

اثر سازه زیرزمینی بر حداکثر شتاب سطح زمین در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک

محمدحسن بازیار^۱، مسعود رابطی مقدم^{۱*}، دانگ-سو کیم^۲ و یون ووک چو^۲

۱. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشگاه کایست، کره جنوبی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۰۹/۰۱)

چکیده - در مقاله حاضر بعد از صحت سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ انجام گرفته بر روی یک تونل مترو، اثر سازه زیرزمینی بر حداکثر شتاب سطح زمین در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در محدوده فرکانس طبیعی سیستم، مدل غیرخطی، کوچک نمایی PGA در اثر حضور سازه نسبت به میدان آزاد را نشان می‌دهد؛ در حالی که در مدل خطی عکس این روند مشاهده می‌شود. در محدوده فرکانس‌های خارج از فرکانس‌های طبیعی سیستم، ضریب بزرگ‌نمایی در مدل خطی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر بوده و هر دو مدل در فرکانس‌های پایین، بزرگ‌نمایی و در فرکانس‌های بالا، کوچک‌نمایی PGA نسبت به میدان آزاد را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: سازه زیرزمینی، میدان آزاد، حداکثر شتاب سطح زمین (PGA)، رفتار خطی و غیرخطی خاک، مطالعه پارامتری، نرم افزار FLAC 2D.

Effect of Underground Structure on PGA at Ground Surface Considering Linear and Nonlinear Behavior for the Soil

M. Hassan Baziar¹, M. Rabeti Moghadam^{1*}, D. S. Kim² and Y. W. Choo²

1. School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Korean Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon

Abstract: In this paper, a numerical model was first verified against dynamic centrifuge tests results performed on an underground subway tunnel and then, the effect of underground structure on peak ground acceleration (PGA) at the ground surface investigated considering linear and nonlinear behavior for the soil. The results show that in the range of natural frequency of the system, nonlinear model shows deamplification of PGA with respected to the freefield. Whereas, linear model shows opposite trend. Out of the range of natural frequency of the system, linear and nonlinear models predict same results and

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rabeti@iust.ac.ir

for both model, underground tunnel resulted in amplification of low frequencies and deamplification of high frequencies with respected to the freefield.

Keywords: Underground structure, freefield, Peak Ground Acceleration (PGA), linear and nonlinear behavior of soil, parametric study, FLAC 2D software.

فهرست علائم

معرف آزمایش میدان آزاد	FF	معرف آزمایش با سازه زیرزمینی	SF
شتاب گرانش (9.8m/s^2)	g	سرعت موج برشی محیط (m/s)	V_s
مدول برشی (Pa)	G	طول المان در مدل عددی (m)	Δl
مدول برشی حداکثر (Pa)	G_{max}	فرکانس ماکزیمم (Hz)	f_{max}
مدول بالک (Pa)	K	علائم یونانی	
سختی برشی (Pa/m)	K_s	کرنش برشی	γ
سختی نرمال (Pa/m)	K_n	کرنش برشی مرجع	γ_{ref}
حداکثر شتاب زمین	PGA	طول موج (m)	λ

۱- مقدمه

ازدیاد جمعیت کلان شهرها منجر به کاهش فضاهای موجود در سطح شهرها گشته و گسترش بیش از پیش فضاهای زیرزمینی نظیر تونل های مترو، تونل های تأسیساتی، انبارهای زیرزمینی، تونل های انتقال آب و فاضلاب شهری را به دنبال داشته است. امروزه این قبیل فضاها از زیرساخت های اساسی شهرنشینی مدرن محسوب می شوند. عملکرد این گونه سازه ها در زمان بهره برداری و در مواقع بحران مورد توجه مهندسین و محققین بسیاری بوده است. هر چند در اذهان طراحان و مهندسین این قبیل سازه ها از لحاظ عملکرد لرزه ای در دسته سازه های کم خطر در برابر زلزله تلقی می شدند، اما خسارات وارده به این قبیل سازه ها در حین زلزله ها (مانند خرابی ایستگاه مترو دایکی^۱ ژاپن در زلزله کوبه [۱]) باعث شده 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 سازه ها بر محیط پیرامون و عملکرد سازه های اطراف و بالعکس [۵]، موضوعی است که مورد توجه بسیاری از محققین بوده

است. این مسئله در شرایط استاتیکی در قالب بررسی نشست های سطح زمین ناشی از حفر فضاهای زیرزمینی مورد مطالعه و بررسی نسبتاً وسیعی قرار گرفته است [۶]. با وجود اثبات اثر حضور این قبیل سازه ها بر پاسخ لرزه ای سطح زمین، اثر اندرکنشی این قبیل سازه ها بر محیط مجاور و سازه های اطراف در حالت لرزه ای کمتر مورد توجه محققین و آیین نامه ها واقع شده است [۷]. غالب مطالعات صورت گرفته در این زمینه به صورت حل های تحلیلی یا مدل های عددی با فرضیات ساده شده ای مانند حل در محیط های الاستیک بوده است.

محققین مختلفی [۸-۱۴] با استفاده از روش های تحلیلی و عددی متعدد به بررسی اثر حضور حفرات زیرزمینی بر پاسخ لرزه ای سطح زمین ناشی از امواج مهاجم حجمی (برشی، فشاری) و سطحی (رایلی) پرداخته اند که همگی این روش ها اثر وجود این قبیل فضاها بر پاسخ لرزه ای سطح زمین را نشان داده اند. لیکن همگی این تحلیل ها با فرض رفتار الاستیک محیط (غالباً محیط سنگی) صورت گرفته است. از آنجا که فرض

رفتار الاستیک در مورد خاک غیرواقعی است؛ لذا نتایج حاصله توسط این روش‌ها در حالتی که رفتار خاک در محدوده غیرخطی باشد معتبر نخواهد بود.

در جامع‌ترین مطالعه عددی صورت گرفته در این زمینه، یوتامیترا و همکاران [۷] به منظور بررسی اثر سازه‌های زیرزمینی بر حرکت لرزه‌ای سطح زمین، مجموعه‌ای از تحلیل‌های عددی دینامیکی کرنش مسطح را انجام دادند که در آن یک تونل دایره‌ای در یک محیط نیم فضای ویسکوالاستیک تحت اثر موج هارمونیک S_v در نظر گرفته شده است. روش عددی این تحقیق براساس روش تفاضل محدود (با استفاده از نرم افزار FLAC) با هدف بررسی اثرات فرکانس تحریک، قطرتونل، عمق ساخت تونل و انعطاف پذیری نسبی پوشش تونل در مقایسه با خاک‌های اطراف تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بوده است. هرچند آنها در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر مسئله پرداختند؛ اما اعتبار نتایج حاصله در این مطالعه محدود به محیطی با رفتار ویسکوالاستیک خواهد بود.

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه بسیار اندک و محدود به یک مطالعه صورت گرفته توسط ابوهاجر و همکاران [۱۵] است. آنها با مدل‌سازی سانتریفیوژی آبروهای مربعی به بررسی اثر عواملی نظیر ضخامت آبرو، تراکم خاک، دامنه شتاب ورودی و اثر حضور روسازه بر شتاب ثبت شده در اطراف آبروها پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که وجود سازه مدفون مقادیر شتاب‌های حداکثر سطح زمین را کاهش می‌دهد. دلیل این امر عدم تبعیت حرکت سازه با حرکت خاک اطراف آن ذکر شده که باعث کاهش پاسخ زمین در بالای سازه زیرزمینی نسبت به منطقه میدان آزاد می‌شود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش مقدار شتاب حداکثر موج ورودی در پایین مدل، اثر کاهندگی وجود حفره بر امواج نمایان‌تر می‌گردد.

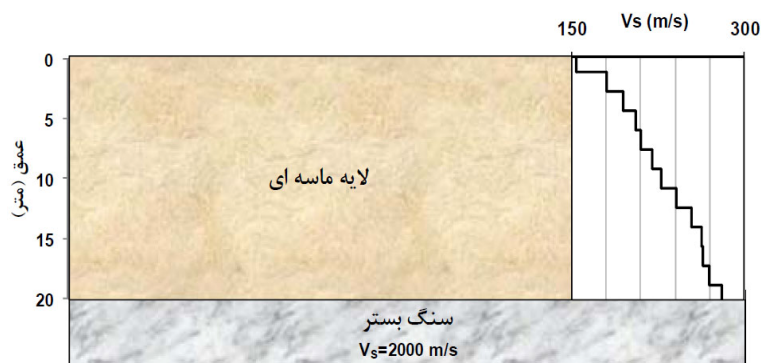
به دلیل وجود متغیرهای متعدد مؤثر بر مسئله از قبیل عمق، هندسه و ابعاد سازه زیرزمینی، مشخصات تحریک ورودی،

رفتار خطی و غیرخطی خاک و انعطاف پذیری پوشش سازه زیرزمینی تاکنون جمع‌بندی مشخصی در این زمینه در ادبیات فنی وجود ندارد. از طرفی، تاکنون تمام مطالعات تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه کاملاً به صورت مستقل به بررسی این موضوع پرداخته‌اند؛ که هر کدام محدودیت و نواقص مربوط به خود را دارند. بررسی این مسئله با در نظر گرفتن تمام ابعاد آن نیازمند مطالعات عددی و آزمایشگاهی وسیعی است که نتایج آنها مؤید یکدیگر بوده تا بتوان تأثیر عوامل مختلف مؤثر بر مسئله را مورد بررسی قرار داد.

