

چکیده

یک سری آزمایش‌های میز لرزه ۱g برای بررسی پاسخ مدل تونل متروی تبریز که یک تونل دایروی مدفون در ماسه خشک می‌باشد، تحت بارگذاری نامنظم با دامنه کم و امواج هارمونیک با دامنه بالا انجام شد. اثرات پارامترهای مختلف شامل شتاب ماکزیمم زمین و محتوای فرکانسی حرکات ورودی روی رفتار تونل بررسی شد. آزمایش‌ها در دو شتاب ماکزیمم زلزله ۰.۳۵g و ۰.۵۰g و فرکانس‌های ۱، ۳، ۵ و ۸ هرترز انجام شدند. نتایج آزمایش‌ها برحسب نیروهای دینامیکی پوشش تونل و شتاب نقاط مختلف مدل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد رفتار دینامیکی تونل‌های دایروی می‌تواند به دو مرحله تقسیم‌بندی شود: مرحله ناپایدار در طی چندین سیکل اول و مرحله سیکل‌های پایدار که در طی آن نیروها در پوشش تونل حول مقدار میانگین نوسان می‌کند. به‌علاوه، اندازه‌گیری‌های آزمایش‌های میز لرزه نشان می‌دهد با افزایش فرکانس بارگذاری برای شتاب $A=0.35g$ ، لنگر ماکزیمم ایجاد شده در پوشش تونل ثابت مانده یا اندکی کاهش می‌یابد اما برای $A=0.50g$ ، لنگر ماکزیمم به شدت کاهش می‌یابد. شتاب افقی ثبت شده در چندین تراز نشان می‌دهد که تقویت سطحی به وسیله حفره تونل انجام می‌گیرد که به‌عنوان مانع در جهت گسترش امواج برشی به سمت بالا عمل می‌کند.

واژگان کلیدی: تونل مترو، شهر تبریز، مدل‌سازی فیزیکی، میز لرزه، رفتار لرزه‌ای.

بررسی رفتار لرزه‌ای تونل مترو دایروی در ماسه خشک توسط آزمایش‌های میز لرزه

مجید فرین

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مسعود حاجی علیلوی بناب (نویسنده مسئول)

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 hajialilue@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

بارگذاری لرزه‌ای در تحقیقات آورده شده است [۲-۵]. تنها تعداد کمی از این آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری نیروهای داخلی بودند [۶]. کائو و هوانگ [۷] نمودار تاریخچه زمانی کرنش تونل تحت بار لرزه‌ای را نشان دادند. آنها نتیجه گرفتند که عملکرد زمین و تونل بستگی به شدت تحریک‌های اعمال شده و همچنین مرزهای فیزیکی مدل سانتریفیوژ دارد. همچنین پاسخ زمین تحت شرایط میدان آزاد و وجود تونل در مدل متفاوت است. لائزانو و همکاران [۸] رفتار لرزه‌ای تونل‌ها را به‌وسیله یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ کرنش مسطح به‌وسیله بارگذاری دینامیکی روی مدل تونل ارزیابی کردند. آنها پاسخ نمونه‌ای از ماسه ریز یکنواخت را که در دو دانسیته مختلف آماده شده بود، مطالعه کردند که در آن لوله آلیاژ آلومینیومی در دو عمق مختلف

مطابق رکوردهای ثبت شده، تسهیلات زیرزمینی نرخ آسیب کمتری از سازه‌های سطحی را تجربه کرده‌اند. با این وجود، برخی سازه‌های زیرزمینی آسیب عمده‌ای در زلزله‌های بزرگ اخیر دیده‌اند که شامل زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، زلزله ۱۹۹۹ چی‌چی تایوان و زلزله ۱۹۹۹ کوجالی ترکیه می‌باشد. در سازه‌های زیرزمینی چنانچه نیروی سینماتیکی وارد به سازه توسط زمین اطراف به نیروهای اینرسی ناشی از نوسان خود سازه غلبه پیدا کند، پاسخ لرزه‌ای متفاوتی در مقایسه با سازه‌های سطح زمین از خود نشان می‌دهند [۱].

مدل‌سازی فیزیکی ممکن است برای به دست آوردن اطلاعات مهم و داده‌های کمی روی رفتار لرزه‌ای تونل‌های زیرزمینی کمک کند. تعدادی آزمایش فیزیکی مدل‌های تحت

همکاران [۱۱] با انجام آزمایش‌های میز لرزه و روش عددی به بررسی اثرات حضور تونل متروی شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در محدوده رفتار خطی خاک پرداخته‌اند. آنها تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب و همچنین اثر آن بر طیف پاسخ شتاب در سطح زمین را مورد مطالعه قرار داده و اثر پارامترهای عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بر میزان بزرگنمایی‌ها برای امواج واقعی زلزله را مورد مطالعه پارامتری قرار دادند.

تا کنون به دلیل پارامترهای متعددی که بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد، نتایج جامعی در این قسمت از نوشته‌های فنی وجود ندارد. بدین منظور هدف مطالعه حاضر انجام یک سری آزمایش‌های میز لرزه روی مدل تونل برای توسعه برخی از ابعاد مسئله است. در مطالعه حاضر، اثرات پارامترهای مختلف شامل محتوای فرکانسی حرکت ورودی و شتاب ماکزیمم زمین روی رفتار لرزه‌ای تونل متروی تبریز بررسی شده است. این آزمایش‌ها در قالب یک پروژه تحقیقاتی که به وسیله سازمان قطار شهری تبریز حمایت شده است، انجام شده‌اند.

۲- آزمایش‌های میز لرزه ۱g و تجهیزات وابسته

۲-۱- میز لرزه ۱g دانشگاه تبریز

میز لرزه آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تبریز با عرشه فولادی برابر با 200×300 سانتی‌متر برای اعمال بارگذاری دینامیکی مطلوب به مدل استفاده شد. جک هیدرولیکی هوشمند^۱ متصل به میز، ظرفیت اعمال نیروی افقی تا ۱۲۰ کیلو نیوتن و توانایی حمل نمونه‌هایی تا وزن ۶۰ کیلو نیوتن را دارد. این میز قادر به اعمال محدوده فرکانسی تحریک ورودی ۰/۰۱ تا ۲۰ هرتز با دامنه جابه‌جایی ± 100 میلی‌متر و دامنه شتاب بیش از ۱g می‌باشد.

۲-۲- جعبه برش لایه‌ای^۲

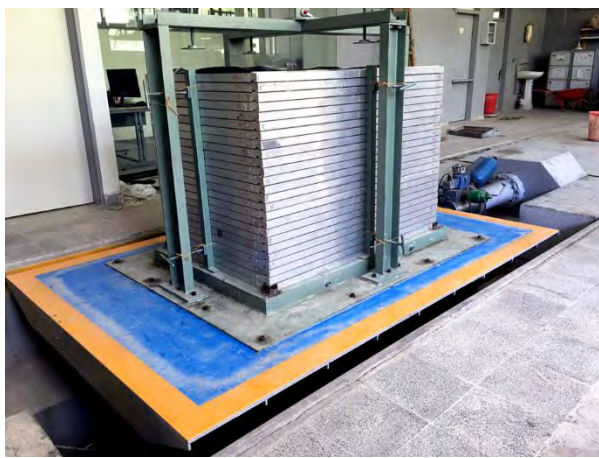
یک جعبه برشی لایه‌ای که در راستای این تحقیق در

نصب شده بود. لوژن و همکاران [۹] یک سری آزمایش میز لرزه در روی مدل تونل تأسیسات شهر شانگهای برای بررسی عملکرد آن تحت زلزله انجام دادند. ملاحظات اصلی برنامه آنها به صورت پاسخ سازه‌ای، پاسخ خاک، اندرکنش خاک و سازه و فشار خاک در رس غیراشباع بود. از شتاب‌سنج‌ها، سلول‌های اندازه‌گیری فشار خاک، مبدل‌های جابه‌جایی سیمی، حس‌گر جابه‌جایی لیزری و کرنش‌سنج‌ها، در روی سازه، خاک و روی جعبه خاک به منظور اندازه‌گیری پاسخ سازه، خاک و جعبه برش استفاده شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های دامنه پاسخ سازه کمی کمتر از دامنه خاک بود که سازگار با مشاهدات اندازه‌گیری صحرائی در طی زلزله بود. از لحاظ طیفی، طیف پاسخ سازه‌ای و پاسخ خاک تقریباً یکسان بودند. ماکزیمم کرنش در نزدیکی گوشه بالا و پایین دیوار کناری اتفاق می‌افتد و کرنش در وسط ارتفاع دیوارهای کناری تقریباً صفر است. نتایج نشان‌دهنده‌ی یک تغییر شکل برشی واضح مقطع تونل بود که یک پیچش مهم را روی گره‌های تونل ایجاد می‌کرد [۹]. در تحقیق دیگری، تیسینیدیس و همکاران [۱۰] یک سری آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی بر روی تونل‌های مستطیلی مدفون در ماسه خشک انجام دادند. این آزمایش‌ها در دانشگاه کمبریج بر روی مدل‌های تونل مربعی مدفون در ماسه خشک انجام شد. نتایج آزمایشگاهی انجام شده برای درک بهتر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مستطیلی مدفون و همچنین تأیید صحت مدل‌های عددی پیشرفته و بهبود روش‌های طراحی به کار برده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، شتاب‌های افقی ثبت شده در چندین محل به سمت بالا افزایش یافتند. تاریخچه‌های زمانی شتاب قائم ثبت شده در طرفین مدل در دال سقف ناهم‌فاز بودند که نشان‌دهنده‌ی مد نوسانی ارتعاش تونل است. افزایش فشارهای خاک ثبت شده در گوشه‌های دیوار و دال بر اثر صلبیت بالای مدل در این محل‌ها نسبت به وسط دیوارها بالا بودند. لنگرهای خمشی دینامیکی از همان روند فشارهای دینامیکی خاک پیروی کردند و برای نیروهای محوری دینامیکی مقادیر باقیمانده کوچک‌تری مشاهده شد [۱۰]. بازیار و

سگمنت‌های بتن پیش‌ساخته پوشش درست در پشت سپر نصب می‌شوند [۱۲].

در مسیر مورد نظر، بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی خط ۲ متروی تبریز، نوع خاک اساساً ML و SM است. مقطع زمین‌شناسی در امتداد مسیر تونل در شکل (۲) نشان داده شده است.

