

مطالعه رفتار لرزه‌ای تونل‌های متقاطع دایره‌ای شکل تحت شرایط مختلف

مقاله علمی - پژوهشی

الهام صالحی مهربان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
مریم یزدی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
علیرضا صادق آبادی، دانش آموخته دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: yazdi_ma@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۲۸۳-۳۰۶

چکیده

با افزایش جمعیت و توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل شهری، روند ساخت هر چه بیشتر مترو شهری و به تبع آن تقاطع تونل‌ها وجود دارد. مقاله حاضر به بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های متقاطع دایره‌ای شکل (مترو) در نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D پرداخته است. متغیرهای این تحقیق شامل فواصل بین دو تونل، عمق قرارگیری تونل‌ها، زوایای بین تونل‌ها و نوع خاک بوده است. مدل‌های مختلف با مقایسه میزان جابه‌جایی کل، نشست و تنش، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در نهایت با ارزیابی نتایج مشاهده شد که با کاهش عمق قرارگیری تونل‌ها میزان جابه‌جایی‌ها افزایش یافته و همچنین با افزایش زاویه بین تونل‌ها از میزان جابه‌جایی کاسته شده است. نوع خاک در تحلیل‌های لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با کاهش مدول الاستیسیته (E) و ریزتر شدن دانه‌های خاک تاثیر امواج بر خاک و سازه به مقدار چشمگیری افزایش یافته است. نتایج بیانگر این است که میزان عمق قرارگیری تونل‌ها تا ۱۹٪، فاصله بین دو تونل تا ۱۹/۵٪ و نوع خاک تا ۳۷٪ و زاویه بین تونل‌ها تا ۶۷٪ در میزان جابه‌جایی کل موثر بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: تونل‌های متقاطع غیرهمسطح، تونل دایره‌ای، FLAC3D، بار دینامیکی

۱-مقدمه

با توجه به اینکه تا به حال تحقیق چندانی در خصوص بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های متقاطع صورت نگرفته رفتار این تونل‌ها در شرایط لرزه‌ای می‌تواند یک نگرانی برای مهندسان طراح باشد. هدف تحقیق حاضر مطالعه چگونگی رفتار تونل‌های متقاطع با مقطع دایره‌ای تحت بار لرزه‌ای در شرایط مختلف تقاطع می‌باشد.

طراحی هر یک از فضاهای تونل‌های شهری مستلزم دسترسی به داده‌های مناسب و به کارگیری تمهیدات ویژه است. در هر مورد طراح باید ضمن آگاهی دقیق از شرایط زمین، ابتدا در جهت بهبود کیفیت مصالحی که قرار است تونل در آن حفر شود، اقدام نماید. به نظر می‌رسد که مهمترین عامل در طراحی تونل، یا هر فضای زیرزمینی دیگر، تامین پایداری آن است. قرارگیری این گونه سازه‌ها در میان مصالح طبیعی، یعنی سنگ و خاک، باعث شده است که شرایط زمین‌شناسی نقش اصلی را در پایداری ایفا نمایند. این‌گونه سازه‌ها باید در زمینی مطمئن و مقاوم ایجاد شوند، ولی شرایط درون زمین بسیار متغیر است و برخلاف سطح زمین، امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن وجود ندارد.

۲-پیشینه تحقیق

در تحقیقی که بر پایه راه حل نیمه تحلیلی بهبود یافته برای پاسخ مکانیکی طولی تونل‌های عبوری از گسل‌های فعال با در نظر گرفتن اندرکنش‌های غیرخطی خاک-تونل و اثرات برشی

مانند در ناحیه شکستگی گسل ظاهر می‌شود. تونل در امتداد محور طولی تونل یک تغییر شکل S شکل کشیده را تجربه می‌کند و تغییرات جابجایی آسترهای مقطعی در ناحیه برشی قابل توجه است. به صورت عرضی، آسترها یک الگوی تغییر شکل بیضی شکل نعل اسبی را نشان می‌دهند. تحت نایجایی گسل معمولی، تونل در ناحیه برشی شکست ترکیبی لنگر خمشی و نیروی برشی را تجربه می‌کند. اما شکست فشاری پوشش‌های دور از گسل با ترک‌های طولی روی تونل که در معرض خطای معمولی قرار دارند رخ می‌دهد. (Tianqiang Wang et al, 2022). مدل‌سازی فیزیکی تونل‌های کم عمق D شکل برای درک رفتار تونل زمانیکه در معرض نرخ بالای ضربه (پرتابه) قرار می‌گیرند نشان داده که نقش حیاتی عمق پوشش در تنش‌ها و تغییر شکل‌ها بدین صورت است که عمق پوشش کمتر موجب تغییر شکل بیشتر می‌شود، همچنین تاثیر شکل تونل D شکل بیشتر از تونل دایره ای می‌باشد. (Rohan Rmesh Dhamne et al, 2021) در مطالعات دیگری با موضوع پاسخ لرزه‌ای تونل در نزدیکی ناحیه شکستگی گسل تحت امواج SV بود دریافت شد که گسل غیرعامل به طور قابل توجه توزیع تنش حلقه سطوح داخلی و خارجی تونل را تغییر می‌دهد و در ناحیه گسل، تنش حلقه داخلی بیشتر از خارجی است. (Zhongxian Liu et al, 2021) وجود لایه خاک نرم سبب افزایش نیروهای داخلی و تغییر شکل‌ها، بخصوص زمانیکه لایه خاک از تونل انعطاف پذیر در خط فزنی عبور می‌کند، می‌شود. (Qiangqiang Sun et al, 2020)، مطالعه بر روی تاثیر فرکانس ورودی بر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای عمیق نشان داده که تحلیل شبه استاتیک برای پاسخ لرزه‌ای تونل‌های زهکشی شده و نشده دور از منبع لرزه کافیتست. (Eimar Sandoval et al 2020)، تصادفی بودن مدول برشی کرنش کوچک خاک رس می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای لنگر خمشی، نیروی برشی و تغییر شکل جانبی دیواره تونل‌های مستطیلی تاثیر بگذارد. تاثیر تصادفی بودن G_{max} بر پاسخ لرزه‌ای تونل را می‌توان با معرفی یک عامل ضریب ایمنی که مربوط به شکست است توضیح داد و از تجزیه و تحلیل‌های اجزا محدود که پیچیده و زمان بر هست اجتناب کرد. (Lei Zhang et al, 2020) حاصل پژوهش بر روی مدل‌سازی عددی تونل در سنگ‌های درزدار تحت بار لرزه‌ای آن بود که با کاهش زاویه اصطکاک مفصل، لغزش مفصل به صورت خطی افزایش می‌یابد و تاثیر آن در تونل کم عمق بیشتر است. (Malavika Varma et al, 2019) تاثیر شکل مقطع بر پاسخ