از آنجا که اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه با فرض الاستیک بودن محیط انجام شده است؛ لذا در مقاله حاضر تأثیر رفتار غیرخطی خاک بر اثر سازه زیرزمینی بر شتاب ثبت شده در سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک مدل عددی به کمک نرم افزار FLAC 2D با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ صورت گرفته در دانشگاه کایست^۲ کره جنوبی که به منظور مطالعه لرزه‌ای رفتار تونل زیرزمینی مترو صورت گرفته است صحت سنجی شده است. سپس تأثیر حضور سازه زیرزمینی بر PGA سطح زمین در دو حالت فرض رفتار خطی و غیرخطی خاک در یک مطالعه پارامتری مورد بررسی و تحلیل واقع شده است.

۲- آزمایشات سانتریفیوژ

مجموعه‌ای از آزمایشات سانتریفیوژ دینامیکی در دانشگاه کایست کره جنوبی به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای تونل جعبه‌ای شکل مترو در شتاب سانتریفیوژی 40g انجام شده است. از تحریک ورودی با مقادیر حداکثر شتاب (PGA) های مختلف در آزمایش‌ها استفاده شده است. شکل (۱) شرایط ژئوتکنیکی در محل مسئله مورد مطالعه مدل شده در آزمایشات سانتریفیوژ را نشان می‌دهد که متشکل از یک لایه ۲۰ متری ماسه خشک است که روی سنگ بستر با سرعت موج برشی ۲۰۰۰ متر بر ثانیه واقع شده است. خاک مورد استفاده در آزمایش، خاک



شکل ۱- شرایط ژئوتکنیکی درمحل مسئله مورد مطالعه مدل شده در آزمایشات سانتریفیوژ

از طریق یک میز لرزه در حین چرخش سانتریفیوژ به مدل اعمال می‌شود. جزییات کامل این آزمایش توسط چو و همکاران [۱۶] گزارش شده است.

۱-۲- مشخصات دستگاه سانتریفیوژ کایست

سانتریفیوژ کایست با بازوی ۵ متر دارای ظرفیت ۲۴۰ g-ton است که شتاب حداکثر 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 پروتوتایپ^۳ را دارد. همچنین فرکانس اعمالی از طرف میز در محدوده ۴۰ الی ۳۰۰ هرتز در مقیاس مدل است. مشخصات کامل این دستگاه سانتریفیوژ توسط کیم و همکاران [۱۷] ارائه شده است. همچنین به منظور شبیه سازی مرز نیمه بی‌نهایت در اطراف محفظه مدل از یک جعبه^۴ ESB (تیر برشی معادل) استفاده شده است. عملکرد لرزه‌ای جعبه ESB مذکور توسط لی و همکاران [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲-الف) تصویری از دستگاه سانتریفیوژ کایست و شکل (۲-ب) جعبه ESB به کار رفته در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی کایست؛

ب) جعبه ESB

۲-۲- فهرست آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده

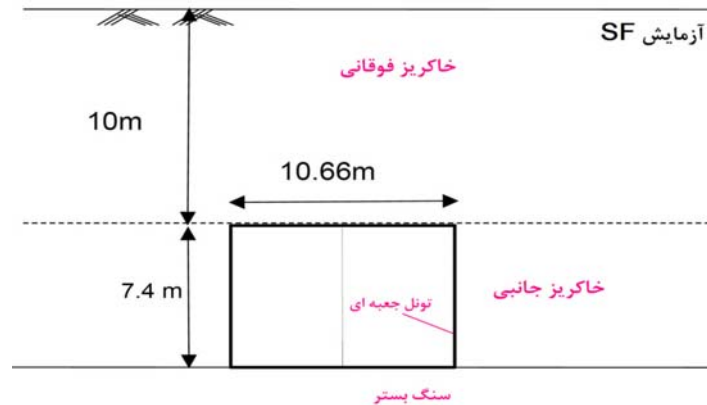
فهرست آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده به همراه مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش^۵ FF آزمایش میدان آزاد (بدون وجود تونل) و آزمایش^۶ SF آزمایش با تونل است. هندسه مدل شماره SF

ماسه‌ای خشک سیلیکاته است که پروفیل سرعت موج برشی آن در عمق در شکل (۱) نشان داده شده است. بارگذاری دینامیکی

جدول ۱- لیست آزمایشات سانتریفیوژ انجام شده

شناسه آزمایش	هدف آزمایش	شرایط خاک	
		ضخامت خاکریز جانبی (متر)	ضخامت خاکریز فوقانی (متر)
FF	پاسخ میدان آزاد	یک لایه ماسه به ضخامت ۱۷/۴ متر	تحریک ورودی زلزله های کوبه و نورتریج با PGA های مختلف
SF	پاسخ تونل جعبه ای شکل	۷/۴	۱۰



شکل ۳- آزمایش SF در مقیاس پروتوتایپ

جعبه ای شکل مترو سئول کره جنوبی انتخاب شده است. جعبه تونل در مقیاس پروتوتایپ به صورت تونل دو دهانه با مقطعی مستطیلی با عرض ۱۰/۶۶ و ارتفاع ۷/۴ متر بوده که طول آن ۱۹/۶ متر است. مابین دو دهانه ستون هایی به فواصل مختلف از یکدیگر واقع شده است. مقطع این تونل جعبه ای شکل در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. تونل پروتوتایپ از جنس بتن بوده که مدول الاستیسیته آن برابر ۲۴ گیگاپاسکال است. این تونل جعبه ای با در نظر گرفتن قوانین مقیاسی در مدل سانتریفیوژی با جعبه ای از جنس آلومینیوم مدل شده است. تصویری از تونل جعبه ای ساخته شده در مقیاس مدل از جنس آلومینیوم در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است.

۲-۵- ابزار گذاری مدل ها

از ابزار شتاب سنج میناتوری به منظور ثبت شتاب افقی در آزمایشات استفاده شده است. در مدل FF از ۵ شتاب سنج مطابق آنچه در شکل (۶-الف) آمده و در مدل SF از ۱۹

در مقیاس پروتوتایپ در شکل (۳) نشان داده شده است. مدل شامل تونل جعبه ای واقع بر سنگ بستر، خاکریزهای جانبی و فوقانی تونل است. در مقاله حاضر مدل سازی عددی این آزمایشات تشریح شده و نتایج تحلیل های عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ معرفی شده صحت سنجی گردیده است.

۲-۳- مشخصات مهندسی ماسه مورد استفاده

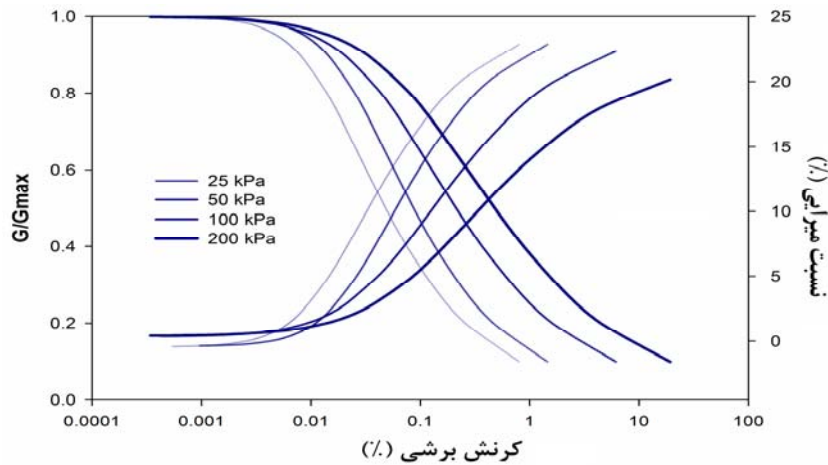
خاک ماسه ای در آزمایشات به صورت خشک مورد استفاده قرار گرفته که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است. مشخصات غیرخطی این ماسه (منحنی تغییرات G/G_{max} و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی) که از آزمایشات ستون تشدید در چهار فشار همه جانبه ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال به دست آمده در شکل (۴) نشان داده شده است.

