

چکیده

در مقاله حاضر، با انجام آزمایش‌های میز لرزه و روش عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌ها، به بررسی اثرات حضور تونل مترو شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در محدوده رفتار خطی خاک پرداخته شده است. تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب و همچنین اثر آن بر طیف پاسخ شتاب در سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر پارامترهای عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بر میزان بزرگنمایی‌ها برای امواج واقعی زلزله مورد مطالعه پارامتری قرار گرفته است. از مطالعات چنین نتیجه‌گیری شد که میزان حداکثر بزرگنمایی تابع عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بوده که بیشینه آن برای نسبت عمق‌های $1/5$ ، 2 و 3 به ترتیب برابر با 10 ، 8 و 5 درصد برای خاکی با سرعت موج برشی 175 متر بر ثانیه بود. همچنین نتیجه‌گیری شد که حضور تونل مترو در خاک‌های مختلف، محدوده فرکانسی متفاوتی از سازه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که سازه‌های با محدوده پریودی بالاتر از $0/4$ ثانیه تحت تأثیر حضور تونل مترو قرار نمی‌گیرند.

کلمات کلیدی: تونل مترو، شهر تهران، بزرگنمایی لرزه‌ای، سطح زمین، مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌سازی عددی

تأثیر تونل مترو شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در محدوده رفتار خطی خاک: مطالعه آزمایشگاهی و عددی

محمدحسن بازاریار (نویسنده مسؤول)

استاد دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

E-mail: baziar@iust.ac.ir

عباس قلندرزاده

دانشیار دانشکده عمران پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

مسعود رابطی مقدم

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

1- مقدمه

حضور فضاهای زیرزمینی طبیعی مانند غارها و حفرات زیرزمینی و یا تأثیر ساخت سازه‌های زیرزمینی به دست بشر نظیر تونل‌های داخل شهری بر پاسخ لرزه‌ای محیط پیرامون به‌ویژه در سطح زمین توسط محققین آشکار شده است [1-22]. با این حال، عمده مطالعات انجام‌شده در مورد تأثیر فضاها و سازه‌های زیرزمینی بر عملکرد لرزه‌ای محیط پیرامونی و سازه‌های مجاور آنها و به‌ویژه پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، محدود و اکثر تحقیقات صورت گرفته شامل مطالعات تحلیلی و عددی و به‌ندرت آزمایشگاهی، در محدوده رفتار الاستیک محیط بوده است. به دلیل ناشناخته بودن اثرات ساخت این قبیل سازه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای زمین، در هیچ آیین‌نامه‌ای به اثرات اندرکنشی سازه‌های زیرزمینی با محیط پیرامون در حین زلزله و به‌ویژه اثرات آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و سازه‌های واقع بر آن اشاره‌ای نشده است. پر واضح است که اطلاع از تأثیر حضور سازه زیرزمینی بر

از دید جمعیت کلان‌شهرها منجر به کاهش فضاهای موجود در سطح شهرها شده و گسترش بیش‌ازپیش فضاهای زیرزمینی را به دنبال داشته است. امروزه سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌های مترو، تونل‌های انتقال آب و فاضلاب، تونل‌های تأسیساتی، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ‌های زیرزمینی از زیرساخت‌های حیاتی شهرنشینی مدرن محسوب می‌شوند. این قبیل سازه‌ها، به‌ویژه در شهرهای با جمعیت زیاد، به شکل فزاینده‌ای به‌منظور رفع نیازهای مختلف احداث می‌گردند. هر چند در خصوص سازه‌های زیرزمینی، عمده تمرکز مطالعات پیشین به بررسی رفتار لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها در حین زلزله، به‌ویژه از دیدگاه سازه‌ای، معطوف بوده است، تأثیر ساخت و وجود فضاها و سازه‌های زیرزمینی بر محیط پیرامون و سازه‌های اطراف موضوعی است که در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. از منظر ژئوتکنیک لرزه‌ای، اهمیت

مختلفی از جمله اثر عمق بدون بعد (h/a) ، اثر پریود بدون بعد (λ/D) ، اثر شکل هندسی مقطع تونل (دایره‌ای، مربعی، نیم‌دایره و نعل اسبی) و نوع موج مهاجم (SV, P) بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات تجربی انجام شده در زمینه اثرات حفره‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، اندک می‌باشند. تحقیقات انجام شده در این زمینه به تنها مطالعه‌ی موردی صورت گرفته توسط اسگارلاتو و همکاران [19] محدود می‌شود که به اندازه‌گیری تأثیر حفرات زیرزمینی موجود در منطقه‌ی کاتانیای ایتالیا بر ارتعاشات محیطی اطراف آنها پرداختند.

با آشکار شدن اهمیت حضور فضاهای زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین به کمک مطالعات تحلیلی و عددی، این موضوع مورد توجه محققین در حوزه‌ی مطالعات با مدل‌سازی فیزیکی قرار گرفت؛ هر چند تعداد این مطالعات بسیار اندک است. به عنوان اولین مطالعه آزمایشگاهی، ابوهاجر و همکاران [20] با مدل‌سازی سانتی‌فیوژی کالورت‌های مربعی به بررسی اثر پارامترهایی نظیر ضخامت کالورت، تراکم خاک، دامنه شتاب ورودی و اثر حضور روسازه بر شتاب ثبت شده در اطراف کالورت‌ها پرداختند. لائزانو و همکاران [21] به کمک سانتی‌فیوژ مرکز اسکوفیلد دانشگاه کمبریج انگلستان به بررسی اثرات تونل دایره‌ای بر روی شتاب‌های نزدیک آن پرداختند. اخیراً، بازاریار و همکاران [22] اثر تونل جعبه‌ای شکل مترو بر شتاب‌های ثبت شده در سطح زمین را به کمک مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر محتوای فرکانسی موج ورودی در مطالعات آنها مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که عنوان گردید تاکنون مطالعات انجام شده در مورد تأثیر فضاها و سازه‌های زیرزمینی بر عملکرد لرزه‌ای محیط پیرامونی و سازه‌های مجاور آنها و به‌ویژه پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، محدود و اکثر تحقیقات صورت گرفته شامل مطالعات تحلیلی و عددی و به‌ندرت آزمایشگاهی، در محدوده رفتار الاستیک محیط بوده است. مطالعات عددی که بیشترین سهم را در این زمینه داشته‌اند اعتبار خود را از روش‌های تحلیلی

پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌تواند در طراحی لرزه‌ای سازه‌های موجود و یا در حال ساخت مجاور آن فضاها مفید واقع شود.

تاکنون ابعاد اصلی مسأله به کمک مطالعات تحلیلی [10-1] نمایان شده و پارامترهای مهم مؤثر بر مسأله نیز توسط آنها مشخص گردیده است. از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر مسأله می‌توان به پریود بی بعد (λ/D) ، طول موج مهاجم D قطر سازه زیرزمینی می‌باشد، عمق بی بعد (h/a) ، عمق مرکز سازه زیرزمینی و a شعاع سازه زیرزمینی است، فاصله افقی از مرکز تونل در سطح زمین (X/a) ، ضریب انعطاف‌پذیری (J) ، اندازه و شکل هندسی فضا یا سازه زیرزمینی (مانند مقاطع دایره‌ای و مستطیلی)، نوع موج مهاجم (برشی، فشاری و ریلی)، محتوای فرکانسی موج ورودی، و زاویه تابش موج مهاجم اشاره نمود. درعین حال، حل‌های تحلیلی غالباً محدود به مسائل با هندسه ساده با مشخصات همگن و همسان الاستیک در برابر موج مهاجم SH و فضای فرکانس می‌شوند. از این رو به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های تحلیلی، مطالعات بر مبنای روش‌های عددی المان محدود (FEM)، تفاضل محدود (FDM) و المان مرزی (BEM) به‌منظور شناخت اثرات سازه‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین شکل گرفتند [11-18]. در این میان، یوتامیترا و همکاران [15] به کمک تحلیل‌های عددی ویسکو الاستیک بر مبنای FDM تأثیر پارامترهایی نظیر عمق بدون بعد، فرکانس بدون بعد و ضریب انعطاف‌پذیری را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد مطالعه قرار دادند. سیکا و همکاران [17] تأثیر حضور حفرات زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین برای روستایی واقع بر تپه در ایتالیا را به روش عددی بر مبنای FEM ارزیابی نمودند. علی‌الهی و همکاران [18] پاسخ لرزه‌ای یک محیط الاستیک خطی بدون میرایی مصالح (محیط سنگی با سرعت 800 متر بر ثانیه) که در بردارنده حفره‌ای با هندسه‌های متفاوت می‌باشد را در برابر امواج مهاجم SV و P مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، آنها از تحلیل عددی دو بعدی در حوزه زمان که بر مبنای روش المان مرزی توسعه داده شده، استفاده نمودند. تأثیر پارامترهای

گرفته‌اند که دارای فرضیات ساده شده‌ای هستند. هر چند اخیراً روش‌های عددی بر مبنای نتایج مطالعات انجام‌شده به صورت آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند، تاکنون این مسأله به طور مدون از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی یا مطالعات عددی که پیش‌توانه آزمایشگاهی داشته باشند، بررسی نگردیده است. در مقاله‌ی حاضر، با انجام آزمایش‌های میز لرزه $1g$ و روش عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌ها، به بررسی اثرات حضور تونل زیرزمینی مترو شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخته شده است. تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در مجاورت تونل نسبت به سطح آزاد زمین و همچنین اثر آن بر طیف پاسخ شتاب سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. اثر پارامترهای عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بر میزان بزرگنمایی‌ها برای امواج واقعی زلزله مورد مطالعه پارامتری قرار گرفت. در پایان مشخص گردید که در محدوده رفتار خطی خاک، تحت چه شرایطی اثر حضور تونل مترو باید در طراحی لرزه‌ای سازه‌های اطراف لحاظ شود و تحت چه شرایطی از این اثر می‌توان صرف نظر نمود.

2-1- میز لرزه $1g$ دانشگاه تهران

در این تحقیق، مدل‌سازی فیزیکی آزمایش‌ها با استفاده از میز لرزه دانشگاه تهران صورت گرفته است. این میز لرزه دارای عرشه‌ای فولادی به ابعاد 180 سانتیمتر بوده و جک هیدرولیکی متصل به آن ظرفیتی معادل 25 کیلو نیوتن را دارا می‌باشد. این میز قادر به اعمال محدوده فرکانسی تحریک ورودی از $0/01$ تا 20 هرتز با دامنه جابه‌جایی ± 125 میلی‌متر و دامنه شتاب بیش از $1g$ می‌باشد. جعبه مورد استفاده در آزمایش‌ها، از ورقه‌های پلکسی گلس (Plexiglass) ساخته شده است. این جعبه دارای ابعاد داخلی $1/8$ متر (طول)، $0/8$ متر (عرض) و $1/2$ متر (ارتفاع) می‌باشد. تصویری از میز لرزه دانشگاه تهران به همراه جعبه آزمایش مورد استفاده در شکل (1) نشان داده شده است.

