محمدحسن بازیار <sup>۱</sup>، مسعود رابطی مقدم <sup>۱\*</sup>، دانگ–سو کیم<sup>۲</sup> و یون ووک چو<sup>۲</sup> ۱. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران ۲. دانشگاه کایست، کرهجنوبی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۹ – دریافت نسخه نهایی: ۱۰/۹۰/۱۳۹۳)

چکیده – در مقاله حاضر بعد از صحت سنجی یک مدل عددی با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ انجام گرفته بر روی یک تونل متـرو، اثـر سـازه زیرزمینی بر حداکثر شتاب سطح زمین در دو حالت رفتارخطی و غیرخطی خاک مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد در محـدوده فرکانس طبیعی سیستم، مدل غیرخطی، کوچک نمایی PGA در اثر حضور سازه نسبت به میدان آزاد را نشان میدهد؛ در حالیکه در مدل خطـی عکس این روند مشاهده میشود. در محدوده فرکانسهای خارج از فرکانسهای طبیعی سیستم، ضریب بزرگنمایی در مـدل خطـی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر بوده و هر دو مدل در فرکانسهای پایین، بزرگنمایی و در فرکانسهای بالا، کوچکنمایی PGA نسبت به میـدان آزاد را نشان می دهد. 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 Baziar<sup>1</sup>, M. Rabeti Moghadam<sup>1\*</sup>, D. S. Kim<sup>2</sup> and Y. W. Choo<sup>2</sup>

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
 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 models predict same results and

\* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي: 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.

FF	معرف آزمایش میدان آزاد	SF	معرف آزمایش با سازه زیرزمینی
g	شتاب گرانش (۹/۸m/s <sup>۲</sup> )	$V_{S}$	سرعت موج برشی محیط (m/s)
G	مدول برشی (Pa)	Δl	طول المان در مدل عددي (m)
G <sub>max</sub>	مدول برشی حداکثر (Pa)	$\mathbf{f}_{\text{max}}$	فركانس ماكزيمم (Hz)
K	مدول بالک (Pa)	علائم يوناني	
K <sub>s</sub>	سختی برشی (Pa/m)	γ	كرنش برشى
K <sub>n</sub>	سختی نرمال (Pa/m)	$\gamma_{ref}$	کرنش برشی مرجع
PGA	حداكثر شتاب زمين	λ	طول موج (m)

#### فهرست علائم

### ۱– مقدمه

است. ایسن مسئله در شرایط استاتیکی در قالب بررسی نشستهای 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 حلهای تحلیلی یا مدل های عددی با فرضیات ساده شده ای مانند حل در محیط های الاستک بوده است.

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

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

رفتار الاستیک در مورد خاک غیرواقعی است؛ لذا نتایج حاصله توسط این روش ها 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 برحرکت 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 ۷۷ در نظر گرفته شده است. روش عددی این تحقیق براساس روش تفاضل فرکانس تحریک، قطرتونل، عمق ساخت تونل و فرکانس تحریک، قطرتونل، عمق ساخت تونل و انعطاف پذیری نسبی پوشش تونل در مقایسه با خاکهای اظراف 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 می شود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش مقدار شتاب حداکثر موج ورودی در پایین مدل، اثر کاهندگی وجود حفره بر امواج نمایانتر می گردد.

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 بهصورت 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 ایس 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 درسطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک مدل عددی به کمک نرم افزار ZD FLAC با نتایج آزمایشات سانتریفیوژ صورت گرفته در دانشگاه کایست کرهجنوبی که به منظور مطالعه لرزه ای رفتار تونل زیرزمینی مترو صورت گرفته است صحت سنجی شده است. سپس تأثیر حضور سازه زیرزمینی بر PGA سطح زمین در دوحالت فرض رفتار خطی وغیر خطی خاک در یک مطالعه پارامتری مورد بررسی و تحلیل واقع شده است.