۲-۴- مشخصات تونل زیرزمینی

سازه زیرزمینی مدل شده در آزمایشات از میان تونل های

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه مورد استفاده در آزمایش‌های سانتریفیوژ

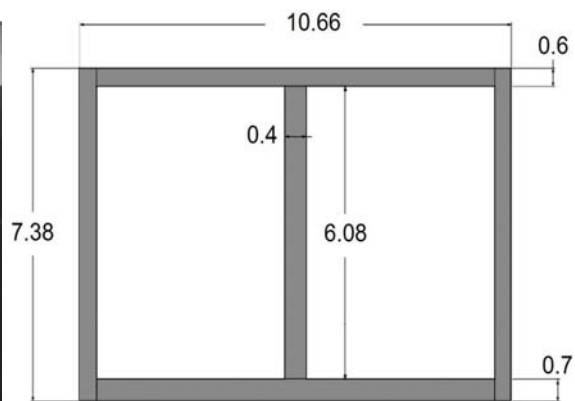
پارامتر	واحد	مقدار
نام ماسه برحسب طبقه بندی یونیفاید	-	SP
چگالی خشک حداکثر	Ton/m ³	1.645
چگالی خشک حداقل	Ton/m ³	1.244
چگالی ویژه	-	2.65
نشانه خمیری	-	NP
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	45
چسبندگی	kPa	°
وزن مخصوص	Ton/m ³	1.57
تراکم	%	84
نسبت پواسون	-	0.3



شکل ۴- تغییرات منحنی G/G_{max} و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی ماسه مورد آزمایش

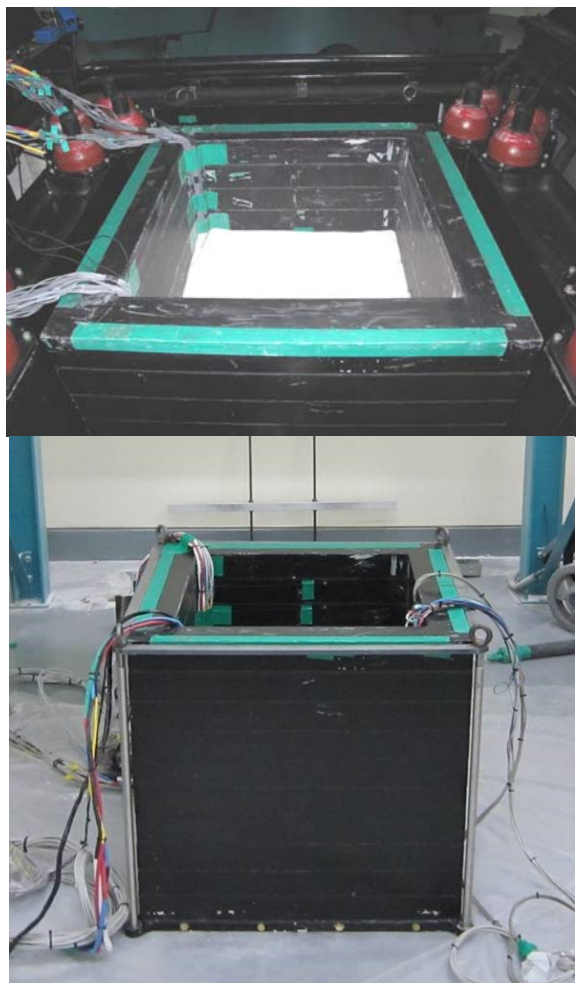


(ب)

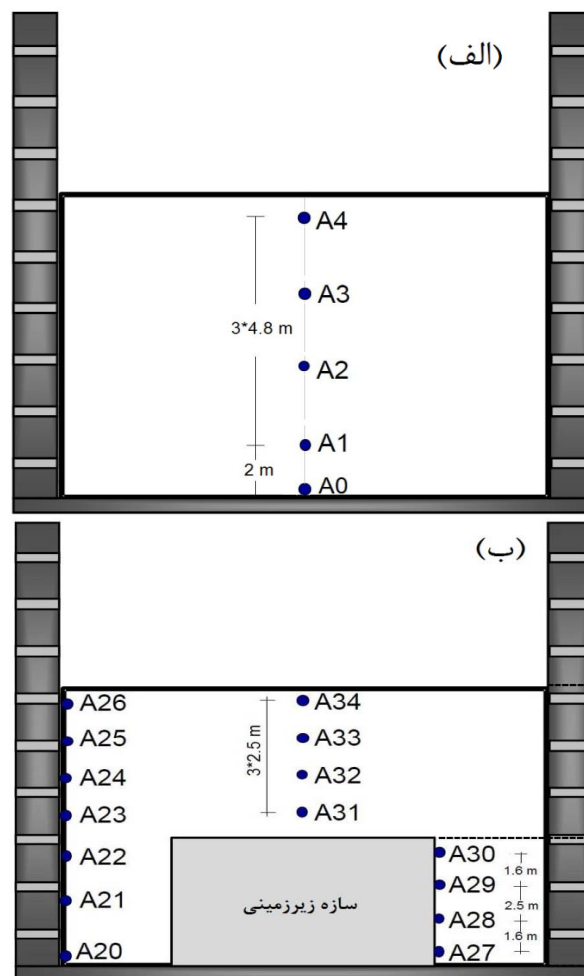


(الف)

شکل ۵- الف) مقطع تونل شبیه سازی شده در آزمایش‌ها در مقیاس پروتوتایپ (ابعاد برحسب متر) ب) تصویری از تونل در مقیاس مدل ساخته شده از جنس آلومینیوم



شکل ۷- تصاویری از ابزارگذاری مدل‌های سانتریفیوژی قبل از اعمال تحریک ورودی



شکل ۶- ابزارگذاری مدل‌های سانتریفیوژی
الف) مدل FF ب) مدل SF

شکل (۸) تاریخچه زمانی و طیف فوریه این دو زلزله را نشان می‌دهد.

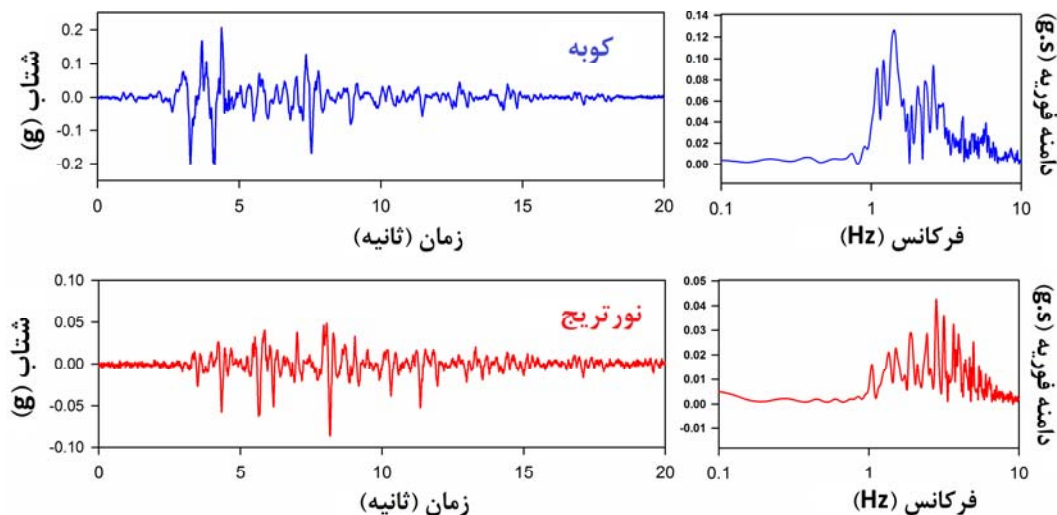
۳- مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها

مدل‌سازی عددی آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده با نرم افزار دوبعدی اختلاف محدود 2D FLAC انجام گرفته است. این نرم افزار توانایی انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه را دارد. آزمایش‌ها در مقیاس پروتوتایپ در نرم افزار مدل‌سازی گردیده است که جزئیات مدل‌سازی‌ها در ادامه آمده است.

شتاب‌سنج مطابق شکل (۶-ب) جهت ثبت شتاب در داخل خاک، روی سازه و روی جعبه به‌کار رفته است. شتاب‌سنج‌های A0 و A20 به‌عنوان شتاب‌های ورودی به‌ترتیب در مدل FF و SF در مدل‌سازی‌های عددی استفاده شده است. شکل (۷) تصاویری از مدل سانتریفیوژی ابزارگذاری شده قبل از اعمال تحریک ورودی را نشان می‌دهد.

۶-۲- تحریک‌های ورودی به مدل‌ها

از دو نوع موج ورودی (زلزله کوبه و نورتریج) با PGAهای مختلف در آزمایشات سانتریفیوژی استفاده شده است.



شکل ۸- تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده به همراه طیف فوریه آن‌ها

۳-۱- المان‌بندی مدل

در مدل‌سازی‌های عددی، ابعاد المان باید به نحوی انتخاب شود تا سه شرط زیر (به‌ویژه 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 به‌ویژه در مسائل دینامیکی کاهش خواهد یافت.

۳- انتشار صحیح موج در محیط؛ حداکثر اندازه المان در مسائل دینامیکی انتشار موج به گونه‌ای باشد که انتشار موج در محیط به‌درستی صورت گیرد.

