۳]، برآورد شده است. این میزان از زاویه‌ی اصطکاک، هم‌خوانی مناسبی با مقدار معمول 27.3° دارد، که برای ماسه‌ی متراکم در این مطالعه، با زاویه‌ی اصطکاک 45° درجه، $\delta = 30^\circ$ را به دست می‌دهد. درخصوص سازه‌های زیرزمینی به دلیل احاطه شدن سازه از اطراف و محدود شدن حرکات نسبی، اندرکنش بین خاک و سازه به اهمیت سازه‌های روی سطح زمین نیست. مطالعه‌ی پارامتری انجام شده توسط نویسندگان نشان داده است که تغییرات اندک در پارامترهای عنصر واسطه (رابط)، تأثیر چندانی در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین و شتاب‌های ثبت شده ندارند. مشخصات المان رابط در جدول ۴ ارائه شده است.



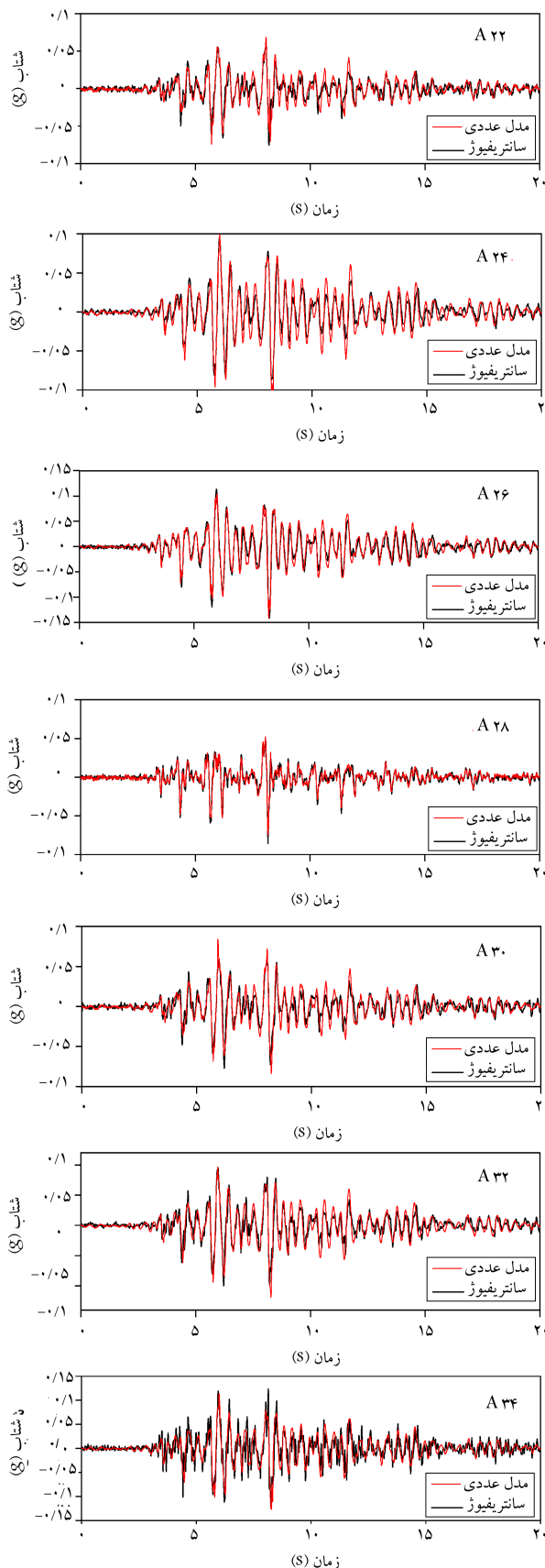
شکل ۱۱. قاب سازه‌یی جهت تعیین K_S . [۲۳]

از تعیین K_S ، مقادیر ضریب انعطاف‌پذیری پوشش تونل با مقطع مستطیلی طبق رابطه‌ی ۶ محاسبه شده است. ضریب انعطاف‌پذیری بالاتر به معنی انعطاف‌پذیرتر بودن سازه‌ی زیرزمینی نسبت به محیط اطراف است.

در این مطالعه، از سه مصالح با سختی متفاوت در پوشش تونل استفاده شده است. با ثابت نگه‌داشتن ضخامت پوشش، ۳ ضریب انعطاف‌پذیری ۷، ۲۱ و ۷۲ به ترتیب برای مصالح فولادی، آلومینیومی و بتنی پوشش به دست آمده است. در جدول ۵، مشخصات مدل‌های در نظر گرفته‌شده در مطالعه‌ی پارامتری اثر ضریب انعطاف‌پذیری پوشش ارائه شده است.