## ۲-آزمایشات سانتریفیوژ

مجموعهای از آزمایشات سانتریفیوژ دینامیکی در دانشگاه کایست کرهجنوبی بهمنظور 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 درمحل مسئله مورد مطالعه مدل شده در آزمایشات سانتریفیوژ را نشان می دهد 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



(الف)



(ب) شکل ۲– الف) دستگاه سانتریفیوژ ژئو تکنیکی کایست؛ ب) جعبه ESB

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

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

### ۲–۱– مشخصات دستگاه سانتریفیوژ کایست

سانتریفیوژ کایست با بازوی ۵ متر دارای ظرفیت ۲۴۰ g-ton است که شتاب حداکثر آن در حالت استاتیکی برابر g ۱۳۰ است. این سانتریفیوژ مجهز به یک میزلرزه است که در حین چرخش عمل می کند. این میز توانایی ایجاد شتاب g ۵/۰ در مقیاس پروتوتایپ<sup>۳</sup> 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 ایا]. ارائه شده است. همچنین به منظور شبیه سازی مرز نیمه بی نهایت در اطراف محفظه مدل از یک جعبه <sup>1</sup>BSB (تیر برشی معادل) استفاده شده است. عملکرد لرزه ای جعبه عالا مدکور توسط لی و همکاران [۸۸] مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۲- الف) تصویری از دستگاه سانتریفیوژ کایست و شکل (۲-

۲-۲- فهرست آزمایشهای سانتریفیوژ انجام شده

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

آزمایش FF<sup>®</sup> آزمایش میدان آزاد (بدون وجود تونل) و آزمایش SF<sup>°</sup> آزمایش با تونل است. هندسه مدل شماره SF

جدول ۱– لیست آزمایشات سانتریفیوژ انجام شده					
	ط خاک	شرايه		. 1. *	
 تحریک ورودی	ضخامت خاكريز فوقاني	ضخامت خاكريز جانبي	هدف آزمایش	سیاسه آ: دار:	
	(متر)	(متر)		ارهایس	
زلزله های کوبه و نورتریج با	یک لایه ماسه به ضخامت ۱۷/۴ متر		پاسخ میدان آزاد	FF	
PGA های مختلف	١٠	٧/۴	پاسخ تونل جعبهای شکل	SF	





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 ۱۹/۶۶ و ارتفاع ۲/۲ متر بوده که طول آن ۱۹/۶ متر است. مابین دو دهانه ستونهایی 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 درنظر 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 مینیاتوری 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 پروتو تایپ 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 مدلسازی عددی این آزمایشات تشریح شده و نتایج تحلیلهای 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<sub>max</sub> و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی) که از آزمایشات ستون تشدید در چهار فشار همه جانبه ۲۵، ۵۰، ۵۰۰ 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 توناهای

مقدار	واحد	پارامتر
SP	_	نام ماسه برحسب طبقه بندى يونيفايد
1.645	Ton/m <sup>3</sup>	چگالی خشک حداکثر
1.244	Ton/m <sup>3</sup>	چگالی خشک حداقل
2.65	-	چگالی ویژه
NP	-	نشانه خميري
45	درجه	زاويه اصطكاك داخلي
o	kPa	چسبندگی
1.57	Ton/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص
84	7.	تراكم
0.3	_	نسبت پواسون

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



شکل ۴– تغییرات منحنی G/G<sub>max</sub> و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی ماسه مورد آزمایش



شکل ۵– الف) مقطع تونل شبیه سازی شده در آزمایش.ها در مقیاس پروتوتایپ (ابعاد برحسب متر) ب) تصویری از تونل در مقیاس مدل ساخته شده از جنس آلومینیوم



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

شتابسنج مطابق شکل (۶-ب) جهت ثبت شتاب در داخل خاک، روی سازه و روی جعبه به کار رفته است. شتاب سنج های A0 و A20 به عنوان شتاب های ورودی به ترتیب در مدل FF و SF در مدل سازی های عددی استفاده شده است. شکل (۷) تصاویری از مدل سانتریفیوژی ابزار گذاری شده قبل از اعمال تحریک ورودی را نشان می دهد.

