

### بررسی تاثیرات تراکم و عمق روباره خاک در پاسخ لرزه‌ای سیستم خاک و تونل با استفاده از تحلیل عددی

پژوهشی

سینا مجیدیان\*

۱- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، sina.majidian@mazust.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

شماره صفحات: ۱۸۷ تا ۲۰۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11897.1453

واژگان کلیدی	چکیده
تونل روش جدید اتریسی مدل رفتاری رفتار لرزه‌ای شبیه‌سازی عددی	تونل‌ها بخش مهمی از سازه‌های زیرساخت را در مهندسی عمران تشکیل داده و به‌عنوان تسهیلات عمومی حمل‌ونقل، آبرسانی و ... استفاده می‌شوند. جلوگیری از صدمات و خرابی تونل‌ها به‌عنوان شرایط حیاتی ناشی از اتفاقات لرزه‌ای دارای اهمیت بالایی می‌باشد. در این پژوهش اثرات عمق تونل و تراکم خاک در رفتار لرزه‌ای یک مقطع تونل دوخطه مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور یک مقطع ۲/۵ خطه ترافیکی نعل اسبی انتخاب گردید. روش عددی امان محدود و مدل رفتاری سخت شونده کرنش کوچک با قابلیت شبیه‌سازی میرایی هیستریزس مصالح مورد استفاده قرار گرفتند و مراحل ساخت روش جدید اتریسی قبل از اعمال شتاب نگاشت در نظر گرفته شد. نتایج ابزارنگاری پروژه زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش با مقطع تونل مشابه به منظور صحت‌سنجی استفاده گردید. یک سری تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی با اعمال شتاب نگاشت‌های واقعی با ضرائب مقیاس مختلف انجام گرفت و نمودارهای حداکثر و میانگین پاسخ دررفت بر حسب شتاب بیشینه حاصل از مدل‌های مختلف در معرض پنج شتاب نگاشت با ضرائب مقیاس شتاب ترسیم و برای ارزیابی نتایج استفاده شدند. نتایج نشان دادند که تراکم و ارتفاع سربار تاثیر قابل توجهی بر میزان پاسخ دررفت تونل در خاک ماسه‌ای خواهند داشت و اثرات مربوطه در در شتاب‌های مختلف متفاوت می‌باشد. علت این تغییر روند ناشی از اثرات رفتار غیرخطی توده خاک، جابجایی شبه استاتیک و نیروهای اینرسی است.

#### ۱- مقدمه

بررسی کردند (Jiang, et al., 2010). ونگ و ژانگ آمار پاسخ تعداد ۲۵۴ تونل سنگی در معرض سه زلزله مختلف را بررسی کردند (Wang & Zhang, 2013). بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های ژئوتکنیکی بدلیل تاثیر عوامل مختلف مانند پیچیدگی‌های رفتار خاک و اندرکنش خاک-سازه با چالش‌های بسیاری همراه می‌باشد (Komak Majidian & Panah, 2017) و (Panah & Majidian, 2020). شبیه‌سازی‌های عددی روش‌های معمول ارزیابی

امروزه تونل‌ها در زیرساخت‌های جامعه با کاربردهایی نظیر مترو، راه‌آهن، سازه‌های زیرزمینی، انتقال آب و فاضلاب استفاده می‌شوند. ساخت این سازه‌های زیرزمینی در مناطق لرزه‌خیز نیازمند طراحی مناسب لرزه‌ای است، زیرا هرگونه آسیب می‌تواند قابلیت استفاده این گونه شریان‌های حیاتی و خدمت رسانی شهری را تحت تاثیر قرار دهد. جیانگ و همکاران (۲۰۱۰) آسیب تونل در اثر زلزله ۲۰۰۴ نیگتا را

شبیه‌سازی رفتار دینامیکی خاک و امکان تشکیل مفاصل پلاستیک در تونل تاثیر بالایی در پاسخ لرزه‌ای تونل دارند. هو و همکاران با استفاده از تحلیل های عددی دینامیکی، به ارزیابی ریسک لرزه‌ای تونل‌ها در اعماق مختلف و خاک نرم پرداختند (Hu, et al., 2020). مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای به منظور استخراج منحنی‌های شکنندگی ریسک استفاده گردید. مشخص شد که با افزایش ارتفاع ممکن است احتمال گسیختگی در اثر زلزله افزایش یابد. به‌طور کلی تحلیل‌های عددی تاریخچه زمانی ابزار مفید و موثری به برای بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم‌های اندرکنشی زمین و تونل هستند و به دلیل افزایش توانایی نرم‌افزارها و پردازنده‌های بارانه‌ای استفاده از آن‌ها رو به افزایش است..

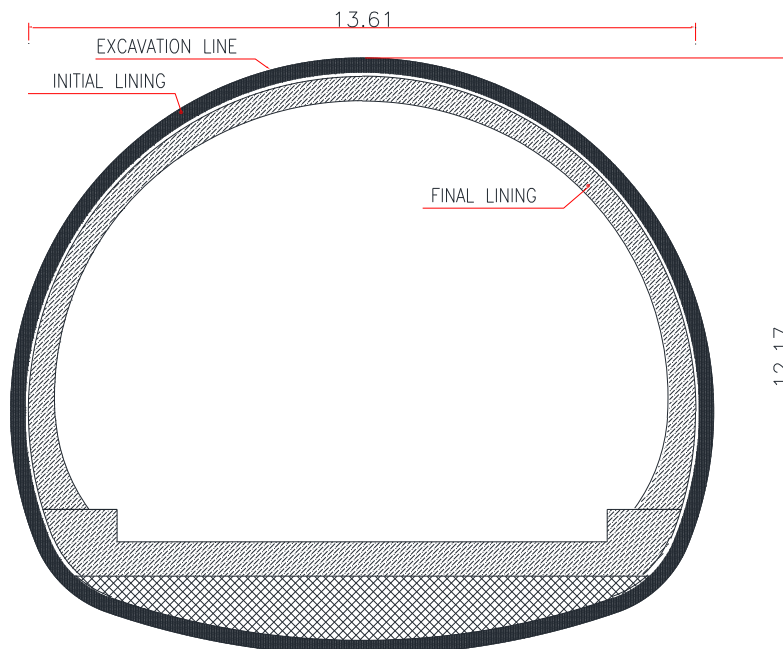
در مقاله حاضر اثرات عمق تونل و تراکم خاک بر رفتار لرزه‌ای یک مقطع متداول با استفاده از تحلیل‌های عددی تاریخچه زمانی ارزیابی گردید. مقطع نعل اسبی ۲/۵ خطه ترافیکی با روش ساخت جدید اتریشی (NATM) در نظر گرفته شده است. این مقطع در پروژه‌هایی مانند تونل نیایش (Zolghadr, et al., 2013)، (Yasrobi, et al., 2014) و تونل آرش- اسفندیار (Golshani, et al., 2018) مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به عدم دسترسی به پارامترهای دقیق مدل‌های رفتاری دینامیکی خاک پروژه‌های اشاره شده از پارامترهای ماسه استاندارد فیروزکوه با تراکم‌های مختلف (متوسط و متراکم) برای ارزیابی پارامتریک استفاده شد. پنج شتاب‌نگاشت از زلزله‌های واقعی با چهار بیشینه شتاب به مدل عددی اعمال گردید. همچنین اثر سه روباره بررسی شده است. نتایج به‌صورت مقایسه بیشینه قدرمطلق اختلاف جابجایی تاج تونل نسبت به کف (دریفت) در تحلیل‌های مختلف ارایه شده است.