به‌منظور انتشار صحیح موج در محیط، کولمر و لیسمر (۱۹۷۳) [۱۹] حداکثر ابعاد المان (Δl) را به رابطه (۱) محدود کردند:

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

که در آن λ طول موج انتشار یافته در محیط است که با حداقل سرعت موج برشی در محیط (V_{smin}) و حداکثر فرکانس تحریک ورودی (f_{max}) به‌صورت زیر در رابطه است:

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

طبق دو رابطه بالا حداکثر ابعاد المان‌ها به‌منظور انتشار صحیح

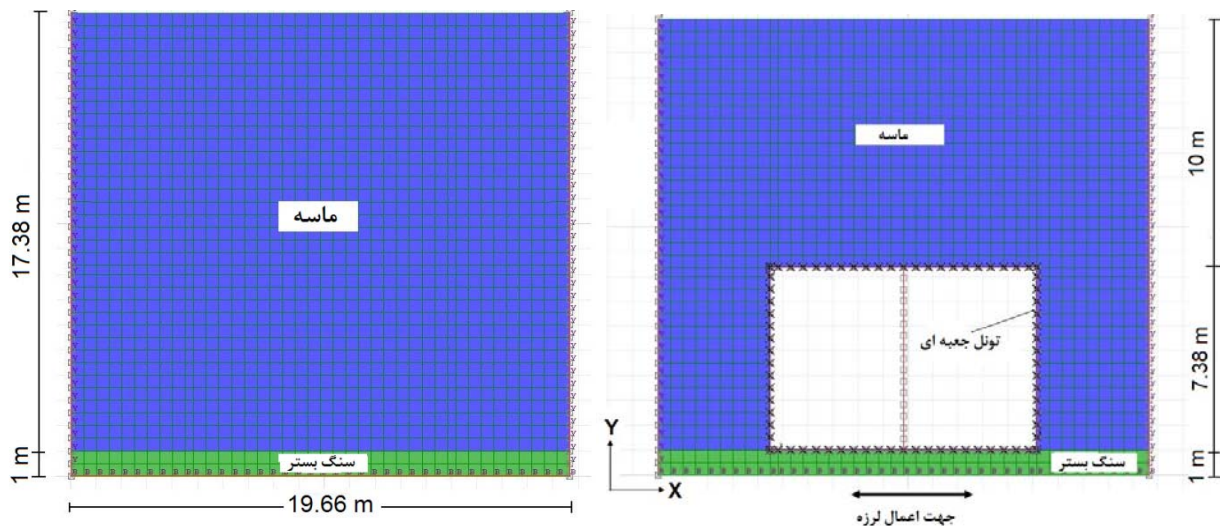
موج در محیط به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

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

با توجه به حداقل سرعت موج برشی خاک ماسه‌ای مورد بررسی برابر با 150 متر بر ثانیه و فرکانس حداکثر زلزله برابر 10 هرتز، حداکثر ابعاد المان طبق رابطه (۳) به $1/5$ متر محدود می‌شود. لازم به‌ذکر است در تحلیل‌های عددی، فرکانس‌های بالاتر از 10 هرتز امواج ورودی زلزله فیلتر شده‌اند. به دلیل محدودیت‌های هندسی در مدل عددی از جمله ابعاد سازه زیرزمینی و همچنین موقعیت شتاب‌سنج‌ها (مضربی از $0/5$) و به‌منظور دقت بیشتر در تحلیل‌ها، در تحلیل عددی صورت گرفته، از المان‌های چهارضلعی کرنش مسطح با حداکثر ابعاد $0/5$ متر استفاده گردید. انتخاب حداکثر بعد المان‌ها برابر با $0/5$ متر منجر به 1480 المان چهارضلعی در مدل عددی گردید. المان‌بندی مدل‌های SF و FF به ترتیب در شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) نشان داده شده است.

۳-۲- شرایط مرزی مدل

صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ مستلزم مدل‌سازی صحیح شرایط مرزی مدل‌های سانتریفیوژی توسط مدل عددی است. شرایط مرزی مدل‌های سانتریفیوژی



شکل ۹- المان بندی مدل های عددی الف (مدل FF؛ ب) مدل SF

جعبه ESB به گونه ای است که تمام نقاط هم ارتفاع دارای تغییر مکان یکسان و هم جهت در راستای اعمال لرزش (راستای افقی) هستند و در جهت قائم هیچگونه تغییر مکانی ندارند. برای مدل سازی این مشخصه، از یک المان سازه ای (المان لاینر^۹ در FLAC) به ضخامت ناچیز یک میلی متر در مرز دو طرف مدل استفاده گردید. گره های این المان سازه ای به گره های خاک مقید شده به گونه ای که هیچ نوع لغزش و جدایی بین آنها اتفاق نیفتد. مدول الاستیسیته این المان ها با مدول الاستیسیته خاک یکسان در نظر گرفته شد. سپس به کمک دستور SLAVE در نرم افزار، تغییر مکان افقی گره های هم ارتفاع دو طرف جعبه به گونه ای به یکدیگر مقید شدند که در هر لحظه تغییر مکان یکسان و هم جهت با هم داشته باشند. لازم به ذکر است تعریف المان لاینر فقط به منظور شبیه سازی شرایط مرزی مرزهای جانبی جعبه ESB تعریف شده است به همین دلیل مشخصات آن عیناً مشابه خاک فرض شده است. این شرایط مرزی توسط لوژن و همکاران [۲۱] جهت شبیه سازی عددی جعبه لمینار مشابه در آزمایشات میز لرزه استفاده شده است که نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی داشته است.

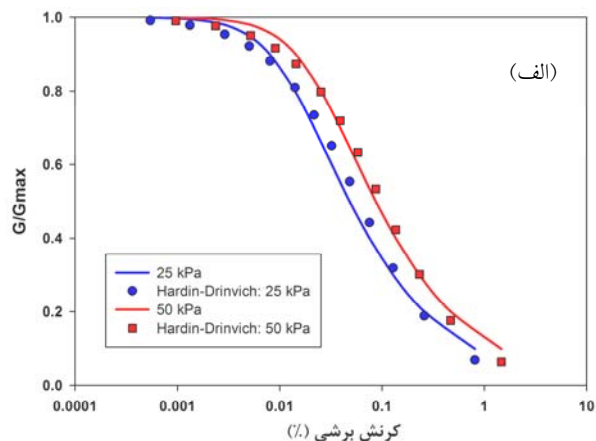
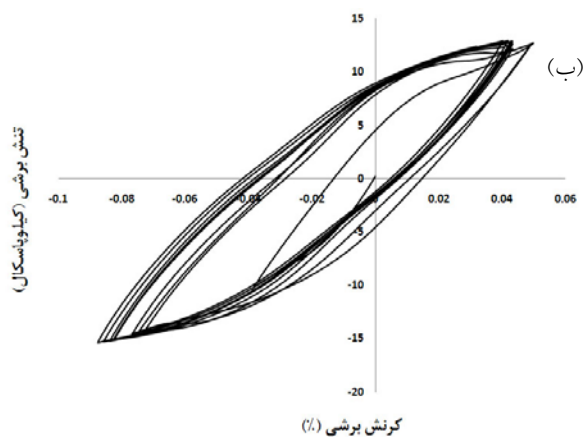
۳-۳- مدل سازی رفتار غیر خطی خاک

از مدل الاستوپلاستیک موهر کولمب در مدل سازی رفتار خاک

شامل مدل سازی مرز پایینی جعبه مدل و مرزهای جانبی جعبه ESB است. این مرزها در مدل عددی به صورت زیر مدل سازی گردید.

تحریک ورودی در نرم افزار FLAC با فرض کف صلب و یا کف نرم^۷ به دو صورت قابل اعمال است. در حالت کف صلب، تحریک ورودی به صورت تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل اعمال می شود. برای کف نرم، از یک مرز آرام^۸ در کف مدل استفاده شده و تحریک ورودی در قالب تاریخچه زمانی تنش به کف مدل اعمال می شود [۲۰]. در آزمایشات سانتریفیوژی، کف مدل به صورت یک مرز صلب عمل کرده و امواج ورودی را همانند یک مرز صلب به داخل مدل منعکس می کنند. بنابراین میرایی تشعشعی در این آزمایشات مدل نمی گردد. در مدل عددی، مرز کف به صورت مرز صلب در نظر گرفته شد و با یک لایه سنگی به ضخامت ۱ متر از جنس سنگ بستر محل مدل سازی گردید. تحریک ورودی به صورت تاریخچه زمانی شتاب به سرتاسر کف مدل اعمال گردید. لازم به ذکر است مدل پروتوتایپ دارای شرایطی مشابه مدل سانتریفیوژی بوده که در آن لایه ماسه ای بر سنگ بستر صلب واقع شده است.