### ۲–۶– تحریکهای ورودی به مدلها

از دو نوع موج ورودی (زلزله کوبه و نـورتریج) بـا PGAهـای مختلـف در آزمایشـات سـانتریفیوژی اسـتفاده شــده اسـت.



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

شکل (۸) تاریخچه زمانی و طیف فوریه این دو زلزلـه را نشـان میدهد.

# ۳- مدلسازی عددی آزمایشها

مدل سازی عددی آزمایش های سانتریفیوژ انجام شده با نرم افزار دوبعدی اختلاف محدود FLAC 2D انجام گرفته است. این نرم افزار توانایی انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی با درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه را دارد. آزمایش ها در مقیاس پروتوتایپ در نرم افزار مدل سازی گردیده است که جزییات مدل سازی ها در ادامه آمده است.



### ۳-۱- المانبندی مدل

در مدلسازی های عددی، ابعاد المان باید به نحوی انتخاب شود تا سه شرط زیر (به ویژه شرط سوم) بر آورده شوند: ۱-دقت تحلیل؛ ابعاد ریزتر المان تا یک میزان به منزله دقت بیشتر تحلیل خواهد بود. ۲-سرعت تحلیل؛ با کاهش ابعاد المان سرعت تحلیل به ویژه در مسائل دینامیکی کاهش خواهد یافت. ۳-انتشار صحیح موج در محیط؛ حداکثر اندازه المان در مسائل دینامیکی انتشار موج به گونه ای باشد که انتشار موج در محیط به درستی صورت گیرد.

به منظور انتشار صحیح موج در محیط، کولمر و لیسمر (۱۹۷۳) [۱۹] حداکثر ابعاد المان (Δ۱) را به رابطه (۱) محدود کردند:

$$\Delta l \le \frac{\lambda}{10} \tag{1}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{V s_{\min}}{f_{\max}} \tag{(1)}$$

طبق دو رابطه بالا حداکثرابعاد المانها بهمنظور انتشار صحيح

موج در محیط بهصورت زیر تعیین می شود:

 $\Delta l \le \frac{V s_{min}}{10 \times f_{max}} \tag{(3)}$ 

با توجه به حداقل سرعت موج برشی خاک ماسهای مورد بررسی برابر با ۱۵۰ متر بر ثانیه و فرکانس حداکثر زلزله برابر ۱۰ هرتز، حداکثر ابعاد المان طبق رابطه (۳) به ۱/۵ متر محدود می شود. لازم به ذکر است در تحلیل های عددی، فرکانس های بالاتر از ۱۰ هرتز امواج ورودی زلزله فیلتر شدهاند. به دلیل محدودیت های هندسی در مدل عددی از جمله ابعاد سازه زیرزمینی و همچنین موقعیت شتاب سنج ها (مضربی از ۵/۰) و به منظور دقت بیشتر در تحلیل ها، در تحلیل عددی صورت گرفته، از المان های چهارضلعی کرنش مسطح با حداکثر ابعاد ۵/۰ متر استفاده گردید. انتخاب حداکثر بعد المان ها برابر با ۵/۰ متر منجر به ۱۲۸۰ المان چهارضلعی در مدل عددی گردید. المان بندی مدل های FT و ST به ترتیب در شکل های (۹ – الف)