2- معرفی آزمایش‌های میز لرزه $1g$

در مقاله حاضر، مجموعه‌ای از آزمایش‌های میز لرزه $1g$ به منظور بررسی اثر تونل متروی شهر تهران بر شتاب سطح زمین انجام شده است. سازه‌ی واقعی مدل شده، تونلی با مقطع دایره‌ای می‌باشد که از بین تونل‌های متروی شهر تهران انتخاب گردیده است. در مقیاس نمونه اصلی، تونل متروی مورد مطالعه دارای مقطعی دایره‌ای با قطر داخلی 8 متر و با ضخامت پوشش 35

جدول (1): لیست مدل‌های میز لرزه به همراه مشخصات آن‌ها

شناسه مدل	نوع مدل	بررسی اثر	ضخامت لایه خاک (سانتی‌متر)	عمق بی بعد (h/a)	فاصله مرکز تونل از سطح زمین (سانتی‌متر)	درصد تراکم خاک (درصد)	قطر تونل (سانتی‌متر)
FF	مدل بدون تونل (میدان آزاد)	تعیین پاسخ میدان آزاد	100	-	-	70	-
SF	مدل با تونل	بررسی اثر تونل مترو بر شتاب سطح زمین	100	2	25	70	25



شکل (1): تصویری از میز لرزه دانشگاه تهران به همراه جعبه نصب شده بر روی آن

بی بعد می باشد، به دست آمده است. ضریب انعطاف پذیری (J) برای تونل های دایره ای طبق رابطه (1) تعریف می شود [25]:

جدول (2): ضرایب مقیاس کمیت های مختلف در آزمایش های میز لرزه 1 g

Quantity	Prototype/ Model [24]	(N=32) مطالعه حاضر	
		M/P	P/M
Density (ρ)	1	1	1
Length (L)	N	0/031	32
Stress (σ)	N	0/031	32
Shear Strain (ϵ)	$N^{0.5}$	0/18	5/66
Displacement (d)	$N^{1.5}$	0/006	181
Shear modulus (G)	$N^{0.5}$	0/18	5/66
Shear wave velocity (V_s)	$N^{0.25}$	0/42	2/38
Acceleration (a)	1	1	1
Frequency (f)	$1/N^{0.75}$	13/45	0/074
Dynamic Time (t)	$N^{0.75}$	0/074	13/45
Flexibility ratio (J)	1	1	1

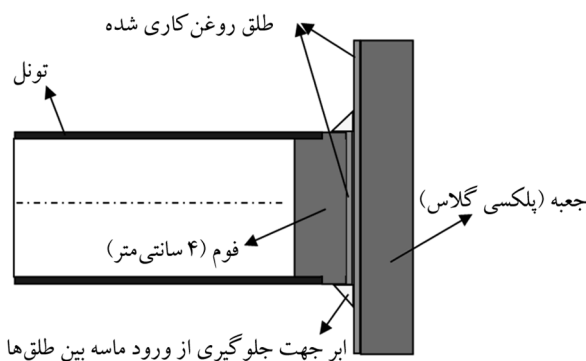
2-2- مقیاس آزمایش ها

بر اساس ابعاد جعبه میز لرزه (به طول 180، عرض 80 و ارتفاع 120 سانتی متر) و فاصله مناسب تونل از طرفین و سایر پارامترهای مورد بررسی در مسأله، مقیاس 1 به 32 ($\lambda_p = 32$) برای آزمایش ها انتخاب شده است. سایر مشخصات آزمایش ها بر اساس این مقیاس مدل سازی شده است. بر طبق مقیاس انتخاب شده، ضرایب تشابه کمیت های مختلف بین مدل و سازه واقعی، در جدول (2) ارائه شده است. این روابط تشابه توسط یایی [24] برای یک مدل ژئوتکنیکی با فرض رفتار در محدوده کرنش های کوچک و متوسط و با فرض $\lambda_p = \lambda_\epsilon = 1$ ، برای آزمایش های میز لرزه 1 g پیشنهاد شده است.

2-3- ابعاد و مشخصات سازه زیرزمینی

سازه اصلی بیانگر یک تونل مترو با مقطع دایره ای به قطر 8 متر از جنس بتن مسلح و ضخامت 35 سانتی متر می باشد که در مقیاس مدل، لوله ای از جنس آریست سیمانی (Asbestos Cement) به قطر داخلی 25 سانتی متر و ضخامت 6 میلی متر انتخاب شده است. جنس و ضخامت لوله مورد بررسی بر اساس یکسان سازی ضریب انعطاف پذیری بین مدل و سازه واقعی، که یک پارامتر

ضخامت 10 سانتی متر در دو انتهای جعبه مدل استفاده شد. همچنین، شرایط تکیه گاهی تونل با جعبه میز لرزه باید طوری مدل شود تا حتی الامکان تأثیر جداره‌های جعبه بر تونل به حداقل برسد. بدین منظور، طول تونل 76 سانتی متر در نظر گرفته شد که 2 سانتی متر از هر طرف با طرفین جعبه فاصله دارد (عرض داخلی جعبه برابر با 80 سانتی متر است). این فاصله با مصالح منعطف از جنس فوم پوشانده شد. جزئیات شرایط مرزهای جانبی تونل در شکل (2) آمده است.



شکل (2): جزئیات شرایط مرزهای جانبی تونل با بدنه جعبه میز لرزه

2-5- ساخت مدل‌ها

در تمامی آزمایش‌ها از ماسه مصنوعی خرد شده شماره 161 فیروزکوه با تراکم 70 درصد و با رطوبت 5% استفاده شد. متراکم نمودن خاک به شیوه بارش خاک از ارتفاع به همراه کوبش آن در لایه‌های 5 سانتی متری جهت رسیدن به تراکم مورد نظر انجام شده است. مشخصات ماسه 161 فیروزکوه مطابق جدول (3) توسط اقبالی و فخاریان [26] ارائه شده است.

جدول (3): مشخصات ماسه 161 فیروزکوه [26]

Passing # 200 (%)	Sand (%)	C_c	C_u	D50 (mm)	e_{min}	e_{max}	G_s	USCS name
1	99	0/88	1/9	0/26	0/58	0/86	2/56	SP

هر دو مدل FF و SF به روش لایه به لایه و در شرایط یکسان ساخته شده‌اند. در ابتدا خاک آماده شده از ارتفاع مشخصی به روش بارش به صورت یکنواخت درون جعبه ریخته شده تا 5

$$J = \frac{2E_{soil}(1 - \nu_{lining}^2)R_{lining}^3}{E_{lining}(1 + \nu_{soil})t_{lining}^3} \quad (1)$$

که در رابطه (1) E_{soil} و E_{lining} به ترتیب مدول الاستیسیته خاک و مصالح پوشش تونل می‌باشد. ν_{soil} و ν_{lining} به ترتیب ضریب پواسون مصالح خاک و پوشش تونل می‌باشد. R_{lining} و t_{lining} به ترتیب قطر و ضخامت پوشش تونل هستند.

طبق قانون تشابه بین مدل و نمونه اصلی برای کمیت ضریب انعطاف پذیری، با ثابت قرار دادن ضریب انعطاف پذیری بین مدل و نمونه واقعی، ضخامت آن بر اساس رابطه (2) تعیین می‌شود:

$$t_m = \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} \times t_p \times \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

طبق این رابطه، برای جنس‌های مختلف لوله (E_m)، ضخامت‌های مختلفی حاصل می‌شود. به دلیل تشابه مشخصات مهندسی آریست سیمانی با بتن (مدول الاستیسیته و جرم حجمی تقریباً یکسان)، لوله‌ای از جنس آریست با قطر داخلی 25 سانتی متر و با ضخامت 6 میلی متر جهت مدل‌سازی تونل مترو تهیه شد. جرم حجمی آریست مورد استفاده برابر با 2168 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که نزدیک به جرم حجمی بتن مسلح (2400 کیلوگرم بر مترمکعب) می‌باشد. لازم به ذکر است طول لوله برابر با 76 سانتی متر انتخاب شده است که 4 سانتی متر از عرض جعبه آزمایش کوتاه‌تر می‌باشد. این کاهش طول به دلیل در نظر گرفتن تمهیداتی برای مرزهای جانبی تونل با جعبه به منظور برقراری شرایط کرنش مسطح در مدل می‌باشد. همچنین، به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی تونل مترو، اصطکاک بین تونل و خاک با استفاده از چسباندن ماسه تمیز مانده روی الک شماره 20 به کمک چسب اپوکسی به طور یکنواخت در سرتاسر سطح بیرونی تونل تأمین شد.

2-4- شرایط مرزهای جانبی جعبه و شرایط تکیه گاهی تونل

مرزهای جانبی جعبه حتی الامکان می‌بایست طوری مدل گردد تا از بازگشت موج به داخل محیط جلوگیری به عمل آید تا بتواند شرایط میدان آزاد را مدل‌سازی نماید. از ابرهای به

گردید. شتاب ورودی توسط شتاب‌سنج ACC1 ثبت می‌شود. شتاب‌سنج ACC8 شتاب سطح زمین را ثبت می‌کند. در شکل‌های (5) و (6) چیدمان شتاب‌سنج‌ها و LVDTها به همراه ابعاد مدل به ترتیب برای مدل FF و SF با جزئیات ارائه شده است. در مدل FF، شتاب‌سنج ACC10 که بر روی ابر چسبانده شده و هم‌راستی شتاب‌سنج‌های ACC6 و ACC7 می‌باشد، جهت ثبت شتاب بر روی ابر و بررسی عملکرد ابر در جذب موج انتخاب شده است. همچنین در مدل SF، شتاب‌سنج ACC10، شتاب بر روی تونل را اندازه‌گیری می‌نماید. لازم به ذکر است تمامی شتاب‌سنج‌ها بر روی محور تقارن طولی مدل واقع هستند بدین معنی که از دیواره‌های طولی جعبه به اندازه 40 سانتی‌متر فاصله دارند. همچنین از دو عدد LVDT با چیدمان نشان داده شده در سطح مدل‌ها جهت ثبت نشست‌های سطح زمین استفاده شده است.

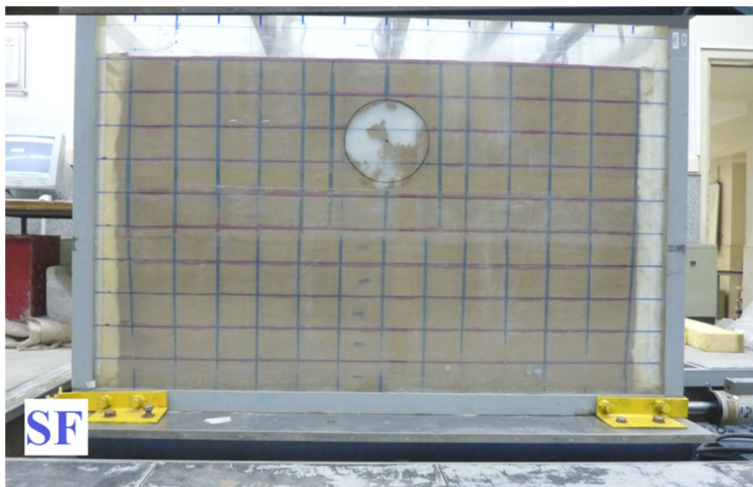
ساتی‌متر اول برای کوبش آماده گردد. با استفاده از کوبه دستی لایه خاک متراکم شده تا سطح آن به تراز مشخص شده برای آن لایه برسد. پس از کوبش یکنواخت لایه و رسیدن به تراز مورد نظر در تمام سطح مدل، لایه بعدی آماده ریختن و کوبش می‌شود. قبل از ریختن لایه بعدی، سطح تمام شده لایه اول به صورت زیگزاگ به جهت ایجاد گیرداری بین لایه‌ها خراشیده می‌شود و لایه بعدی به روش بارش و کوبش متراکم می‌گردد. ترتیب اجرای روش ساخت مدل با تونل (SF) به شیوه لایه به لایه در شکل (3) و مدل تکمیل‌شده در شکل (4) نمایش داده شده است.