قوانین شبیه‌سازی آزمایش‌های میز لرزه ۱g که توسط یایی [۱۳] پیشنهاد شده است در مطالعه حاضر به کار گرفته شده

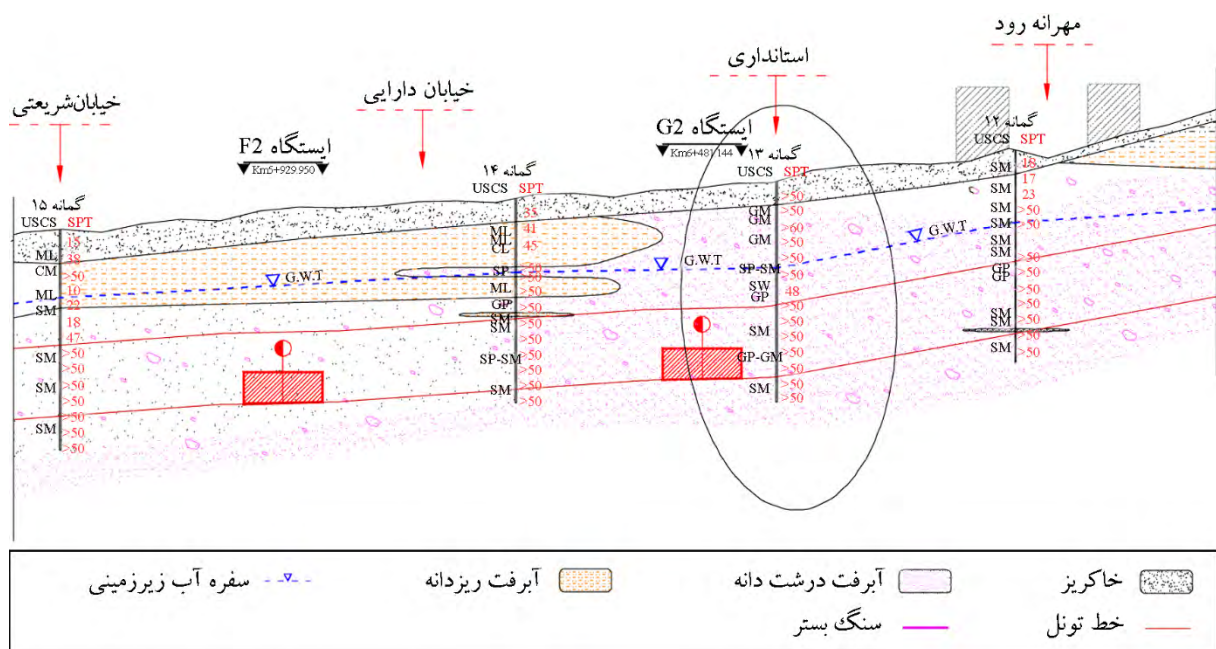


شکل (۱): تصویری از میز لرزه دانشگاه تبریز به همراه جعبه برشی لایه‌ای نصب شده بر روی آن.

دانشگاه تبریز طراحی شد، برای این آزمایش‌ها استفاده شد. این جعبه دارای ۲۵ فریم آلومینیومی است که ابعاد داخلی هر یک ۱۳۲×۸۶۰ ارتفاع آنها ۳/۸ سانتی‌متر می‌باشد. به منظور کاهش اصطکاک بین فریم‌ها و شبیه‌سازی جابه‌جایی لایه‌های خاک، بین فریم‌های آلومینیومی از ساچمه‌های فلزی در داخل تسمه‌های لاستیکی استفاده شده است به نحوی که فاصله فریم‌ها از یکدیگر ۴ میلی‌متر می‌باشد. تصویری از میز لرزه دانشگاه تبریز به همراه جعبه برش لایه‌ای مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است.

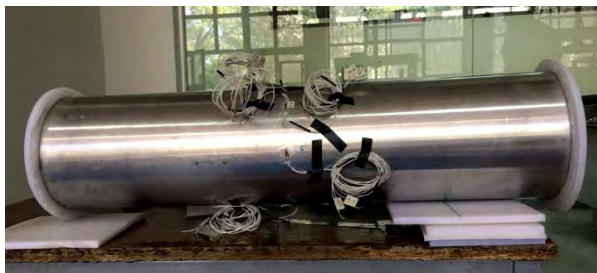
۲-۳- مقیاس آزمایش‌ها

خط ۲ قطار شهری تبریز (TURL2) با طولی در حدود ۲۲ کیلومتر قسمت شرقی شهر را به قسمت غربی آن متصل خواهد کرد. در این مطالعه از مشخصات تونل مترو خط ۲ در قسمت مرکزی آن بین ایستگاه‌های E2 و H2 استفاده شده است. تونل خط ۲ با استفاده از دستگاه تی‌بی‌ام با تعادل فشار زمین با قطر چرخش برابر با ۹/۴۹ متر و یک سپر با قطر خارجی ۹/۴۶ متر در قسمت جلوی دستگاه ساخته شده است.



شکل (۲): پروفیل زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی به همراه محل انتخاب مدل مبنا.

بر اساس مشخصات نمونه اصلی، سرعت موج برشی در خاک محل (۵۸۵ متر بر ثانیه) و خاک مدل (۹۰ متر بر ثانیه) که بر اساس اندازه گیری زمان رسیدن موج برشی ایجاد شده در پایه مدل به محل شتاب سنج ها با فاصله معین از همدیگر به دست آمد، ابعاد جعبه برش لایه ای و سایر پارامترهای مورد بررسی در مسئله، ضریب مقیاس نمونه اصلی به مدل برابر با ۴۵ ($\lambda=45$) برای آزمایش ها در نظر گرفته شد؛ بنابراین ۴۵ متر لایه خاک نمونه اصلی، یک متر در آزمایش ها مدل سازی گردید. همچنین از فرض $\lambda_p=1$ که برای آزمایش های میز لرزه ۱g پیشنهاد شده است، استفاده گردید [۱۳]. نمونه اصلی یک تونل دایروی با قطر خارجی برابر با ۹/۲۰ متر، ضخامت ۰/۳۵ و طول رینگ ۱/۵ متر می باشد که با اعمال روابط ذکر شده، مدل تونل مطابق شکل (۳) از آلایژ آلومینیوم با قطر ۱۹۵/۵ میلی متر و ضخامت ۱/۵ میلی متر ساخته شد. مشخصات مدل در نمونه اصلی و مدل در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۳): مدل تونل.

جدول (۱): مشخصات تونل در نمونه اصلی و مدل.

مدل	نمونه اصلی	مشخصه
۱۹۷	۹۲۰۰	قطر خارجی (میلی متر)
۱۹۴	۸۵۰۰	قطر داخلی (میلی متر)
۱/۵	۳۵۰	ضخامت (میلی متر)
۶۹	۳۰/۲	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳	۰/۲	نسبت پواسون

است. با توجه به اینکه هدف تحقیق حاضر بررسی رفتار خمشی تونل تحت زلزله عرضی بود از شبیه سازی سختی خمشی مطابق معادله (۱) استفاده شد:

$$\frac{(EI)_p}{(EI)_m} = \frac{\lambda^4 \cdot \lambda_p}{\lambda_\varepsilon} \quad (1)$$

که در آن $(EI)_p$ سختی خمشی نمونه اصلی، $(EI)_m$ سختی خمشی مدل، λ ضریب مقیاس هندسی، λ_p ضریب مقیاس دانسیته و λ_ε ضریب مقیاس کرنش ارائه شده است. که ضریب مقیاس کرنش طبق رابطه (۲) به دست می آید:

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\lambda}{[(V_s)_p / (V_s)_m]^2} \quad (2)$$

که در آن $(V_s)_p$ و $(V_s)_m$ به ترتیب سرعت موج برشی در نمونه اصلی و مدل می باشد. واضح است سختی خمشی تونل سگمندی شبیه تونل پیوسته یا تونل با تعداد مفصل های ثابت در موقعیت معین نیست. چندین روش برای در نظر گرفتن تأثیر درزهای سگمندی روی سختی خمشی پوشش تونل پیشنهاد شده است. در روش محاسبه متداول اصلاح شده برای در نظر گرفتن کاهش سختی در درزهای سگمندی، یک نسبت انتقال لنگر خمشی (ξ) معرفی می شود. این نسبت با اصلاح مدول الاستیک رینگ برای تحلیل استفاده می شود. در این روش، بعد از اصلاح مدول الاستیک رینگ با ضریب ξ ، بارهای اعمالی روی پوشش محاسبه می شوند. سپس مقدار لنگر خمشی به وسیله افزایش مقدار برای سگمندی یا کاهش برای درزها با همان ضریب ξ اصلاح می شوند. مقدار پارامتر ξ بین ۰/۳ تا ۰/۵ به عنوان تابعی از تعداد سگمندی ها و سختی زمین اطراف متغیر است [۱۴]. انجمن مهندسين عمران ژاپن مقدار کاهش سختی سازه خطی پیوسته را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد توصیه می کنند. با فرض ضریب اصلاح $\xi=0.3$ برای مدول یانگ بتن، مدول واقعی بایستی مطابق معادله (۳) محاسبه شود [۱۵].

$$E_c = (1 - \xi) \times E_{CLS} = (1 - 0.3) \times E_{CLS} = 0.7E_{CLS} \quad (3)$$

که در آن E_c مدول مجازی رینگ و E_{CLS} مدول بتن می باشد.

۴-۲- مشخصات خاک مدل

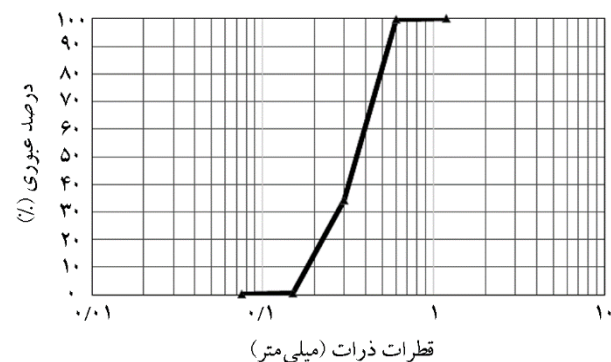
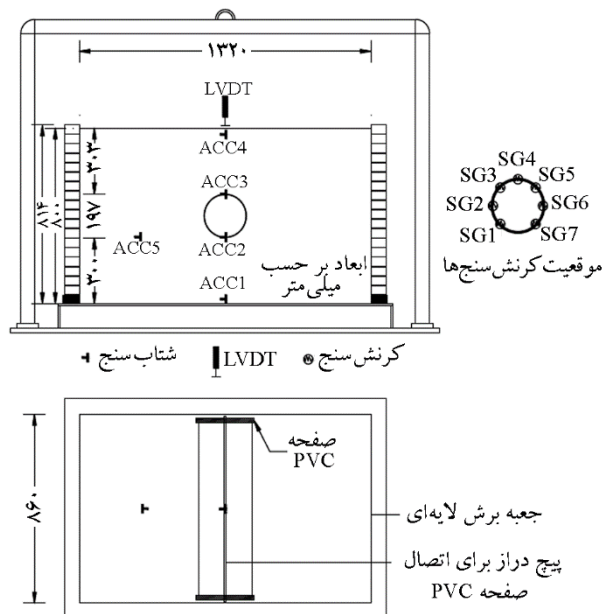
ماسه یکنواخت که از منطقه قوم تپه در نزدیکی شهر تبریز تهیه شده بود در این مطالعه استفاده شده است. مشخصات اصلی این ماسه یکنواخت در جدول (۲) آورده شده است. همچنین منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات اصلی ماسه قوم تپه.

طبقه‌بندی نمونه	SP
چگالی ویژه	۲/۶۴
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۳
چسبندگی (kN/m^3)	۰
ضریب یکنواختی	۲/۱۷
ضریب خمیدگی	۱/۰۴
مینیمم وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۴/۶۰
ماکزیمم وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۷/۳۸

برای اندازه‌گیری تراکم نسبی در لایه‌های مختلف خاک از قالب‌های کوچکی که در ترازهای مختلف قرار داده شده بودند استفاده شد. در حین تراکم و بعد از اتمام آزمایش وزن مخصوص ماسه جای گرفته در داخل قالب اندازه‌گیری شده و با توجه به وزن مخصوص خشک ماکزیمم و مینیمم، درجه تراکم محاسبه می‌گردید.