### ۳-۲- شرایط مرزی مدل

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



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

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

تحریک ورودی در نرم افزار FLAC با فرض کف صـلب و یا کف نرم<sup>۷</sup> به دو صورت قابل اعمال است. در حالت کف صلب، تحریک ورودی بهصورت تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل اعمال می شود. برای کف نرم، از یک مرز آرام در کف مدل استفاده شده و تحریک ورودی در قالب تاریخچـه زمـانی تنش به کف مدل اعمال میشود [۲۰]. در آزمایشات سانتریفیوژی، کف مدل بهصورت یک مرز صلب عمل کـرده و امواج ورودی را همانند یک مرز صلب به داخل مـدل مـنعکس می کنند. بنابراین میرایی تشعشعی در این آزمایشات مدل نمی گردد. در مدل عددی، مرز کف بهصورت مرز صلب در نظر گرفته شد و با یک لایه سنگی به ضخامت ۱ متر از جنس سنگ بستر محل مدلسازی گردید. تحریک ورودی بهصورت تاریخچه زمانی شتاب به سرتاسر کف مدل اعمال گردیـد. لازم بهذكر است مدل پروتوتايت داراي شرايطي مشابه مدل سانتریفیوژی بوده که در آن لایه ماسهای بر سنگ بستر صلب واقع شده است.

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

جعبه ESB به گونهای است که تمام نقاط هم ارتفاع دارای تغییرمکان یکسان و هم جهت در راستای اعمال لرزش (راستای افقی) هستند و در جهت قائم هیچگونه تغییرمکانی ندارند. برای مدلسازی این مشخصه، از یک المان سازهای (المان لاینر و در FLAC) به ضخامت ناچیز یک میلی متر در مرز دو طرف مدل استفاده گردید. گرههای این المان سازهای به گرههای خاک مقید شده بهگونهایکه هیچ نوع لغزش و جدایی بین آنها اتفاق نیفتد. مدول الاستيسيته اين المان ها با مدول الاستيسيته خاك يكسان در نظر گرفته شد. سپس به کمک دستور SLAVE در نرم افزار، تغییرمکان افقی گرههای هم ارتفاع دو طرف جعبه به گونهای به یکدیگر مقید شدند که در هر لحظـه تغییرمکـان یکسـان و هـم جهت با هم داشته باشند. لازم بهذكر است تعريف المان لاينر فقط بهمنظور شبيه سازي شرايط مرزي مرزهاي جانبي جعبه ESB تعريف شده است به همين دليل مشخصات أن عيناً مشابه خاک فرض شده است. این شرایط مرزی توسط لوژن و همکاران [۲۱] جهت شبیه سازی عددی جعبه لمینار مشابه در آزمایشات میزلرزه استفاده شده است که نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی داشته است.

۳-۳- مدلسازی رفتار غیرخطی خاک
از مدل الاستوپلاستیک موہر کولمب در مدلسازی رفتار خاک



المان وسط مدل FF

جهت تحلیل استاتیکی مدل استفاده گردید. همان گونه 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 بهصورت هیسترزیس است لذا رفتار خاک در حالت دینامیکی در مدل غیرخطی در محدوده الاستیک بهصورت غیرخطی و با میرایی هیسترزیس مدل گردید. در نرم افزار FLAC از منحنیهای کاهش مدول و میرایی که در تحلیلهای معادل خطی معمول است بهمنظور مدلسازی میرایی هیسترزیس جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده میشود [۲۲]. بهاینمنظور منحنی تغییرات غیرخطی استفاده میشود [۲۲]. بهاینمنظور منحنی تغییرات مراهی میرایی مدول برشی حداکثر) در برابر کرنش برشی ( γ) با مشخصات یکی از مدلهای هیسترزیس موجود مطالعه از مدل هاردین-درینویچ<sup>°(</sup> استفاده شده است که در آن رابطه بین G/G<sub>max</sub> و کرنش برشی به صورت زیر تعریف میشود:

$$\frac{G}{G_{\text{max}}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{\text{ref}}}} \tag{(f)}$$

در این رابطه <sub>۲ref</sub> کرنش برشی مرجع است و به میـزان کـرنش

برشی در G/G<sub>max</sub> اطلاق می شود. تمام منحنی های G/G<sub>max</sub> خاک ماسه ای ارائه شده در شکل ۳ با مدل هاردین – درینویچ کالیبره گردیدند. شکل (۱۰ – الف) منحنی های کالیبره شده آزمایشات با مدل هاردین – درینویچ را نشان می دهد. مدل هیسترزیس غیر خطی به لایه های مختلف خاک بر حسب تنش مؤثر متوسط در هر عمق معرفی شد.