2-6- ابزارگذاری مدل‌ها

برای اندازه‌گیری شتاب ورودی و همچنین شتاب در قسمت‌های مختلف مدل از 10 شتاب‌سنج در مدل‌ها استفاده



شکل (3): ترتیب اجرای روش ساخت لایه به لایه در مدل با تونل



شکل (4): مدل آزمایشگاهی SF ساخته شده به روش لایه به لایه

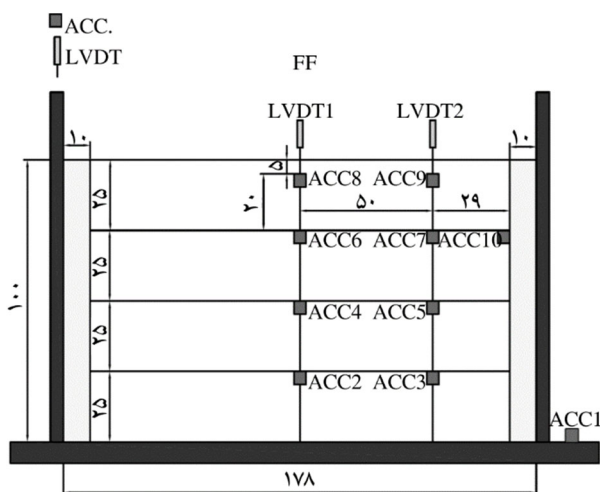
2-7- تحریک‌های اعمال شده توسط میز به مدل‌ها

تعداد 12 تحریک توسط میز لرزه در قالب دو دسته امواج (امواج نامنظم با محتوای فرکانسی بالا و دامنه کم و امواج هارمونیک با دامنه بالا) به هر مدل اعمال و شتاب ورودی توسط شتاب‌سنج ACC1 ثبت گردید. امواج نامنظم با محتوای فرکانسی تا 40 الی 50 هرتز ولی با دامنه کم $0/1-0/2$ g بوده ولی امواج هارمونیک شامل فرکانس‌های 1، 3، 5، 8، 10، 15 و 20 هرتز ولی دامنه‌های بالاتر ($0/35$ g) بودند. این امواج بر حسب قابلیت میز لرزه انتخاب شدند. در شکل (7) نمونه‌ای از دو دسته امواج ورودی اعمال شده توسط میز به مدل‌های FF و SF نشان داده شده است. تحریک‌های اعمالی به دو مدل FF و SF با یکدیگر در قالب تاریخچه زمانی شتاب‌ها به همراه طیف فوریه آنها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میز توانسته امواج ورودی را برای هر دو مدل FF و SF به‌طور تقریباً یکسانی تولید نماید.

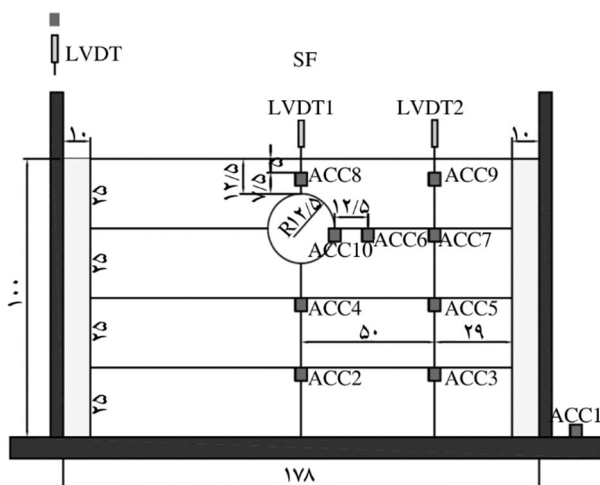
3- تحلیل نتایج آزمایش‌های SF و FF

3-1- تعیین فرکانس طبیعی مدل‌ها

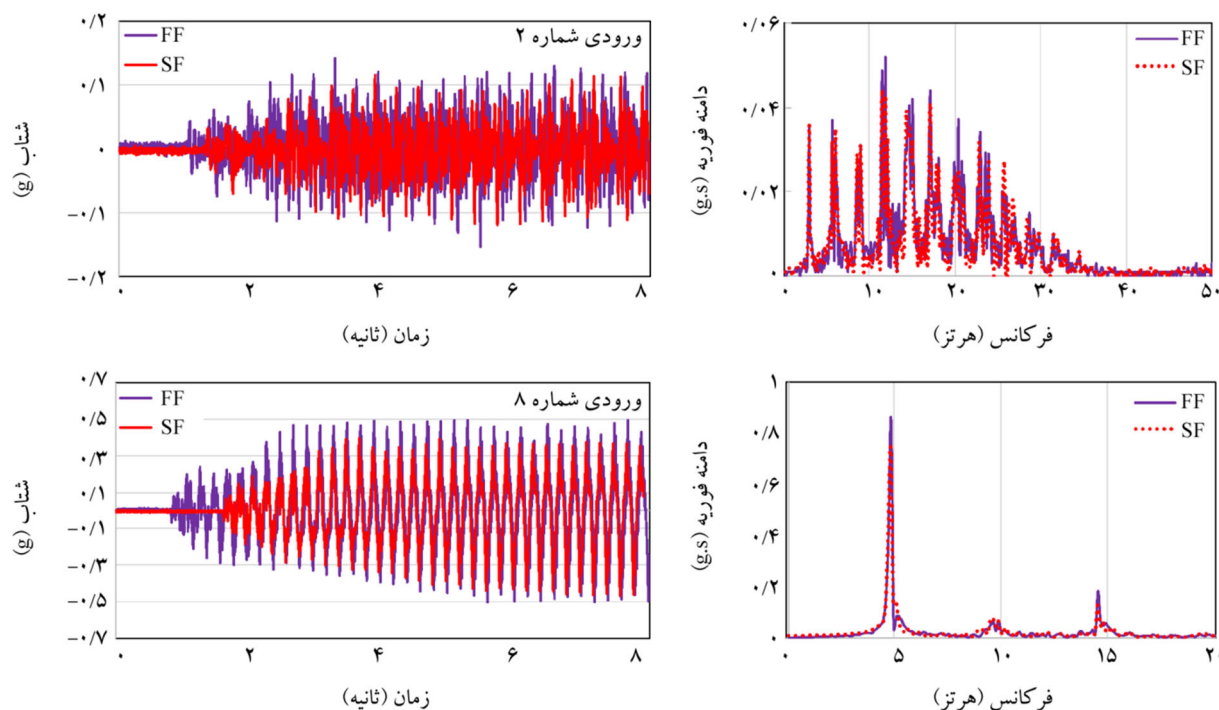
تابع تبدیل (Transfer Function) شتاب مدل‌های FF و SF برای تحریک ورودی نامنظم شماره 2 با دامنه کم ($0/1$ g) با تقسیم طیف فوریه شتاب سطح زمین (ACC8) به شتاب ورودی در کف (ACC1) در شکل (8) ترسیم شده است.



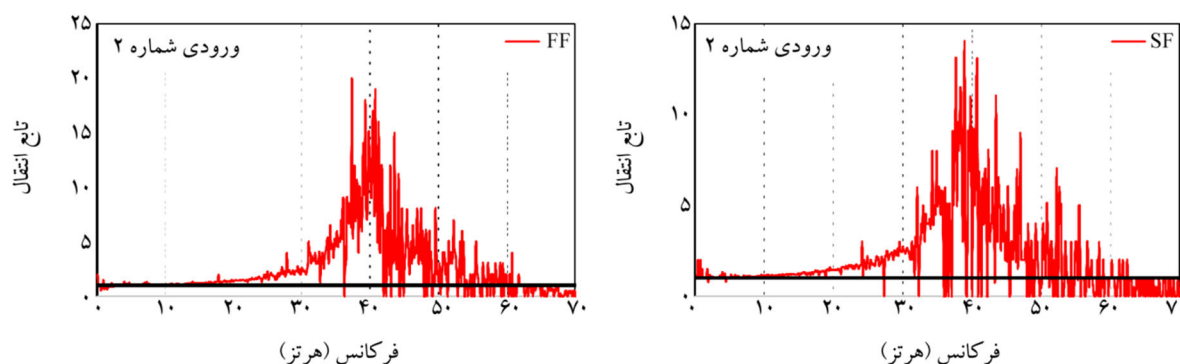
شکل (5): ابزارگذاری مدل FF (ابعاد بر حسب سانتی‌متر و در مقیاس مدل می‌باشد)



شکل (6): ابزارگذاری مدل SF (ابعاد بر حسب سانتی‌متر و در مقیاس مدل می‌باشد)



شکل (7): نمونه تحریک‌های اعمالی میز لرزه در مقیاس مدل: تحریک شماره 2 (نامنظم) و 8 (هارمونیک)



شکل (8): تابع تبدیل شتاب مدل‌های SF و FF برای تحریک‌های ورودی مختلف در مقیاس مدل

روی شتاب‌سنج‌های مذکور تصحیح خط مبنا صورت گرفته و فرکانس‌های بالا و پایین فرکانس ورودی حذف شده‌اند. کرنش خاک برای تحریک با فرکانس 10 هرتز و دامنه 0.35g، که از قوی‌ترین تحریک‌های اعمالی است، محاسبه شد. از دو شتاب‌سنج در وسط مدل (ACC4 و ACC8) به فاصله 45 سانتی‌متر استفاده گردید. بر طبق محاسبات انجام شده مشاهده گردید که خاک حداکثر کرنش برشی برابر با $1/5 \times 10^{-4}$ را تجربه کرده است که در محدوده کرنش‌های الاستیک می‌باشد. این میزان از کرنش با مشاهدات عدم نشست در مدل‌ها در انتهای آزمایش‌ها به دلیل تراکم بالا و رطوبت خاک سازگاری دارد.

همان‌طور که دیده می‌شود بزرگنمایی حداکثر موج ورودی در محدوده فرکانسی بین 37 تا 40 هرتز در مقیاس مدل برای هر دو مدل SF و FF اتفاق افتاده است. این فرکانس به عنوان فرکانس طبیعی لایه خاک در نظر گرفته می‌شود.

3-2- کرنش برشی در خاک

کرنش برشی ایجاد شده در خاک در مدل FF با محاسبه جابه‌جایی افقی بین دو شتاب‌سنج در دو ارتفاع مختلف در وسط مدل و با تقسیم اختلاف جابه‌جایی‌ها به فاصله آنها محاسبه شده است. لازم به ذکر است جهت محاسبه تاریخچه جابه‌جایی، بر

3-3- مقایسه شتاب در سطح زمین

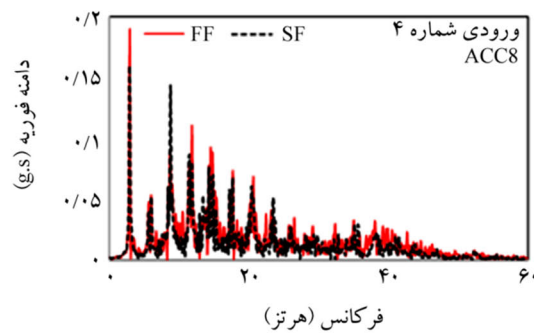
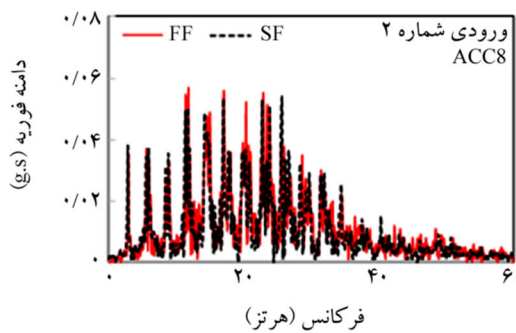
در شکل (9) طیف فوریه شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج واقع در سطح زمین (ACC8) برای دو مدل SF و FF برای تحریک‌های ورودی مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در محدوده فرکانسی مورد بررسی در آزمایش‌ها (تا حدود 50 هرتز در مقیاس مدل)، اثر تونل بر شتاب ثبت شده در سطح زمین و مجاورت تونل مشهود نیست و پاسخ‌های به دست آمده برای هر دو مدل SF و FF برای ورودی‌های مختلف در محدوده فرکانسی مورد بررسی تقریباً یکسان شده است. اندک اختلاف در پاسخ‌ها به دلیل خطا در ورودی‌های اعمالی توسط میز لرزه می‌باشد.