## ۲- روش تحقیق

به قصد ارزیابی تاثیرات عمق روباره و تراکم خاک بر رفتار لرزه‌ای تونل‌ها از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. ابتدا روش تحلیل شامل جزییات مدل، مراحل تحلیل و اطلاعات ورودی مدل‌های رفتاری مصالح و تحریکات لرزه‌ای تشریح می‌گردند. مقطع تونل ۲/۵ خطه ترافیکی استفاده شده در تونل آرش-اسفندیار با ارتفاع حدود ۱۲ متر و عرض حدود ۱۴ متر برای تحلیل‌ها انتخاب شده است که در شکل

رفتار لرزه‌ای تونل‌ها می‌باشند که در سال‌های گذشته بسیار مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته‌اند. آرجیروودیس و پیتیلاکیس به بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های کم‌عمق در خاک رسوبی تحت بار زلزله با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند (Argyroudis & Pitilakis, 2012). تغییرمکان دینامیکی میدان آزاد لایه خاک از آنالیز یک‌بعدی عددی محاسبه و سپس پاسخ تونل در تحلیل شبه استاتیکی با اعمال تغییرمکان میدان آزاد به مدل المان محدود محاسبه گردید و نتایج با روش‌های حل بسته مقایسه گردید. مدول برشی و میرایی بر اساس کرنش برشی به روش خطی معادل در محاسبه پاسخ لحاظ گردید. برای بررسی رفتار لرزه‌ای شتاب نگاشت‌ها با محدوده‌های فرکانسی متفاوت با ضرائب شتاب مقیاس شده و اعمال گردید. در این مطالعه رفتار دو نوع مقطع متداول دایره و مستطیل در سه نوع لایه‌بندی زمین بررسی گردید. سطوح مختلف آسیب لرزه‌ای بصورت نسبت تقاضا به ظرفیت لنگر خمشی مقطع فرض گردید و چهار سطح آسیب پیشنهاد گردید. ونگ و ژانگ به عوامل تاثیرگذار بر خرابی تونل‌های سنگی با استفاده از تحلیل‌های عددی و آزمایش‌های میز لرزان پرداختند (Wang & Zhang, 2013). ژو و همکاران مطالعات عددی گسترده‌ای را برای بررسی مشخصات پاسخ تونل با مقطع مستطیل با روباره کم انجام دادند (Xu, et al., 2019). در تحقیق مذکور از مدل دوبعدی المان محدود اندرکنش خاک و سازه برای تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شد. پارامترهای مختلف زلزله، خاک، سازه، و سطح مشترک خاک-سازه بررسی شدند. پارامترهای مختلفی مانند تغییرات جابجایی‌های نسبی افقی محاسبه و در شرایط مختلف مقایسه شدند. نتایج آنالیزهای عددی نشان داد نیروی اینرسی خاک و همچنین سختی نسبی بین خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه تاثیرگذار بوده است. همچنین برخی از محققین (Ma et al., 2018) و (Sun & Dias, 2019) اثر تنش‌های برجای خاک در رفتار لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای و محمدی حاجی و اردکانی اثر مدل رفتاری و تشکیل مفاصل خمیری پوشش تونل در رفتار لرزه‌ای را بررسی کردند (Mohammadi-Haji & Ardakani, 2020). مدل رفتاری هایپوپلاستیک برای تحلیل عددی تاریخچه زمانی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. بنابر نتایج، انتخاب یک مدل با قابلیت

۱، آورده شده است. تحلیل حساسیت با تغییر شکل و دامنه تحریک ورودی، مشخصات خاک و ارتفاع روباره انجام پذیرفت. جدول پارامترهای متغیرهای تحلیل حساسیت در جدول ۱، آورده شده است.



شکل ۱- مقطع تونل ۲/۵ خطه مورد استفاده

جدول ۱- مقادیر متغیر تحلیل‌های دینامیکی

متغیر	مقادیر	واحد
ارتفاع روباره	۱۰، ۲۰ و ۴۰	m
درصد تراکم خاک (نسبت وزن مخصوص طبیعی به بیشینه)	۵۵ و ۸۰	%
شتاب حداکثر زلزله	۰/۱، ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۶۵	g
در کف مدل		
شکل تحریک	۵ شتاب نگاشت	-

سازه محاسبه می‌شوند. در مورد جزییات مدل‌سازی در ادامه توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱- هندسه مدل و ابعاد مش‌بندی

ابعاد مدل خاک دو طرف تونل در مدل‌سازی عددی باید به‌گونه‌ای باشد تا از تأثیرات مرزها بر روی پاسخ‌ها اجتناب شود. بنابراین عرض توده خاک به اندازه سه برابر عرض مقطع در هر دو جهت انتخاب گردید (Argyroudis & Pitilakis 2012). هندسه مدل عددی در شکل ۲، آورده

### ۳- مدل‌سازی مقطع تونل مورد مطالعه

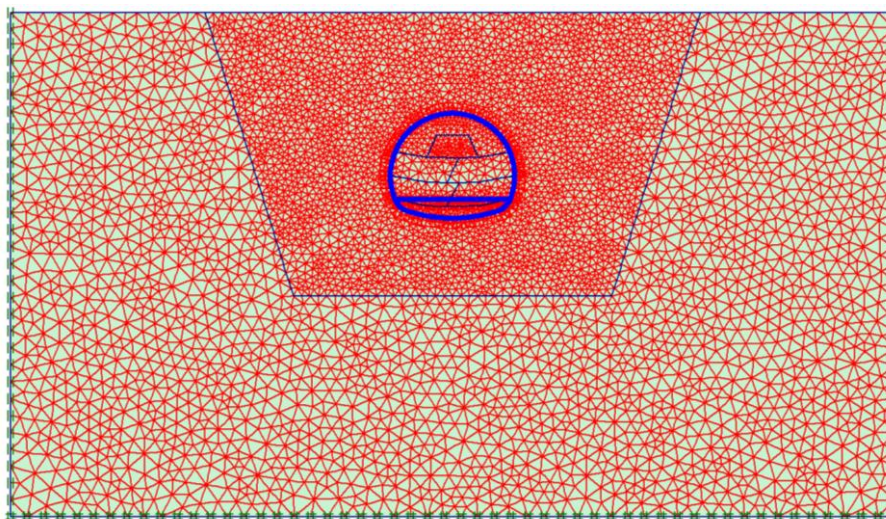
نرم‌افزار مورد استفاده در تحلیل‌های عددی این مقاله، *PLAXIS 2D* است (Brinkgreve, et al., 2016). اساس این نرم‌افزار روش اجزای محدود غیرخطی است. امکان مدل‌سازی اندرکنش المان‌های سازه و خاک، اثرات تنش‌های برجا، شبیه‌سازی ساخت مرحله‌ای و مدل‌های پیشرفته خاک در این نرم‌افزار تعبیه شده است. بارهای اعمال شده به سازه تونل بطور مستقیم از اندرکنش خاک و

$$\Delta l < \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (1)$$

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

در این روابط  $\lambda_{min}$  طول موج در بیشترین فرکانس زلزله است.  $V$  سرعت موج برشی و  $f_{max}$  فرکانس بیشینه زلزله است. سرعت موج برشی از روی مدول برشی محاسبه می‌شود و برای تعیین حداکثر فرکانس زلزله نیز می‌توان از محتوی فرکانسی زلزله استفاده نمود.