آن انجام شد، نتایج نشان داد که پاسخ‌های تونل به جابجایی گسل، عمق مدفون و انسجام خاک همبستگی مثبت دارد. افزایش جابجایی گسل نیروی برشی عمودی و عدم تقارن لنگر خمشی را تقویت می‌کند در حالی که افزایش عمق مدفون این عدم تقارن را کاهش می‌دهد. افزایش قطر تونل و زاویه اصطکاک خاک با کاهش اوج نیروی محوری و افزایش نیروی برشی عمودی و لنگر خمشی همراه است. علاوه بر این، تغییرات در زاویه اصطکاک، تأثیر قابل توجهی بر نیروی برشی عرضی و لنگر خمشی ندارد. (Henghong Yang et al, 2024) مطالعه بر روی تأثیر جهت‌گیری بارگذاری دینامیکی بر خواص شکست سنگ‌های اطراف در تونل‌های دوقلو نشان داد که برای یک تونل دوقلو که در معرض بار دینامیکی از جهت‌های مختلف قرار دارد، موقعیت شروع ترک اغلب در گوشه تونل، اسپندل تونل و کف تونل ظاهر می‌شود. اسپندل از آنجایی که زاویه بارگذاری ضربه $\alpha=90^\circ$ درجه است، تونل کمترین آسیب را متحمل می‌شود و تنها شکستگی‌های کششی در سنگ‌های اطراف ایجاد می‌شود. جهت بار ضربه‌ای می‌تواند توزیع تنش را در تونل دوقلو تغییر دهد، و شکستگی‌های عمده در مناطقی که تنش کششی متمرکز است بیشتر ایجاد می‌شود. (Ze Deng et al, 2023). در ارزیابی پایداری تونل‌های مدور در خاک اصطکاک منسجم تحت بارگذاری زلزله و با استفاده از رویکرد شبه دینامیکی اصلاح شده، مشخص شد تنش‌های نرمال اعمال شده توسط خاک اطراف در امتداد حاشیه تونل متفاوت است و پایداری تونل زمانی تضمین می‌شود که حداقل فشار پشتیبانی ارائه شده توسط پوشش تونل برابر یا بیشتر از حداکثر تنش نرمال اعمال شده توسط خاک در شرایط شکست نهایی باشد. (Jgdish prasad sahuo et al, 2023) آزمایش‌های مدل فیزیکی که برای بررسی ویژگی‌های پاسخ دینامیکی تونل‌های جاده-مترو تحت بارهای ارتعاشی قطار و تأثیر ساختار داخلی بر پاسخ دینامیکی پوشش‌های تونل و خاک‌های اطراف انجام شده است و در نتایج تجربی مشاهده شده است که، ساختار داخلی می‌تواند به طور قابل توجهی پاسخ دینامیکی پوشش تونل و خاک‌های اطراف را کاهش دهد. همچنین عدم در نظر گرفتن ساختار داخلی تونل‌های جاده-مترو می‌تواند منجر به برآورد بیش از حد پاسخ دینامیکی پوشش‌های تونل و خاک‌های اطراف شود و باید توجه ویژه‌ای به پاسخ دینامیکی آشکار عرشه‌های خطوط شود. (Wenqi Guo et al, 2023). با مطالعه بر روی تغییر شکل و شکست خاک روباره در معرض جابجایی معمولی گسل و تاثیر آن بر تونل نتایج نشان داد که یک ناحیه برشی سه‌بعدی منشور