3-4- جمع بندی مشاهدات آزمایشگاهی

چنانچه تحلیل‌های آنالیز برگشتی بخش بعد به کمک مدل‌های عددی مشخص خواهد نمود، سرعت موج برشی در مدل‌های SF و FF برابر با 148 متر بر ثانیه در مقیاس مدل به دست آمده است. میزان λ/D برای خاکی با این مشخصات و برای موجی با حداکثر فرکانس 50 هرتز در مقیاس مدل برابر با

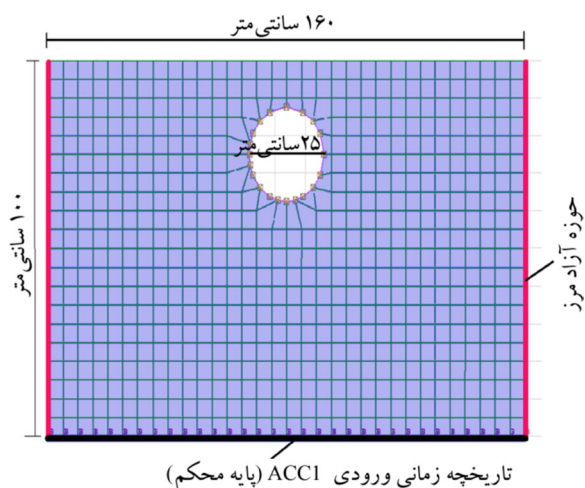
12 به دست می‌آید. همان‌طور که مطالعات تحلیلی و عددی پیشین نیز نشان داده‌اند [15، 18]، حضور تونل در این میزان از λ/D موج ورودی را تحت تأثیر قرار نخواهد داد. هر چند این مسأله تاکنون به‌طور آزمایشگاهی بررسی نشده بود. این میزان از سرعت موج در مقیاس نمونه اصلی برابر با 352 متر بر ثانیه می‌شود که معادل خاک نوع III و متمایل به خاک نوع II، طبق استاندارد 2800 می‌باشد.

جعفری و همکاران [27]، توزیع متوسط سرعت موج برشی عمق 30 متری را برای گستره شهر تهران ارائه نمودند. بر اساس این مطالعه، غالب سرعت موج برشی در شهر تهران، بالای 300 متر بر ثانیه می‌باشد. لذا، آزمایش‌های میز لرزه توانسته‌اند مقادیر حداقل سرعت موج برشی در شهر تهران را مدلسازی نمایند. متوسط سرعت موج برشی تا عمق 30 متری در مناطق مرکزی به نزدیکی 500 متر بر ثانیه و در مناطق شمالی به بالاتر از 700 متر بر ثانیه می‌رسد. در مناطق جنوبی شهر سرعت موج برشی به 300 و کمتر از 300 متر بر ثانیه نیز رسیده است، هر چند این مناطق دارای تراکم جمعیتی بسیار پائینی می‌باشند که از لحاظ درجه اهمیت مناطق کم‌اهمیتی تلقی می‌شوند.



شکل (9): طیف فوریه شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌های واقع در سطح زمین برای دو مدل SF و FF برای تحریک‌های ورودی مختلف

انتشار صحیح موج در مدل، معیار انتخاب اندازه المان‌ها، کوچک بودن اندازه المان‌ها از یک‌دهم طول موج منتشره در محیط بر طبق ادبیات فنی بود. مرزهای جانبی مدل‌ها با مدل مرز جاذب موجود در نرم‌افزار FLAC تحت عنوان Free Field مدل گردید. مدل تونل با المان Liner و با رفتار الاستیک به قطر 25 سانتی‌متر و ضخامت 6 میلی‌متر و از جنس آریست مدل شد. به دلیل ثبت شتاب‌های یکسان بر روی تونل و خاک مجاور در آزمایش‌ها، اندرکنش بین خاک و تونل بدون هیچ‌گونه اجازه لغزشی مدل شد. در تحلیل‌ها از 10% میرایی رایلی با فرکانس مرکزی برابر با فرکانس طبیعی سیستم (37 هرتز) استفاده شد. مشخصات مصالح در مدل عددی برای مدل‌های SF و FF مطابق جدول (4) در نظر گرفته شده است. به کمک مدل عددی توسعه داده شده تاریخچه زمانی شتاب در نقاط مختلف ثبت و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل (10): مدل عددی SF به همراه ابعاد، مش بندی و شرایط مرزی آنها در مقیاس آزمایشگاه

جدول (4): مشخصات مصالح در مقیاس مدل در مدل‌های SF و FF

مصالح	مدل رفتاری	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)
خاک	ویسکو الاستیک	95	0/3	1680
تونل	الاستیک	$2/3 \times 10^{-4}$	0/3	2168

بر اساس مطالعه آزمایشگاهی انجام شده در مطالعه حاضر می‌توان نتیجه گرفت که برای خاکی با سرعت موج برشی 352 متر بر ثانیه، تونل‌های سطحی مترو با قطر 8 متر که تاج آن در عمق 4 متری از سطح زمین واقع است، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را نسبت به سطح آزاد زمین دستخوش تغییر نمی‌کند. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت فرکانس اعمالی توسط میز لرزه این نتیجه به فرکانس حداکثر تا 3/5 هرتز محدود می‌شود. این مسأله در بخش بعد به کمک مطالعات عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌های میز لرزه به‌طور پارامتری مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر پارامترهایی نظیر تیپ خاک، عمق تونل، فرکانس‌های بالاتر بارگذاری برای موج‌های واقعی زلزله برای شهر تهران بررسی شده است.

4- مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها

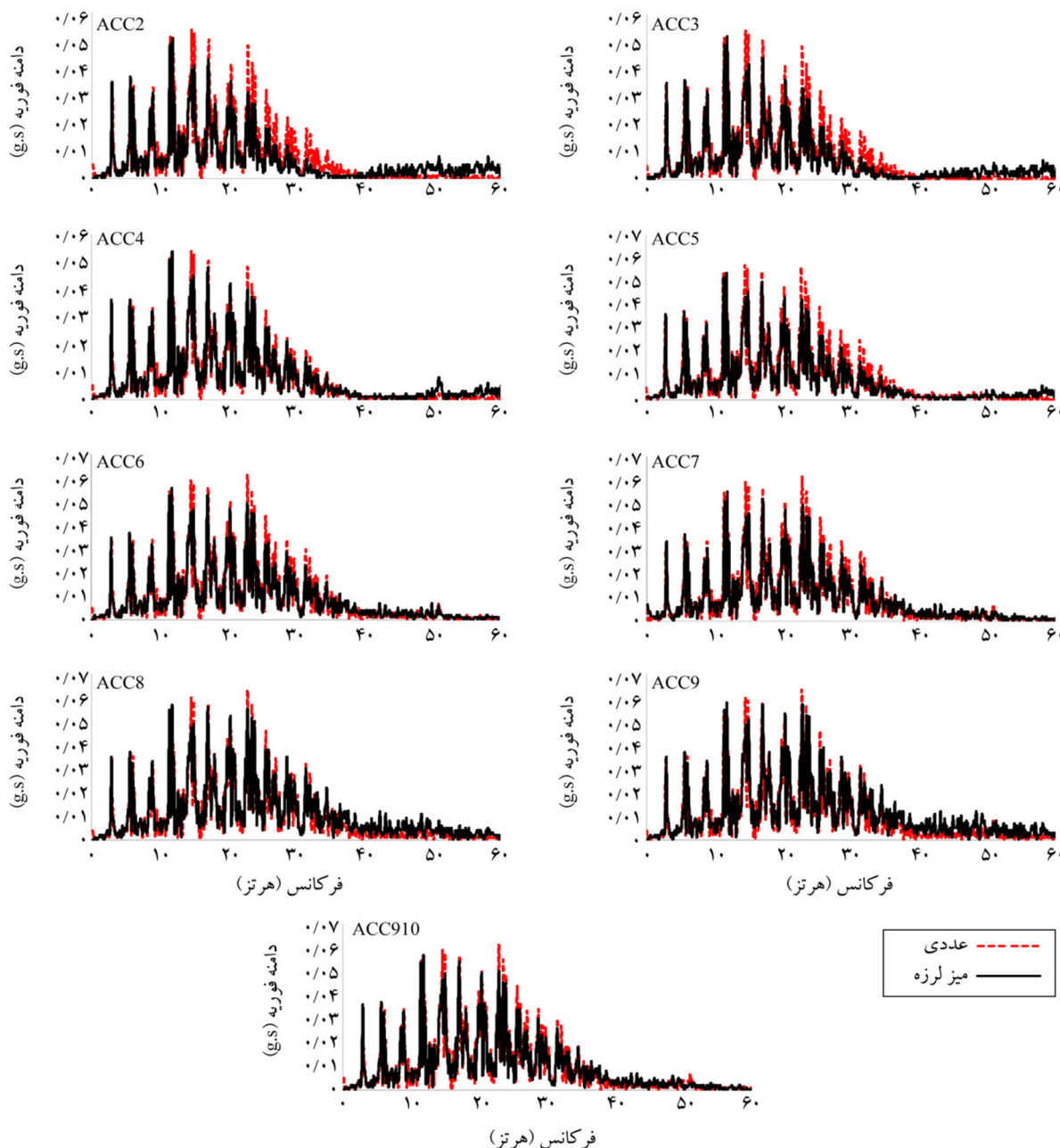
4-1- مشخصات مدل عددی

مدل عددی آزمایش‌ها در نرم‌افزار اختلاف محدود 2D FLAC [28] و بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی بخش قبل توسعه داده شده است. بدین صورت که به دلیل رفتار خاک در محدوده کرنش‌های پایین از یک مدل عددی ساده با رفتار ویسکو الاستیک مصالح استفاده شد. مشخصات خاک بر اساس فرکانس طبیعی مدل‌های SF و FF به دست آمده از آزمایش‌ها (برابر با 37 هرتز) و با استفاده از روابط الاستیک به دست آمد. از روابط یک‌بعدی الاستیک $f = V_s / 4 \text{ Hz}$ ، و با فرض $f = 37 \text{ Hz}$ ، سرعت موج برشی اولیه این مصالح برابر با 148 متر بر ثانیه به دست آمد ($H=1 \text{ m}$). با استفاده از روابط الاستیک، مدول برشی ($G = \rho V_s^2$) و مدول الاستیسیته خاک ($E = 2G(1+\nu)$) تعیین شد. مش بندی مدل عددی SF در شکل (10) نشان داده شده است. مدل عددی هم‌اندازه با مقیاس آزمایشگاه به عرض 1/6 متر و به ارتفاع 1 متر ساخته شده است. مرز کف به صورت صلب در نظر گرفته شده و شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج ACCI به عنوان شتاب ورودی به کف مدل عددی اعمال شد. از المان‌های با ابعاد 5 سانتی‌متر در 5 سانتی‌متر برای المان‌بندی مدل استفاده شده است. به منظور

2-4- شبیه‌سازی نتایج آزمایش‌ها در مقیاس مدل

کرده است. نکته قابل توجه در این مقایسه، مقایسه شتاب ACC10 در مدل عددی و آزمایش‌ها می‌باشد. این شتاب‌سنج بر روی ابر نصب شده است. در مدل عددی به جای ابر از مرز جاذب Free Field استفاده شد. یکسان شدن شتاب در این نقطه به منزله دقت بالای ابر در شبیه‌سازی مرز جاذب Free Field بوده است. تطابق نتایج عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی مؤید صحت فرکانس طبیعی برآورد شده از نتایج آزمایش‌ها برای مدل FF می‌باشد که به کمک توابع تبدیل حاصل گشت.