در طی ساخت مدل چندین ابزار اندازه‌گیری مختلف برای بررسی رفتار تونل و خاک در آزمایش‌ها استفاده شد. ابزارهای نصب شده شامل شتاب‌سنج‌ها^۲، کرنش‌سنج‌ها^۳ و مبدل تفاضلی متغیر خطی^۵ (LVDT) بودند. شکل (۵) طرح نهایی مدل و ابزارهای نصب شده را نشان می‌دهد. پنج شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب در خاک و تونل استفاده شدند. شتاب‌سنج‌ها در کف و ارتفاع‌های ۳۰، ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متر از کف جعبه برش لایه‌ای قرار داده شدند. شتاب‌سنج اول که در کف جعبه قرار داده شد جهت اندازه‌گیری شتاب ورودی به سیستم استفاده گردید. شتاب‌سنج دوم در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از کف در زیر تونل قرار داده شد.



شکل (۴): منحنی دانه‌بندی ماسه قوم تپه.

۵-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و ابزارگذاری مدل‌ها

مدل ماسه با ارتعاش نمونه روی میز لرزه با یک فرکانس و دامنه ثابت تا رسیدن به تراکم مورد نظر ($Dr=65\%$) ساخته شد.

شکل (۵): طرح شماتیک پیکربندی و ابزاربندی مدل و جانمایی کرنش‌سنج‌ها بر روی پوشش مدل فیزیکی.

شامل فرکانس ۱، ۳، ۵، ۸ هرتز و ماکزیمم دامنه شتاب ۰/۳۵g و ۰/۵۰g بودند (به دلیل محدودیت جابه‌جایی ماکزیمم میز، فرکانس ۱ هرتز و ۰/۵۰g اعمال نگردید). مدت‌زمان تحریک پایه در امواج هارمونیک برای تمامی مدل‌ها ۵ ثانیه در نظر گرفته شد. باید یادآوری نمود که این حرکات ورودی، تحریکات موج برشی داخل صفحه نسبت به مقطع تونل را شبیه‌سازی می‌کنند.

۳- تحلیل نتایج آزمایش‌های مدل میدان آزاد^۷ (FF) و مدل خاک-تونل^۸ (SF)

همان‌طوری که اشاره شد، هشت مدل ساخته شده تحت بارگذاری نامنظم و دینامیکی سینوسی قرار گرفتند. داده‌های به‌دست‌آمده از سیستم ثبت داده‌ها به پارامترهای فیزیکی مانند شتاب، کرنش و جابه‌جایی تبدیل شدند.

۳-۱- تعیین فرکانس‌های طبیعی مدل‌ها

در شکل (۷) امواج نامنظم (نویز سفید^۹) اعمال شده به هر دو مدل میدان آزاد (FF) و خاک-تونل (SF) به همراه طیف فوریه^{۱۰} آنها آورده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود میز لرزه توانسته است امواج ورودی را به‌طور تقریباً یکسانی برای هر دو مدل FF و SF تولید نماید. با توجه به تبدیل فوریه امواج نامنظم اعمال شده فرکانس طبیعی میدان آزاد ۱۶/۴ هرتز و فرکانس طبیعی سیستم تونل-خاک ۱۵/۵ هرتز می‌باشد.

از نظر تئوری، فرکانس مدل nام یک ستون خاک طبق رابطه ارائه شده توسط کرامر (رابطه ۴) به دست می‌آید [۱۶]:

$$f_n = \frac{(2n-1)V_s}{4H} \quad (4)$$

که در آن n شماره مدل، V_s سرعت موج برشی متوسط و H عمق ستون خاک می‌باشد. با توجه به مشخصات و ابعاد نمونه مورد آزمایش مقدار فرکانس طبیعی برای n=۱ از رابطه (۴) برابر با ۲۸/۱ هرتز به دست می‌آید که با مقدار به‌دست‌آمده از آزمایش نویز سفید متفاوت می‌باشد.

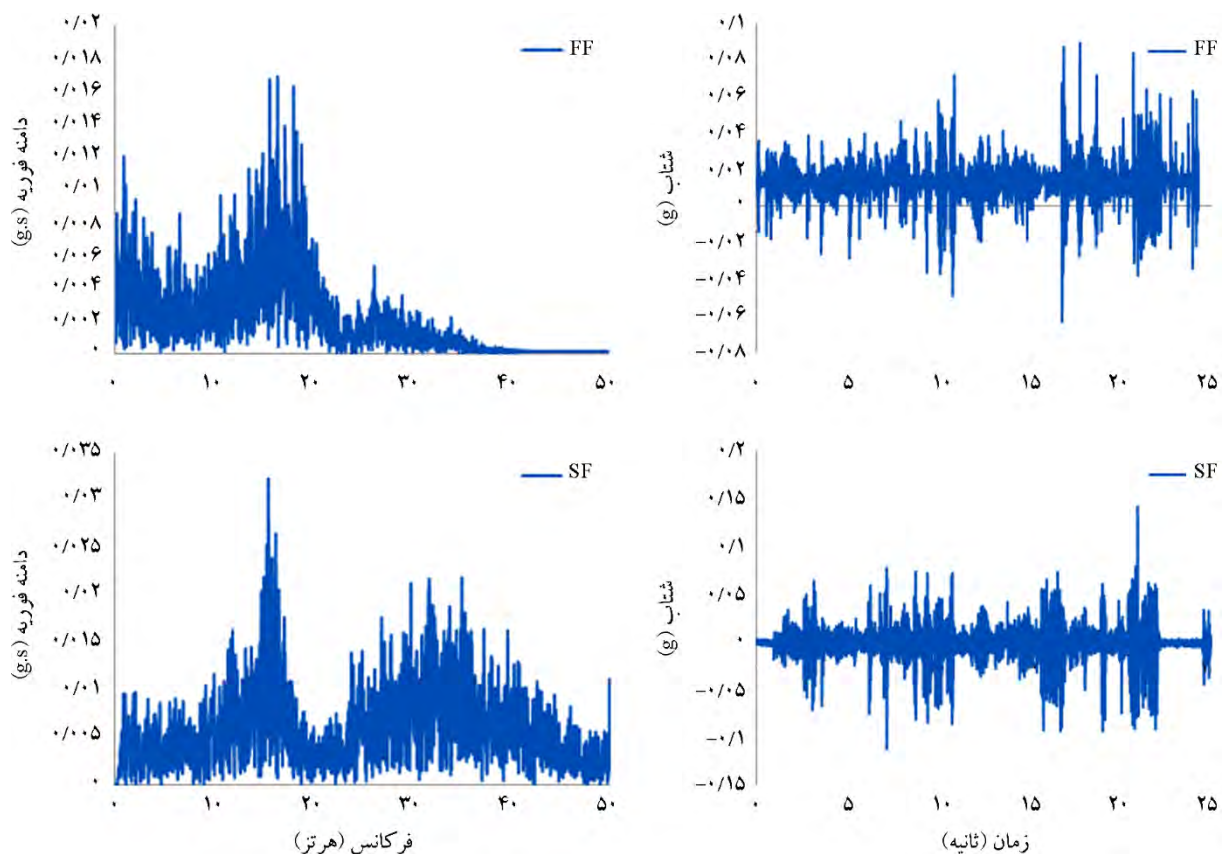
شتاب‌سنج سوم در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از کف در بالای تونل و شتاب‌سنج چهارم در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از کف در سطح خاک در امتداد خط مرکزی تونل قرار داده شد. همچنین شتاب‌سنج پنجم جهت مفاصله در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری از کف در داخل خاک قرار داده شد. به‌منظور اندازه‌گیری نشست خاک تحت بارگذاری دینامیکی دو LVDT در بالای مدل تونل قرار داده شد. کرنش‌سنج‌ها نیز برای اندازه‌گیری کرنش‌های خمشی مدل در هفت نقطه روی سطح خارجی تونل چسبانده شدند. تمامی ابزارهای نصب شده با دقت کافی قبل از هر آزمایش کالیبره شده و بعد از انجام آزمایش نیز کنترل شدند. توسط یک دیتالاگ^{۱۱} دینامیکی ۳۲ کاناله تمام داده‌های اندازه‌گیری شده ثبت و به کامپیوتر انتقال داده شد. در شکل (۶) مراحل آماده‌سازی مدل و نمونه آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۶): مراحل آماده‌سازی مدل و نمونه آماده شده برای آزمایش.

۲-۶- تحریک‌های اعمال شده توسط میز لرزه به مدل‌ها

تعداد هشت تحریک توسط میز لرزه در قالب دو دسته امواج هارمونیک با دامنه بالا و امواج نامنظم با محتوای فرکانسی بالا و دامنه کم به هر مدل اعمال و شتاب ورودی توسط شتاب‌سنج ACC1 ثبت گردید. امواج نامنظم با محتوای فرکانسی تا ۵۰ هرتز ولی با دامنه کم تا ۰/۱۵g-۰/۱ بوده ولی امواج هارمونیک



شکل (۷): تابع شتاب و طیف فوریه مدل‌های FF و SF برای تحریک‌های ورودی نامنظم در مقیاس مدل.

۲-۳- تحلیل و مقایسه نتایج شتاب‌ها

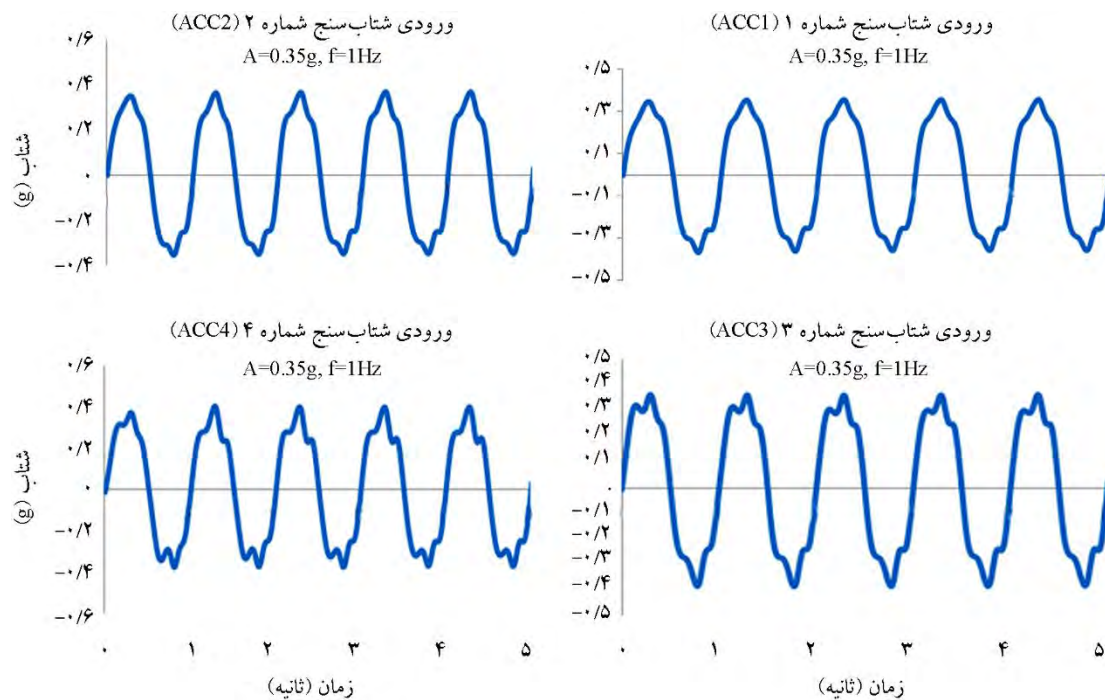
یک فیلتر ضربه- پاسخ بی‌نهایت^{۱۴} است که به‌عنوان یک فیلتر پالایند^{۱۵} بین فرکانس‌های ۰/۲ و ۵۰ هرتز عمل می‌کند. این انتخاب برای حذف پایین‌ترین و بالاترین فرکانس‌ها پذیرفته شده است که عدد اولی منتسب به انحراف سیگنال شتاب‌سنج و عدد آخری مربوط به نویز الکترونیکال ثبت شده می‌باشد.