مرزهای جانبی مدل سانتریفیوژی با در نظر گرفتن مشخصه اصلی جعبه ESB مدل سازی گردید. عملکرد مرزهای جانبی



شکل ۱۰- الف) منحنی های G/G_{max} کالیبره شده آزمایشات با مدل هاردین-درینوویچ؛ ب) چرخه هیستریزس تنش-گرنش

المان وسط مدل FF

برشی در $G/G_{max}=0.5$ اطلاق می‌شود. تمام منحنی‌های G/G_{max} خاک ماسه‌ای ارائه شده در شکل ۳ با مدل هاردین-درینوویچ کالیبره گردیدند. شکل (۱۰-الف) منحنی‌های کالیبره شده آزمایشات با مدل هاردین-درینوویچ را نشان می‌دهد. مدل هیستریزس غیرخطی به لایه‌های مختلف خاک برحسب تنش مؤثر متوسط در هر عمق معرفی شد.

چرخه هیستریزس تنش-گرنش غیرخطی در یک المان در وسط مدل FF ناشی از ۱۰ سیکل بارگذاری هارمونیک با $PGA=0.1g$ و فرکانس ۳ هرتز در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. مساحت چرخه نشان‌دهنده میرایی هیستریزس است. با فرض رفتار خطی برای خاک، این چرخه تبدیل به یک خط شده که بیانگر رفتار خطی تنش-گرنش است.

۳-۴- سازه زیرزمینی و اندرکنش خاک-سازه

از المان‌های تیر در مدل‌سازی سازه تونل زیرزمینی استفاده شد. اندرکنش بین تونل و محیط اطراف توسط المان رابط^{۱۱} با رفتار برشی موهر-کولمب مدل‌سازی گردید. مشخصات المان رابط شامل سختی برشی و قائم (K_s, K_n) و همچنین زاویه اصطکاک بین دو محیط (δ) - که المان رابط واسطه بین آن دو است - است. پارامترهای سختی المان رابط (سختی نرمال (K_n) و سختی برشی (K_s)) به توصیه ای‌تاسکا^{۱۲} [۲۲] و طبق رابطه (۵)

جهت تحلیل استاتیکی مدل استفاده گردید. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است مدول الاستیسته خاک تابعی از عمق بوده که به صورت متغیر با عمق به نرم افزار معرفی شده است. سایر مشخصات خاک مطابق جدول ۲ به مدل معرفی شدند.

میرایی واقعی در محیط‌های خاکی به صورت هیستریزس است لذا رفتار خاک در حالت دینامیکی در مدل غیرخطی در محدوده الاستیک به صورت غیرخطی و با میرایی هیستریزس مدل گردید. در نرم افزار FLAC از منحنی‌های کاهش مدول و میرایی که در تحلیل‌های معادل خطی معمول است به منظور مدل‌سازی میرایی هیستریزس جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده می‌شود [۲۲]. به این منظور منحنی تغییرات G/G_{max} (مدول برشی به مدول برشی حداکثر) در برابر گرنش برشی (γ) با مشخصات یکی از مدل‌های هیستریزس موجود در نرم افزار کالیبره شده و به نرم افزار معرفی می‌گردد. در این مطالعه از مدل هاردین-درینوویچ^{۱۰} استفاده شده است که در آن رابطه بین G/G_{max} و گرنش برشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در این رابطه γ_{ref} گرنش برشی مرجع است و به میزان گرنش

جدول ۳- مشخصات المان رابط

زاویه اصطکاک بین تونل و خاک (درجه)	سختی برشی؛ K_S (Pa/m)	سختی نرمال؛ K_n (Pa/m)
۳۰	10^9	10^9

محاسبه گردید:

$$K_n = K_s = 10 \max \left[\frac{K + \frac{4}{3} G_{\max}}{\Delta l_{\min}} \right] \quad (5)$$

در این رابطه K مدول بالک محیط سخت تر و Δl_{\min} طول ریزترین المان در راستای عمود بر جهت المان رابط است که برابر ۵/۰ در نظر گرفته شد.

طبق رابطه (۵)، مقادیر سختی برشی و نرمال المان رابط بین مصالح ماسه و بتن، برابر با 4×10^{11} پاسکال بر متر به دست می آید. طبق توصیه ایتاسکا، استفاده از مقادیر بسیار بالای سختی در المان رابط توصیه نمی شود زیرا این مقادیر از سختی، مدت زمان تحلیل دینامیکی مسئله را به شدت افزایش می دهند. لذا با سعی و خطا مقادیر کمتر سختی برای المان رابط (10^9 پاسکال بر متر) انتخاب شد به گونه ای که کاهش سختی تا این میزان تأثیری بر نتایج صحت سنجی نداشت.

زاویه اصطکاک بین مصالح تونل از جنس بتن و خاک، از مطالعات گومز و همکاران [۲۳] برآورد شده است. این میزان از زاویه اصطکاک همخوانی مناسبی با مقدار معمول $\frac{2}{3}\phi$ (زاویه اصطکاک داخلی خاک) دارد که برای ماسه متراکم مطالعه حاضر با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه، $\delta = 30^\circ$ را به دست می دهد. در خصوص سازه های زیرزمینی به دلیل احاطه شدن سازه از اطراف و محدود شدن حرکات نسبی، اندرکنش بین خاک و سازه به اهمیت سازه های روی سطح زمین نیست. مطالعه پارامتری انجام شده توسط نویسندگان نشان داد که تغییرات اندک در مشخصات عنصر واسطه (رابط) تأثیر چندانی بر روی پاسخ لرزه ای سطح زمین و شتاب های ثبت شده ندارند. مشخصات المان رابط در جدول ۳ ارائه شده است.

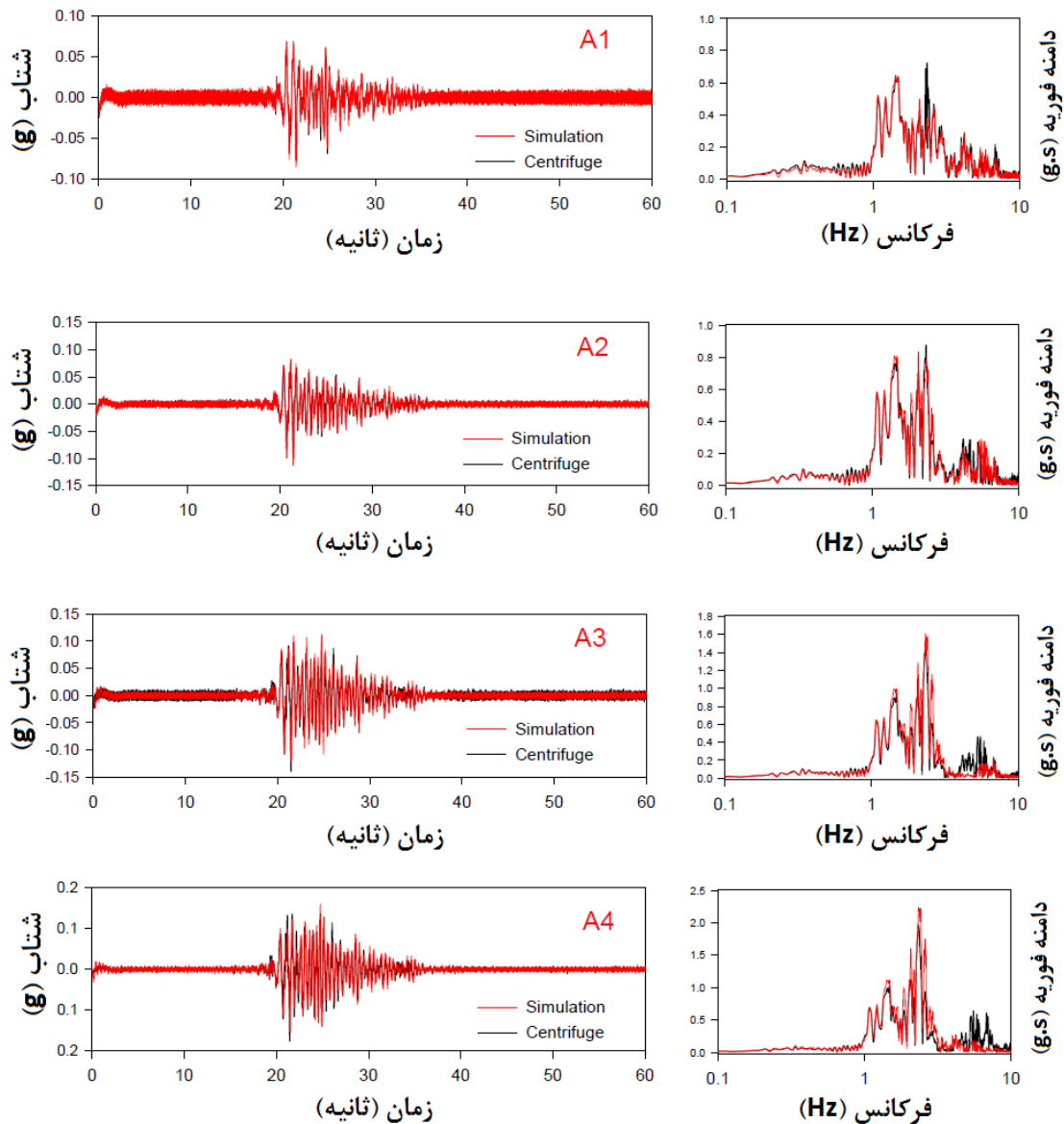
۳-۵- تحلیل ها

پس از تعادل استاتیکی مدل ها تحت وزن خود، تحلیل دینامیکی با اعمال تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل انجام گردید. گام زمانی تحلیل های دینامیکی برابر 10^{-5} sec به دست آمد. در حین تحلیل های دینامیکی، تاریخچه زمانی شتاب در نقاط مختلف مدل های عددی در موقعیت های متناظر با محل شتاب سنج های آزمایش های سانتریفیوژی به عنوان خروجی مدل ها برداشت گردید.