شده است. به علاوه انتخاب ابعاد المان‌ها یا مش بندی در دقت و سرعت رسیدن به پاسخ تاثیرگذار است. افزایش تعداد المان‌ها سبب افزایش تلاش محاسباتی و افزایش قابل توجه زمان تحلیل می‌گردد. از سویی دیگر انتخاب المان‌های با ابعاد بزرگ نیز موجب کاهش دقت تحلیل و حتی عدم همگرایی پاسخ می‌شود. در تحلیل‌های دینامیکی انتشار امواج در شبکه المان‌های مدل، ابعاد المان‌ها حداقل کوچکتر از یک‌هشتم تا یک‌دهم طول موج زلزله پیشنهاد شده است (Lysmer & Kuhlemeyer 1969).

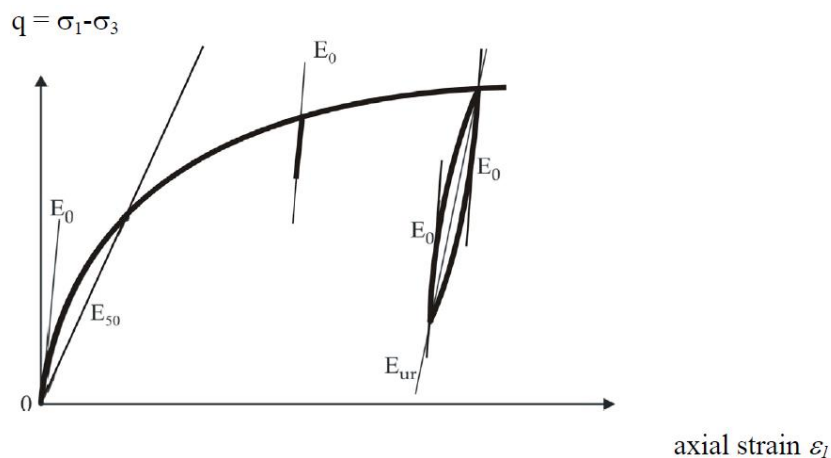


شکل ۲- هندسه مدل عددی برای مدل با روباره ده متر

### ۳-۲- مدل سازی رفتار خاک

انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای مربوطه نقش قابل توجهی در صحت نتایج تحلیل‌های عددی دارند (Yasrobi, et al., 2014). مدل رفتاری باید براساس طبیعت مساله مورد مطالعه انتخاب گردد. در تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی مدل رفتاری دینامیکی با قابلیت در نظر گرفتن میرایی هیستریزیس مصالح خاکی در سیکل‌های رفت و برگشتی، سختی بالای خاک در باربرداری ناشی از حفاری و قابلیت مدل سازی کرنش‌های خمیری دارای اهمیت هستند. بدین منظور مدل رفتاری *HS-small* انتخاب شده است (Brinkgreve, et al., 2016). شکل ۳، به صورت شماتیک رفتار تنش کرنش مدل رفتاری *HS-small* در شبیه سازی آزمایش سه محوری را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۳، قابل مشاهده است این مدل

رفتاری قادر به شبیه سازی تغییرات سختی وابسته به کرنش، اتلاف انرژی در سیکل‌های دینامیکی و سختی بالا در رژیم‌های تنش باربرداری و بارگذاری مجدد است. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به عنوان یک خاک استاندارد بدین منظور انتخاب شده است. تراکم ۵۵ درصد در محدوده تراکم متوسط و تراکم ۸۰ درصد در محدوده تراکم بالا برای تحلیل‌های حساسیت استفاده شدند. پارامترهای مدل رفتاری مربوطه بر اساس مطالعات آزمایشگاهی استاتیکی و دینامیکی پیشین روی ماسه فیروزکوه استخراج شده اند (Mohammadi- Haji & Ardakani, 2020). مشخصه‌های ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و پارامترهای مدل رفتاری منتخب مربوطه به همراه تعریف آنها به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳، آورده شده اند. میرایی مصالح خاکی شامل میرایی هیستریزیس و رایلی باید در تحلیل‌های دینامیکی در نظر گرفته شود.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش مدل رفتاری HS-small در آزمایش سه محوری (Brinkgreve, et al., 2016)

جدول ۲- مشخصه‌های ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

مشخصه	$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$D_{50}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	درصد ریزدانه
ماسه ۱۶۱ فیروزکوه	۲/۶	۰/۹۱	۰/۵۶	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۰۰

جدول ۳- پارامترهای مدل رفتاری HS-small برای ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

واحد	خاک متراکم	خاک سست	نماد	پارامتر
%	۸۰	۵۵	$Dr$	درصد تراکم
$kN/m^3$	۱۵	۱۶	$\gamma$	وزن مخصوص
$kN/m^2$	۰	۰	$c$	چسبندگی
degree	۳۵	۳۱	$\phi$	زاویه اصطکاک
degree	۶	۴	$\psi$	زاویه اتساع
$kN/m^2$	۱۰۰	۱۰۰	$P_{ref}$	فشار مرجع
-	۰/۲	۰/۲	$\nu$	نسبت پواسن
$kN/m^2$	$۳/۷ \times 10^4$	$۳ \times 10^4$	$E_{50}^{ref}$	مدول یانگ
$kN/m^2$	$۱/۱ \times 10^5$	$۹ \times 10^4$	$E_{ur}^{ref}$	مدول باربرداری - بارگذاری مجدد
-	۰/۵	۰/۵	$m$	توان سختی وابسته به تنش
$kN/m^2$	$۷/۴ \times 10^4$	$۶/۴ \times 10^4$	$G_0$	مدول برشی اولیه
-	$۱ \times 10^4$	$۳ \times 10^4$	$\gamma_{0.7}$	کرنش برشی در مدول برشی $0.7 G_0$

خطی فرض شدند. هرچند در هنگام زلزله ممکن است پوشش تونل وارد مرحله غیرخطی گردد ولیکن در این مقاله به جهت سادگی در تفسیر نتایج و مقایسه ساده‌تر بین حالات مختلف تحلیل از مدل الاستیک خطی برای پوشش استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات پوشش موقت

نماد	Th	Ec	v
پارامتر	ضخامت	مدول الاستیسیته	پواسن
واحد	m	kN/m <sup>2</sup>	-
مقدار	۰/۳	۲۳۸۷۵۲	۰/۲

جدول ۵- مشخصات پوشش دائم

نماد	Th	Ec	v
پارامتر	ضخامت	مدول الاستیسیته	پواسن
واحد	m	kN/m <sup>2</sup>	-
مقدار	۰/۷ - ۰/۵	۲۸۲۴۹۵	۰/۲

### ۴-۳- مرزهای مدل

در تحلیل مراحل استاتیکی مرز پائین در دو جهت قائم و افقی و مرزهای کناری در جهت افقی بسته شدند تا شرایط کرنش صفر برای توده خاک بی نهایت در نقاط مرزی مدل به‌درستی شبیه‌سازی گردد. در زمان رخداد زلزله امواج حاصل از آن به سازه برخورد کرده و پس از انعکاس از سازه به زمین برگشته و به تدریج با دور شدن از سازه دامنه و انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد. در تحلیل‌های دینامیکی با توجه به محدودیت ابعاد هندسی مدل باید تمهیداتی برای مرزهای اطراف در نظر گرفته شود تا ترکیب امواج ورودی زلزله و امواج بازگشتی از سازه هنگامی که به مرزها مدل می‌رسند به درون مدل برنگردند و ایجاد تداخل در ارتعاش نکنند. در تحلیل‌های تاریخچه زمانی سیستم مرز در دو جهت افقی و قائم بسته شدند و شرایط مرزی میدان آزاد به مرزهای کناری اختصاص داده شد (Brinkgreve, et al., 2016).