تعدادی از نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب افقی ثبت شده به‌وسیله شتاب‌سنج‌ها برای شتاب ۰/۳۵g و فرکانس ۱ و ۳ هرتز، همچنین شتاب ۰/۵۰g و فرکانس ۳ و ۵ هرتز در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است.

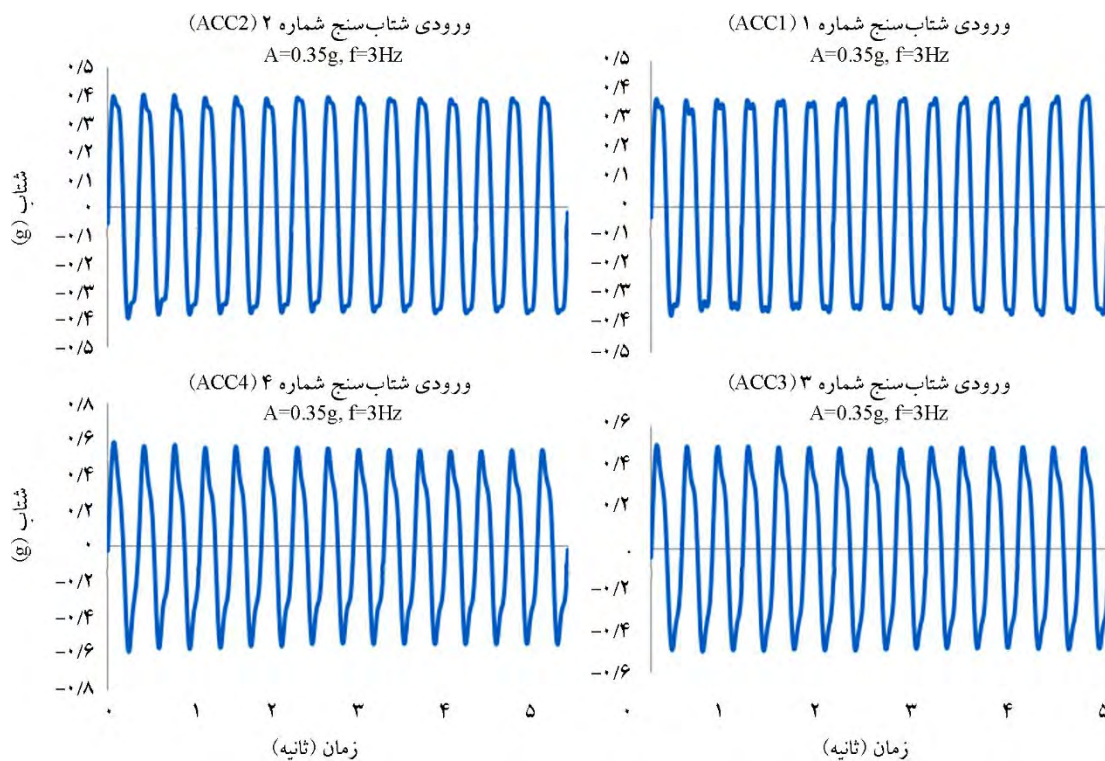
زمانی که هر سیگنال به‌طور صحیح پردازش شد، شتاب ماکزیمم به‌عنوان مقدار ماکزیمم سیکل‌های نیم‌دامنه در تاریخچه زمانی شتاب مشخص گردید. تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بین این مقادیر و میانگین نیم‌دامنه روی سیکل‌ها مشاهده نشد. داده‌های هفت بارگذاری هارمونیک اعمال شده در شکل (۱۲) خلاصه بندی

هرچند که تاریخچه زمانی ثبت شده به‌وسیله شتاب‌سنج افقی در کف صلب مدل به‌عنوان موج‌های سینوسی تک‌فرکانسی در نظر گرفته شده بودند، ولی سیگنال‌های ثبت شده شبه‌هارمونیک بوده و دارای برخی ویژگی‌های خاصی هستند که در حوزه زمانی قابل مشاهده است.

برای تفسیر نتایج آزمایش‌ها بر حسب ضریب تقویت زمین، تمامی نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب به مرکز صفر به‌وسیله مقیاس آنها نسبت به خط پایه انحرافی^{۱۱} تبدیل شدند و از قسمت‌های ثبت شده زمانی قبل و بعد از مدت‌زمان سیگنال صرف نظر شد. یک اصلاح خط پایه^{۱۲} با قانون خطی به سیگنال ورودی اعمال شد. این اصلاح برای به دست آوردن یک مقدار متمایل به صفر در انتهای تاریخچه زمانی سرعت و جابه‌جایی مؤثر بود. فیلتر فرکانس از مرتبه چهار از نوع باترورث^{۱۳} بود که



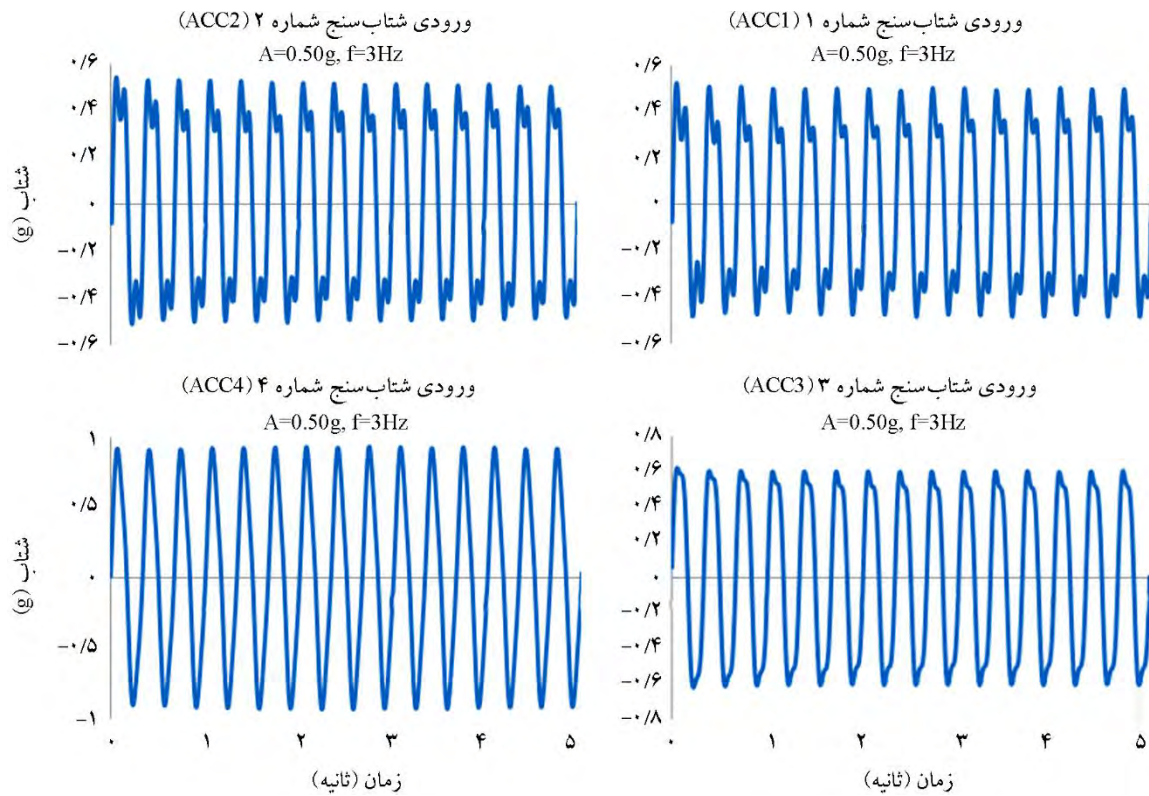
شکل (۸): نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده برای $f=1Hz$ و $A=0.35g$.



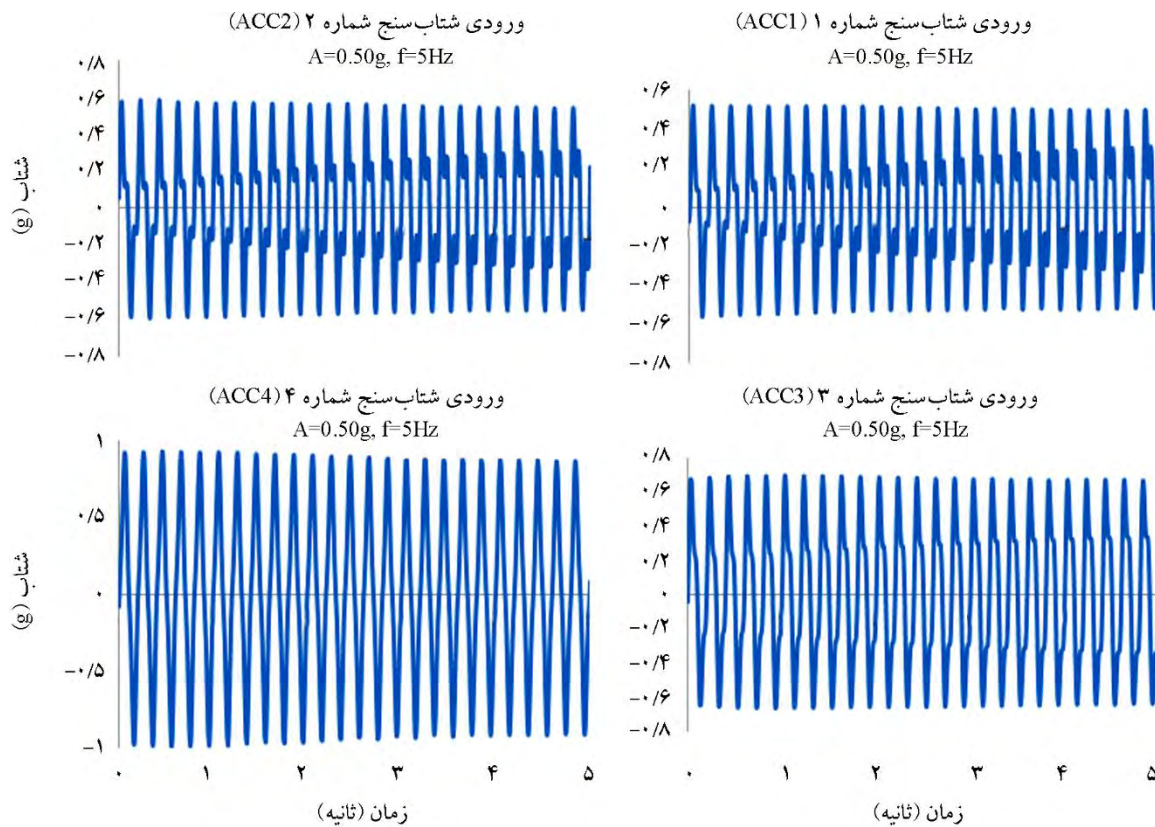
شکل (۹): نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده برای $f=3Hz$ و $A=0.35g$.