تولن-خاک بستگی دارد. (Dalong Jin et al, 2018) در بررسی تاثیر نیروهای لرزه ای بر یک تولن دایره‌ای در لایه خاک غیر مایع با چسبندگی عمومی که در زیر لایه خاک کاملاً روانگرا قرار دارد مشاهده شد با افزایش در عمق، تعادل تولن و زاویه اصطکاک لایه دوم به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، همانطور که انتظار می‌رود، افزایش زاویه اصطکاک داخلی لایه دوم اثر انقباض بر پایداری تولن را افزایش می‌دهد. (Sounik Kumar et al, 2018). تحقیقاتی که بر پایه تحلیل استاتیکی تولن‌ها در مورد پایداری تولن‌ها، روش ساخت و تاثیر توالی ساخت تولن‌های متقاطع انجام شده. مشاهده گردیده انحراف و ممان خمشی تولن موجود را می‌توان با تقویت خاک زیر تولن موجود و کاهش ابعاد تولن جدید کاهش داد. تغییر شکل مقاطع نزدیک به محل تقاطع بیشتر از سایر نقاط است و گسیختگی فشاری و کششی در مقاطع تولن‌ها و تا فاصله ۵ متری این محل اتفاق می‌افتد همچنین نشست تولن موجود زمانی که تولن جدید در زیر آن حفاری می‌شود به طور قابل توجهی بزرگتر از تورم تولن موجود زمانیکه تولن جدید در بالای آن ساخته می‌شود، می‌باشد و در مورد تولن‌های دوقلو تولن موجود تا حد زیادی تحت تاثیر ساخت تولن دوم قرار می‌گیرد. با این حال تولن موجود تنها باعث تاثیر کمی بر تولن جدید می‌شود و رفتار تولن جدید شبیه یک تولن تک است. (Xiang Liu et al, 2018; Thyanan Boonyark et al, 2016; Yayong Li et al, 2016; Thyanan Boonyark et al, 2015; Ngoc Anh Do et al, 2015) در این میان در روش‌شناسی حفاظت تولن با روش جک‌گذاری برای حفر تولن در زیر تولن بهره‌برداری شده، مشاهده شد که با اجرای روش حفاری *in-tunnel jacking* جا به جایی تولن در حال بهره برداری به زیر مقدار مجاز می‌رسد در نتیجه می‌توان کار را بدون وقفه ادامه داد. (Xinggao Li et al, 2013) و در مطالعه سانترفیوژ و مدل‌سازی سه بعدی اندرکنش تولن‌های عبوری عمود برهم (مقاطع)، نتایج حاکی از آن بود که نشست تولن موجود، نه تنها به وسیله کاهش آبی کرنش عمودی و در جهت عکس، بلکه به وسیله تنش سربار قابل توجهی که به تاج منتقل می‌شود به وجود می‌آید و در این بین مقطع تولن موجود در جهت مستقیم روی تولن حفاری جدید و به طور عمود فشرده می‌شود. به طور کلی در نتیجه کماتش خاک و توزیع تنش در مدل، تنش‌های عمودی محاسبه شده که در پیرامون تولن موجود عمل می‌کند، به میزان قابل ملاحظه‌ای در جهت رسیدن به مقدار اوج به فاصله دو برابر قطر اسمی از خط مرکزی مقطع عرضی تولن در حال حفاری افزایش پیدا می‌کند. (Charles

دینامیکی تولن‌ها تحت بارهای ارتعاشی ناشی از قطار اینگونه است که تغییر شکل تولن مستطیلی بیشتر از دایره‌ای و نعل اسبی است و توزیع لنگر تحت تاثیر شکل مقطع تولن می‌باشد همچنین تاثیر شکل مقطع بر پاسخ خاک محدود است و اثرات شکل مقطع نیز در میدان نزدیک اتفاق می‌افتد و با دور شدن از منبع تحریک کاهش می‌یابد. (Wenbo Yang et al, 2019). نتایج یک مطالعه درباره تاثیر روش مدل‌سازی پوشش تولن بر پاسخ لرزه‌ای تولن‌های بتنی اسپری در خاک‌های درشت دانه در نهایت بدین صورت بود که از لحاظ نیروهای لاینینگ در مدل‌سازی ساختاری UET در مقایسه با مدل GET سخت‌تر و نیروهای داخلی بسیار بالاتر توسعه یافته است. اثر هندسه ساختاری در انتشار نیروهای داخلی نشان می‌داد که بخش المان (قوس) تمایل به تفسیر تنش کینماتیک خارجی خاک محدوده نیروها به جای نیروهای برشی در مقایسه با بخش صاف دارد که به رفتار تیر معمولی شباهت دارد. (G-Kamas et al, 2019) و در شبیه‌سازی رفتار تولن کم عمق در خاک نرم تحت شرایط لرزه ای مشخص شد که اعوجاج در پوشش تولن به عمق تعبیه و نسبت انعطاف پذیری تولن بستگی دارد و در فصل مشترک لغزش کامل، ۶-۸٪ اعوجاج و ۲۰٪ ممان خمشی بیشتر بدست می‌آید همچنین شکل مقطع تولن در پاسخ لرزه‌ای مهم است و با گرد کردن گوشه تیز تولن مربعی می‌توان تا ۵۵٪ از گشتاور خمشی آن کاست. (Milind Patil et al, 2018). همچنین با تحقیق در مورد راه حل تحلیلی الاستیک تولن کم عمق به علت تولن زنی دوقلو براساس یک تابع جا به جایی یکپارچه به این نشان داده شد که حالت‌های تغییر شکل بخش مقطع تولن اثرات زیادی بر روی جا به جایی زمین و منحنی نشست سطح زمین دارد. سطح زمین دارای یک گرایش کلی برای برخی از حالت‌های تغییر شکل است و اثرات متقابل با افزایش فاصله تولن‌های دوقلو کوچک می‌شود. (Fanchao Kong et al, 2019) نتایج بررسی رفتار تولن موجود با توجه به ساخت تولن جدید در زیر آن حاکی از آن بود که با کاهش ضریب عکس‌العمل و فاصله خالی عمود بین تولن موجود و جدید و با افزایش طول خاک بهم خورده، مقدار حداکثر انحراف منفی تولن موجود افزایش می‌یابد و حداکثر انحراف خطی تولن موجود، به فاصله رویه تولن در حال حفاری که در مجاورت تقاطع دو مسیر دو تولن هست، حساسیت دارد. (Xiang Li et al, 2019). تحلیل نشست تولن موجود ناشی از حفر تولن با سپر محافظ در زیر آن نشان داد که نشست زمین و تولن متفاوت است و نشست تولن کمتر از زمین است که این امر به سختی