### ۴-۵- مدل‌سازی مراحل ساخت

در روش جدید اتریسی مقطع به بخش‌های کوچک‌تری در عرض و طول تونل تقسیم می‌شود تا حداکثر مقاومت توده زمین اطراف تونل در برابر فشار سربار تجهیز شود (Leca & Clough, 1992). پیکربندی مراحل ساخت به عوامل

میرایی هیستریزس بطور طبیعی در مدل رفتاری غیرخطی HS-small در نظر گرفته می‌شود، ولیکن میرایی ویسکوز یا وابسته به سرعت نیز باید در نظر گرفته شود. میرایی ویسکوز رابلی می‌تواند به شکل ترکیب خطی از ماتریس جرم و ماتریس سختی اولیه‌ی سازه در نظر گرفته شود (Clough & Penzien 1993):

$$[c] = \alpha[m] + \beta[k] \quad (۳)$$

در این رابطه [c] ماتریس میرایی، [m] ماتریس جرم و [k] ماتریس سختی است.  $\alpha$  و  $\beta$  نیز ضرایب ثابت میرایی متناسب با جرم و سختی می‌باشند.

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{\omega_1+\omega_2} \quad (۴)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1+\omega_2} \quad (۵)$$

$\xi$  میرایی بحرانی است که برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.  $\omega_n$  فرکانس زاویه‌ای مدهای nام لایه خاک بر اساس معادله زیر قابل محاسبه است (Kramer, 1996):

$$\omega_n = \left[ \frac{(2n-1)\pi}{2H} \right] \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad (۶)$$

که در آن  $G_0$  مدول برشی اولیه،  $\rho$  چگالی خاک و H ارتفاع مدل عددی است.

### ۳-۳- مشخصات مصالح پوشش

در تونل‌های ساخته شده به روش اتریسی بطور معمول دو پوشش موقت و دائم اجرا می‌شود. با توجه به مشخصات پوشش موقت، این نوع پوشش تحمل مقابله در برابر بارهای دائمی و لرزه‌ای را ندارد و در طراحی برای بارهای اشاره شده در نظر گرفته نمی‌شود. شایان ذکر است اثر توالی اجرای پوشش موقت و دائم در مدل‌سازی قبل از اعمال زلزله در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که بعد از هر مرحله حفاری، پوشش موقت ۳۰ سانتی‌متری به صورت المان‌های صفحه‌ای خمشی فعال می‌گردد و در انتهای تحلیل ساخت مرحله‌ای خواص پوشش موقت به دائم تبدیل می‌شود. پوشش دائم در بخش‌های مختلف بین ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر بوده است. در جدول ۴ و جدول ۵، به ترتیب مشخصات پوشش موقت و دائم ذکر شده است. در این تحقیق مشخصات المان‌های پوشش موقت و دائم بصورت الاستیک و

در شکل ۵، نشان داده شده است. با اعمال حداکثر شتاب بین  $0/1g$  تا  $0/65g$  در کف مدل میزان محدوده شتاب در سطح زمین بین  $0/13g$  تا  $4g$  در مدل‌های مختلف به دست آمد.

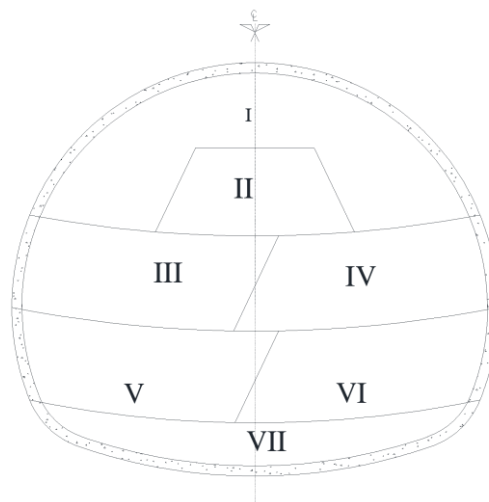
جدول ۶- مشخصات زلزله‌های اعمالی به مدل‌ها

رکورد زلزله	ایستگاه	بیشینه شتاب زمین (g)
1940 El Centro	Imperial Valley	0/31
1989 Loma Prieta	Gilroy Array #1	0/41
1978 Tabas	9101 Tabas	0/84
1990 Manjil	Abhar	0/21
1983 Trinidad	-	0/19

#### ۴- صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی

به منظور صحت‌سنجی نحوه مدل‌سازی، از نتایج ابزارسنجی انجام شده در پروژه تونل زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش استفاده شده است. مقطع تونل و مراحل اجرا دقیقاً مشابه مقطع مورد بررسی در این مقاله است. ارتفاع روباره در این بخش از پروژه حدود  $11/4$  متر بوده است. همچنین پارامترهای ورودی مدل رفتاری بر اساس نتایج مطالعات ژئوتکنیک پروژه استخراج و در مدل‌سازی عددی استفاده شده است (جدول ۷). قابل توجه است که از نظر اصولی دو پارامتر سختی برشی اولیه و کرنش برشی متناظر با  $70\%$  سختی برشی اولیه که در جدول ۷، آورده شده است، پارامترهای رفتار دینامیکی مصالح هستند و در صحت‌سنجی کنونی عملاً تاثیری ندارند. بطور کلی نمودار نشست زمین محاسبه شده همان‌طور که در شکل ۶، دیده می‌شود از نظر مقادیر و شکل نمودار تا حد زیادی با نتایج ابزار دقیق انطباق دارد.

مختلفی مانند جنس زمین، ارتفاع روباره و حساسیت سازه‌های سطحی وابسته است. در این تحقیق مراحل ساخت شامل حفاری و نصب پوشش موقت تونل  $2/5$  خطه تونل آرش-اسفندیار بدین منظور انتخاب گردید (Golshani, et al., 2018). مراحل مختلف حفاری به ترتیب در شکل ۴، شماره‌گذاری شده‌اند. هر مرحله شامل حفاری ناحیه نمایش داده شده و سپس اجرای پوشش موقت در آن ناحیه است.