۳-۶- نتایج شبیه سازی های عددی

نتایج مدل عددی آزمایش FF در قالب تاریخچه زمانی شتاب با مقادیر ثبت شده در مدل آزمایشگاهی (شتاب سنج های A1 تا A4) برای زلزله کوبه با $PGA=0.075g$ در شکل (۱۱) مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین نتایج مدل عددی آزمایش SF در قالب تاریخچه زمانی شتاب با مقادیر ثبت شده در مدل آزمایشگاهی (شتاب سنج های A22 تا A34) برای زلزله کوبه با $PGA=0.191g$ در شکل (۱۲) مقایسه شده است. به منظور سهولت مقایسه نتایج، طیف فوریه هر شتاب سنج در سمت راست شکل ها رسم شده است.

از مقایسه نتایج تحلیل های عددی با شتاب های ثبت شده در آزمایشات سانتریفیوژ به خوبی دیده می شود که مدل عددی با دقت بالایی قادر به پیش بینی دامنه و مسیر شتاب های ثبت شده در آزمایشات برای هر دو مدل FF و SF است. لازم به ذکر است نتایج حاصله برای سایر مقادیر PGA حرکات ورودی، نتیجه مشابهی را در پی داشت. بنابراین، مدل عددی غیرخطی مدل سازی شده با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ صحت سنجی شده و انجام مطالعات پارامتری با مدل عددی صحت سنجی شده معتبر خواهد بود.

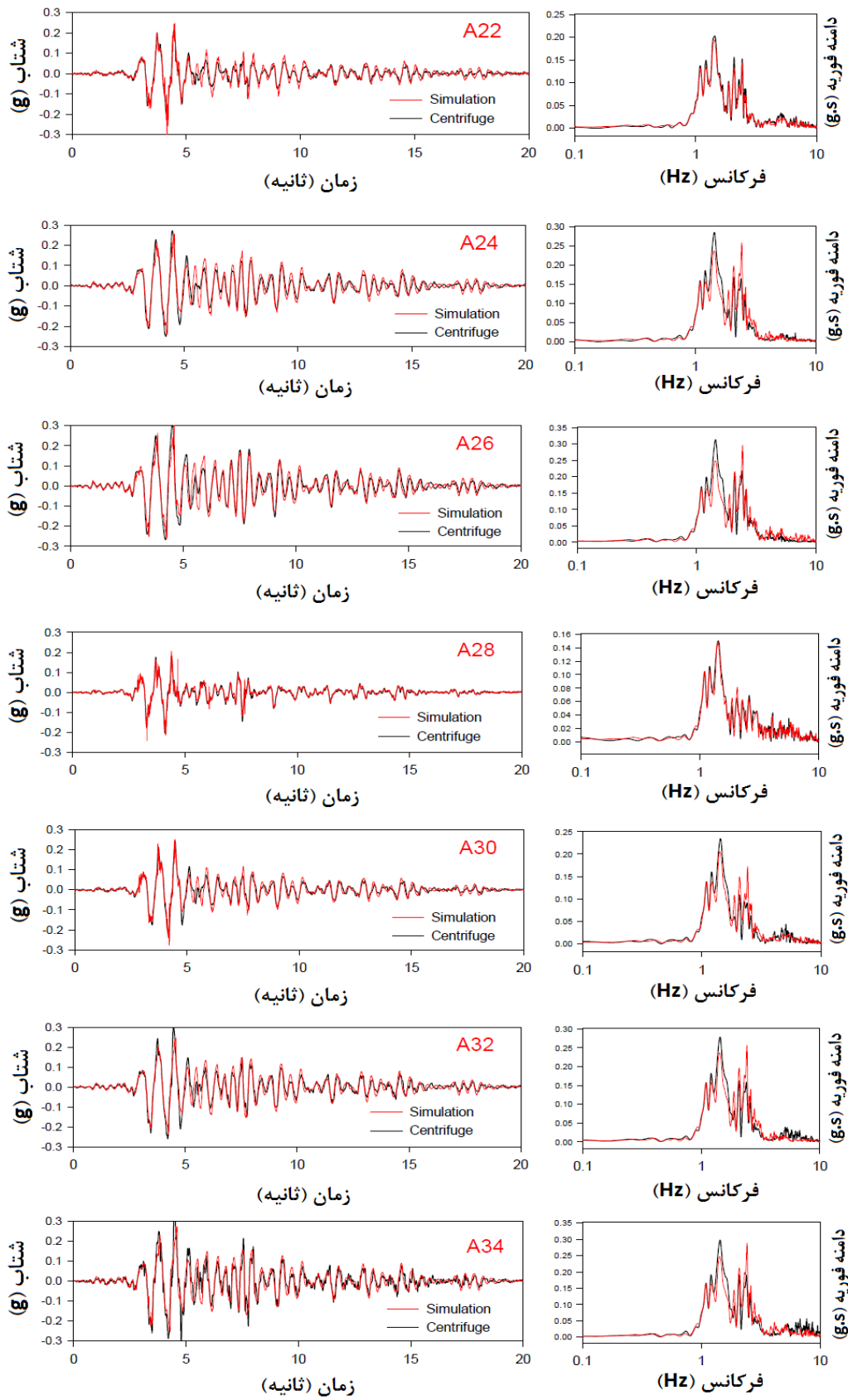


شکل ۱۱- نتایج شبیه سازی عددی آزمایش FF: شتاب سنج های A1 تا A4

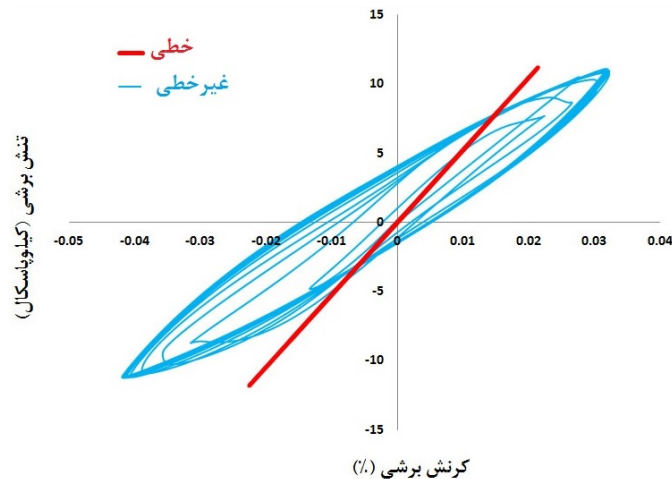
۴- مطالعه پارامتری

الاستیک خطی تغییر داده شد. PGAهای امواج هارمونیک به نحوی انتخاب گردید تا مدل غیرخطی در محدوده PGAهای انتخاب شده به صورت غیرخطی رفتار کند. رفتار خطی و غیرخطی خاک از روی نمودار τ - γ قابل بررسی است. شکل (۱۳) منحنی تنش برشی- کرنش برشی (τ - γ) دو مدل FF با رفتار خطی و غیرخطی خاک در برابر 10° سیکل موج هارمونیک با فرکانس $2/5$ هرتز و دامنه $0.05g$ را نشان می دهد.