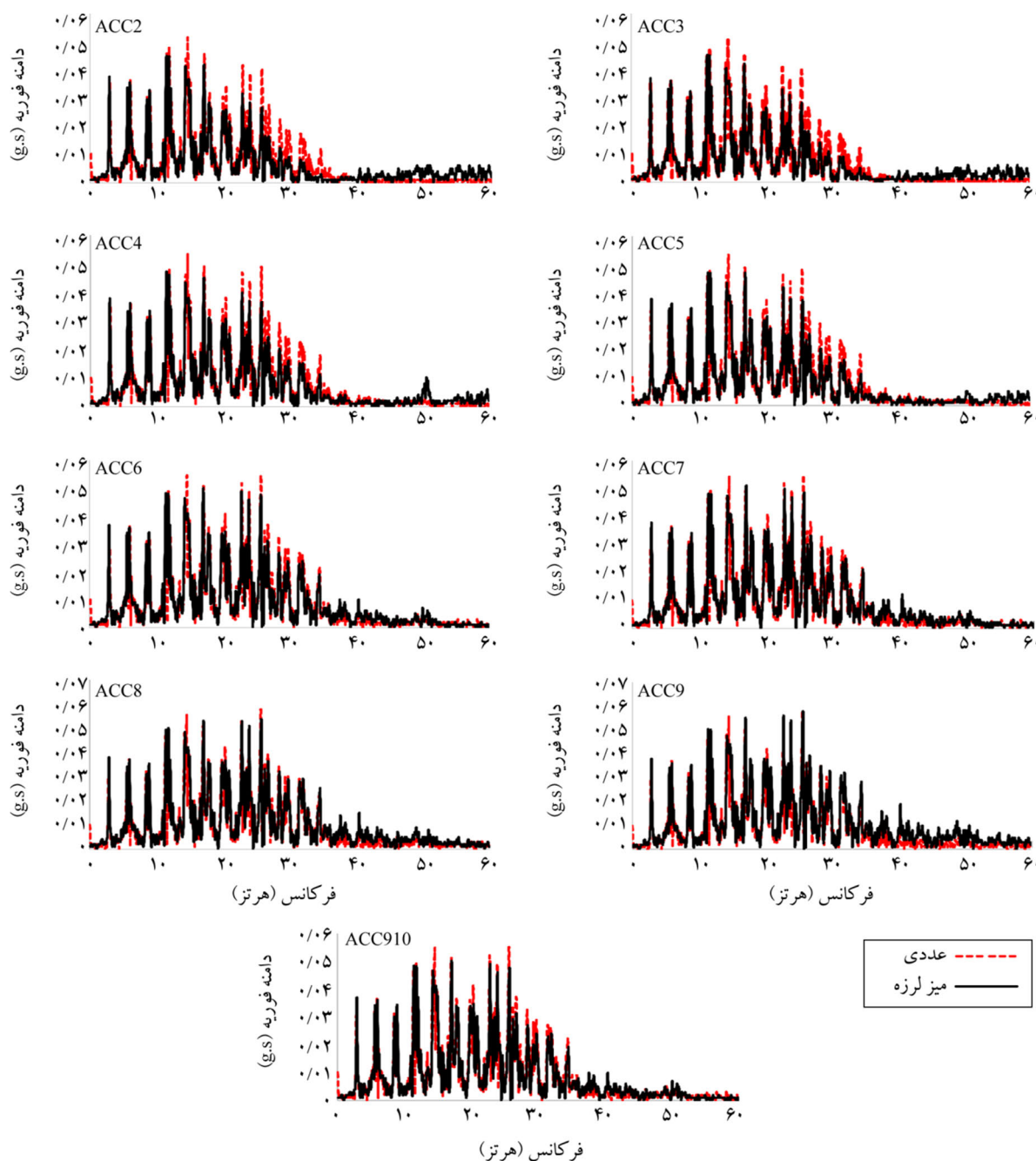
در شکل (11) طیف فوریه شتاب‌های ثبت‌شده در نقاط مختلف مدل در مدل آزمایشگاهی FF با نتایج مدل‌سازی عددی برای تحریک ورودی شماره 2 مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، به جز دو شتاب‌سنج پایین مدل (ACC2 و ACC3)، که مدل عددی در برخی فرکانس‌ها مقادیر بیشتری نسبت به مدل آزمایشگاهی داشته است، در بقیه موارد مدل عددی با دقت بالایی شتاب‌های مدل آزمایشگاهی را پیش‌بینی



شکل (11): مقایسه طیف فوریه شتاب در موقعیت‌های مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی FF تحت تحریک ورودی شماره 2

شده نشان از عملکرد مطلوب مدل عددی توسعه داده شده در برآورد نتایج آزمایش هاست. در ادامه، به منظور تفسیر مستقیم نتایج در مقیاس نمونه اصلی، از مدل عددی در مقیاس نمونه اصلی استفاده خواهد شد. از این رو، مدل‌های آزمایشگاهی به مقیاس نمونه اصلی درآمده و مقایسه بین نتایج مدل عددی با نتایج آزمایش‌ها در مقیاس نمونه اصلی در بخش بعد انجام گرفته است.

در شکل (12) طیف فوریه شتاب‌های ثبت‌شده در نقاط مختلف مدل در مدل آزمایشگاهی SF با نتایج مدل‌سازی عددی برای ورودی شماره 2 مقایسه شده است. همان‌طور که پیداست، مدل عددی با دقت بالایی نتایج مدل آزمایشگاهی را برای این مدل پیش‌بینی نموده است که بیانگر صحت شرایط فرض شده در مدل عددی از جمله رفتار خاک (به‌ویژه فرکانس غالب لایه خاک یعنی 37 هرتز) و شرایط مرزی می‌باشد. مقایسه‌های انجام



شکل (12): مقایسه طیف فوریه شتاب در موقعیت‌های مختلف در مدل عددی و آزمایشگاهی SF تحت تحریک ورودی شماره 2

3-4- شبیه‌سازی نتایج آزمایش‌ها در مقیاس نمونه اصلی

جهت انجام مطالعات پارامتری، از مدل عددی در مقیاس نمونه اصلی استفاده گردید تا نتایج به دست آمده مستقیماً در شرایط واقعی قابل تفسیر باشد. برای این منظور، نتایج آزمایش‌ها و همچنین مشخصات مدل به مقیاس نمونه اصلی در آمده و با نتایج مدل عددی توسعه داده شده در بخش قبلی ولی در مقیاس نمونه اصلی مقایسه گردیده است. مشخصات مصالح در مقیاس نمونه اصلی بر اساس روابط مقیاسی میز لرزه مطابق جدول (5) می‌باشد. مدل عددی ساخته شده در مقیاس نمونه اصلی برای مدل SF در شکل (13) نشان داده شده است. لازم به ذکر است در مدل

جدول (5): پارامترهای مدل‌های آزمایشگاهی در مقیاس مدل و نمونه اصلی

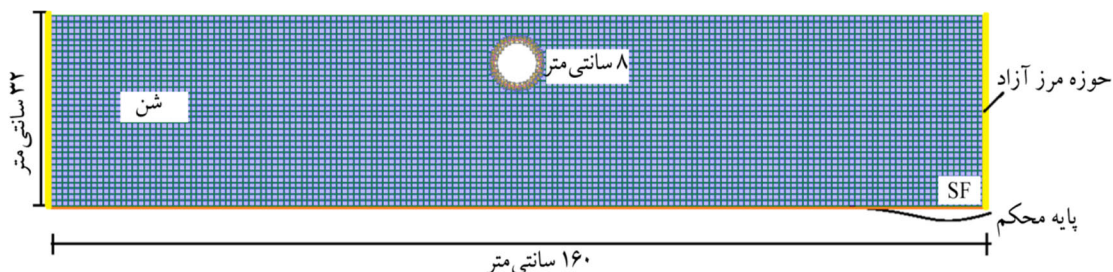
پارامتر	پارامتر در مقیاس مدل	ضریب مقیاس (P/M)	پارامتر در مقیاس نمونه اصلی
خاک	مدول الاستیسیته (MPa)	95/538	5/66
	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	148/352	2/38
تونل	قطر (متر)	0/25	8
	ضخامت (متر)	0/006	58
	جنس	آزبست	-
	مدول الاستیسیته (GPa)	23	1
هندسه مدل	عرض (متر)	1/6	32
	ارتفاع (متر)	1	32
تحریک ورودی	فرکانس طبیعی (هرتز)	37	0/074
	دامنه شتاب (g)	-	1
	فرکانس (هرتز)	-	0/074
	مدت زمان (ثانیه)	8/2	13/45

عددی در مقیاس نمونه اصلی مرزهای کناری مدل به فاصله تا 20 برابر شعاع تونل انتقال یافت تا اثرات حضور تونل بر سطح قابل مطالعه باشد. از آنجا که مرزهای کناری مدل عددی در مقیاس مدل دارای شرایط Free Field بودند، لذا این مسأله تأثیری بر نتایج نخواهد داشت.

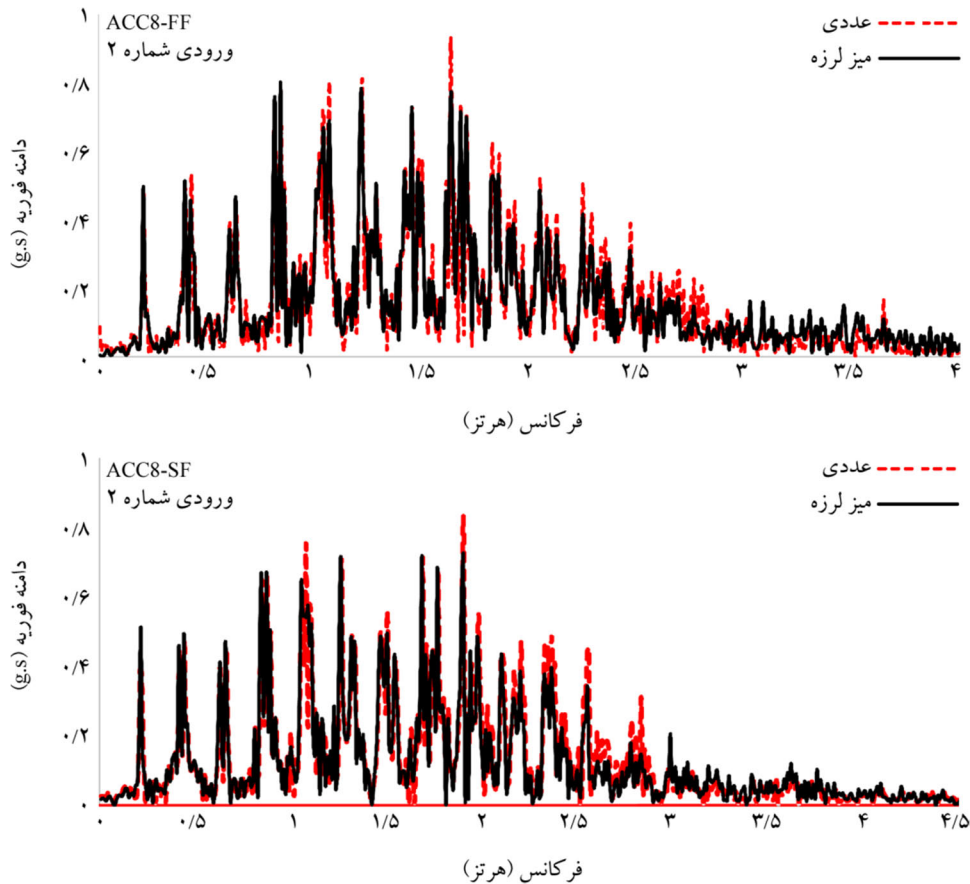
پیش‌بینی مدل عددی از شتاب سطح زمین (ACC8) در مدل‌های SF و FF در مقیاس نمونه اصلی در برابر تحریک شماره 2 در شکل (14) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، مدل عددی در مقیاس نمونه اصلی به خوبی شتاب‌های مدل آزمایشگاهی در مقیاس نمونه اصلی را پیش‌بینی کرده است. دلیل این مسأله، اعتبار روابط مقیاسی میز لرزه برای مدل‌های با رفتار خاک در محدوده کرنش‌های کم تا متوسط می‌باشد که برای مدل‌های مطالعه حاضر صدق می‌کند. مدل عددی توسعه یافته در مقیاس نمونه اصلی برای سایر تحریک‌های ورودی نیز پیش‌بینی‌های قابل قبولی همانند آنچه که برای ورودی شماره 2 مشاهده گردید، داشت. در ادامه به کمک مدل عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مطالعات پارامتری در خصوص اثر تونل مترو شهر تهران بر شتاب سطح زمین انجام شده است.

5- الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین بر اثر تونل مترو در شهر تهران

تأثیر یک تونل زیرزمینی بر شتاب سطح زمین در فواصل مختلف از مرکز تونل به صورت الگوی بزرگنمایی قابل بیان است. بزرگنمایی به صورت تقسیم PGA در نقطه‌ای در بالای تونل به PGA در مدل Free Field برای X/a مشخصی تعریف می‌شود.