در جدول مذکور، دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم‌های شماره ۱ تا ۴ نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب انعطاف‌پذیری سیستم، دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم افزایش یافته است، که به منزله‌ی نرم‌تر شدن سیستم است. مصالح پوشش تونل در تحلیل‌های شماره‌ی ۳ و ۴ از دو جنس متفاوت است، ولی ضخامت پوشش‌ها طوری انتخاب شده است تا ضریب انعطاف‌پذیری برای هر دو مدل یکسان باشد ($F = 72$). نتیجه‌ی این مقایسه، کاربرد پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری (F) را به‌عنوان یک پارامتر بی‌بعد در مطالعات مشخص می‌کند. بدین صورت که انتظار می‌رود برای دو ضریب انعطاف‌پذیری یکسان، نتایج یکسانی برای شتاب در سطح زمین به دست آید. نکته‌ی قابل توجه، یکسان بودن دوره‌ی تناوب طبیعی این دو مدل (برابر با ۰٫۴ ثانیه) است. نتیجه‌ی این مقایسه در شکل ۱۲ برای زلزله‌ی کوبه با $PGA = 0.075g$ در قالب طیف پاسخ شتاب در سطح زمین نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای دو جنس متفاوت مصالح پوشش (فولاد و بتن) ولی با ضریب انعطاف‌پذیری نسبی یکسان ($F = 72$)، برابر شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که ضریب انعطاف‌پذیری نسبی یکسان برای دو سیستم با مشخصات مصالح مختلف به منزله‌ی تأثیر مشابه دو سیستم در پاسخ لرزه‌ی در سطح زمین خواهد بود. بنابراین پارامتر F یک پارامتر بی‌بعد مناسب در بررسی پاسخ لرزه‌ی تونل در سطح زمین است.

به‌منظور بررسی تأثیر پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین، نتایج حاصل از تحلیل‌های تعریف‌شده برای این منظور (تحلیل‌های شماره‌ی ۱ الی ۳ در جدول ۵)، در قالب طیف پاسخ شتاب در سطح زمین در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای زلزله‌ی کوبه با $PGA = 0.075g$ و نورتریج با $PGA = 0.088g$



شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش ۱-T۲: زلزله‌ی کوبه با $0.088g$ $PGA =$

جدول ۵. تحلیل های پارامتری تعریف شده.

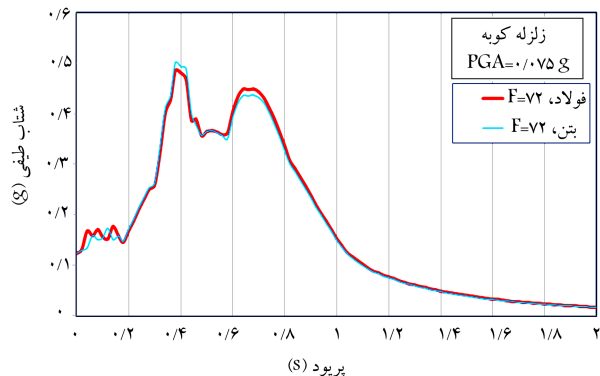
شماره ی تحلیل	جنس مصالح پوشش	مدول کشسانی (گیگا پاسکال)	ضخامت پوشش (متر)	ضریب ضریب پواسون	K_s (MPa)	ضریب انعطاف پذیری (F)	دوره ی تناوب طبیعی سیستم (ثانیه)
۱	فولاد	۲۰۰	۰٫۶	۰٫۳	۱۶٫۷	۷	۰٫۳۳
۲	آلومینیوم	۷۰	۰٫۶	۰٫۳۳	۵٫۹	۲۱	۰٫۳۵
۳	بتن	۲۰	۰٫۶	۰٫۲	۱٫۷	۷۲	۰٫۴
۴	فولاد	۲۰۰	۰٫۲۷	۰٫۳	۱٫۷	۷۲	۰٫۴

نشان داده شده است. از بررسی طیف های پاسخ شتاب در سطح زمین در شکل های ۱۳ و ۱۴، این نتایج به دست آمده است:

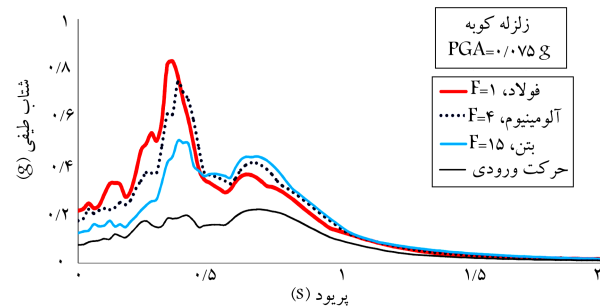
- روند نتایج حاصله برای دو زلزله ی کوبه و نورتریج مشابه است و تأثیر انعطاف پذیری پوشش در پاسخ شتاب در سطح زمین در هر دو شکل نمایان است.
- با کاهش ضریب انعطاف پذیری تونل (افزایش سختی پوشش)، میزان بیشینه ی شتاب در سطح زمین (PGA) افزایش یافته است.
- تونل با انعطاف پذیری کمتر (پوشش سخت تر)، پاسخ بیشتری در دوره ی تناوب کم نسبت به تونل با انعطاف پذیری بیشتر دارد. عکس این موضوع برای دوره های تناوب بالاتر اتفاق افتاده است، به طوری که تونل با پوشش نرم تر، پاسخ بیشتری نسبت به تونل سخت تر دارد. در مطالعه ی پارامتری انجام شده، پوشش فولادی، بیشترین پاسخ را داشته است و پوشش آلومینیومی با سختی کمتر، پاسخ کمتری نسبت به پوشش فولادی و پوشش بتنی با کمترین سختی، کمترین پاسخ را در دوره های تناوب کم داشته اند.

- با افزایش ضریب انعطاف پذیری پوشش، سختی سیستم کاهش یافته است، که افزایش دوره ی تناوب طبیعی سیستم را در پی داشته است (جدول ۵). در طیف های پاسخ شتاب نشان داده شده در شکل های ۱۳ و ۱۴، پیک اول پاسخ در بسامد طبیعی سیستم اتفاق افتاده است. همان طور که در شکل های مذکور مشاهده می شود، با افزایش ضریب انعطاف پذیری پوشش، پاسخ بیشینه در دوره ی تناوب بیشتری اتفاق افتاده و بیشینه ی پاسخ در نمودار به سمت راست (دوره ی تناوب بالاتر) متمایل شده است. این مسئله در مطالعه ی آزمایشگاهی انجام شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، [۳] نیز مشاهده شده است.

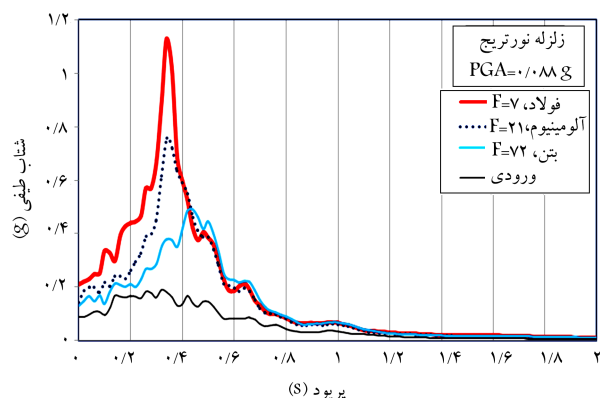
- تأثیر پارامتر انعطاف پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین در دوره های تناوب کوتاه به مراتب مشهودتر از تأثیر این پارامتر در پاسخ شتاب در دوره های تناوب بلندتر است. دلیل این مسئله، انطباق دوره های تناوب طبیعی سیستم های مورد بررسی با دوره های تناوب کوتاه است، که باعث تقویت پاسخ شتاب در این دوره های تناوب نسبت به دوره های تناوب بلندتر شده است. لذا میزان تأثیر پارامتر انعطاف پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین متأثر از دوره ی تناوب طبیعی سیستم مورد بررسی است. برای مثال، در شکل ۱۳، میزان تأثیر پارامتر انعطاف پذیری در پاسخ شتاب در دوره های تناوب کم نظیر دوره های تناوب طبیعی سیستم ها بسیار بیشتر از تأثیر این پارامتر در دوره های تناوب بالاتر است. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، میزان تأثیر پارامتر انعطاف پذیری در دوره های تناوب کم بسیار مشهود بوده، ولی در دوره های تناوب بالاتر این تأثیر قابل اغماض است.
- رکورد زلزله ی کوبه با بسامد غالب ۱٫۴ هرتز نسبت به زلزله ی نورتریج با بسامد غالب ۳ هرتز، یک زلزله ی میدان نزدیک حاوی دوره ی تناوب بالاتر است. مطابق



شکل ۱۲. طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای مصالح پوشش با جنس متفاوت ولی با ضریب انعطاف پذیری یکسان.