شده‌اند که برحسب نسبت شتاب ماکزیمم اندازه‌گیری شده به وسیله شتابسنج‌های بالا و پایین تونل در آرایش قائم رسم شده‌اند. این نسبت‌ها برای بررسی تأثیر محل حفرة تونل روی گسترش قائم امواج برشی تعریف شده‌اند. شکل (۱۲) نشان می‌دهد

شده‌اند که برحسب نسبت شتاب ماکزیمم اندازه‌گیری شده به وسیله شتابسنج‌های بالا و پایین تونل در آرایش قائم رسم شده‌اند. این نسبت‌ها برای بررسی تأثیر محل حفرة تونل روی گسترش قائم امواج برشی تعریف شده‌اند. شکل (۱۲) نشان می‌دهد



شکل (۱۰): نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده برای $A=0.50g$ و $f=3Hz$.



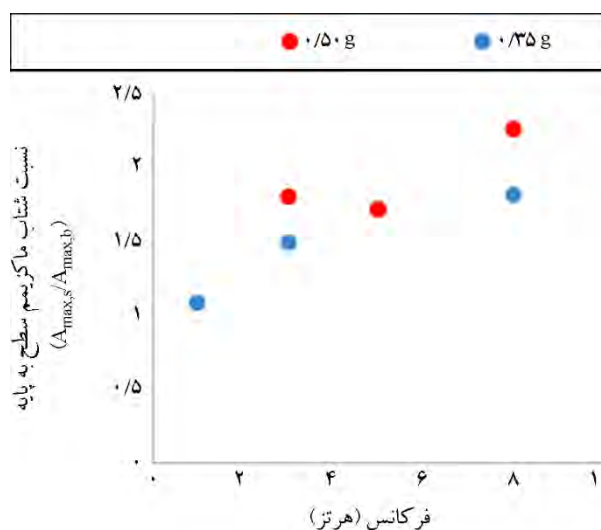
شکل (۱۱): نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده برای $A=0.50g$ و $f=5Hz$.

هرتز برای کرنش سنج‌های SG1، SG2، SG3 و SG4 نشان داده شده است. لنگر خمشی دینامیکی به‌عنوان لنگر اضافی اعمالی به پوشش تونل بعد از شروع زلزله تعریف می‌شود. مقادیر مثبت لنگر خمشی، افزایش تنش کششی در سطح پوشش تونل را نشان می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده عموماً نشان می‌دهند که قسمت پایین تونل بیشتر از قسمت بالایی تحت فشار است که این حالت به خاطر تنش‌های سرباره انتظار می‌رود. در طی بارگذاری دینامیکی نیروهای پوشش تونل عموماً از مقادیر استاتیکی اندازه‌گیری شده قبل از بارگذاری دینامیکی افزایش می‌یابد. چنین افزایشی که بعد از بارگذاری لرزه‌ای اتفاق می‌افتد با متراکم شدن ماسه و انباشته شدن کرنش‌های غیرقابل بازگشت لایه خاک اطراف تونل سازگار است. به‌علاوه پوشش تونل به دلیل مؤلفه برگشت‌پذیر کرنش برشی خاک در طی بارگذاری در معرض سیکل‌های افزایش-کاهش نیروهای داخلی قرار گرفت. این نشان می‌دهد که هر دو مؤلفه برگشت‌پذیر و باقیمانده این افزایش نیروهای داخلی مربوط به مکانیسم بیضی‌شدگی مقطع عرضی تونل هست که به دلیل تغییر شکل لایه زمین ایجاد می‌شود. بنابراین توزیع لنگرهای خمشی دینامیکی بستگی به الگوی تغییر شکلی دارد که تونل بعد از شروع زلزله تجربه می‌کند. به‌علاوه مقادیر لنگر خمشی در طی زلزله در قسمت پایین پوشش تونل بزرگ‌تر از قسمت بالایی است.

مطابق شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر خمشی دینامیکی می‌تواند به دو قسمت اصلی تقسیم شود: مرحله ناپایدار و سیکل‌های حالت پایدار. تونل در طی چند سیکل اول به سمت یک مرحله تعادل تغییر شکل می‌دهد. مرحله دوم سیکلی بعد از شروع تا انتهای بارگذاری دینامیکی ادامه پیدا می‌کند.

ماکزیمم لنگر خمشی دینامیکی روی پوشش تونل به‌وسیله محاسبه مقدار قدر مطلق لنگرها خمشی مثبت و منفی و انتخاب بزرگ‌ترین آنها پیدا می‌شود. بدین طریق، هر دو لنگر خمشی مثبت و منفی مد نظر قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ماکزیمم لنگر خمشی در نزدیکی تاج و شانه‌ای مدل تونل اتفاق می‌افتد.

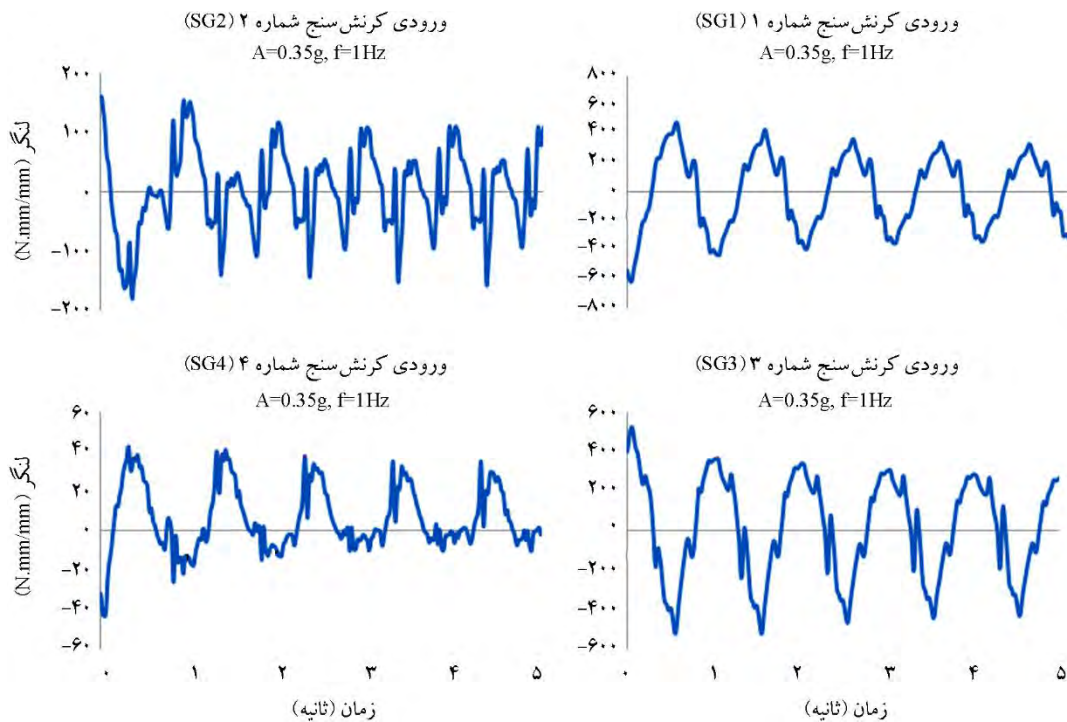
که شتاب ماکزیمم در بیشترین حالات به‌صورت یکنواخت با عمق در امتداد آرایش شتاب‌سنج‌ها کاهش می‌یابد. نسبت شتاب محاسبه شده در امتداد آرایش تونل عموماً بزرگ‌تر از یک می‌باشند؛ که نشان‌دهنده تمایل مدل برای تقویت سیگنال پایه در حال حرکت به سطح زمین در امتداد آرایش تونل می‌باشد که در شکل (۱۲) می‌توان مشاهده نمود. به‌عنوان یک واقعیت، شتاب ماکزیمم اندازه‌گیری شده در سطح بالای تونل بزرگ‌تر از پایین تونل است. همچنین شتاب‌سنج پایین زیر تونل که به کف صلب مدل متصل نشده است، همیشه مقادیر بزرگ‌تری از شتاب را نسبت به شتاب‌سنج کف اندازه‌گیری کرده است که این یک دلیل احتمالی از تنش غیریکنواخت در امتداد تونل به دلیل اثرات قوس‌زدگی و همچنین تأثیر مرز حفره تونل می‌باشد که امواج برشی قسمت پایین را به سمت بالا منتشر می‌کند.



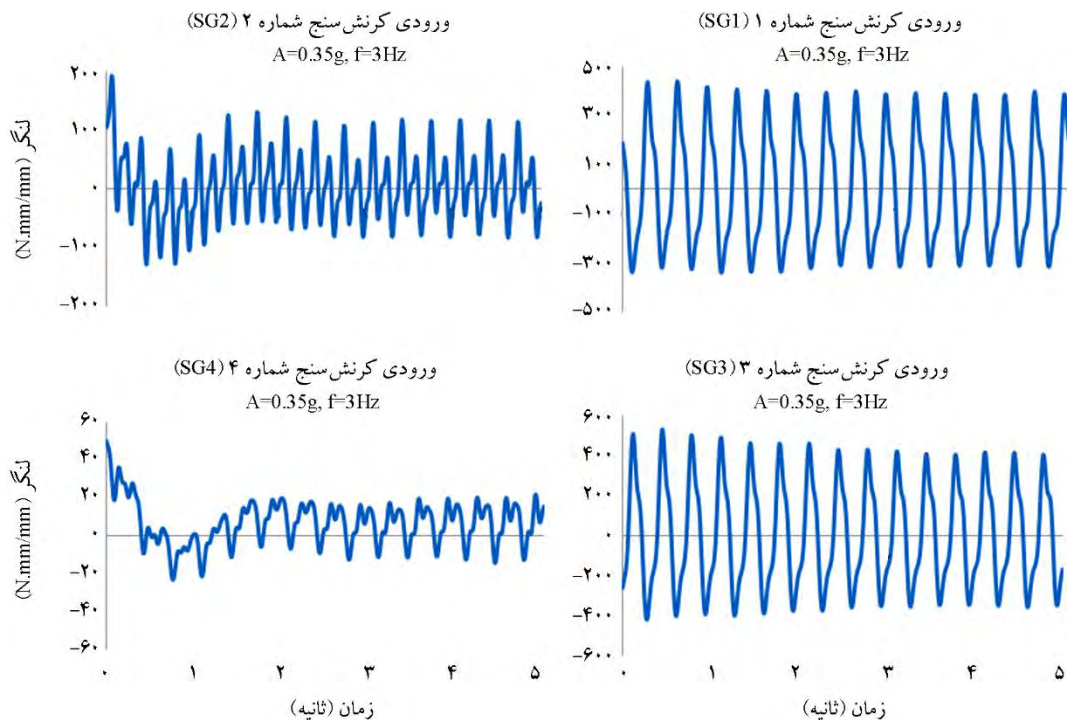
شکل (۱۲): نسبت تشدید برای شتاب افقی برای آزمایش‌های انجام شده.