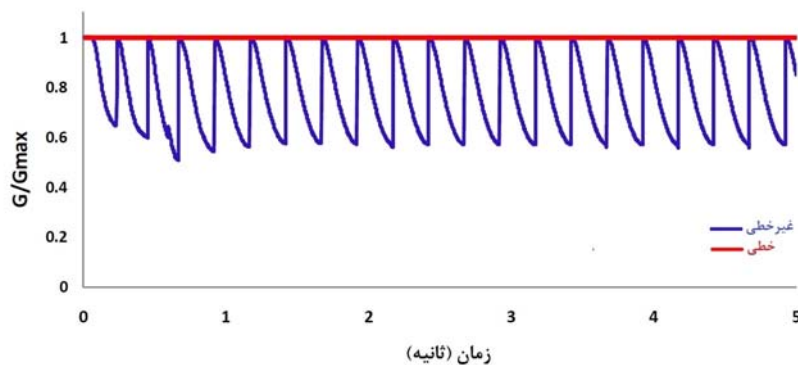
پس از صحت سنجی مدل عددی، مطالعه پارامتری به منظور مقایسه اثر حضور سازه زیر زمینی بر PGA سطح زمین در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک انجام گردید. تحلیل از طریق موج های هارمونیک با فرکانس های مختلف و با PGAهای متفاوت صورت گرفت. به منظور تعریف مدل خطی، در مدل غیرخطی صحت سنجی شده توسط آزمایشات سانتریفیوژی رفتار خاک از الاستیک غیرخطی (هیستریزس) به



شکل ۱۲- نتایج شبیه سازی عددی آزمایش SF: زلزله کوبه با $PGA=0.191g$



شکل ۱۳- نمودار تنش- کرنش برشی برای یک المان در وسط مدل FF برای مدل خطی و غیرخطی



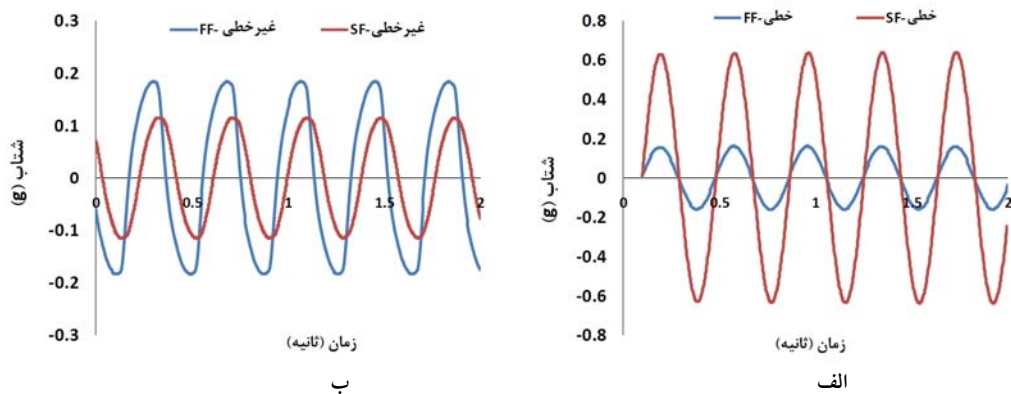
شکل ۱۴- تغییرات نسبت مدول برشی خاک (G/G_{max}) در طول تحلیل برای مدل غیرخطی و مدل خطی FF

از آنجا که مدل در $PGA=0.05g$ به صورت غیرخطی عمل نموده لذا PGA های بیشتر از این مقدار نیز منجر به غیرخطی شدن رفتار خاک خواهد گردید. مطالعه پارامتری حاضر در سه سطح شتاب $PGA=0.05g$ ، $PGA=0.10g$ و $PGA=0.15g$ انجام شده است.

جدول ۴ تحلیل‌های پارامتری تعریف شده به منظور بررسی مسئله تأثیر رفتار خاک بر PGA سطح زمین در حضور سازه زیرزمینی را ارائه می‌دهد.

بر اساس تحلیل‌های ارتعاش آزاد صورت گرفته، فرکانس طبیعی سیستم‌های FF و SF به ترتیب برابر با 3.25 و 2.6 هرتز به دست آمده است. لذا این فرکانس‌ها به عنوان فرکانس‌های تشدید در مطالعه پارامتری لحاظ شده‌اند. شکل (۱۵) نتایج

همان‌گونه که از شکل (۱۳) مشخص است رفتار تنش- کرنش خاک ماسه‌ای در مدل غیرخطی در این محدوده به صورت غیرخطی هیستریزس بوده و حداکثر کرنش برشی 0.04% را تجربه نموده است در حالی که رابطه تنش-کرنش در مدل خطی به صورت خطی است. شکل (۱۴) تغییرات نسبت مدول برشی خاک (G/G_{max}) در طول تحلیل را در دو مدل غیرخطی و خطی مورد مقایسه قرار داده است. از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که مدول برشی خاک در مدل خطی در حین تحلیل ثابت و برابر با G_{max} است؛ در صورتی که در مدل غیرخطی مدول برشی خاک در حین تحلیل با زمان متغیر و تابعی از میزان کرنش برشی در خاک است و در این تحلیل تا مقدار $G/G_{max}=0.5$ کاهش داشته است.



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین با و بدون سازه برای دو مدل رفتار خطی و غیرخطی خاک- فرکانس ۲/۵ هرتز و $PGA=0.1g$

جدول ۴- تحلیل های پارامتری تعریف شده

شماره تحلیل	نوع موج ورودی	دامنه موج	فرکانس تحریک (هرتز)
۱			0.5
۲			1.0
۳			2
۴			2.6
۵	سینوسی	0.05g - 0.10g - 0.15g	3
۶			3.25
۷			4
۸			5

مقدار PGA مدل SF در سطح زمین (PGA_{SF}) به مقدار PGA مدل FF در سطح زمین (PGA_{FF}) به صورت زیر تعریف شده است:

$$Amp = \frac{PGA_{SF}}{PGA_{FF}} \quad (6)$$

پس از انجام تحلیل های تعریف شده در جدول ۴، ضریب بزرگنمایی در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک برای امواج سینوسی با PGA های مختلف به دست آمده و در شکل های (۱۶) الی (۱۸) رسم شده است. ضریب ۱ به معنای برابری PGA سطح زمین در دو مدل SF و FF در فرکانس مورد بررسی است.

حاصله در اثر اعمال موج سینوسی با فرکانس 2.5 هرتز و $PGA=0.1g$ در مدل خطی و غیرخطی در قالب تاریخچه زمانی شتاب در سطح زمین را نشان می دهد.

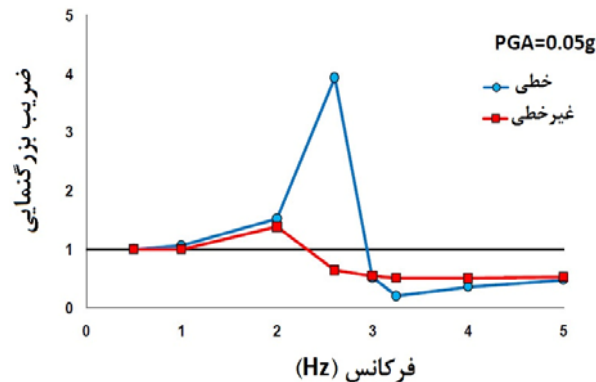
با توجه به شکل (۱۵) در فرکانس مورد بررسی (فرکانس طبیعی سیستم SF)، در سیستم خطی حضور سازه باعث بزرگنمایی شتاب نسبت به میدان آزاد شده است؛ در حالی که در سیستم غیرخطی حضور سازه باعث کاهش در PGA میدان آزاد (FF) شده است. این مسئله در فرکانس های مختلف تعریف شده در جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور مقایسه تأثیر رفتار خاک بر نتایج حاصله، ضریب بزرگنمایی (Amp) در هر فرکانس به صورت حاصل تقسیم

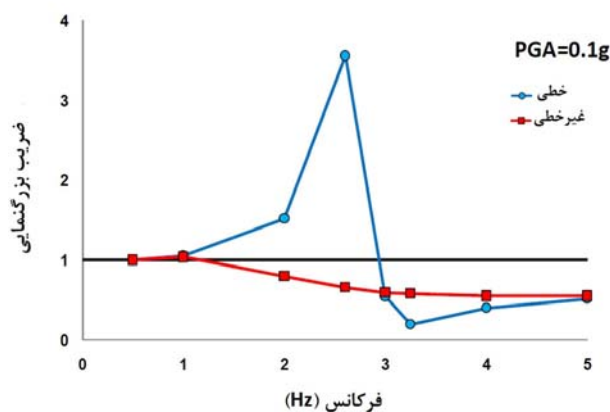
همان‌گونه‌که در شکل‌های (۱۶) الی (۱۸) دیده می‌شود پاسخ تحلیل در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک به شدت تحت تأثیر فرکانس طبیعی دو سیستم SF و FF است. در محدوده فرکانس طبیعی سیستم با سازه، مدل غیرخطی، کوچک‌نمایی پاسخ زمین در اثر حضور سازه نسبت به پاسخ میدان آزاد را نشان می‌دهد؛ در حالی‌که در مدل خطی، حضور سازه باعث بزرگ‌نمایی پاسخ نسبت به پاسخ میدان آزاد گردیده است. در محدوده فرکانسی خارج از فرکانس‌های طبیعی سیستم SF و FF، ضریب بزرگ‌نمایی در دو مدل خطی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر بوده و هر دو مدل در فرکانس‌های پایین، بزرگ‌نمایی اندک و در فرکانس‌های بالا کوچک‌نمایی پاسخ سطح زمین در اثر وجود سازه نسبت به پاسخ میدان آزاد را از خود نشان داده‌اند.

نتایج نمودارهای شکل‌های (۱۶) الی (۱۸) با بی بعد کردن محور افقی نسبت به فرکانس طبیعی سیستم SF (f_{sf}) و نرمالایز کردن محور قائم با تقسیم پاسخ خطی به غیرخطی در هر فرکانس برای هر سه PGA مورد مطالعه در شکل (۱۹) ترسیم شده است. ضریب ۱ به معنای برابری پاسخ خطی با غیرخطی در فرکانس مورد بررسی است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود نسبت پاسخ خطی به غیرخطی در فرکانس‌های طبیعی SF و FF دارای بیشترین اختلاف است به‌گونه‌ای‌که در فرکانس طبیعی سیستم SF، پاسخ مدل خطی ۵ الی ۶ برابر پاسخ غیرخطی شده است.