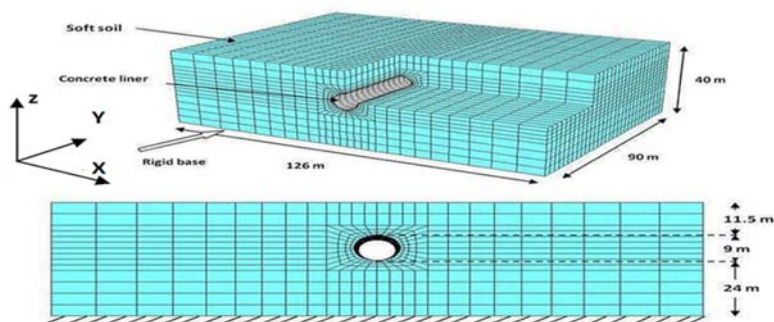
می‌تواند مورد توجه طراحان قرار گیرد. با توجه به تحقیقات محققین گذشته، موضوعات مورد بحث در این تحقیق که با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود **FLAC 3D** صورت پذیرفته است بر روی تاثیر زاویه تقاطع، فاصله عمودی تونل‌ها، عمق سربار و نوع خاک بر رفتار لرزه‌ای تونل‌های متقاطع دایره‌ای شکل است، در گذشته انجام نشده و از این رو نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشای مباحث طراحی قرار گیرد.

۳-مدل‌سازی عددی

در این پژوهش که هدف بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌های متقاطع بوده از مدل‌سازی سه بعدی در نرم افزار **FLAC** استفاده شده است. به منظور صحت سنجی مدل‌های ساخته شده در محیط تفاضل محدود، ابتدا یک نمونه مدل سه بعدی تونل که توسط محققان پیشین انجام شده در نرم افزار **FLAC** شبیه‌سازی شده است. بدین منظور از پژوهش اسلایتین و همکاران که تحلیل سه بعدی و غیرخطی یک تونل در خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای را ارائه می‌دهد، استفاده شده است. (**Sliteen et al, 2011**). ابتدا حفاری تونل برای حالت اولیه خاک ایجاد شده و پس از آن مدل تحت یک بار لرزه‌ای قرار گرفته است. این تحلیل از یک برنامه تفاضل محدود صریح سه بعدی (**FLAC3D**) استفاده می‌کند. نتایج مربوط به نیروهای داخلی القا شده در پوشش تونل (نیروی محوری، گشتاور خمشی و نیروی برشی) و نشست در سطح زمین است. ابعاد مدل در جهت **X** برابر ۱۲۶ متر، در جهت **Y** برابر ۹۰ متر و ارتفاع آن در جهت **Z** برابر ۴۰ متر است. قطر تونل ۹ متر و فاصله تاج تونل از سطح زمین ۱۱/۵ متر است. در شکل ۱ مدل مقاله و شکل ۲ مدل هندسی ایجاد شده در نرم افزار **FLAC** ارائه شده است.

(**W.W.Ng et al, 2013**). علاوه بر موارد ذکر شده، در تحلیل الاستو پلاستیک از پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها در خاک نرم که در آن به بررسی تونل دایره‌ای در لایه نرم بالای یک لایه سخت با لاینر بتنی با رفتار الاستیک خطی و رفتار خاک با استفاده از رابطه الاستوپلاستیک چرخه‌ای پرداخته شده است مشاهده شد که تغییر شکل پلاستیک، یک کاهش مهم در لرزه خیزی ممان خمشی در تونل را نتیجه می‌دهد. درحالی که انعطاف پذیری خاک به طور متوسط در ممان خمشی در لاینر تاثیر می‌گذارد. (**Shahrour et al, 2010**). در پژوهش دیگری که در مورد اثرات تونل زنی بر روی سیستم نگهدارنده موجود تونل‌های متقاطع عمودبرهم پرداخته شده، دریافتند بررسی روند اجداث تونل مهم است زیرا در این تحقیق سیستم نگهدارنده موجود در منطقه تقاطع، ابتدا در سمت پیشرو و سپس در جهت معکوس و بعد از آن در تاج و در پایان در سمت دور هنگامی که تونل زیرین پیشرفت کرده تحت تاثیر قرار گرفته است؛ اما در منطقه نسبتاً دور از منطقه تقاطع، در طول تونل زنی جدید تقریباً بدون تغییر است. پیشروی تونل جدید به طور عمود در بالای تونل موجود موجب شکست فشاری پوشش شاتکریت موجود در تاج می‌شود، همچنین نیروی کششی به طور قابل توجهی در **rockbolt**های پیرامون تاج افزایش می‌یابد. (**H.Y.Liu et al, 2009**).

با بررسی تحقیقات پژوهشگران مختلف در زمینه مورد مطالعه این تحقیق دریافته شد گرچه پیرامون تونل و اثرات لرزه‌ای بر آن مطالعاتی انجام پذیرفته ولی در حوزه این پژوهش یعنی تونل‌های متقاطع مطالعات کم می‌باشد و از این حیث موضوع این تحقیق کار نو و تازه‌ای می‌باشد که با توجه به نیاز روزافزون جوامع به سازه‌های زیرزمینی چنین مطالعاتی مفید خواهد بود و



شکل ۱. مدل ارائه شده در مقاله اسلایتین و همکاران (۲۰۱۱) هندسه سیستم خاک-تونل در حالت سه بعدی



شکل ۲. مدل ایجاد شده در محیط تفاضل محدود

مصالخ خاکی بصورت خاک رسی نرم در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مصالح لاینینگ با استفاده از المان لاینر ایجاد شده است. مدل رفتاری خاک موهر کولمب در نظر گرفته شده است و خصوصیات مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات مصالح

| Material | E(MPa) | ν | $\gamma(\text{KN/m}^3)$ | $\varphi(^{\circ})$ | $\psi(^{\circ})$ | C (KPa) |
|----------|--------|-------|-------------------------|---------------------|------------------|---------|
| soil | 30 | 0.3 | 20 | 35 | 5 | 7 |
| lining | 35000 | 0.25 | | | | |

مراحل تحلیل به صورت خلاصه می‌شوند.