شکل ۱۳. طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای مصالح پوشش با ضریب انعطاف پذیری متفاوت - زلزله ی کوبه.



شکل ۱۴. طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای مصالح پوشش با ضریب انعطاف پذیری متفاوت - زلزله ی نورتریج.

۵. نتیجه‌گیری

پس از صحت‌سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام‌گرفته بر روی یک تونل مترو، اثر انعطاف‌پذیری سازه‌ی زیرزمینی در پاسخ شتاب در سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. این مسئله از طریق یک مطالعه‌ی پارامتری با در نظر گرفتن ۳ جنس مختلف از مصالح پوشش (با ۳ ضریب انعطاف‌پذیری متفاوت) مورد بررسی قرار گرفته و این نتایج حاصل شده است:

۱. دو سیستم تونل با ضریب انعطاف‌پذیری برابر، منجر به پاسخ یکسان شتاب در سطح زمین می‌شوند.
۲. ضریب انعطاف‌پذیری پوشش سازه‌ی زیرزمینی، پاسخ شتاب در سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این مسئله تحت تأثیر محتوای بسامدی حرکت ورودی و بسامد طبیعی سیستم است.
۳. با کاهش ضریب انعطاف‌پذیری تونل (افزایش سختی پوشش)، میزان بیشینه‌ی شتاب در سطح زمین (PGA) افزایش می‌یابد.
۴. با افزایش انعطاف‌پذیری پوشش، سختی سیستم کاهش می‌یابد، که افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم را در پی دارد و لذا بیشینه‌ی پاسخ شتاب در دوره‌های تناوب بالاتری اتفاق می‌افتد.
۵. پوشش سخت‌تر (ضریب انعطاف‌پذیری کمتر)، باعث بزرگ‌نمایی بیشتر پاسخ شتاب در دوره‌های تناوب کوتاه نسبت به پوشش‌های منعطف‌تر می‌شود، در حالی که پوشش منعطف‌تر منجر به پاسخ بیشتر در دوره‌های تناوب بلندتر نسبت به پوشش‌های سخت‌تر می‌شود.
۶. تونل با پوشش منعطف‌تر، باعث بزرگ‌نمایی دوره‌های تناوب بالاتر می‌شود، که می‌تواند برای سازه‌های بلند خطرآفرین باشد. عکس این قضیه برای تونل با پوشش سخت‌تر مطرح است، که باعث بزرگ‌نمایی بیشتر در دوره‌های تناوب پایین می‌شود و سازه‌های کم ارتفاع را تهدید می‌کند.
۷. در این مطالعه، تأثیر پارامتر انعطاف‌پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین در دوره‌های کوتاه به مراتب مشهودتر از تأثیر این پارامتر در پاسخ شتاب در دوره‌های تناوب بلندتر بوده است. دلیل این مسئله انطباق دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم‌های مورد بررسی با دوره‌های تناوب کوتاه است، که باعث تقویت پاسخ شتاب در این دوره‌های تناوب نسبت به دوره‌های تناوب بلندتر شده است. لذا میزان تأثیر پارامتر انعطاف‌پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین متأثر از دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم مورد بررسی است.

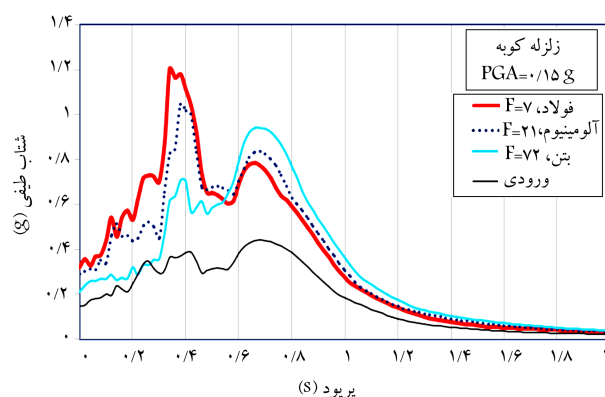
۸. تأثیر ضریب انعطاف‌پذیری پوشش تونل در شتاب سطح زمین برای سطوح مختلف از بیشینه‌ی شتاب ورودی بررسی شده و نتایج حاصله در موارد ۱ تا ۶ در بخش نتیجه‌گیری، در تمامی سطوح شتاب ورودی مشاهده شده است. افزایش PGA تحریک اعمالی منجر به غیرخطی‌تر شدن خاک و در نتیجه کاهش بزرگ‌نمایی به ویژه در دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم نسبت به تحلیل با PGA کمتر شده است. به عبارت دیگر، تأثیر پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین در دوره‌های تناوب نظیر دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم در PGAهای کمتر مشهودتر است.