شکل (13): مش بندی مدل SF به همراه ابعاد آن در مقیاس نمونه اصلی



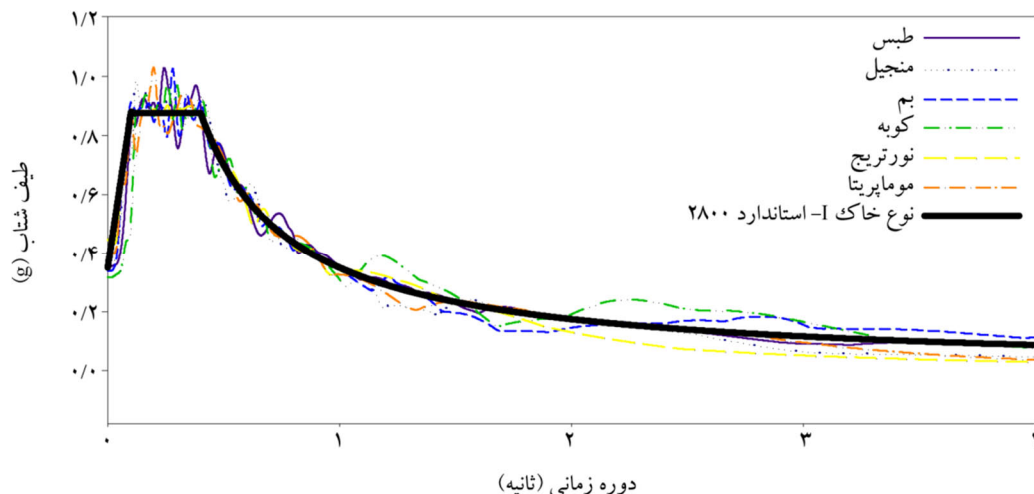
شکل (14): طیف فوریه شتاب سطح زمین در مدل های FF و SF در مقیاس نمونه اصلی برای موج ورودی شماره 2

2800 به عنوان طیف طرح ساختگاه انتخاب گردید. از این رو طیف پاسخ شتاب نگاشت های انتخابی، به طیف نوع 1 استاندارد 2800 منطبق گردیدند. شکل (15) طیف پاسخ شتاب زلزله های انتخاب شده در مطالعه پارامتری پس از منطبق شدن با طیف استاندارد 2800 برای زمین نوع 1 را نشان می دهد. رکوردهای زلزله از ایستگاه های لرزه نگاری که دارای مشخصات لرزه ای نزدیک به مشخصات لرزه ای خاک نوع 1 آیین نامه باشند، انتخاب شده اند. جدول (6) مشخصات زلزله های انتخابی را نشان می دهد. از 3 زلزله معروف ایران به همراه 3 زلزله معروف دنیا در تحلیل ها استفاده شده است. در شکل (16) الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین برای 6 زلزله انتخابی برای خاکی با سرعت موج برشی 375 متر بر ثانیه و برای نسبت عمق 1/5 تونل ارائه شده است. در این شکل، پوش بزرگنمایی زلزله های انتخابی به عنوان حداکثر بزرگنمایی در نظر گرفته شده است.

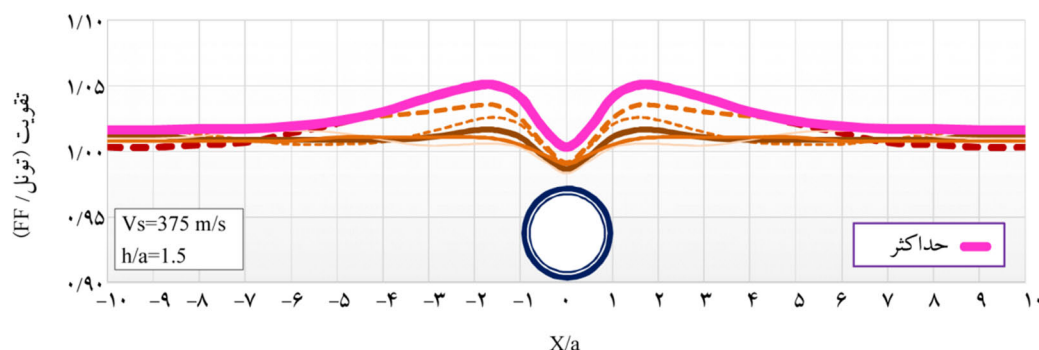
به منظور بررسی تأثیر تونل های مترو بر بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در اثر زلزله های واقعی، طیف زلزله های انتخابی به طیف خاک نوع 1 استاندارد 2800 برای مناطق با لرزه خیزی بالا (شهر تهران) منطبق شده و دامنه آنها به $PGA=0.35g$ (شتاب حداکثر بر روی سنگ در شهر تهران) مقیاس گردیده و در تحلیل ها استفاده شده است. تونلی با قطر 8 متر و ضخامت 35 سانتی متر به عنوان تونل مترو در این مطالعه در نظر گرفته شده است. طبق استاندارد 2800 [29] و پروفیل سرعت موج برشی متوسط تا عمق 30 متری برای شهر تهران، پنج تپ خاک با سرعت موج مختلف (375، 250، 175، 500 و 750 متر بر ثانیه) و تونلی با قطر 8 متر و به ضخامت 35 سانتی متر در سه نسبت عمق 1/5، 2 و 3 برای شهر تهران در تحلیل های عددی فرض شده است.

5-1- انطباق شتاب نگاشت ها با طیف سنگ بستر لرزه ای

طیف پاسخ شتاب ارائه شده برای خاک های نوع 1 استاندارد



شکل (15): طیف پاسخ شتاب زلزله‌های انتخاب شده در مطالعه پارامتری سازگار شده با طیف استاندارد 2800 برای زمین نوع 1



شکل (16): الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در اثر زلزله‌های انتخابی به همراه پوش بزرگنمایی‌ها

جدول (6): مشخصات زلزله‌های انتخابی جهت مطالعه پارامتری

نام زلزله	سال وقوع	نام ایستگاه	فاصله از گسل مسبب (کیلومتر)	سرعت موج برشی متوسط خاک V_{s30} (m/s)
طبس	1978	طبس	1/8	767
منجیل	1990	آب بر	13	724
بم	2003	یافت	170	505
کوبه	1995	Kobe University	1	1043
نورتریج	1994	LA - Griffith Park Observatory	18/5	1016
لوماپریتا	1989	Gilroy Array #1	9	1428

در محدوده $10 < X/a < 10$ - مشهود است.

- در همه نسبت عمق‌ها، بیشترین بزرگنمایی‌ها در خاکی با کم‌ترین سرعت موج برشی (175 متر بر ثانیه) اتفاق افتاده است و با زیادتر شدن سرعت موج برشی، مقدار بزرگنمایی حداکثر کاهش یافته است. همان‌طور که دیده می‌شود حداکثر بزرگنمایی حاصله برای تونل مترو برای زلزله‌ای با

2-5- الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین

پوش بزرگنمایی در سطح برای خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف و نسبت عمق‌های مختلف تونل (1/5، 2 و 3) به‌دست آمده و در شکل‌های (17) تا (19) ترسیم شده است.

نتایج زیر بر اساس این شکل‌ها قابل‌دستیابی است:

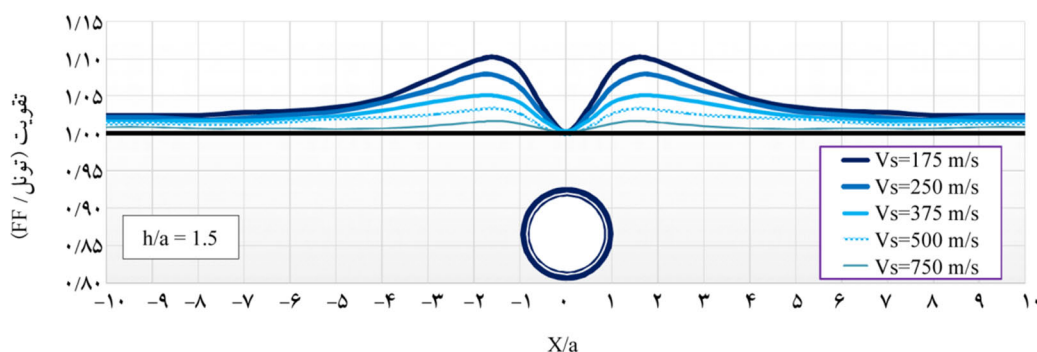
- تأثیر حضور تونل بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین

- محل حداکثر بزرگنمایی با افزایش عمق تونل از مرکز تونل فاصله گرفته به طوری که برای نسبت عمق‌های $1/5$ ، 2 و 3 تونل، محل حداکثر بزرگنمایی در X/a برابر با $1/5$ ، 2 و 3 واقع شده است.

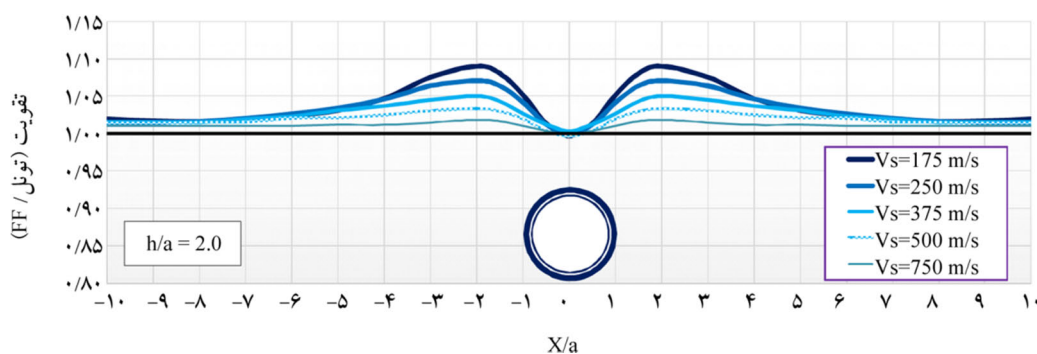
حداکثر بزرگنمایی حاصله برای نسبت عمق‌های مختلف تونل و برای سرعت‌های موج مختلف خاک در محل حداکثر بزرگنمایی در شکل (20) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان بزرگنمایی PGA در سطح برای خاک‌های تپ 1 و 2 برای نسبت عمق‌های مختلف یکسان و به کمتر از 5% رسیده است.

حداکثر $PGA=0.35g$ ، درصد برای خاکی با سرعت موج برشی 175 متر بر ثانیه می‌باشد. برای خاک‌های با سرعت موج برشی بالاتر مقدار حداکثر بزرگنمایی کاهش یافته و اثر تونل بر بزرگنمایی PGA در خاک‌های تپ 1 و 2 استاندارد 2800 عملاً به کم‌تر از 5% رسیده است.

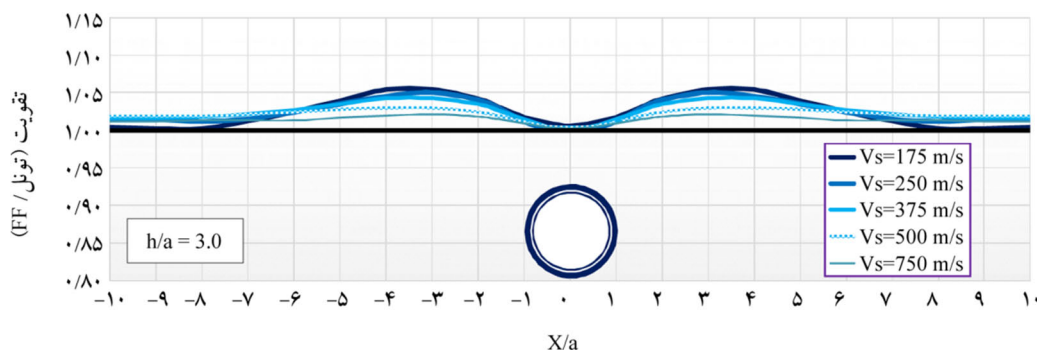
- میزان حداکثر بزرگنمایی با زیاد شدن عمق تونل کاهش یافته است. حداکثر بزرگنمایی به دست آمده برای نسبت عمق‌های $1/5$ ، 2 و 3 به ترتیب برابر با 10 ، 8 و 5 درصد برای خاکی با سرعت موج 175 متر بر ثانیه بوده است.