-ایجاد تنش‌های وزنی در توده خاک

-حفاری و نصب لاینینگ تونل به صورت همزمان

-اعمال شرایط مرزی دینامیکی و شتاب زلزله به کف مدل

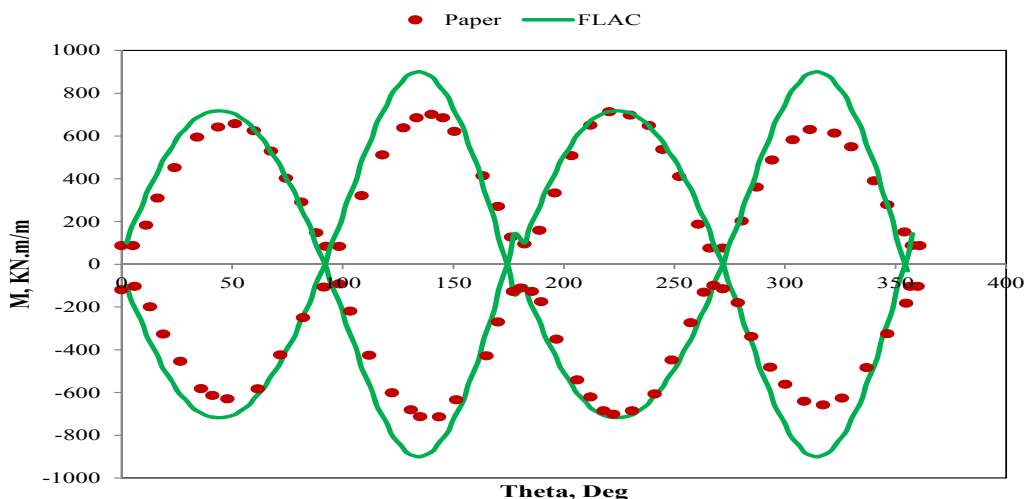
۳-۱- نتایج تحلیل و صحت سنجی

در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب تغییر لنگر خمشی و نیروی محوری لاینینگ در انتهای زلزله در محیط لاینینگ ارایه شده‌اند. مقادیر نیروها دقیقاً در مرکز مدل ($\gamma=45\text{ m}$) محاسبه شده‌اند. نحوه محاسبه زاویه تتا در شکل ۳ ارائه شده است. با مقایسه نمودارهای حاصله از خروجی نرم‌افزار و مقاله مرجع

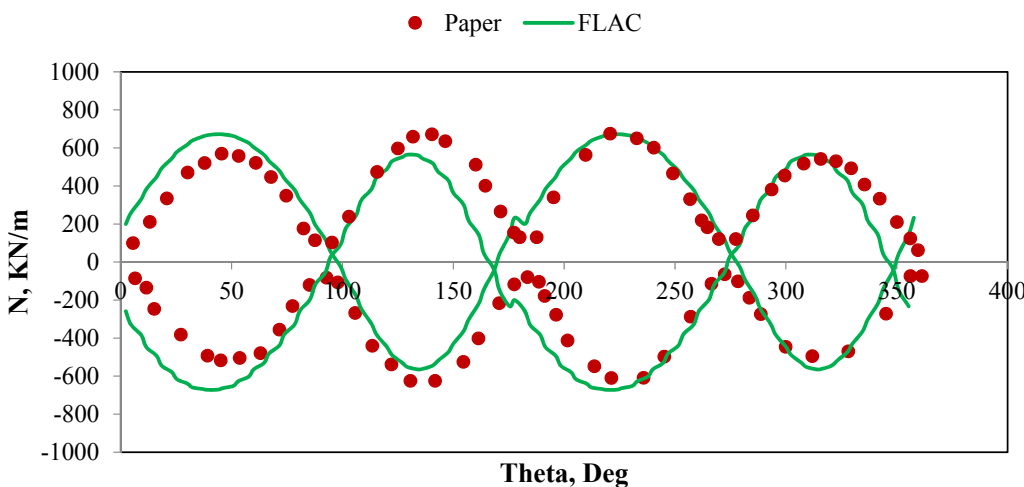
(نمودارهای ۴ و ۵) مشاهده می‌شود اختلاف بسیار ناچیز بوده و این موضوع بیانگر خطای اندک تحلیل اجزای محدود با نرم افزار FLAC3D می‌باشد که اعتبارسنجی نرم افزار با توجه به مقاله تایید می‌شود.