براساس نتایج حاصله از مطالعه‌ی پارامتری انجام‌شده در محیط غیرخطی خاک، اهمیت تأثیر پارامتر انعطاف‌پذیری پوشش تونل در اندرکنش دینامیکی این‌گونه سازه‌های زیرزمینی با محیط مجاور مشخص شده است. این تذکر لازم است که

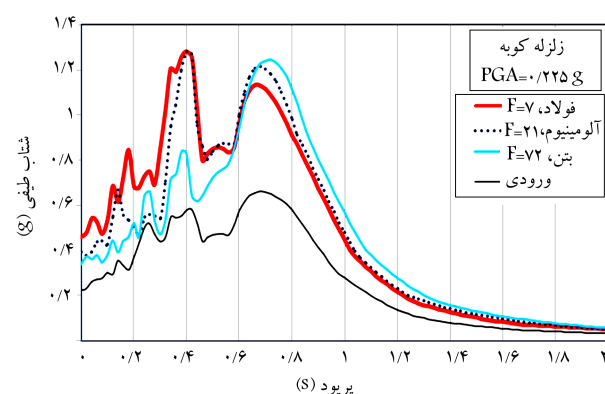
شکل ۱۳، دوره‌های تناوب بالاتر در طیف پاسخ زلزله‌ی کوبه، پاسخ بیشتری دارد و اثر انعطاف‌پذیری پوشش در این دوره‌های تناوب نمایان‌تر است. این بدان معنی است که پوشش منعطف‌تر تونل، باعث بزرگ‌نمایی دوره‌های تناوب بالاتر شده است، که می‌تواند برای سازه‌های بلند خطرآفرین باشد. عکس این قضیه نیز برای پوشش سخت‌تر مطرح است، که باعث بزرگ‌نمایی بیشتر در دوره‌های تناوب پایین می‌شود و ساختمان‌های کوتاه مجاور تونل را تهدید می‌کند.

به منظور بررسی اثرات شتاب بیشینه‌ی موج ورودی در نتایج حاصله، تحلیل‌های شماره‌ی ۱ تا ۳ جدول ۵ با مقادیر بزرگ‌تر PGA حرکت ورودی انجام شده است، تا اثر غیرخطی شدن خاک در نتایج حاصله مشخص شود. بدین منظور زلزله‌ی کوبه با بیشینه‌ی شتاب ۲ و ۳ برابر PGA استفاده شده در مطالعه‌ی پارامتری یعنی $0.15g$ ، $0.225g$ ، $0.15g$ در مدل‌سازی عددی استفاده شده است که نتایج این تحلیل‌ها در قالب طیف پاسخ شتاب در سطح زمین در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶، نتایج حاصله در این تحلیل‌ها مؤید نتایج حاصله از تحلیل با شتاب‌های بیشینه‌ی کمتر است. بیشینه‌ی شتاب بالاتر منجر به غیرخطی‌تر شدن خاک و در نتیجه کاهش بزرگ‌نمایی به ویژه در دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم نسبت به تحلیل با PGA کمتر شده است. به عبارت دیگر، تأثیر پارامتر ضریب انعطاف‌پذیری در پاسخ شتاب در سطح زمین در PGAهای کمتر در دوره‌های تناوب نظیر دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم مشهودتر است.



شکل ۱۵. طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای مصالح پوشش با ضریب انعطاف‌پذیری متفاوت - زلزله‌ی کوبه $PGA = 0.15g$.



شکل ۱۶. طیف پاسخ شتاب در سطح زمین برای مصالح پوشش با ضریب انعطاف‌پذیری متفاوت - زلزله‌ی کوبه $PGA = 0.225g$.

از جمله تونلی با مقطع مستطیلی، عمق قرارگیری مشخص تونل و با شرایط خاص ژئوتکنیکی بوده است. تعمیم نتایج به دست آمده برای تونل‌های با مقطع دایره‌ای، تونل‌های عمیق و یا تونل‌های با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت نیازمند بررسی اثر این پارامترها به صورت جداگانه در نتایج به دست آمده است.