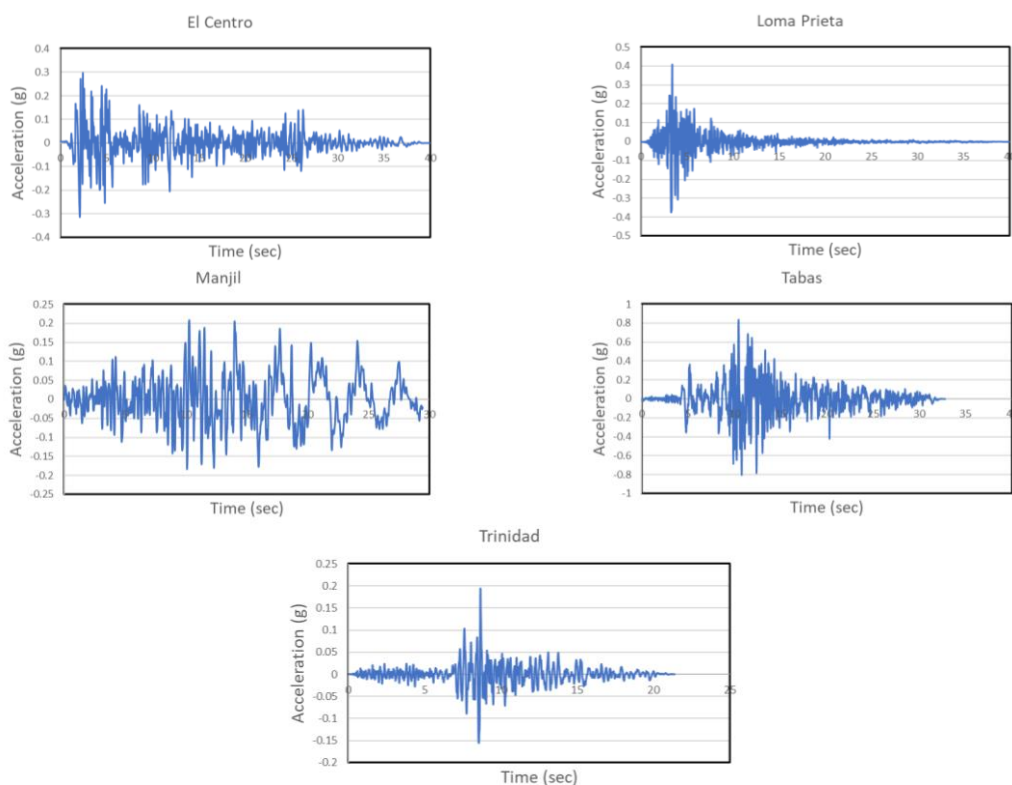


شکل ۴- مراحل ساخت تونل دوخطه آرش-اسفندیار

#### ۳-۶- تحریکات ورودی

در تحلیل تاریخچه زمانی کامل، زلزله‌های ۱۹۴۰ السنترو، ۱۹۸۹ لوماپریتا، ۱۹۷۸ طیس، ۱۹۹۰ منجیل و ۱۹۸۳ تیرینیداد به عنوان زلزله ورودی استفاده شدند. شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده قبل از اعمال تصحیح شدند. مدل‌های المان محدود تحت اثر شتاب‌نگاشت‌هایی با مقیاس شتاب مختلف قرار گرفتند. مشخصات ورودی زلزله‌ها در جدول ۶، آورده شده است. همچنین تاریخچه زمانی شتاب‌ها

بررسی تاثیرات تراکم و عمق روباره خاک در پاسخ لرزه‌ای سیستم خاک و تونل...، سینا مجیدیان، ص ۱۸۷-۲۰۱



شکل ۵- تحریکات ورودی اعمالی به مدل عددی

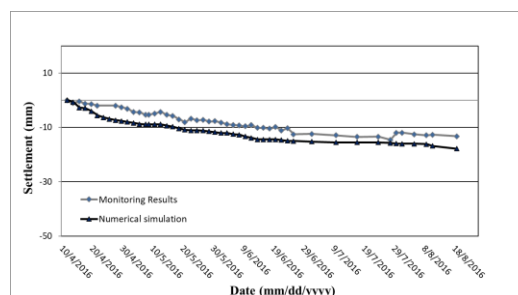
جدول ۷- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک پروژه زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش

مقدار	واحد	پارامتر	نماد	لایه
۳۰	درجه	زاویه اصطکاک داخلی	$\Phi$	لایه اول - ضخامت ۳/۵ متر مدل رفتاری HS
۰/۱۵	$\text{kN/m}^2$	چسبندگی	C	
۱۷	$\text{kN/m}^3$	وزن مخصوص طبیعی	$\gamma$	
۰/۲	-	نسبت پواسن بارگذاری/ باربرداری	$\nu$	
۵۰۰۰۰	$\text{kN/m}^2$	مدول یانگ	$E_{50}$	
۱۵۰۰۰۰	$\text{kN/m}^2$	مدول باربرداری	$E_{ur}$	
۰	درجه	زاویه اتساع	$\Psi$	
۳۷	درجه	زاویه اصطکاک داخلی	$\Phi$	لایه دوم - از ۳/۵ متر به بعد مدل رفتاری HS-SMALL
۰/۳۵	$\text{kN/m}^2$	چسبندگی	C	
۱۸	$\text{kN/m}^3$	وزن مخصوص طبیعی	$\gamma$	
۰/۲	-	نسبت پواسن بارگذاری/ باربرداری	$\nu$	
۱۰۰۰۰۰	$\text{kN/m}^2$	مدول باربرداری	$E_{50}$	
۳۰۰۰۰۰	$\text{kN/m}^2$	سختی باربرداری	$E_{ur}$	
۰/۵	-	توان سختی سطح تنش	m	
۷	درجه	زاویه اتساع	$\Psi$	
۹۰۰۰۰۰	$\text{kN/m}^2$	مدول برشی اولیه	$G_0$	
۰/۰۰۰۳	-	کرنش برشی در مدول برشی $0.7 G_0$	$\gamma_{0.7}$	

افزایش می‌یابد و سپس با افزایش ارتفاع از ۲۰ به ۴۰ متر میزان دریافت کاهش می‌یابد. این رفتار برای دریافت‌های میانگین و حداکثر بین تحریکات مختلف مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت به‌طور کلی افزایش ارتفاع روباره به جز در مدل با سربار ۴۰ متر، در خاک با تراکم متوسط منجر به افزایش میزان دریافت می‌شود. در تراکم بالاتر رفتار متفاوت خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۸، قابل ملاحظه است بطور کلی، افزایش سربار موجب کاهش میزان دریافت بیشینه (در منحنی‌های حداکثر و میانگین) می‌شود. هر چند در مقادیر شتاب‌های پایین که میزان پاسخ‌ها بسیار نزدیک هستند رفتار متفاوت می‌باشد و دریافت مربوط به سربار ۴۰ متر در شتاب بیشینه کمتر از  $0.3g$  بیش از سربارهای دیگر است.

شکل منحنی‌های دریافت-شتاب زمین نیز در همه نمودارها روند یکسانی دارند. بدین صورت که منحنی‌ها دارای سه بخش متفاوت هستند. در شتاب‌های در حدود  $0.2g$  و پائین‌تر شیب منحنی ملایم می‌باشد و سپس با افزایش شتاب، شیب منحنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و دوباره در شتاب‌های بالای  $0.35g$  شیب کاهش می‌یابد.

در شتاب‌های پایین به دلیل سختی بالای خاک، تغییرشکل میدان آزاد شبه استاتیکی کوچک است و در نتیجه دریافت اعمالی به سازه تونل کوچک می‌باشد. با افزایش سطح تحریک، کرنش برشی خاک افزایش یافته و با توجه به توانایی مدل رفتاری خاک استفاده شده، با افزایش سطح کرنش سختی خاک کاهش می‌یابد و در پی آن میزان افزایش جابجایی شبه استاتیکی زمین با افزایش شتاب افزایش می‌یابد. کاهش دوباره شیب بخش سوم منحنی‌ها می‌تواند بدلیل ایجاد گوه‌ها و بلوک‌های گسیختگی پیرامون حفره تونل باشد در شتاب‌های بالا باشد. بدین صورت که گوه‌های گسیختگی با توجه به نوع رفتار خمیری در کرنش‌های بالا به‌عنوان جداساز ارتعاش موجب کاهش انتقال موجب تنش به سازه تونل می‌گردند.