شکل ۳. تعریف زاویه تتا



شکل ۴. نمودار مقایسه تغییر لنگر خمشی با تتا در مقاله و مدل ایجاد شده با نرم افزار FLAC

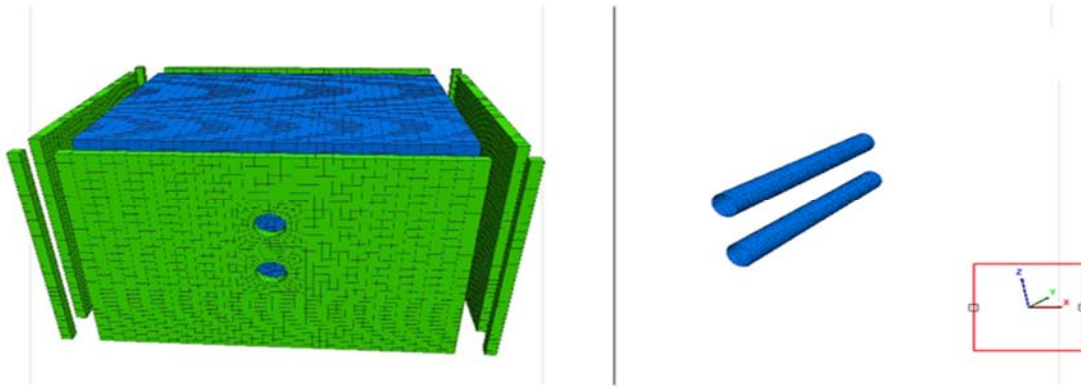


شکل ۵. نمودار مقایسه تغییر نیروی محوری با تتا در مقاله و مدل ایجاد شده با نرم افزار FLAC

۳-۲- مدل سازی

مدل ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفتند. در این تحقیق تونل‌ها از قبل حفاری شده در نظر گرفته شده و در طراحی روند طراحی لحاظ نشده است. از طرفی با توجه به نمودارهای تغییرات لنگر خمشی و نیروی محوری در زوایای مختلف، جهت تاثیر بر هم کنش تونل‌ها، ضریب افزایش بار $1/25$ به مقادیر نیروهای داخلی اعمال شده است. همچنین با توجه به اینکه المان‌های پوسته خارجی و داخلی تونل یکپارچه منظور شده و فاصله بین تونل‌ها بهینه می‌باشند، مدول الاستیسته در $0/9$ ضرب شده ولی در لنگرهای خمشی نیازی به تغییر نیست.

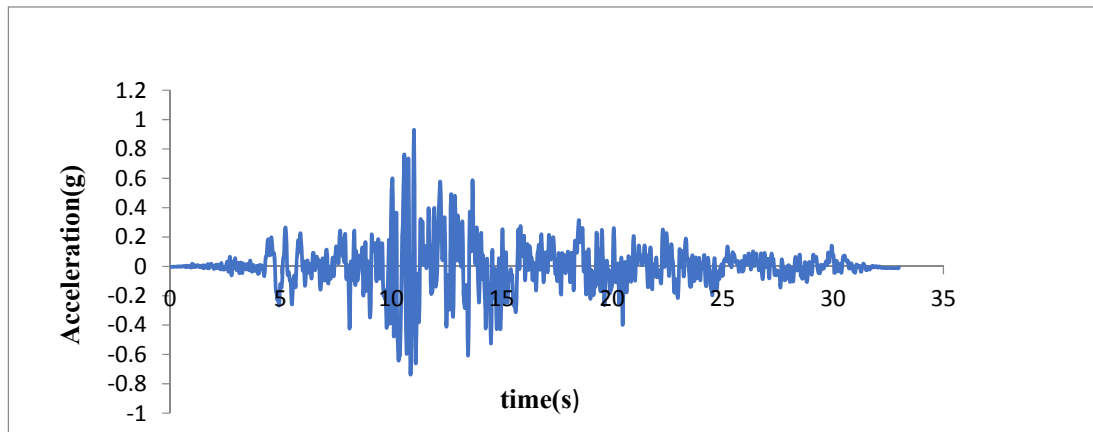
شکل تونل بصورت دایروی (شکل ۶)، با قطر برابر با ۵ متر و طولی برابر با حداقل ۵۰ متر می‌باشد. در مدل‌سازی تونل در حالت تحلیل لرزه‌ای باید این نکته را مد نظر قرار داد که حداقل فاصله لبه تونل تا مرزهای طرفین ۱۰ برابر شعاع باشد تا از تاثیر مرزها بر مدل در تحلیل جلوگیری گردد. بنابراین جهت کاهش زمان تحلیل‌ها و با توجه به این موضوع ابعاد در نظر گرفته شده برای مکعب خاک در حالت صفر درجه $60 \times 50 \times 45$ ، در حالت ۳۰ درجه $80 \times 50 \times 45$ ، در حالت ۶۰ درجه $60 \times 90 \times 45$ و در حالت ۹۰ درجه $60 \times 60 \times 45$ در نظر گرفته شد. در مجموع ۳۰



شکل ۶. هندسه مدل انتخاب شده

۳-۳- رکورد زلزله

رکورد زلزله طیس به عنوان بار زلزله در نرم افزار FLAC در جهت افقی X اعمال گردیده است. تاریخچه زمانی شتاب در جهت متعاد X در نمودار شکل ۷ و مشخصات موج زلزله انتخابی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۷. نمودار تاریخچه زمانی شتاب در جهت X

جدول ۲. مشخصات رکورد زلزله طیس

| مدت زمان زلزله (ثانیه) | گام زمانی زلزله (ثانیه) | ماکزیمم جابه‌جایی زمین (سانتی‌متر) | سرعت حداکثر (سانتی متر بر ثانیه) | شتاب حداکثر PGA (سانتی متر مجذور بر ثانیه) | جهت زلزله |
|---------------------------|-------------------------------|--|--|--|------------------------|
| ۳۲,۹۶ | ۰,۰۲ | ۹۱,۱ | ۱۱۱,۳۵ | ۰,۹۲ | رکورد افقی در جهت X |

۳-۴- مشخصات مدل‌ها

است، در نتیجه خاک بصورت خاک خشک فرض شده و دانسیته خشک خاک برابر با ۱۸۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب در خاک ۱ و ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در خاک ۲ در نظر گرفته شده است.