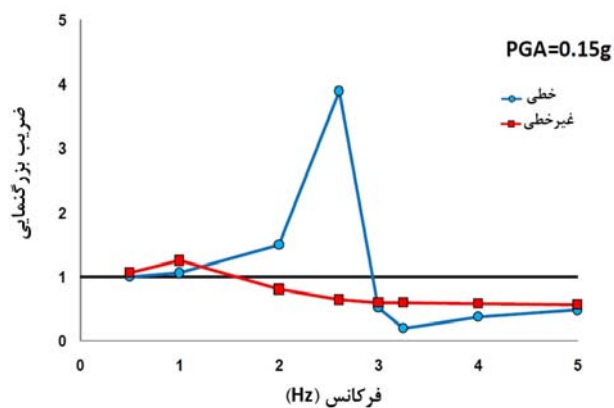
بنابراین فرکانس طبیعی سازه زیرزمینی، نقش بسزایی در سطح زمین در حالت فرض رفتار خطی و غیرخطی PGA میزان برای خاک ایفا می‌کند. به‌گونه‌ای‌که با فرض رفتار خطی، نقش سازه زیرزمینی در فرکانس‌های طبیعی سیستم با سازه، به‌صورت بزرگ‌نمایی نسبت به میدان آزاد دیده می‌شود؛ در حالی‌که رفتار غیرخطی عکس این موضوع را نشان می‌دهد. در توصیف این رفتار می‌توان گفت که در محدوده فرکانس طبیعی سیستم، ارتعاش سیستم الاستیک با سازه (رفتار الاستیک خاک و سازه) منجر به وقوع پدیده تشدید شده و حضور سازه، این ارتعاش را



شکل ۱۶- ضریب بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی خاک در فرکانس‌های مختلف



شکل ۱۷- ضریب بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی خاک در فرکانس‌های مختلف



شکل ۱۸- ضریب بزرگ‌نمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی خاک در فرکانس‌های مختلف

خاک را دارد.

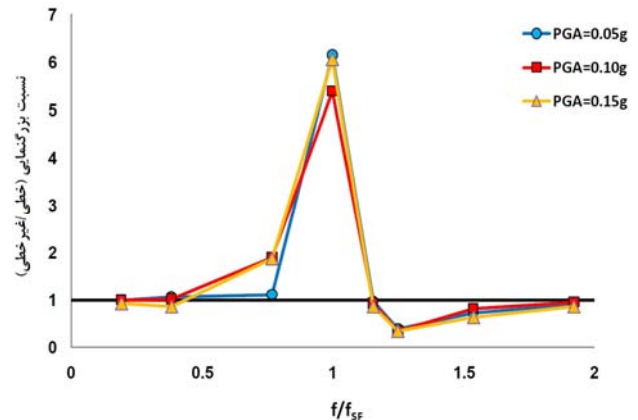
• میزان PGA سطح زمین در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک به شدت تحت تأثیر فرکانس طبیعی دو سیستم با و بدون سازه زیرزمینی است. در محدوده فرکانس طبیعی سیستم با سازه، مدل غیرخطی کوچک‌نمایی PGA در اثر حضور سازه نسبت به میدان آزاد را نشان می‌دهد؛ در حالی که در مدل خطی حضور سازه باعث بزرگ‌نمایی PGA نسبت به میدان آزاد می‌گردد. نتایج حاصله در سه سطح شتاب مورد بررسی مشاهده گردید.

• در محدوده فرکانس‌های خارج از فرکانس‌های طبیعی سیستم با و بدون سازه، ضریب بزرگ‌نمایی در دو مدل خطی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر بوده و هر دو مدل در فرکانس‌های پایین (پریودهای بلند)، بزرگ‌نمایی و در فرکانس‌های بالا (پریودهای کوتاه)، کوچک‌نمایی PGA سیستم با سازه نسبت به میدان آزاد را نشان می‌دهند. نتایج حاصله در سه سطح شتاب مورد بررسی مشاهده گردید.

طبق مطالعه پارامتری انجام شده، فرکانس طبیعی سازه زیرزمینی، نقش به‌سزایی در میزان PGA سطح زمین در حالت فرض رفتار خطی و غیرخطی خاک ایفا می‌کند. به‌گونه‌ای که با فرض رفتار خطی، نقش سازه زیرزمینی در فرکانس طبیعی سیستم با سازه، به‌صورت بزرگ‌نمایی نسبت به میدان آزاد دیده می‌شود؛ در حالی که رفتار غیرخطی عکس این موضوع را نشان می‌دهد. بنابراین فرض رفتار خطی برای خاک منجر به نتایج بسیار محافظه‌کارانه خواهد شد و استفاده از مدل غیرخطی مناسب در بررسی مسئله اثر سازه بر شتاب سطح زمین حائز اهمیت بوده و منجر به نتایج واقعی‌تر خواهد گردید.

۶- تشکر و قدردانی

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



شکل ۱۹- نسبت بزرگ‌نمایی مدل خطی به مدل غیرخطی در PGA های مختلف

تقویت می‌کند. همچنین حضور سازه باعث محبوس شدن موج در خاک بخش فوقانی سازه شده که باعث تقویت دامنه شتاب در سطح زمین می‌گردد. لذا میزان PGA ثبت شده در سطح زمین در سیستم با سازه در حالت الاستیک بیشتر از میدان آزاد گردیده است. درحالی‌که در سیستمی با رفتار غیرخطی خاک به دلیل رفتار غیرخطی خاک (میرایی هیستریزس) در محدوده فرکانس طبیعی سیستم، تشدید رخ نمی‌دهد. همچنین موج حبس شده در خاک بالای سازه به دلیل میرایی خاک میرا می‌شود و سازه نقش کاهشی در میزان شتاب ثبت شده در سطح زمین نسبت به میدان آزاد ایفا می‌کند. هرچند این مسئله یک مسئله اندرکنشی پیچیده است و نیاز به مطالعات عمیق‌تر در این زمینه است.

۵- نتیجه گیری

پس از صحت‌سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ انجام گرفته بر روی یک تونل مترو، اثر حضور سازه زیرزمینی بر حداکثر شتاب سطح زمین (PGA) در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور، با استفاده از یک مطالعه پارامتری که با امواج هارمونیک در فرکانس و دامنه‌های مختلف شتاب انجام گردید نتایج زیر حاصل گردید:

• مدل عددی تشریح شده با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی نتایج آزمایشات سانتریفیوژی با فرض رفتار غیرخطی

1. Daikai	5. free field	9. liner
2. Korean Advanced Institute of Science & Technology (KAIST)	6. structure field	10. Hardin-Drinovich
3. prototype	7. compliant	11. interface
4. equivalent shear beam	8. quiet	12. Itasca

مراجع

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*, Vol. 31, pp. 452-462, 2011.
3. Cilingir U., and Madabhushi, S. P. G., "Effect of Depth on Seismic Response of Circular Tunnels", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, pp.117-127, 2011.
4. Penzien, J., "Seismically-Induced Racking of Tunnel Linings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 683-691, 2000.
۵. لطف الهی یقین، م.ع.، تیماس، س. و خوشنودیان، ف.، "اثر سازه‌های مجاور بر رفتار لرزه‌ای تونل"، نشریه روش‌های عددی در مهندسی، سال ۳۱، شماره ۱، تابستان ۹۱.
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*, Vol. 36, 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, 2007.
8. Wong K. C., Shah A. H., and Datta S. K., "Diffraction of Elastic Waves in a Halfspace.II. Analytical And Numerical Solutions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, pp. 69-92, 1985.
9. Dravinski M., "Ground Motion Amplification Due to Elastic Inclusions in a Halfspace", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 313-335, 1983.
10. Pao H. Y., and Maw C. C., "The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations", A Report Prepared for United States Air Force Project Rand, Crane-Russak, New York, 1973.
11. Lee VW., "Three Dimensional Diffraction of Elastic Waves by a Spherical Cavity in an Elastic Halfspace: Closed form Solutions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 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*, Vol. 38, pp. 1441-1460, 2009.
13. Sun, C., and Wang, Q., "Effects of Underground Structure on Acceleration Response of Site", *Advanced Materials Research*, Vol. 368-373, pp. 2791-2794, 2011.
14. Sica S., Rotili F., Simonelli A.L., and Dello Russo A., "The Role of Underground Cavities on Ground Motion Amplification", *15WCEE*, LISBON, 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*, Vol. 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*, Vol. 44, pp. 102-114, 2013.
19. Kuhlemeyer, R. L., and Lysmer, J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 99, No. 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, 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*, Vol. 9, 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* 2003, Vol. 129(11), pp. 993–1000, 2003.