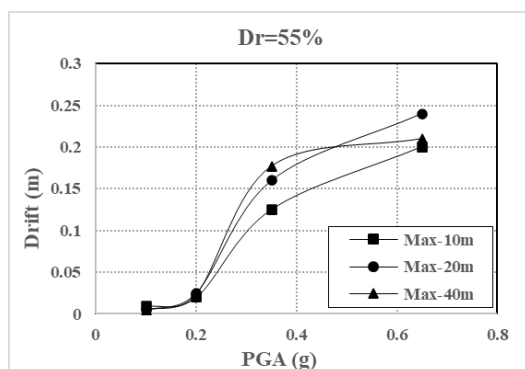
شکل ۶- نمودار نشست زمین ناشی از ساخت تونل ۲/۵ خطه زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش از نتایج ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی

## ۵- نتایج و تفسیر

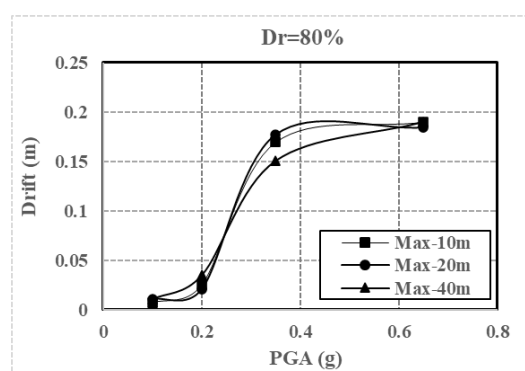
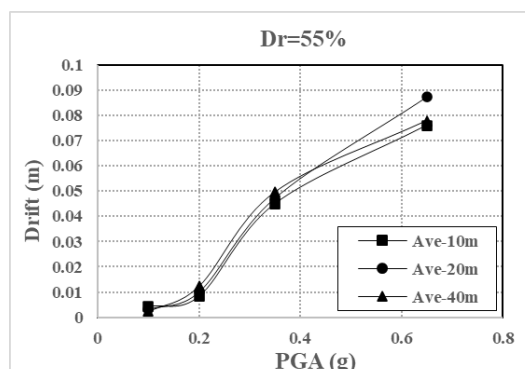
همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد آنالیزهای حساسیت انجام شده برای شرایط مختلف سربار، تراکم خاک و مقیاس‌های مختلف شتابنگاشت است. بدین منظور بیشینه دریافت تونل حاصل از هر تحلیل دینامیکی استخراج شد و میانگین و بیشینه دریافت بین نتایج با پارامترهای ورودی یکسان (تراکم، ارتفاع روباره و شتاب حداکثر) محاسبه شد. به‌طور مثال میانگین و بیشینه دریافت برای مدل با ارتفاع روباره ۱۰ متر، درصد تراکم ۵۵ درصد و شتاب حداکثر  $0.1g$  با شکل تحریکات ورودی متفاوت محاسبه و ثبت گردید و برای مقایسه با مدل‌های دیگر و ارزیابی رفتار مورد استفاده قرارگرفت.

### ۵-۱- اثر ارتفاع روباره بر عملکرد تونل

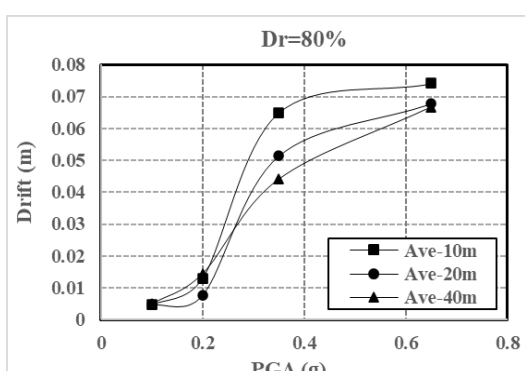
برای بررسی اثر ارتفاع روباره نمودارهای میانگین و حداکثر دریافت بیشینه هنگام تحلیل دینامیکی مربوط به ارتفاع روباره مختلف در هر دو تراکم خاک موردنظر قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۷، منحنی‌های پاسخ بیشینه را در سه ارتفاع روباره ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متر برای خاک با تراکم ۵۵ درصد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۷، مشخص است مقادیر دریافت (تا میزان ۳۲ درصد) در بازه شتاب  $0.35g$  و کمتر با افزایش میزان ارتفاع روباره برای هر دو پاسخ میانگین و بیشینه افزایش می‌یابند درحالی‌که در شتاب‌های بیشتر با افزایش ارتفاع روباره از ۱۰ به ۲۰ متر دریافت



شکل ۷- نمودارهای بیشینه دریفت برای ارتفاع‌های روباره مختلف برای تراکم ۵۵٪



شکل ۸- نمودارهای بیشینه دریفت برای ارتفاع‌های روباره مختلف برای تراکم ۸۰٪



دریفت می‌شود و در تونل با روباره ۴۰ متری روند متفاوت می‌باشد و تونل با سربار ۲۰ متری نقش ناحیه انتقالی دارد که شامل ترکیب هر دو رفتار است. توضیح این روندها را می‌توان ناشی از مکانیزم تجهیز نیروهای لرزه‌ای در سازه‌های زیرزمینی توجیح کرد. در سازه‌های زیرزمینی برخلاف سازه‌های روسطحی، تغییر مکان شبه استاتیک میدان آزاد زمین موجب تجهیز نیرو در پوشش تونل می‌گردد. این مکانیزم مبنای روش‌های تحلیل شبه استاتیکی ارایه شده برای طراحی‌های عملی می‌باشد.

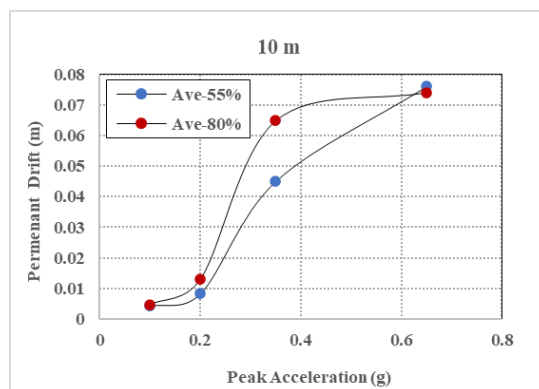
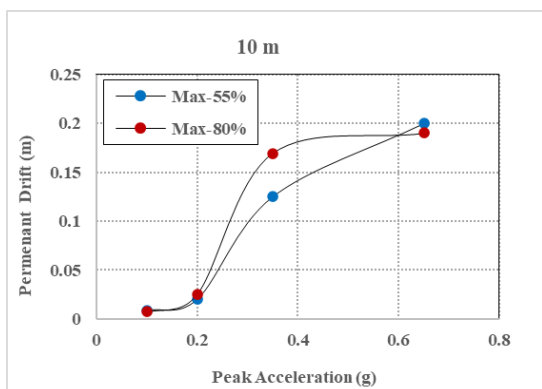
با توجه به شکل مود ارتعاشی زمین در هنگام زلزله می‌توان نتیجه گرفت که شیب شکل ارتعاش تغییرمکان‌های شبه استاتیکی در اعماق بیشتر است و در نتیجه هرچه سختی بیشتر باشد، دریفت کمتر خواهد بود. تراکم بیشتر منجر به سختی بیشتر می‌گردد. در اعماق سطحی اثر تغییرمکان شبه استاتیکی کاهش می‌یابد و اثر نیروهای اینرسی توده خاک پشت پوشش افزایش می‌یابد. در اعماق سطحی با توجه به شکل مود ارتعاش غیرخطی کرنش برشی