شکل (17): پوش الگوی بزرگنمایی در سطح برای خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف و با نسبت عمق تونل برابر با $1/5$



شکل (18): پوش الگوی بزرگنمایی در سطح برای خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف و با نسبت عمق تونل برابر با 2

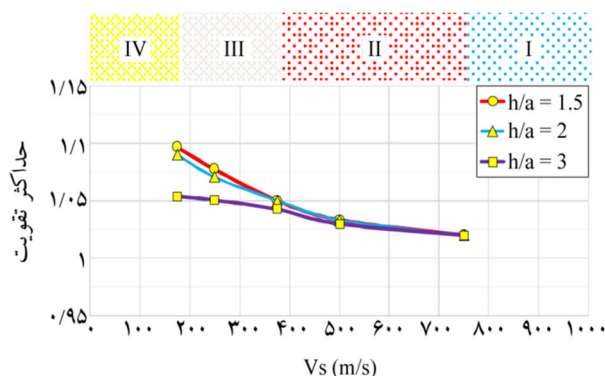


شکل (19): پوش الگوی بزرگنمایی در سطح برای خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف و با نسبت عمق تونل برابر با 3

شده است. در شکل (21) طیف پاسخ شتاب برای مدل FF و مدل با تونل در عمق‌های مختلف برای خاکی با سرعت موج برشی 375 متر بر ثانیه ارائه شده است. محدوده تحت تأثیر تونل بر روی طیف مشخص شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، تونل محدوده پریودی 0/06 تا 0/3 ثانیه را در چنین خاکی تحت تأثیر قرار می‌دهد. پریودهای بالاتر از 0/3 ثانیه (فرکانس کم‌تر از 3/3 هرتز) تحت تأثیر حضور تونل قرار نمی‌گیرند. در آزمایش‌های میز لرزه که در خاکی با سرعت موج برشی 352 متر بر ثانیه (در مقیاس نمونه اصلی) انجام شد و تحت تحریک‌های تا 3/5 هرتز در مقیاس واقعی قرار داشت، حضور تونل تأثیری بر نتایج شتاب ثبت شده نداشت که با نتیجه به دست آمده در شکل (21) سازگار است. محدوده تحت تأثیر تونل منطبق با پریود بی بعد (λ/D) بین 3 تا 10 می‌باشد.

نتایج تحلیل‌های انجام شده در خاک‌های با سرعت موج مختلف در قالب محدوده پریودی تحت تأثیر تونل به همراه بزرگنمایی طیفی برای نسبت عمق‌های مختلف تونل در جدول (7) ارائه شده است. همچنین پریودی که حداکثر بزرگنمایی طیفی در آن رخ داده است در جدول نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پریودهای تحت تأثیر تونل با افزایش سرعت موج برشی خاک کاهش می‌یابد. برای مثال، تونل واقع در خاکی با سرعت موج برشی 175 متر بر ثانیه سازه‌های با محدوده پریودی

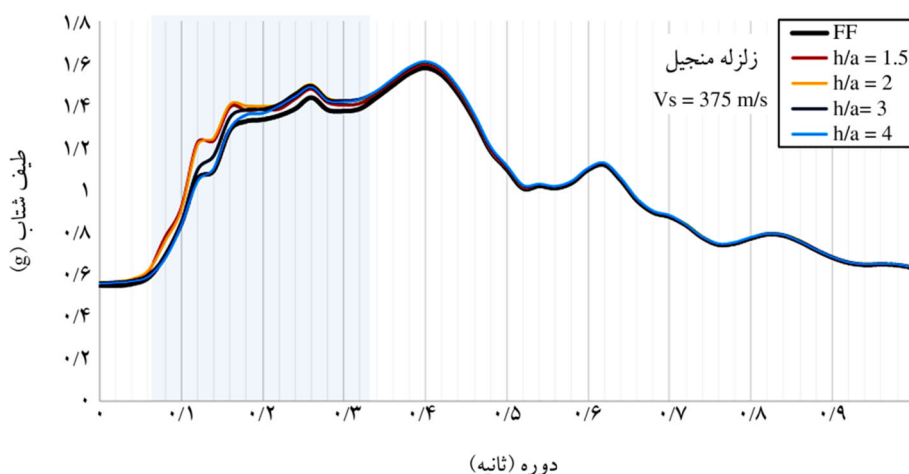
برای خاک‌های تیپ 3 و 4 برای نسبت عمق 3، میزان بزرگنمایی کمتر از 5% می‌باشد ولی برای نسبت عمق‌های سطحی‌تر 1/5 و 2 به حداکثر 10% در خاک نوع 4 می‌رسد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت تأثیر تونل بر شتاب سطح زمین حداکثر برابر 10 درصد می‌باشد که عملاً افزایش کمی محسوب می‌گردد.



شکل (20): حداکثر بزرگنمایی حاصله برای نسبت عمق‌های مختلف تونل و برای سرعت‌های موج مختلف خاک در محل حداکثر بزرگنمایی

3-5- تأثیر تونل مترو بر طیف پاسخ

برای سازه‌های روی سطح زمین، PGA پارامتر تعیین‌کننده‌ای نیست و معمولاً طیف پاسخ شتاب و پریود طبیعی سازه، مبنای تأثیرپذیری لرزه‌ای سازه از تونل نزدیک آن خواهد بود. از این رو در ادامه به بررسی اثر تونل مترو بر طیف پاسخ شتاب در سطح زمین در محل حداکثر بزرگنمایی برای زلزله منجیل - ایستگاه آب بر، سازگار شده با خاک نوع 1 آیین‌نامه، پرداخته



شکل (21): طیف پاسخ شتاب در برابر پریود برای خاکی با سرعت موج 375 متر بر ثانیه در برابر زلزله منجیل برای مدل‌های با و بدون تونل

نتایج ارائه شده در جدول (7) به طور ترسیمی در شکل های (22) و (23) ارائه شده است. همان طور که از شکل (22) مشخص است، بزرگنمایی طیفی با افزایش سرعت موج محیط کاهش یافته است. حداکثر بزرگنمایی طیفی مربوط به خاکی با سرعت موج برشی 250 متر بر ثانیه و برابر با 22% می باشد. با افزایش عمق، حداکثر بزرگنمایی طیفی کاهش یافته است. پریود منطبق بر حداکثر بزرگنمایی طیفی (پریود مشخصه) در شکل (23) ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود، با افزایش سرعت موج برشی، حداکثر بزرگنمایی در پریودهای پایین تر (فرکانس های بالاتری) اتفاق می افتد. با افزایش عمق تونل، پریود منطبق بر حداکثر بزرگنمایی طیفی افزایش یافته است که به معنی افزایش پریود مشخصه بی بعد با افزایش عمق می باشد [18]. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حضور تونل مترو در خاک های مختلف، محدوده فرکانسی متفاوتی از سازه ها را تحت تأثیر قرار می دهد. از بررسی محدوده پریودی تحت تأثیر تونل چنین نتیجه گیری می شود که تونل مترو سازه هایی با فرکانس $2/5$ هر تر به بالا (معادل سازه های با پریود کوتاه تر از $0/4$ ثانیه) را در حین زلزله تحت تأثیر قرار می دهد. طبق توصیه استاندارد 2800 روابط (3) و (4) جهت تعیین پریود طبیعی ساختمان های معمول به کار می رود [29]:

$0/15$ تا $0/4$ ثانیه را تحت تأثیر قرار می دهد، در حالی که تونل واقع در خاک با سرعت موج برشی 750 متر بر ثانیه محدوده پریودی $0/06$ تا $0/18$ ثانیه را تحت تأثیر قرار می دهد. این نتیجه گیری توسط مطالعه تحلیلی که توسط اسمرزینی و همکاران [8] برای تونل های با قطر 6 تا 8 متر انجام شده بود نیز دیده شد. آنها نتیجه گرفتند که وجود سازه های زیرزمینی (قطر 6 تا 8 متر) در پریودهای کم طیف پاسخ شتاب (به طور خاص از $0/05$ تا $0/2$ ثانیه) تأثیر قابل ملاحظه ای (با بزرگنمایی حداکثر برابر با $1/5$) بر پاسخ لرزه ای سطح زمین دارند.

در جدول (7) محدوده پریود بی بعد (λ/D) تحت تأثیر تونل نیز آمده است. به طور کلی سازه های زیرزمینی موجب بزرگنمایی پاسخ شتاب در سطح زمین در محدوده پریود بی بعد بین 3 تا 10 $(3 < \lambda/D < 10)$ مستقل از سرعت موج برشی می گردند. ترکیب دو پارامتر سرعت موج برشی محیط و اندازه سازه زیرزمینی، محدوده پریودی تحت تأثیر تونل در سطح زمین را مشخص می نمایند. علی الهی و همکاران [18] در خصوص تأثیر حفرات زیرزمینی بر سطح زمین به این نتیجه رسیدند که برای امواج مهاجم با طول موج 2 تا 8 برابر قطر تونل های سطحی، ضریب بزرگنمایی در سطح زمین اغلب بزرگ تر از 1 می باشد.

جدول (7): محدوده پریودی تحت تأثیر تونل و بزرگنمایی طیفی حداکثر برای خاک های با سرعت های موج برشی مختلف

حداکثر تقویت طیف (SA)				λ/D	پریود تحت تأثیر تونل (ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
h/a						
4	3	2	1/5	AS	10-3	175
1/01	1/04	1/11	1/16	Period (sec)		
0/3	0/3	0/22	0/2	AS	10-3	250
1/03	1/07	1/16	1/22	Period (sec)		
0/28	0/2	0/16	0/16	AS	10-3	375
1/04	1/06	1/16	1/16	Period (sec)		
0/24	0/14	0/12	0/12	AS	10-3	500
1/04	1/06	1/13	1/13	Period (sec)		
0/18	0/14	0/08	0/08	AS	10-3	750
1/06	1/08	1/11	1/11	Period (sec)		
0/12	0/08	0/08	0/08	AS	10-3	

6- نتیجه‌گیری

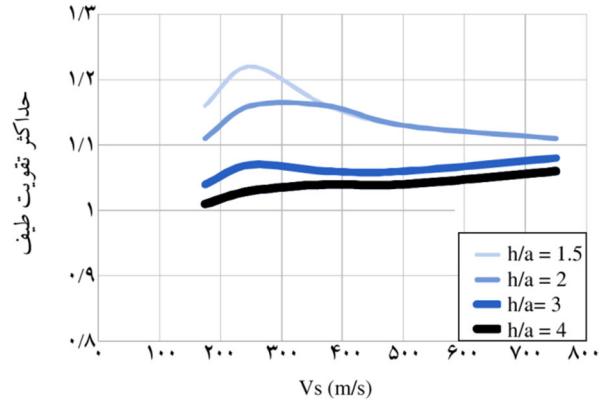
در مقاله حاضر، با انجام آزمایش‌های میز لرزه 1g و روش عددی اعتبارسنجی شده با نتایج آزمایش‌ها، به بررسی اثرات حضور تونل زیرزمینی مترو شهر تهران بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخته شد. بر اساس آزمایش‌های میز لرزه مشاهده گردید که تونل مترو به قطر 8 متر درون خاکی با سرعت 352 متر بر ثانیه تأثیری بر فرکانس‌های تا 3/5 هرتز ندارد. در ادامه با توسعه یک مدل عددی در نرم‌افزار FLAC، نتایج مدل‌های آزمایشگاهی با دقت بالایی در مقیاس مدل و نمونه اصلی پیش‌بینی گردید. به کمک مدل عددی توسعه داده شده، مطالعه پارامتری به منظور بررسی تأثیر تونل مترو بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در مجاورت تونل نسبت به سطح آزاد زمین و همچنین اثر آن بر طیف پاسخ شتاب سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای عمق تونل و سرعت موج برشی محیط بر میزان بزرگنمایی‌ها بررسی گردید که عمده نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشد:

- تأثیر حضور تونل بر الگوی بزرگنمایی شتاب در سطح زمین در محدوده $10 < X/a < 10$ - مشهود است.