برای خاک پیرامونی تونل‌ها از مدل رفتاری Mohr coulomb (MC) برای هر دو حالت خاک ریزدانه و درشت‌دانه استفاده شده است. تراز آب زیر زمینی در عمق زیاد در نظر گرفته شده

امواج در حین تحلیل ایجاد نخواهد شد و طرفین مدل به صورتی در خواهد آمد که انگار مصالح سنگی و خاکی در محیط بی نهایت امتداد دارد. در این روش میدان آزاد، به وسیله صفحات عمود بر محورهای X و Y مدل می شود. لازم به توضیح است که مرزهای متصل به میدان آزاد قائم و مستقیم در نظر گرفته می شوند. در ادامه شرایط مرزی موجود در مدل، در نرم افزار مشخص می شود. در قدم اول کدنویسی بدین صورت است که در قسمت کف مدل شرایط مرزی fix تعریف شده و جابه جایی در جهت X, Y سپس دو وجه روبرویی در جهت Y و مرزهای کناری در جهت X بسته می شوند. پس از اتمام تحلیل استاتیکی، تغییر مکان ها صفر شده و در ادامه برای مرزهای اطراف مدل حالت مرزهای آزاد در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از این نوع المان در نظر گرفتن این مسئله است که خاک فقط در این ابعاد محدود نیست و تونل های از هر طرف درون خاکی قرار دارند که از هر طرف ادامه دار می باشد. با ایجاد این مرزها، اثر یک محیط الاستیک بی نهایت در اطراف تونل میسر می شود.

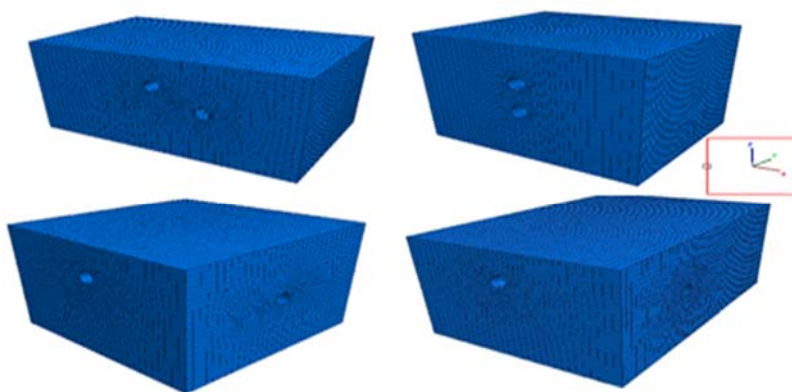
چهار زاویه تقاطع صفر درجه، ۹۰ درجه، ۶۰ درجه، ۳۰ درجه برای تونل ها در نظر گرفته شده است. سه حالت برای فاصله عمودی دو تونل منظور شده است، یکی معادل فاصله دو تونل در خط ۶ و ۷ متروی تهران و برابر با ۴٫۸ متر می باشد، حالت دوم معادل فاصله کمتر از این مقدار و برابر با ۳٫۸ و حالت سوم فاصله ای بیشتر از این مقدار و برابر با ۵٫۸ در نظر گرفته شده است.

۳-۵- عمق قرارگیری تونل، نوع خاک و شرایط مرزی

دو نوع عمق قرارگیری تونل در خط ۶ و ۷ متروی تهران و برابر با ۱۱٫۴ متر و ۱۰ متر در نظر گرفته می شود. مشخصات خاک ها مطابق با مشخصات خاک درشت دانه در خط ۷ متروی تهران (مریم مرادی و همکاران ۱۳۹۱) و مشخصات خاک ریزدانه در بخش ابتدایی تونل سبزکوه می باشد. پارامترهای مکانیکی خاک در جدول ۳ ارائه شده است. برای تونل ها نیز ضخامت ۲۵ سانتی متر و دانسیته کیلوگرم بر متر مکعب در ۲۵۰۰ نظر گرفته شده است. با ایجاد مرزهای آزاد در اطراف مدل، پدیده انعکاس

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی خاک مدل

| نوع خاک | E (مگا پاسکال) | (درجه) ϕ | C | نسبت پواسون | دانسیته خشک (کیلوگرم بر متر مکعب) |
|-----------|-------------------|------------------|----|-------------|--------------------------------------|
| درشت دانه | ۷۵ | ۳۳ | ۱۵ | ۰٫۳ | ۱۸۴۰ |
| ریز دانه | ۴۰ | ۲۲ | ۲۴ | ۰٫۳ | ۱۸۰۰ |



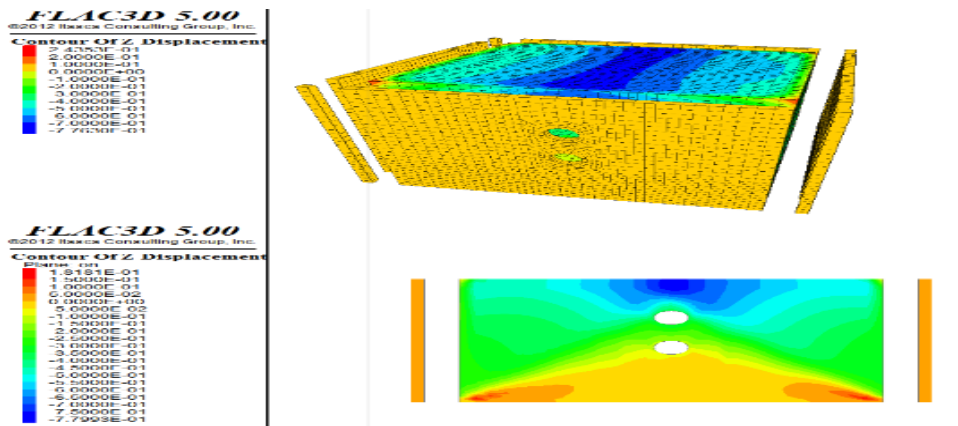
شکل ۸. مدل های ترسیم شده در نرم افزار FLAC، با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بین