۳-۳- تحلیل نتایج حاصل از کرنش سنج‌ها

نتایج آزمایشگاهی نیروهای داخلی در مقطع وسط پوشش تونل از کرنش‌سنج‌ها در طی هر آزمایش به دست آمد. تعدادی از نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر خمشی در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) در مقیاس مدل، برای بارگذاری‌های مربوط به شتاب ۰/۳۵g و ۰/۵۰g و فرکانس ۱ و ۳ هرتز، همچنین شتاب ۰/۵۰g و فرکانس ۳ و ۵



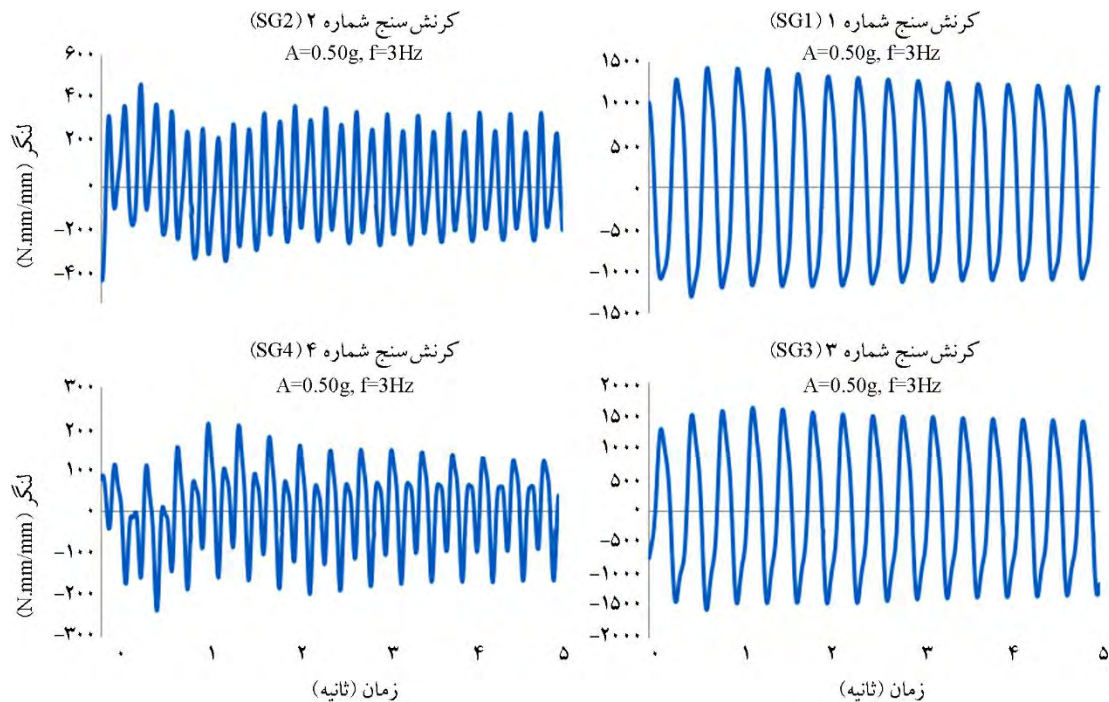
شکل (۱۳): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر ثبت شده در نقاط مختلف مدل تونل برای $A=0.35g$ و $f=1Hz$.



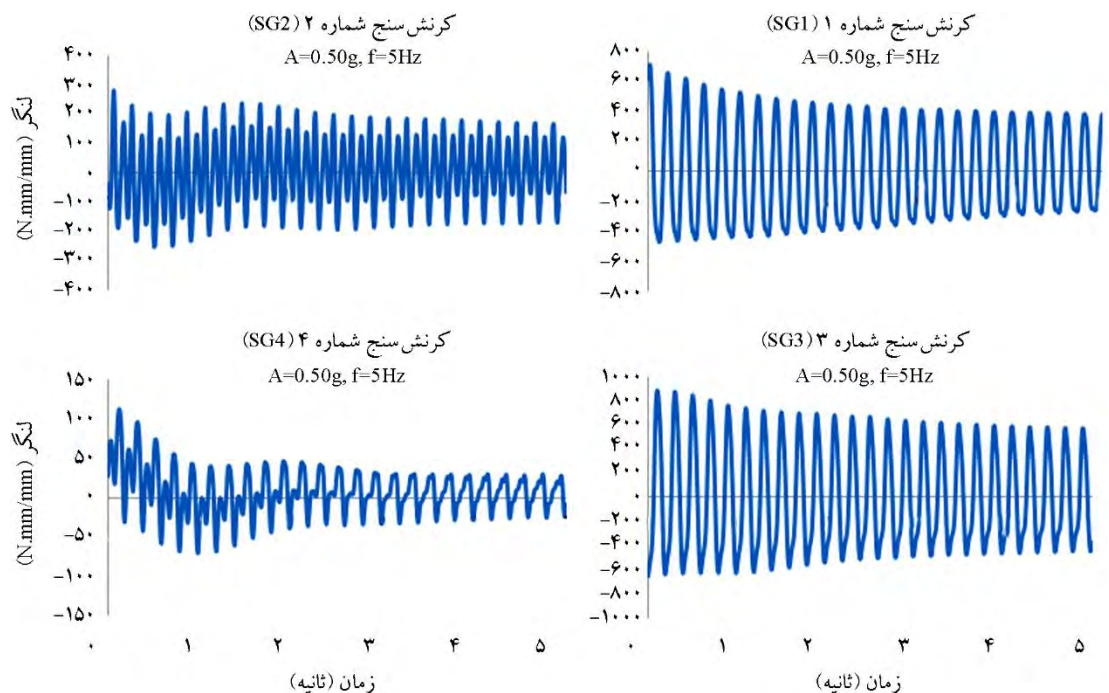
شکل (۱۴): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر ثبت شده در نقاط مختلف مدل تونل برای $A=0.35g$ و $f=3Hz$.

$$M_{\text{prototype}}/M_{\text{model}} = \lambda^3 \cdot \lambda_p \quad (5) \quad \text{لنگر خمشی دینامیکی در نمونه اصلی را می‌توان طبق معادله (۵)}$$

به دست آورد [۱۷]: که در آن $M_{\text{prototype}}$ لنگر خمشی در نمونه اصلی، M_{model} لنگر



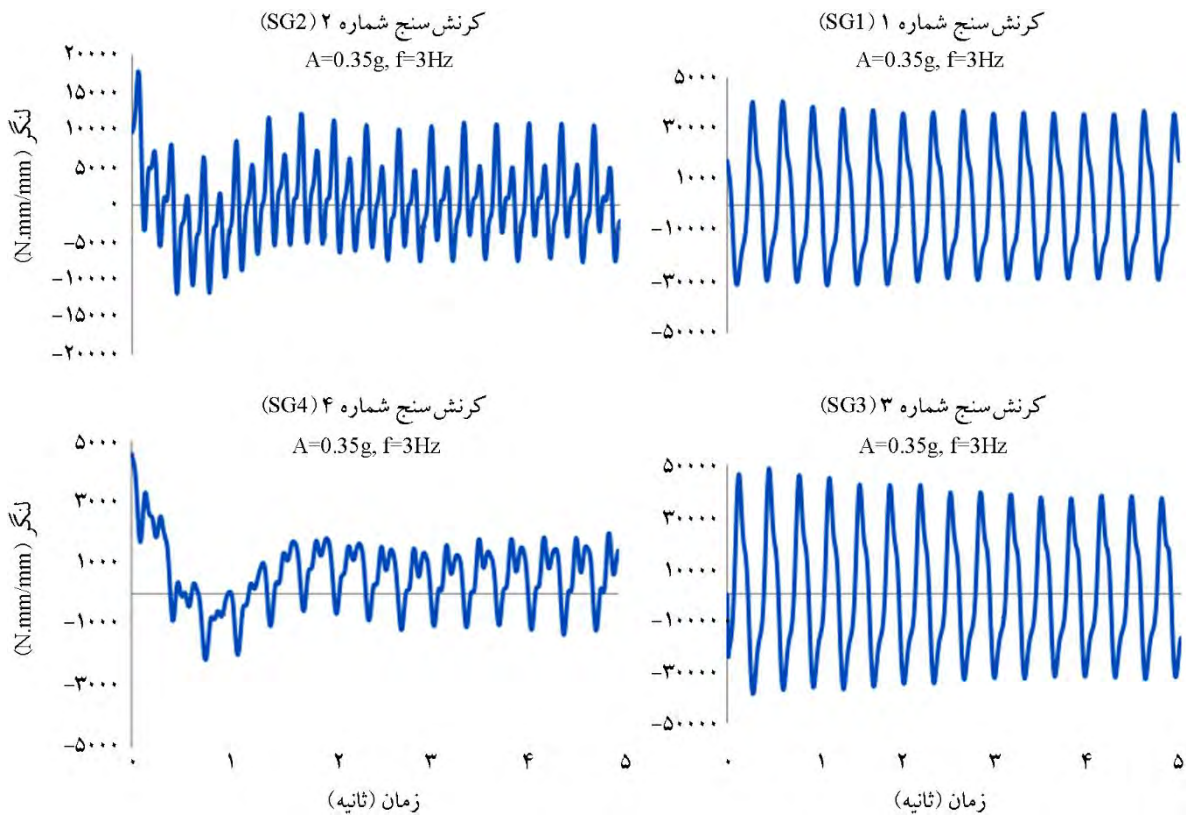
شکل (۱۵): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر ثبت شده در نقاط مختلف مدل تونل برای $A=0.50g$ و $f=3Hz$.