چرخه هیسترزیس تنش کرنش 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 هیسترزیس است. با فرض رفتار خطی برای خاک، این چرخه تبدیل به یک خط شده که بیانگر رفتار خطی تنش –کرنش 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 " با رفتار برشی موهر - کولمب مدلسازی گردید. مشخصات المان رابط شامل سختی برشی و قائم (K<sub>n</sub>, K<sub>n</sub>) و همچنین زاویه اصطکاک بین دو محیط (δ) - که المان رابط واسطه بین آن دو است است. پارامترهای سختی المان رابط (سختی نرمال (K<sub>n</sub>) و سختی برشی (δ) به توصیه ایتاسکا<sup>۲</sup> [ ۲۲] و طبق رابطه (۵)

جدول ٣- مشخصات المان رابط

سختی نرمال؛ (Pa/m) Kn)	سختى برشى؛ Pa/m) K <sub>S</sub> )	زاویه اصطکاک بین تونل و خاک (درجه)
10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	٣٠

محاسبه گردید:

$$K_{n} = K_{s} = 10 \max \left| \frac{K + \frac{4}{3}G_{max}}{\Delta l_{min}} \right|$$
 (a)

در این رابطه K مدول بالک محیط سخت تـر و Al<sub>min</sub> طـول ریزترین المان در راستای عمود بر جهت المان رابط اسـت کـه برابر ۵/۰ در نظر گرفته شد.

طبق رابطه (۵)، مقادیر سختی برشی و نرمال المان رابط بین مصالح ماسه و بتن، برابر با <sup>۱۱</sup> ۲۰×۴ پاسکال بر متر بهدست 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 (<sup>۹</sup> ۱ 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  $\varphi_{\overline{T}}^{-1}$  (  $\varphi$ زاویه اصطکاک داخلی خاک) دارد که برای ماسه متراکم مطالعه حاضر با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه، °۳۰=۵ را به دست می دهد. ماضر با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه، °۳۰=۵ را به دست می دهد. 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 شتابهای ثبت شده ندارند.

## ۳-۵- تحليلها

پس از تعادل استاتیکی مدلها تحت وزن خود، تحلیل دینامیکی با اعمال تاریخچه زمانی شتاب به کف مدل انجام گردیـد. گـام زمانی تحلیلهای دینامیکی برابر sec <sup>5</sup>01 بهدست آمد. در حـین تحلیلهای دینامیکی، تاریخچه زمانی شـتاب در نقـاط مختلف مدلهای عددی در موقعیتهای متناظر با محل شتابسنجهای آزمایشهای سانتریفیوژی به عنوان خروجی مـدلها 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 سنجهای A1 تا (۱۱) مورد 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 سنجهای A22 تا A34) برای زلزله کوبه با PGA=0.1918 در شکل (۱۲) مقایسه شده است. به منظ ور سهولت مقایسه نتایج، طیف فوریه هر شتاب سنج در سمت راست شکلها 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 غیر خطی 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

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 موجهای هارمونیک با فرکانسهای 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 (هیسترزیس) به

الاستیک خطی تغییر داده شد. PGAهای امواج هارمونیک به نحوی انتخاب گردید تا مدل غیرخطی در محدوده PGAهای انتخاب شده بهصورت غیرخطی رفتار کند. رفتار خطی و غیرخطی خاک از روی نمودار γ-۲ قابل بررسی است. شکل (۱۳) منحنی تنش برشی –کرنش برشی (γ-۲) دو مدل FF با رفتار خطی و غیرخطی خاک در برابر ۱۰ سیکل موج هارمونیک با فرکانس ۲/۵ هرتو و دامنه g ۵۰/۰ را نشان میدهد.