## ۵-۲- اثر تراکم خاک بر عملکرد تونل

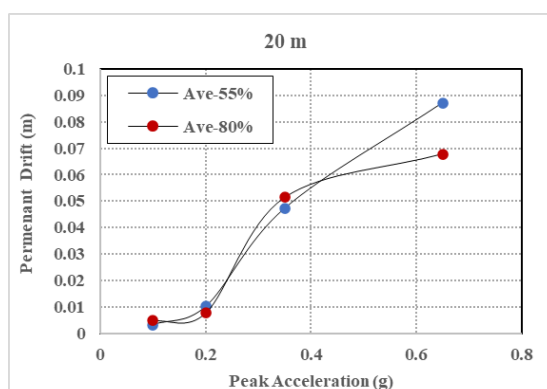
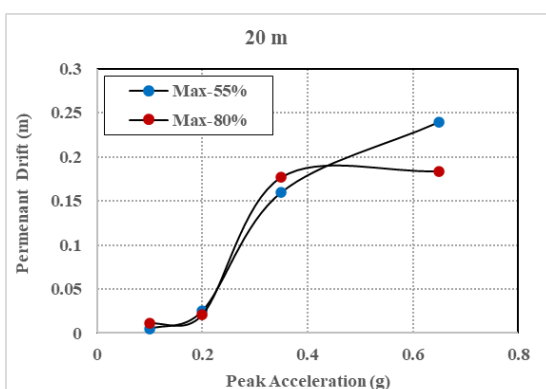
در این قسمت اثر تراکم برای هر یک از سه سربار مختلف به‌طور جداگانه بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۹، مشاهده می‌شود با افزایش تراکم خاک و با سربار ۱۰ متر در هر دو منحنی حداکثر و میانگین پاسخ‌ها تقریباً در تمام سطوح شتاب، میزان دریفت افزایش یافته است. شایان ذکر است در شتاب ۰/۶۵g میزان پاسخ در تراکم بیشتر کمی کمتر از پاسخ در تراکم ۵۵٪ است. با ارزیابی شکل ۱۰، روند افزایش دریفت با افزایش تراکم در مدل با سربار ۲۰ متر نیز مشاهده می‌شود، ولیکن این روند تنها در سه سطح شتاب اولیه برقرار است و در شتاب ۰/۶۵g افزایش تراکم منجر به کاهش مقدار دریفت شده است. در تونل با سربار ۴۰ متری، با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که در محدوده شتاب‌های کم تاثیر تراکم تقریباً ناچیز است و پس از آن، با افزایش تراکم کاهش دریفت اتفاق می‌افتد. به‌طور خلاصه در تونل با روباره ۱۰ متری افزایش تراکم منجر به افزایش

استاتیکی مرسوم که مبنای آنها اعمال تغییر مکان شبه استاتیکی میدان آزاد باشد، دارای خطا خواهد بود و روش‌های مورد استفاده در طراحی دیوارهای حایل صلب در هنگام زلزله که از مبنای اینرسی خاک استفاده می‌کنند، منطقی‌تر به نظر می‌رسند.

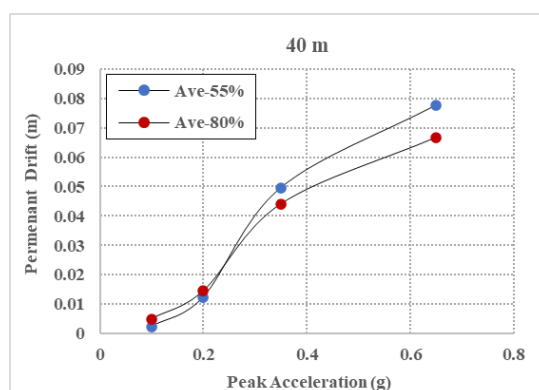
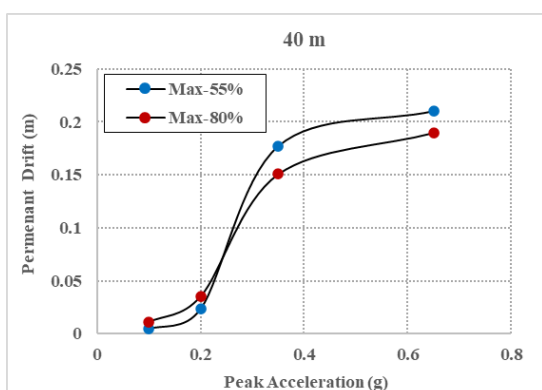
کاهش می‌باید ولی افزایش شتاب نسبت به سنگ بستر موجب افزایش نیروهای اینرسی می‌شود. شایان ذکر است که با افزایش تراکم بدلیل افزایش جرم مخصوص، نیروهای اینرسی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد برای تحلیل و طراحی تونل‌ها در اعماق سطحی استفاده از روش‌های شبه



شکل ۹- نمودارهای بیشینه دریفت برای تراکم‌های ۵۵٪ و ۸۰٪ برای سربار ۱۰ متر



شکل ۱۰- نمودارهای بیشینه دریفت برای تراکم‌های ۵۵٪ و ۸۰٪ برای سربار ۲۰ متر



شکل ۱۱- نمودارهای بیشینه دریفت برای تراکم‌های ۵۵٪ و ۸۰٪ برای سربار ۲۰ متر

کمتر از  $0.2g$  افزایش می‌یابد و در شتاب‌های کمتر از  $0.4g$  دوباره کاهش می‌یابد. علت تغییر شیب اول ناشی از کاهش سختی خاک و افزایش تغییرمکان میدان آزاد خواهد بود، در حالی که کاهش شیب دوباره در شتاب‌های بالا می‌تواند به دلیل ایجاد گوه‌های گسیختگی در تغییرمکان‌های زیاد و عدم انتقال موج تنش به پوشش تونل باشد.

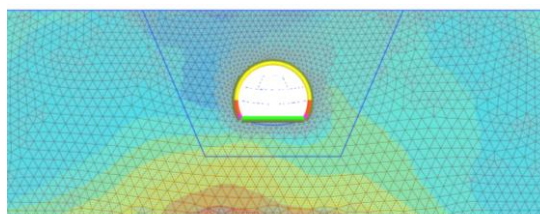
افزایش ارتفاع روباره از ۱۰ متر به ۲۰ متر در خاک با تراکم متوسط منجر به افزایش میزان دررفت می‌شود، در حالی که افزایش ارتفاع از ۲۰ به ۴۰ متر در تغییر مقدار دررفت بی تاثیر است. در تراکم  $80\%$  افزایش سربار به‌خصوص در شتاب‌های بالا موجب کاهش دررفت می‌شود.

با افزایش تراکم خاک در سربار ۱۰ متر به جز در شتاب  $0.65g$  دررفت افزایش می‌یابد. در سربار ۲۰ متر میزان افزایش دررفت نسبت به افزایش تراکم کاهش می‌یابد و در شتاب  $0.65g$  مقدار دررفت مدل با تراکم بالاتر بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مدل با خاک تراکم  $55\%$  بوده است. در تونل با سربار ۴۰ متری در محدوده شتاب‌های کم تاثیر تراکم تقریباً ناچیز است و پس از آن، با افزایش تراکم کاهش دررفت اتفاق می‌افتد.

علت تغییر رفتار ناشی از پیچیدگی اندرکنش دینامیکی خاک-سازه ناشی از تاثیرات رفتار غیرخطی خاک، نیروهای اینرسی توده خاک هنگام زلزله و جابجایی‌های شبه استاتیکی توده زمین می‌باشد.

با استفاده از نتایج نمودارها و بررسی اثرات تراکم و سربار، به نظر می‌رسد که برای طراحی سازه‌های مدفون سطحی روش‌های مورد استفاده در طراحی دیوارهای حایل صلب در هنگام زلزله که از مبانی اینرسی خاک استفاده می‌کنند، منطقی‌تر به نظر می‌رسند. البته این مطلب نیاز به بررسی دقیق دارد.