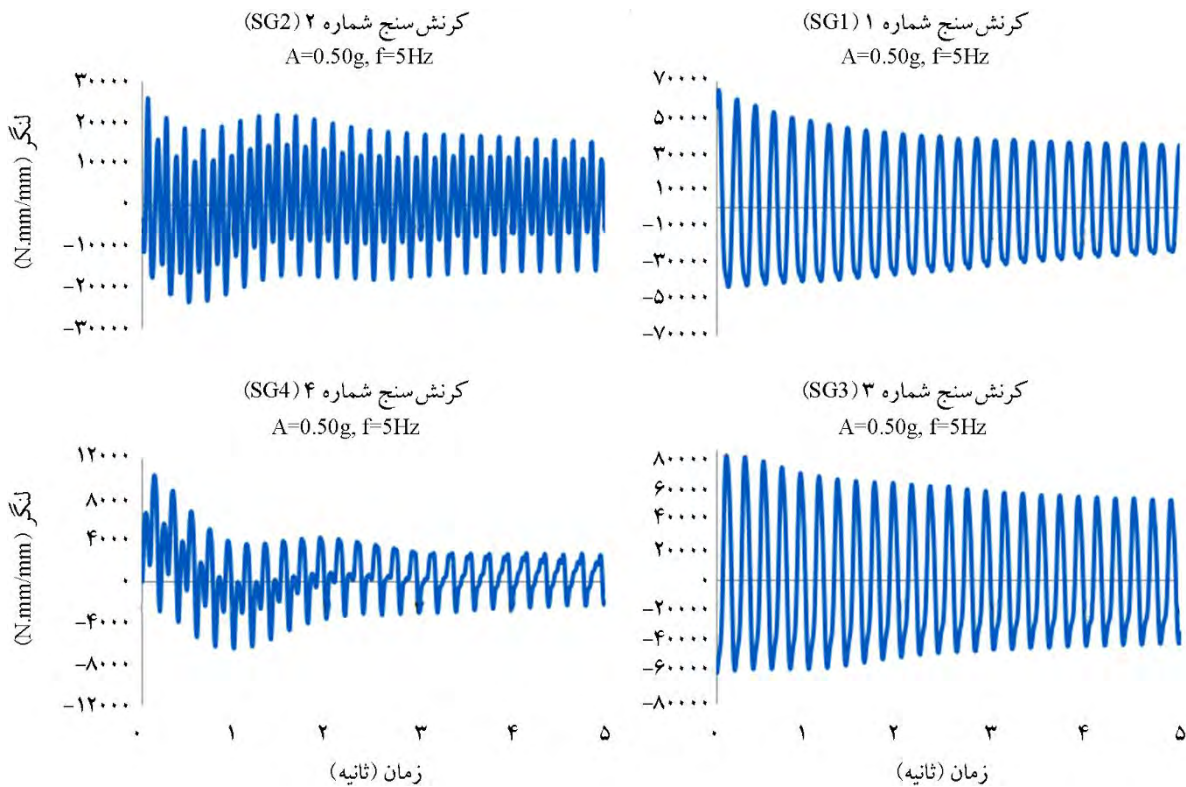
شکل (۱۶): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر ثبت شده در نقاط مختلف مدل تونل برای $A=0.50g$ و $f=5Hz$.

حالت $(f=3Hz$ و $A=0.35g$) و $(f=5Hz$ و $A=0.50g)$ آورده شده است. با مقایسه نتایج هفت آزمایش انجام شده، ماکزیمم لنگر در محل SG5 مربوط به بارگذاری $f=3Hz$ و $A=0.50g$

خمشی در مدل، λ و λ_p ضرایب مقیاس هندسه و دانسیته $(\lambda=45)$ و $(\lambda_p=1)$ می‌باشند. لنگرهای دینامیکی در نمونه اصلی در محل کرنش سنج‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) برای دو



شکل (۱۷): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر در نمونه اصلی در محل کرنش سنج‌های SG1، SG2، SG3 و SG4 برای $A=0.35g$ و $f=3Hz$.



شکل (۱۸): نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر در نمونه اصلی در محل کرنش سنج‌های SG1، SG2، SG3 و SG4 برای $A=0.50g$ و $f=5Hz$.

نمونه اصلی، لنگر ترک خوردگی برابر با ۸۰ کیلونیوتن-متر و لنگر ضریب‌دار برابر با ۱۲۹/۹ کیلونیوتن-متر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار لنگر دینامیکی در آزمایش‌های با دامنه بزرگ‌تر بیشتر از لنگر ترک خوردگی می‌باشد. این لنگر دینامیکی در ترکیب با اثرات بارهای دیگر ممکن است باعث ایجاد آسیب‌های جدی سازه‌ای در تونل گردد.

در شکل (۱۹) لنگر ماکزیمم ایجاد شده در محل کرنش سنج‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در برابر فرکانس‌های مختلف اعمال شده به سیستم رسم شده است. همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود برای $A=0.35g$ لنگر ماکزیمم با افزایش فرکانس، ثابت بوده یا اندکی کاهش می‌یابد؛ اما برای $A=0.50g$ لنگر خمشی ماکزیمم با افزایش فرکانس، به شدت برای تمام کرنش‌سنج‌های کاهش می‌یابد. بنابراین حالت دامنه شتاب ماکزیمم با فرکانس پایین، لنگر خمشی و تغییر شکل‌های بیشتری را در تونل زیرزمینی ایجاد می‌کند.

می‌باشد که این لنگر برابر با ۱۶۴۳ نیوتن-میلی‌متر بر میلی‌متر در مدل و ۱۴۹/۷ کیلونیوتن-متر بر متر در نمونه اصلی می‌باشد.

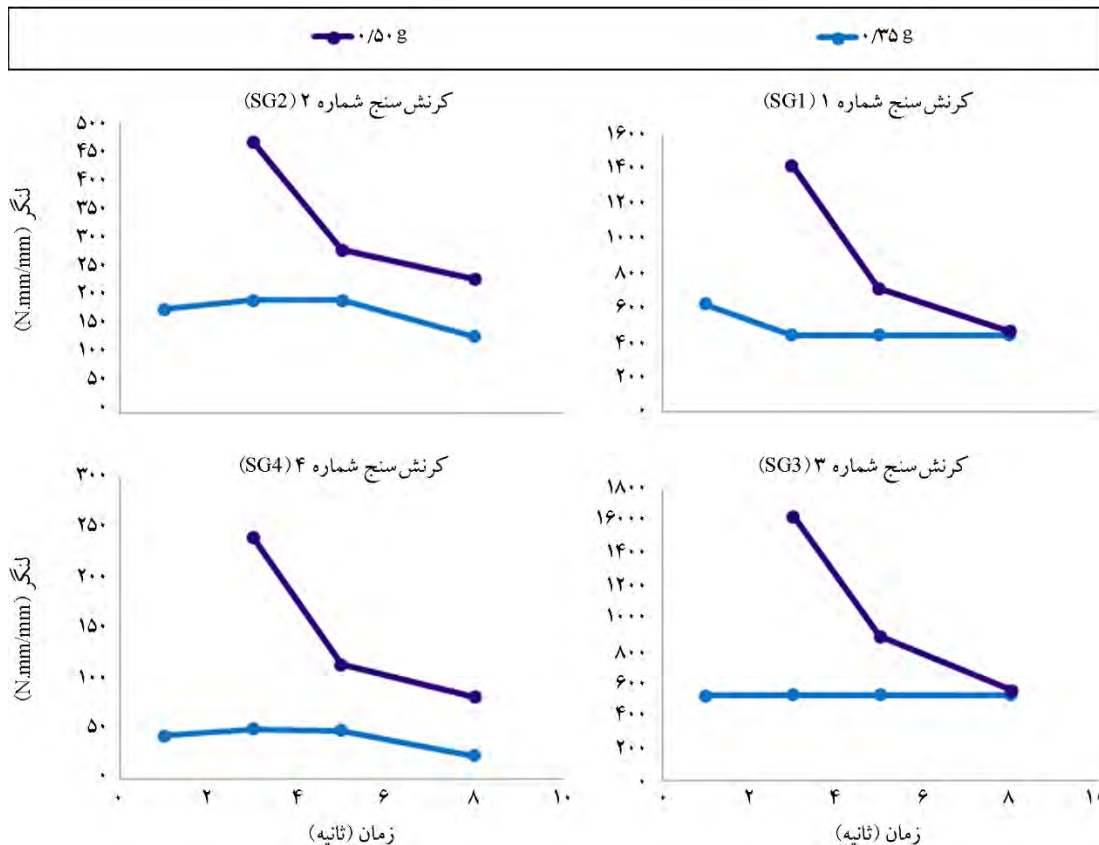
مطابق آیین‌نامه (ACI 2015)، لنگرهای ترک خوردگی و ضریب‌دار در پوشش بتنی طبق معادلات (۶) و (۷) محاسبه می‌شود:

$$M_{cr} = f_r \cdot I_g / (h/2) \quad (6)$$

که در آن f_r مدول گسیختگی بتن، I_g ممان اینرسی مقطع بتنی نسبت ناخالص و h ضخامت کل عضو می‌باشد.

$$M_u = \varphi \cdot M_n = \varphi \cdot A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) \quad (7)$$

در این رابطه φ ضریب کاهش خمشی، M_n مقاومت خمشی اسمی در مقطع، A_s مساحت آرماتورهای کششی طولی f_y ، تنش تسلیم آرماتورها، d فاصله از دورترین تار فشاری تا مرکز آرماتورهای کششی طولی و a ارتفاع بلوک تنش مستطیلی معادل است. با در نظر گرفتن مشخصات مقطع پوشش سازه‌ای



شکل (۱۹): قدر مطلق لنگر خمشی ماکزیمم ایجاد شده در پوشش تونل در برابر فرکانس ورودی برای کرنش‌سنج‌های SG1، SG2 و SG4.

پاسخ یکنواخت توده ماسه زیر تراز تونل کنترل می‌شود.

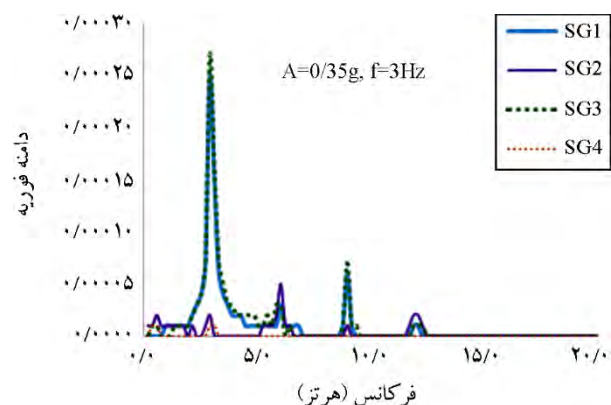
۴- نتایج مشاهدات آزمایشگاهی

در این مطالعه، پاسخ لرزه‌ای تونل دایروی در ماسه خشک به وسیله آزمایش‌های میز لرزه دینامیکی بررسی شد. پارامترهای مهم که روی پاسخ لرزه‌ای تونل تأثیر می‌گذارند مانند شتاب ماکزیمم زمین و فرکانس غالب زلزله در طی برنامه آزمایشگاهی بررسی شدند. داده‌های ثبت شده ویژگی‌های مهمی از پاسخ دینامیکی سازه‌های زیرزمینی از نوع تونل را مشخص کردند. نتایج اصلی این مطالعه طبق موارد زیر خلاصه بندی می‌شود:

- ۱- پاسخ زمین در مدل میدان آزاد و مدل خاک- تونل متفاوت است و فرکانس طبیعی میدان آزاد اندکی بیشتر است.
- ۲- شتاب افقی ثبت شده در چندین تراز نشان می‌دهد که تقویت سطحی به وسیله حفره تونل که به عنوان مانع در جهت گسترش امواج برشی به سمت بالا عمل می‌کند، انجام می‌گیرد.
- ۳- صرف نظر از فرکانس‌های آزمایش، افزایش شتاب پایه باعث افزایش تغییر شکل‌های بیشتر تونل می‌گردد.
- ۴- نتایج آزمایش‌های میز لرزه نشان می‌دهد که رفتار دینامیکی تونل‌های دایروی می‌تواند به دو مرحله تقسیم بندی شود: مرحله ناپایدار و سیکل‌های حالت پایدار. در طی حالت ناپایدار که در طی چندین سیکل اول رخ می‌دهد، سازه تونل به حالت تعادل دینامیکی می‌رسد. مرحله ناپایدار به وسیله سیکل‌های حالت پایدار دنبال می‌شود که در طی آن نیروها در پوشش تونل حول مقدار میانگین نوسان می‌کند.
- ۵- اندازه‌گیری‌های انجام شده با آزمایش‌های میز لرزه نشان می‌دهد که بلافاصله بعد از شروع زلزله تونل از حالت تعادل استاتیکی به حالت تعادل دینامیکی حرکت می‌کند.
- ۶- برای تمام آزمایش‌های تونل، لنگر خمشی و تغییر شکل‌های تونل با افزایش ماکزیمم شتاب پایه افزایش می‌یابد، اما محل کمترین و بیشترین مقادیر لنگر ثابت می‌ماند.
- ۷- در زلزله‌های با دامنه بالا، لنگر دینامیکی ایجاد شده در پوشش

با توجه به نتایج به دست آمده، در شتاب‌های بالا، رفتار غیرخطی ماسه باعث افزایش ناحیه پلاستیک پیش‌رونده خاک در اطراف تونل و در نتیجه افزایش بار قائم منتقل شده به پوشش تونل می‌گردد. در نتیجه لنگر خمشی پوشش تونل به دلیل بیضی شدگی مقطع به طور چشمگیری تغییر پیدا می‌کند. همچنین با افزایش شتاب وارده، افزایش ماکزیمم نیروهای پوشش در حین زلزله نیز مشاهده می‌شود.