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<sub>max</sub>) در طول تحلیل برای مدل غیرخطی و مدل خطی FF

همان گونه که از شکل (۱۳) مشخص است رفتار تنش-کرنش خاک ماسهای در مدل غیرخطی در این محدوده بهصورت غیرخطی هیسترزیس بوده و حداکثر کرنش برشی ۰۰/۰٪ را تجربه نموده است در حالی که رابطه تنش-کرنش در مدل خطی بهصورت خطی است. شکل (۱۴) تغییرات نسبت مدول برشی خاک (G/G<sub>max</sub>) در طول تحلیل را در دو مدل غیرخطی و خطی مورد مقایسه قرار داده است. از شکل ۱۹ مشاهده می شود که مدول برشی خاک در مدل خطی در حین تحلیل ثابت و برابر با G<sub>max</sub> 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<sub>max</sub> حاش داشته است.

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

جدول ۴ تحلیل های پارامتری تعریف شده بهمنظور بررسی مسئله تأثیر رفتار خاک بر PGA سطح زمین در حضور سازه زیرزمینی را ارائه میدهد.

بر اساس تحلیل های ارتعاش آزاد صورت گرفته، فرکانس طبیعی سیستم های FF و SF به ترتیب برابر با 3.25 و 2.6 هرتز بهدست آمده است. لذا این فرکانس ها بهعنوان فرکانس های تشدید در مطالعه پارامتری لحاظ شدهاند. شکل (۱۵) نتایج



خاک- فرکانس ۲/۵ هر تز و PGA=0.1g

فرکانس تحریک (هرتز)	دامنه موج	نوع موج ورودي	شماره تحليل
0.5			١
1.0			٢
2			٣
2.6	0.05g - 0.10g - 0.15g		۴
3		سينوسي	۵
3.25			۶
4			٧
5			٨

جدول ۴– تحلیل های پارامتری تعریف شده

مقدار PGA مدل SF در سطح زمین (PGA<sub>SF</sub>) به مقدار PGA ممدار PGA مدل FF در سطح زمین (PGA<sub>FF</sub>) به صورت زیر تعریف شده است:

 $Amp = \frac{PGA_{SF}}{PGA_{FF}}$ (\$

پس از انجام تحلیلهای تعریف شده در جدول ۴، ضریب بزرگنمایی در دو حالت رفتار خطی و غیرخطی خاک برای امواج سینوسی با PGAهای مختلف بهدست آمده و در شکلهای (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 میدهد.

با توجه به شکل (۱۵) در فرکانس مورد بررسی (فرکانس طبیعی سسیستم SF)، در سیستم خطی حضور سازه باعث بزرگنمایی شتاب نسبت به میدان آزاد شده است؛ درحالیکه 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.

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



شکل ۱۸– ضریب بزرگنمایی در دو رفتار خطی و غیرخطی خاک در فرکانس های مختلف

همان گونه که در شکل های (۱۶) الی (۱۸) دیده می شود 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، محدوده فرکانس طبیعی سیستم با سازه، مدل غیرخطی، کوچکنمایی پاسخ زمین در اثر حضور سازه نسبت به پاسخ میدان آزاد را نشان می دهد؛ در حالی که در مدل خطی، حضور سازه باعث بزرگنمایی پاسخ نسبت به پاسخ میدان آزاد گردیده است. در محدوده فرکانسی خارج از فرکانس های طبیعی سیستم SF و FF، ضریب بزرگنمایی در دو مدل خطی و غیرخطی نزدیک به یکدیگر بوده و هر دو مدل در فرکانس های پایین، بزرگنمایی اندک و در فرکانس های بالا کوچکنمایی پاسخ سطح زمین در اثر وجود سازه نسبت به پاسخ میدان آزاد