برای توضیح بیشتر همان‌طور که در کنتور جابجایی افقی لرزه‌ای شکل ۱۲، مربوط به عمق کم قایل مشاهده است، تغییر مکان توده خاک اطراف تونل در ناحیه‌ای ناشی از اینرسی زلزله ثابت می‌باشد و در نتیجه نیروی وارده ناشی از تغییر شکل میدان آزاد نیست.



شکل ۱۲- جابجایی افقی لرزه‌ای تونل کم عمق

## ۶- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش عددی المان محدود، اثرات تراکم خاک و عمق سربار در رفتار لرزه‌ای یک مقطع تونل نعل اسبی در خاک ماسه‌ای بررسی گردید. رفتار غیر خطی خاک و مراحل ساخت نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. به منظور اطمینان از نحوه مدل‌سازی از نتایج ابزارسنجی مقطع مشابه زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش استفاده گردید و نشست حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر مشابه واقعی مقایسه شد. انطباق بالایی بین نمودار نشست‌های حاصل از تحلیل عددی و ابزارسنجی دیده شد. بیشینه دررفت حاصل از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی به عنوان پاسخ استخراج گردید. تحلیل‌های حساسیت برای ماسه فیروزکوه با دو تراکم، سه ارتفاع روباره، پنج شتاب‌نگاشت واقعی و چهار شتاب بیشینه زمین انجام پذیرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

نمودارهای دررفت بر حسب شتاب بیشینه دارای سه بخش تقریباً خطی است. شیب منحنی‌ها در شتاب‌های

## ۷- مراجع

Argyroudis, S. and K. Pitilakis (2012). Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 35: 1-12.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., & Bonnier, P. G. (2016). *PLAXIS 2016*. "PLAXIS bv, the Netherlands".

- Clough, R. W. and J. Penzien (1993). *Dynamics of Structures, 2nd edon*. New York: McGraw-Hill.
- Golshani, A., Varnusefaderani, M. G., & Majidian, S. (2018). *Comparing Field Displacement History with Numerical Results to Estimate Geotechnical Parameters: Case Study of Arash-Esfandiar-Niayesh under Passing Tunnel, 2.5 Traffic Lane Tunnel, Tehran, Iran*. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 12(9): 578-587.
- Hu, X., Zhou, Z., Chen, H., & Ren, Y. (2020). *Seismic fragility analysis of tunnels with different buried depths in a soft soil*. *Sustainability*, 12(3), 892.
- Jiang, Y., Wang, C., & Zhao, X. (2010). *Damage assessment of tunnels caused by the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake using Hayashi's quantification theory type II*. *Natural Hazards* 53(3): 425-441.
- Komak Panah, A. and S. Majidian (2017 ). *Non-linear 2DOF system for efficient seismic analysis of vertical soil-nailed walls*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2 (11): 1301-1325.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*, Pearson Education India.
- Leca, E. and G. W. Clough (1992). *Preliminary design for NATM tunnel support in soil*. *Journal of geotechnical engineering* 118(4): 558-575.
- Lysmer J. and R. L. Kuhlemeyer (1969). *Finite dynamic model for infinite media*. *Journal of the engineering mechanics division* 95(4): 859-877.
- Ma, C., Lu, D., Du, X., & Qi, C. (2018). *Effect of buried depth on seismic response of rectangular underground structures considering the influence of ground loss*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 106: 278-297.
- Majidian, S. and A. K. Panah (2020). *"Hybrid experimental and numerical approach for assessment of non-linear dynamic behavior of soil-nailed retaining walls."* *International Journal of Non-Linear Mechanics* 123: 103476.
- Mohammadi-Haji, B. and A. Ardakani (2020). *Calibration of a Hypoplastic Constitutive Model with Elastic Strain Range for Firoozkuh Sand*. *Geotechnical and Geological Engineering* 38(5): 5279-5293.
- Mohammadi-Haji, B. and A. Ardakani (2020). *Performance-based analysis of tunnels under seismic events with nonlinear features of soil mass and lining*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 134: 106158.
- Sun, Q. and D. Dias (2019). *Seismic behavior of circular tunnels: Influence of the initial stress state*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 126: 105808.
- Wang, Z. and Z. Zhang (2013). *Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake*. *Soil Dynamics and Earthquake*

*Engineering* 45: 45-55.

Xu, Z., Du, X., Xu, C., Hao, H., Bi, K., & Jiang, J. (2019). Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 116: 242-252.

Yasrobi, S., Majidian, S., & Teimourzadegan, S. (2014). Effects of soil modelling on prediction of tunnelling performance constructed by SEM case study of Niayesh Tunnel. *TAC2014, Toronto*.

Zolghadr, E., Pasdarpour, M., Majidian, S., & Golshani, A. (2013). Numerical modeling of NATM urban tunnels and monitoring-Case study of Niayesh tunnel. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

## Assessment of the effects of soil compaction and overburden on seismic response of soil-tunnel system using numerical modeling

S. Majidian<sup>1\*</sup>

1- Assistant professor; Department of civil engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, sina.majidian@mazust.ac.ir

Received: 8 May 2022; Accepted: 24 Jul 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.11897.1453

---

### Keywords

Tunnel  
NATM  
Constitutive model  
Seismic behavior  
Numerical simulation

---

### Extended Abstract

#### Summary

The growth of urban areas demands the construction of tunnels to house underground transportation infrastructures. If a tunnel is constructed in an earthquake-prone region, an earthquake-resistant design of the tunnel is of major concern. In this research, the effects of soil compaction and overburden

on the seismic behavior of a horse-shoe tunnel have been assessed. Finite element simulation considering incorporating a hardening soil model with small strain and construction stages has been employed. A series of time-history analyses applying five real earthquakes and 4 maximum peak accelerations to different models have been performed. The results show that soil surcharge and compaction have salient effects on the seismic behavior of the selected tunnel.

### Introduction

Fully dynamic analysis that incorporates a nonlinear constitutive model for the soil is the most reliable approach to investigate the seismic behavior of tunnels. Many researches have performed fully dynamic soil-rock interaction analyses to evaluate the influences of diverse parameters on underground structures. In this paper, the soil compaction of Firuzkooch sand and soil overburden have been selected as variables in this paper and their effects on the seismic behavior of a NATM section have been studied.

### Methodology and Approaches

Plane-strain analysis using PLAXIS software that features 15-node elements for soil medium and slender structural elements for linings with a significant bending rigidity and an axial stiffness has been used to simulate the soil-tunnel seismic interactions. Following each stage of excavation, initial lining has been constructed and, after completion of excavation, the final lining has been installed. Real data of settlement for the same tunnel section has been used for six different models including two soil compactions and three soil overburdens that have been built and subjected to five real earthquakes and 4 maximum peak acceleration. Maximum drifts of tunnels during seismic excitation have been extracted and used as the demand parameter.

### Results and Conclusions

The results of this paper show that the soil compaction and soil overburden have salient effects of the seismic behavior of a tunnel lining. However, the results are complicated. The reasons for this lie in the soil nonlinear behavior, the pseudo-static deformation of free-field, and inertia forces of soil acting on the lining during excitation. Overall, the diagrams of drift per peak ground acceleration show analogous trend, which comprises of three different parts. Each part and relevant turning points reveal a meaningful performance of the tunnel section. It seems that whereas pseudo-static deformation of soil layer governs the seismic performance of deep tunnels, the inertia forces of soil around the tunnel section for shallow tunnels proves more effective.

---