باسخ شتاب سطح زمین در مجاورت یک تونل زیرزمینی علاوه بر پارامتر ضریب انعطاف پذیری پوشش تونل، متأثر از پارامترهای متعددی از جمله: مقطع هندسی سازه‌ی زیرزمینی، عمق سازه‌ی زیرزمینی، مشخصات خاک، و خصوصیات زلزله‌ی اعمالی است. لذا نتایج حاصله در این نوشتار، محدود به شرایط خاص این مطالعه

پانوشتها

1. Daikai
2. Korean advanced institute of science & technology (KAIST)
3. Prototype
4. equivalent shear beam
5. compliant
6. quiet
7. Liner
8. Laminar
9. Hardin-Drinovich
10. interface
11. Itasca
12. racking stiffness

منابع (References)

1. Yoshida, N. and Nakamura, S. "Damage to daikai subway station, during the 1995 Hyogoken-Nunbu earthquake and its investigation", 11WCEE, Paper No. 2151 (1996).
2. Cilingir, U. and Madabhushi, S.P.G. "A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(3), pp. 452-462 (2011).
3. Cilingir, U. and Madabhushi, S.P.G. "Effect of depth on seismic response of circular tunnels", *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(1), pp. 117-127 (2011).
4. Penzien, J. "Seismically-induced racking of tunnel linings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(5), pp. 683-691 (2000).
5. Komakpanah, A., Shahmohammadi, B., "Effect of tunnel depth on the seismic response of subway tunnels", *Sharif Journal*, **27-2** (2): pp. 117-126, (in Persian) (2011)
6. Migliazza, M., Chiorboli, M. and Giani, G.P. "Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground", *Computers and Geotechnics*, **36**(1-2), pp. 113-124 (2009).
7. Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G. and Sofianos, A. "Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures", ASCE GSP 160, Dynamic Response and Soil Properties, Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics, pp. 1-10 (2007).
8. Wong, K.C., Shah, A.H. and Datta, S.K. "Diffraction of elastic waves in a halfspace.II. Analytical and numer-

- ical solutions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(1), pp. 69-92 (1985).
9. Dravinski, M. "Ground motion amplification due to elastic inclusions in a halfspace", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(3), pp. 313-335 (1983).
10. Pao, H.Y. and Maw, C.C., *The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations*, Ccrane-Russak, New York (1973).
11. Lee, V.W. "Three dimensional diffraction of elastic waves by a spherical cavity in an elastic halfspace: Closed form solutions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **7**(3), pp. 149-161 (1988).
12. Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R. and Sanchez-Sesma, F.J. "Effect of underground cavities on surface ground motion under SH wave propagation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**(2), pp. 1441-1460 (2009).
13. Sun, Ch. and Wang, Q. "Effects of underground structure on acceleration response of site", *Advanced Materials Research*, **368-373**, pp. 2791-2794 (2012).
14. Sica, S., Rotili, F., Simonelli, A.L. and Dello Russo, A. "The role of underground cavities on ground motion amplification", *In Proc. of 15 World Conference Earthquake Eng, Societade Portuguesa Engenharia Sismica* (2012).
15. Abuhajar, O., El Naggar, H. and Newson, T. "Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density", *Pan-Am CGS Geotechnical Conference* (2011).
16. Choo, Y.W., Kim, S.J., Ha, J.G. and Kim, D.S. "Centrifuge modeling of buried box structure subject to earthquake", *Proceeding of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong Kong, China (2011).
17. Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W. and Cho, G.Ch. "A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in korea", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **17**(1), pp. 77-84 (2013).
18. Lee, S.H., Choo, Y.W. and Kim, D.S. "Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**, pp. 102-114 (2013).
19. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations, Div. ASCE*, **99**(5), pp. 421-427 (1973).

20. Mejia, L.H. and Dawson, E.M. "Earthquake deconvolution for FLAC", *Proceedings of the 4th International FLAC Symposium*, Madrid, Spain, pp. 211-219 (May 2006).
21. Luzhen, J., Jun, Ch. and Jie, L. "Seismic response of underground utility tunnels: Shaking table testing and FEM analysis", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **9**(4), pp. 555-567 (2010).
22. Itasca Consulting Group, *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Ver. 5.0 User's Guide, Minneapolis, Itasca (2005).
23. Gómez, J.E., Filz, G.M. and Ebeling, R.M. "Extended hyperbolic model for sand-to-concrete interfaces", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**(11), pp. 993-1000 (2003).
24. FHWA, *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements*, Publication No. FHWA-NHI-10-034 (2009).