در شکل (۲۰) تغییرات کرنش خمشی در موقعیت کرنش‌سنج‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ در حوزه فرکانسی برای حالت $A=0.35g$ و $f=3Hz$ رسم شده است. اختلاف کمی بین فرکانس اعمال شده به سیستم و فرکانس غالب تونل وجود دارد. همان‌طوری که در شکل نشان داده شده است، فرکانس غالب تونل $2.9Hz$ می‌باشد. این نشان‌دهنده‌ی اثر تونل روی فرکانس تحمیلی به سیستم می‌باشد؛ بنابراین پاسخ تونل کمی متفاوت از حرکات زمین اطرافش می‌باشد.



شکل (۲۰): منحنی پاسخ کرنش‌های خمشی (SG1، SG2، SG3 و SG4) برای $A=0.35g$ و $f=3Hz$

به وسیله LVDT نشست سطحی خاک در بالای تونل در طی زلزله اندازه‌گیری شد. نشست‌های کوچکی از زمین در سطح خاک در طی زلزله به دلیل دانسیته بالای خاک مورد مطالعه ثبت شد. به علاوه آزمایش‌ها نشان دادند که نشست سطح خاک با افزایش PGA افزایش می‌یابد. نشست‌های خاک اساساً به وسیله

- Tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(1), 117-127.
5. Cilingir, U. and Madabhushi, S. P. G. (2011b) A model study on the effects of input motion on the seismic behavior of tunnels. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**, 452-462.
 6. Yang, D., Naesgaard, E., Byrne, P.M., Adalier, K., and Abdoun, T. (2004) Numerical model verification and calibration of George Massey tunnel using centrifuge models. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 921-942.
 7. Cao, J. and Huang, M.S. (2010) Centrifuge Tests on the Seismic Behavior of a Tunnel, *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. 7th ICPMG, Zurich, Switzerland, **1**, 537-542.
 8. Lanzano, G., Bilotta, E., Russo, G., Silvestri, F., and Madabhushi, S.P.G. (2012) Centrifuge modelling of seismic loading on tunnels in sand. *Geotechnical Testing Journal*, **35**(6), 854-869.
 9. Luzhen, J., Jun, Ch., Jie, L. (2010) Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, **9**(4), 555-567.
 10. Tsinidis, G., Pitilakis, K., Heron, Ch., Madabhushi, G. (2013) Experimental and numerical investigation of the seismic behavior of rectangular tunnels in soft soils. *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Kos Island, Greece.
 11. Baziar, M.H., Ghalandarzadeh, A., and Rabeti Moghadam, M. (2015) Tehran subway tunnel effect on the seismic response of the ground surface with linear soil behavior: an experimental and numerical study. *Journal of Science and Earthquake Engineering*, **2**(3), 15-36 (in Persian).
 12. Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajjalilue-Bonab, M., Tarifard, A. (2015) Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM). *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 67-78.

تونل بیشتر از لنگر ترک خوردگی بوده و در ترکیب با اثرات سایر بارها می تواند منجر به آسیب های سازه ای در پوشش گردد.

۸- بزرگ ترین مقادیر لنگر خمشی در وسط تاج و شانیه تونل های دایروی ظاهر می شود.

۹- برای شتاب $A=0.35g$ ، با افزایش فرکانس اعمالی به سیستم، لنگر خمشی ثابت بوده و یا اندکی کاهش می یابد ولی برای $A=0.50g$ لنگر ماکزیمم با افزایش فرکانس به شدت کاهش می یابد.

۱۰- پاسخ سیستم تونل - خاک اندکی متفاوت از حرکت میدان آزاد می باشد و این نشان دهنده ی تاثیر تونل روی فرکانس اعمالی به سیستم میدان آزاد می باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت سازمان قطار شهری تبریز انجام شده است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولان این سازمان بابت حمایت های صورت گرفته اعلام دارند.

مراجع

1. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., and Yao, J.I-C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, **16**, 247-293.
2. Onoue, A., Kazama, H., Hotta, H., Kimura, T., and Takemura, J. (1994) Behaviour of stacked-drift-type tunnels. *Proceedings of the International Conference Centrifuge 94*, Defense Technical Information Center, Singapore, Malaysia, **1**, 687-692.
3. Yamada, T., Nagatani, H., Igarashi, H., and Takahashi, A. (2002) Centrifuge Model Tests on Circular and Rectangular Tunnels Subjected to Large Earthquake-Induced Deformation. *Proceedings of the 3rd Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Toulouse, France, **1**, 673-678.
4. Cilingir, U. and Madabhushi, S.P.G. (2011a) Effect of Depth on the Seismic Response of Circular

13. Iai, S. (1989) Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils Foundations*, **29**(1), 105-118.
14. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, S. (2007) *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*. Taylor & Francis Group, London, UK.
15. Koyama, Y. (2003) Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, **18**, 145-159.
16. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
17. ACI (2015) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318M-14*. American Concrete Institute (ACI) Committee 318.

واژه‌نامه

Actuator	۱- جک هیدرولیکی هوشمند
Laminar Shear Box	۲- جعبه برش لایه‌ای
Accelerometer	۳- شتاب‌سنج
Strain Gauge	۴- کرنش‌سنج
Linear Variable Differential Transformer	۵- مبدل تفاضلی متغیر خطی
Data Logger	۶- دیتالاگر
Free Field	۷- میدان آزاد
Structure Field	۸- مدل خاک-تونل
White Noise	۹- نویز سفید
Fourier Spectra	۱۰- طیف فوریه
Drift Baseline	۱۱- خط پایه انحرافی
Baseline Correction	۱۲- اصلاح خط پایه
Butterworth	۱۳- باترورث
Infinite Impulse-response Filter	۱۴- فیلتر ضربه-پاسخ بی‌نهایت
Bandpass	۱۵- پالاینده

Experimental Study of the Seismic Response of Tabriz Subway Tunnel in Dry Sand

Majid Farrin¹ and Masoud Hajjalilue-Bonab^{2*}

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

2. Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,

*Corresponding Author, email: hajjalilue@tabrizu.ac.ir

A series of 1 g shaking table tests were performed to investigate the response of Tabriz subway tunnel, a circle-type tunnel embedded in dry sand, under sinusoidal excitations. In prototype, the subway tunnel with 9.2 m diameter and 0.35 m thickness was embedded in a soil layer. Two reduced-scale 1 g shaking table models, designated as FF and SF, were constructed in 1/45 scale. The FF was constructed to study the seismic response of the soil layer in free field condition, while the SF model includes a subway tunnel to study its seismic response during different excitations.

The shaking table of Tabriz University with a platform of 3m×2m and one-degree of freedom was used to induce the desired excitations to models. The table can carry up to 6 tones and can reach acceleration levels up to 1.5 g with peak displacements of ±100 mm. A laminar shear box was designed in Tabriz University that includes 20 aluminum frames with dimensions of 1320×814×860 mm (L×H×W). In order to reduce the friction between the layers and simulate the displacement of soil layers, ball bearings were used between two adjacent frames. In this box type, the lateral boundary effect on the seismic response of the soil layer is reduced.

The simulation laws for 1 g shaking table tests were utilized in the current study. Based on the simulation laws and the size of the laminar shear box, the prototype to model scale factor was considered to be 45. Therefore, the tunnel model was constructed by aluminum alloy with a diameter of 195.5 mm and thickness of 1.5 mm.

Uniform dry sand provided from Qomtapeh was used in this study. During the construction, the tunnel and all the embedded instruments were placed in the model. To avoid any interaction of the tunnel with the laminar shear box, the tunnel was selected shorter than the box width. Two PVC circular plates were placed at both the tunnel ends to avoid the sand entrance into the tunnel model. To simulate the effects of friction on the soil–tunnel interaction, the outside surface of tunnel was covered by sand particles using epoxy coating. For reaching the same target relative density ($D_r=65\%$) during the construction of models, the bulk unit weight was controlled to be constant for all layers. Seven strain gauges were installed on the tunnel surface to monitor the behavior of the tunnel. Five accelerometers were placed in different levels of the model to record the acceleration in the soil. Besides, two LVDTs were placed on the top of the model to measure the soil surface settlement. A 32-channel dynamic data logger was used to record and transfer all the measured data to a personal computer.

Two types of excitation were applied to the models by shaking table: I) irregular waves with high frequency content and low amplitude to determine the natural frequency of the models, and II) harmonic waves with low frequency content and high amplitude to study the seismic response of the tunnel. Two peak ground accelerations of 0.35 g and 0.50 g with frequencies of 1, 3, 5 and 8 were applied to the models at this stage.

The recorded data highlighted significant aspects of the dynamic response for the above type of underground structures:

- The results show that the ground response of the free field model is different from the tunnel-soil model and the natural frequency of the free field is slightly larger than soil-tunnel model. This indicates the effect of the tunnel on the applied frequency to the system.
- The recorded horizontal accelerations at different levels indicate that accelerations are amplified towards the soil surface and the tunnel acts as an obstacle against the propagation of shear waves upward.
- According to the results, the dynamic response of circular tunnels can be split into two stages: transient stage and steady-state cycles. During the transient stage, which lasts for the first few cycles, the tunnel reaches a dynamic equilibrium configuration. The transient stage is followed by the steady-state cycles, during which the forces in the tunnel lining oscillate around a mean value.
- For all tests, bending moments and lining deformations increase by increasing in maximum base acceleration, but the location of the highest and the lowest amounts stays the same.
- According to the results, for $A=0.35$ g, maximum bending moment is constant or reduces a little by increasing frequency; however, for $A=0.50$ g, maximum bending moment reduces sharply by increasing of the loading frequency.

The results show that in the earthquakes with high PGA, the dynamic bending moments caused in the tunnel lining are larger than cracking moment that can lead to a serious damage to the lining in combination with other loads.

Keywords: Subway Tunnel, Tabriz City, Physical Modeling, Shaking Table, Seismic Response.