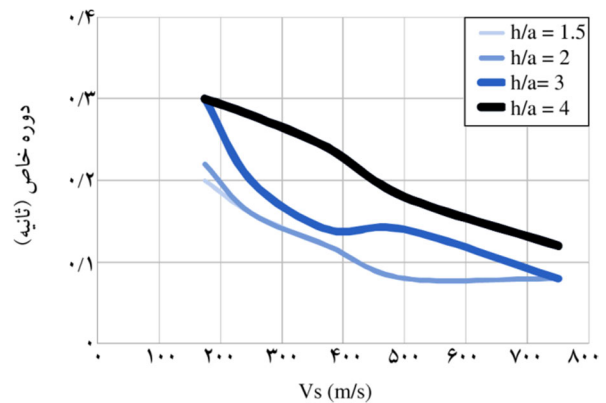
- حداکثر بزرگنمایی حاصله برای تونل مترو برای زلزله‌ای با $PGA=0.35g$ حداکثر 10 درصد برای خاکی با سرعت موج برشی 175 متر بر ثانیه می‌باشد. برای خاک‌های با سرعت موج برشی بالاتر مقدار حداکثر بزرگنمایی کاهش یافته و اثر تونل بر بزرگنمایی PGA در خاک‌های تیپ 1 و 2 استاندارد 2800 عملاً به کم‌تر از 5% می‌رسد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت تأثیر تونل بر شتاب سطح زمین حداکثر برابر 10 درصد می‌باشد که عملاً تأثیر اندکی محسوب می‌گردد.

- میزان حداکثر بزرگنمایی با زیاد شدن عمق تونل کاهش می‌یابد. حداکثر بزرگنمایی به دست آمده برای نسبت عمق‌های 1/5، 2 و 3 به ترتیب برابر با 10، 8 و 5 درصد برای خاکی با سرعت موج 175 متر بر ثانیه بوده است.

- محل حداکثر بزرگنمایی با افزایش عمق تونل از مرکز تونل فاصله گرفته به طوری که برای نسبت عمق‌های 1/5، 2 و 3، محل



شکل (22): حداکثر بزرگنمایی طیفی برای تونلی در اعماق مختلف در خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف



شکل (23): پریود منطبق بر حداکثر بزرگنمایی طیفی برای تونلی در اعماق مختلف در خاک‌های با سرعت موج برشی مختلف

$$T = 0.08H^{0.75} \quad \text{در قاب‌های فولادی} \quad (3)$$

$$T = 0.07H^{0.75} \quad \text{در قاب‌های بتن مسلح} \quad (4)$$

که در آن H ارتفاع ساختمان و T پریود طبیعی ساختمان است. طبق این روابط، تونل مترو باعث بزرگنمایی شتاب طیفی ساختمان‌های قاب خمشی بتنی و فولادی با ارتفاع کمتر از 10 متر (یا به عبارتی ساختمان‌های تا حداکثر سه طبقه) خواهد گردید. البته سازه‌های مذکور باید در محدوده تحت تأثیر حضور تونل واقع شده باشند یعنی در فاصله حداکثر 40 متر از طرفین تونل. ذکر این نکته ضروری است که پریودهای مرتبط با مدهای بالاتر سازه‌های بلند نیز می‌تواند تحت تأثیر تونل در نزدیکی آنها قرار گیرد. لذا می‌بایست این اثر در سازه‌های بلند با پریودهای مودهای بالاتر که نزدیک به پریود تحت تأثیر حضور تونل هستند نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

می‌بایست این اثر در سازه‌های بلند با پیوندهای مودهای بالاتر که نزدیک به پیوند تحت تأثیر حضور تونل هستند نیز مورد بررسی قرار گیرد.

لازم به ذکر است نتایج تحقیق حاضر به موارد زیر محدود می‌گردد:

- رفتار خاک در آزمایش‌های میز لرزه در محدوده کرنش‌های کوچک بوده و اثر تونل بر شتاب سطح زمین در این محدوده از کرنش‌ها و در محدوده رفتار خطی (ویسکو الاستیک) خاک مطالعه شده است.

- فرکانس ورودی میز لرزه در آزمایش‌ها در حالت امواج هارمونیک به حداکثر 20 هرتز محدود بود. از آنجا که فرکانس طبیعی مدل در نزدیکی 37 هرتز قرار داشت، نتایج حاصله در آزمایش‌ها در محدوده فرکانس‌های بالا از اعتبار بالایی برخوردار نیست. پیشنهاد می‌شود در ادامه تحقیق حاضر، به کمک امکانات آزمایشگاهی پیشرفته‌تر و یا استفاده از آزمایش ساترفیوژ دینامیکی، نتایج حاصله به کمک مدل عددی در تحقیق حاضر به‌ویژه در فرکانس‌های تحت تأثیر تونل مورد بررسی مجدد قرار گیرد.

- در پایان باید عنوان داشت که تعمیم نتایج تحقیق حاضر به شهر تهران صرفاً به دلیل مدل‌سازی هندسه مترو تهران در آزمایش‌ها بوده است و شرایط ژئوتکنیکی این شهر و همچنین وجود عوارض سه‌بعدی زمین در این مطالعه دیده نشده است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت شهرداری تهران (مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران) انجام پذیرفته است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از این مرکز بابت حمایت‌های صورت گرفته اعلام دارند.

مراجع

1. Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (1979) Response of tunnels to incident SH-waves. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **105**(4), 643-59.

حداکثر بزرگنمایی در X/a برابر با $1/5$ ، 2 و 3 واقع می‌شود.

- حضور تونل مترو در خاک‌های مختلف، محدوده فرکانسی متفاوتی از سازه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ترکیب دو پارامتر سرعت موج برشی محیط و اندازه سازه زیرزمینی محدوده پیرویی تحت تأثیر تونل در سطح زمین را مشخص می‌نماید. پیوندهای تحت تأثیر تونل با افزایش سرعت موج برشی خاک کاهش می‌یابد. برای مثال، تونل واقع در خاکی با سرعت موج برشی 175 متر بر ثانیه سازه‌های با محدوده پیرویی $0/15$ تا $0/4$ ثانیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی که تونل واقع در خاک با سرعت موج برشی 750 متر بر ثانیه محدوده پیرویی $0/06$ تا $0/18$ ثانیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی سازه‌های زیرزمینی موجب بزرگنمایی پاسخ شتاب در سطح زمین در محدوده پیرویی بعد بین 3 تا $10 (3 < \lambda/D < 10)$ می‌گردند.

- بزرگنمایی طیفی با افزایش سرعت موج محیط کاهش یافته و با افزایش عمق، حداکثر بزرگنمایی طیفی کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت موج برشی، حداکثر بزرگنمایی در پیوندهای پایین‌تر (فرکانس‌های بالاتری) اتفاق می‌افتد. با افزایش عمق تونل، پیوند منطبق بر حداکثر بزرگنمایی طیفی افزایش می‌یابد که به‌منزله‌ی افزایش پیوند مشخصه بی‌بعد با افزایش عمق می‌باشد.

در پایان چنین نتیجه شد که سازه‌های با محدوده پیرویی بالاتر از $0/4$ ثانیه (معادل فرکانس $2/5$ هرتز) تحت تأثیر حضور تونل مترو قرار نمی‌گیرند. لذا بر اساس توصیه‌ی استاندارد 2800 در خصوص پیوند طبیعی ساختمان‌ها، تونل مترو باعث بزرگنمایی شتاب طیفی ساختمان‌های قاب خمشی بتنی و فولادی با ارتفاع کمتر از 10 متر (یا به عبارتی تا حداکثر سه‌طبقه) خواهد شد و تأثیری بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلندتر نخواهد داشت. البته سازه‌های مذکور باید در محدوده تحت تأثیر حضور تونل واقع شده باشند یعنی در فاصله حداکثر 40 متر از طرفین تونل در سطح زمین. ذکر این نکته ضروری است که پیوندهای مرتبط با مدهای بالاتر سازه‌های بلند نیز می‌تواند تحت تأثیر تونل در نزدیکی آنها قرار گیرد. لذا

- Diffraction of obliquely incident waves by a cylindrical cavity embedded in a layered viscoelastic half-space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **12**(3), 159-71.
13. Luco, J.E. and De Barros, F.C.P. (1994) Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half space. *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, **23**, 321-40.
 14. Rodriguez-Castellanos, A., Sanchez-Sesma, F.J., Luzon, F., and Martin, R. (2006) Multiple scattering of elastic waves by subsurface fractures and cavities. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(4A), 1359-1374.
 15. Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., and Sofianos, A. (2007) Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures. *Dynamic Response and Soil Properties*, Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics.
 16. Yu, CW. and Dravinski, M. (2009) Scattering of a plane harmonic SH wave by a completely embedded corrugated scatterer. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **78**(2), 196-214.
 17. Sica, S., Russo, A.D., Rotili, F., and Simonelli, A.L. (2015) Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils. *Natural Hazards*, **71**(3), 1913-1935.
 18. Alielahi, H., Kamalian, M., and Adampira, M. (2015) Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, 63-79.
 19. Sgarlato, G., Lombardo, G., and Rigano, R. (2011) Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy. *Engineering Geology*, **122**, 281-291.
 20. Abuhajar, O., El Naggar, H., and Newson, T. (2011) Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, Toronto, Ontario, Canada.
 2. Dravinski, M. (1983) Ground motion amplification due to elastic inclusions in a half space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(3), 313-335.
 3. Lee, V.W. and Karl, J. (1993) Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **11**(8), 445-56.
 4. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. (1996) Diffraction of SH-waves by sub-surface inclusions of arbitrary shape. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **122**(2), 123-129.
 5. Lee, V.W., Chen, S., and Hsu, I. (1999) Antiplane diffraction from canyon above a subsurface unlined tunnel. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, **125**(6), 668-675.
 6. Lee, V.W., Manoogian, M.E., and Chen, S. (2002) Antiplane SH-deformations near a surface rigid foundation above a subsurface rigid circular tunnel. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1**(1), 27-35.
 7. Liang, J., Luo, H. and Lee, V.W. (2004) A series solution for surface motion amplification due to underground group cavities: incident P waves. *Acta Seismologica Sinica*, **17**(3), 296-307.
 8. Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R., and Sanchez-Sesma, F.J. (2009) Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**(12), 1441-1460.
 9. Liang, J., Luo, H., and Vincent, W.L. (2010) Diffraction of plane SH waves by a semi-circular cavity in half-space. *Earthquake Science*, **23**(1), 5-12.
 10. Tsaur, D. and Chang, K. (2012) Multiple scattering of SH waves by an embedded truncated circular cavity. *Journal of Marine Science and Technology*, **20**(1), 73-81.
 11. Crichlow, J.M. (1982) The effect of underground structure on seismic motions of the ground surface. *Geophysical Journal International*, **70**(3), 563-75.
 12. De Barros, F.C.P. and Luco, J.E. (1993)

21. 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.
22. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D.S., and Choo, Y.W. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Tunnelling and Under-ground Space Technology*; **44**, 10-22.
23. رابطی مقدم، مسعود (1394) مطالعه اثر سازه زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین به کمک مدل‌سازی فیزیکی و عددی. رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
24. Iai, S. (1989) Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, **29**(1), 105-118.
25. Wang, J.N. (1993) *Seismic Design of Tunnels: A Simple State of the Art Design Approach*. Parsons Brinckerhoff Inc., New York.
26. Eghbali, A.H. and Fakharian, K. (2014) Effect of principal stress rotation in cement-treated sands using triaxial and simple shear tests. *International Journal of Civil Engineering*, **12**(1), Transaction B: Geotechnical Engineering.
27. جعفری، محمد کاظم، رزمخواه، آرش و کشاورز بخشایش، محمد (1382) پهنه‌بندی سرعت موج برشی آبرفت‌های تهران. نشریه دانشکده فنی، جلد (2) 37، 213-225.
28. Itasca Consulting Group. (2014) *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua; Ver. 7.0 User's Guide*. Minneapolis, Itasca.
29. استاندارد 2800 (1393) آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. مرکز تحقیقات راه، مسکن و ساختمان، ویرایش چهارم.