نتایج نمودارهای شکل های (۱۶) الی (۱۸) با بی بعد کردن محور افقی نسبت به فرکانس طبیعی سیستم fsF) 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. همان گونه که مشاهده می شود SF و FF و SF و ایک در فرکانس های طبیعی SF و دارای بیشترین اختلاف است به گونه ای که 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 PGAمیزان برای خاک ایفا می کند. به گونهای که با فرض رفتار خطی، نقش سازه زیرزمینی در فرکانس های طبیعی سیستم با سازه، بهصورت بزرگنمایی نسبت به میدان آزاد دیده می شود؛ در حالی که رفتار غیرخطی عکس این موضوع را نشان می دهد. در توصیف ایس رفتارمی توان 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



تقویت می کند. همچنین حضور سازه باعث محبوس شدن موج در خاک بخش فوقانی سازه شده که باعث تقویت دامنه شتاب در سطح زمین می گردد. لذا میزان PGA ثبت شده در سطح زمین در سیستم با سازه در حالت الاستیک بیشتر از میدان آزاد گردیده است. درحالی که در سیستمی با رفتار غیرخطی خاک به دلیل رفتار غیرخطی خاک (میرایی هیسترزیس) در محدوده فرکانس طبیعی سیستم، تشدید رخ نمی دهد. همچنین موج حبس شده در خاک بالای سازه به دلیل میرایی خاک میرا می شود و سازه نقش کاهشی در میزان شتاب ثبت شده در سطح زمین نسبت به میدان آزاد ایغا می کند. هرچند این مسئله یک مسئله اندرکنشی پیچیده

۵- نتیجه گیری

پس از صحت سنجی 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 دوحالت رفتار خطی و غیر خطی خاک مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور، با استفاده از یک مطالعه پارامتری که با امواج هارمونیک در فرکانس و دامنه های مختلف شتاب انجام گردید نتایج زیر حاصل گردید:

مدل عددی تشریح شده با دقت بالایی قادر به پیش
 بینی نتایج آزمایشات سانتریفیوژی با فرض رفتار غیرخطی

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 می دهد؛ در حالی که در مدل خطی حضور سازه باعث بزرگنمایی PGA نسبت به میدان آزاد می گردد. نتایج حاصله در سه سطح شتاب مورد بررسی مشاهده گردید.

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

طبق مطالعه پارامتری انجام شده، فرکانس طبیعی سازه زیرزمینی، نقش به سزایی در میزان PGA سطح زمین در حالت فرض رفتار خطی و غیرخطی خاک ایفا می کند. به گونه ای که با فرض رفتار خطی، نقش سازه زیرزمینی در فرکانس طبیعی سیستم با سازه، به صورت بزرگنمایی نسبت به میدان آزاد دیده می شود؛ در حالی که رفتار غیر خطی عکس این موضوع را نشان می دهد. بنابراین فرض رفتار خطی برای خاک منجر به نتایج بسیار محافظه کارانه خواهد شد و استفاده از مدل غیر خطی مناسب در بررسی مسئله اثر سازه بر شتاب سطح زمین حائز اهمیت بوده و منجر به نتایج واقعی تر 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 می دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از این مرکز بابت حمایت های صورت گرفته اعلام دارند.

واژەنامە

- 1.Daikai
- 2. Korean Advanced Institute of Science & Technology (KAIST)
- 3. prototype

6. structure field 7. compliant 8. quiet

5. free field

- 4. equivalent shear beam
- 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.
- 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.
- 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.
- Penzien, J., "Seismically-Induced Racking of Tunnel Linings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 683–691, 2000.

۵. لطف الهي يقين، م. ع.، تيماس، س. و خوشنوديان، ف.، "اثر

- 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.
- 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.
- 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.
- Dravinski M., "Ground Motion Amplification Due to Elastic Inclusions in a Halfspace", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 313-335, 1983.
- 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:

9. liner 10. Hardin-Drinvich 11. interface 12. Itasca

مراجع

Closed form Solutions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 7(3), pp. 149-161, 1988.

- 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.
- Sica S., Rotili F., Simonelli A.L., and Dello Russo A., "The Role of Underground Cavities on Ground Motion Amplification", 15WCEE, LISBON, 2012.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.