۴- نتایج و بحث

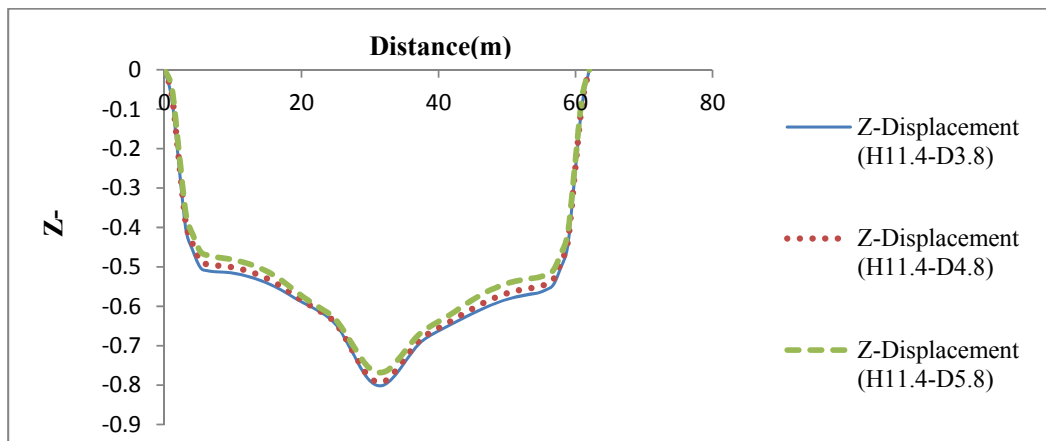
۴-۱- مدل‌های با زاویه صفر درجه در حالت‌های مختلف عمق قرارگیری تونل و فاصله تونل با خاک درشت دانه

نماد خاک درشت دانه، S_2 نماد خاک ریز دانه، H نماد عمق قرارگیری تونل، D نماد فاصله بین دو تونل و θ نماد زاویه بین دو تونل می‌باشد. به عنوان مثال θ_{90} $D_{3.8}$ H_{10} یعنی مدلی که در آن خاک درشت دانه، عمق قرارگیری تونل ۱۰ متر، فاصله بین دو تونل ۳٫۸ متر و زاویه بین آن‌ها ۹۰ درجه می‌باشد. اشکال ۱۰ و ۱۱ نمودار مربوط به نشست برای این فواصل و عمق‌های قرارگیری را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای ۱۰ و ۱۱ نیز نشان می‌دهد که در نقطه‌ای از پروفیل عرضی خاک که مقطع تونل وجود دارد بیشترین نشست آن اتفاق افتاده است.

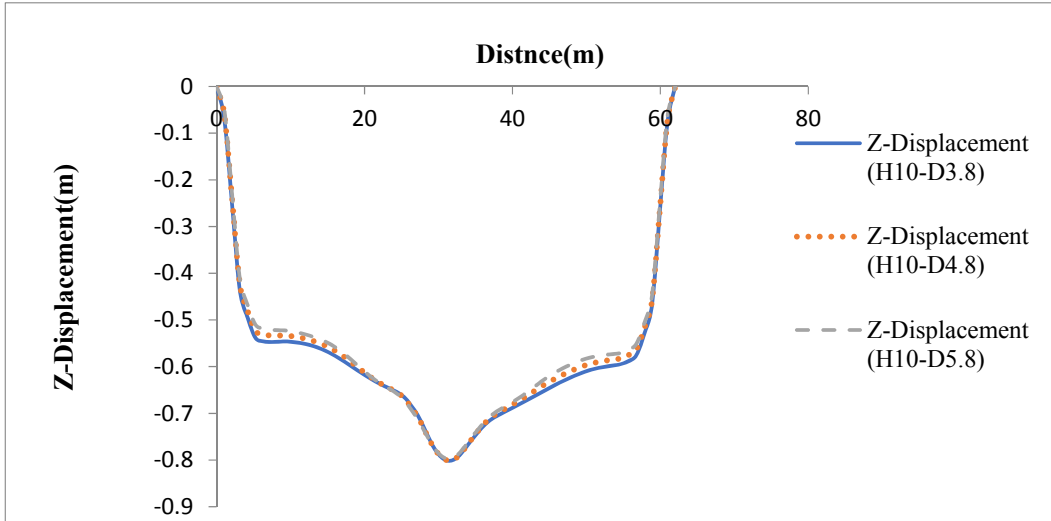
در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی در مدل‌های با عمق قرارگیری تونل در ۱۰ و ۱۱٫۴ متری در حالی که فاصله بین دو تونل ۳٫۸، ۴٫۸ و ۵٫۸ متری می‌باشد، تونل‌ها موازی هم هستند و خاک درشت دانه است پرداخته شده است. شکل ۹ نحوه نشست خاک را به دو صورت سه بعدی و دو بعدی برای عمق قرارگیری تونل در ۱۱٫۴ متری و فاصله ۵٫۸ متری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار نشست در طول تونل حداکثر مقدار خود را داراست و با فاصله گرفتن از تونل‌ها از مقدار آن کاسته می‌شود. برای تسهیل در کار برای هریک از مدل‌ها یک نام اختصاری تعیین گردید که در آن S_1



شکل ۹. عمق قرارگیری تونل ۱۱٫۴ متر و فواصل بین دو تونل ۵٫۸ متری



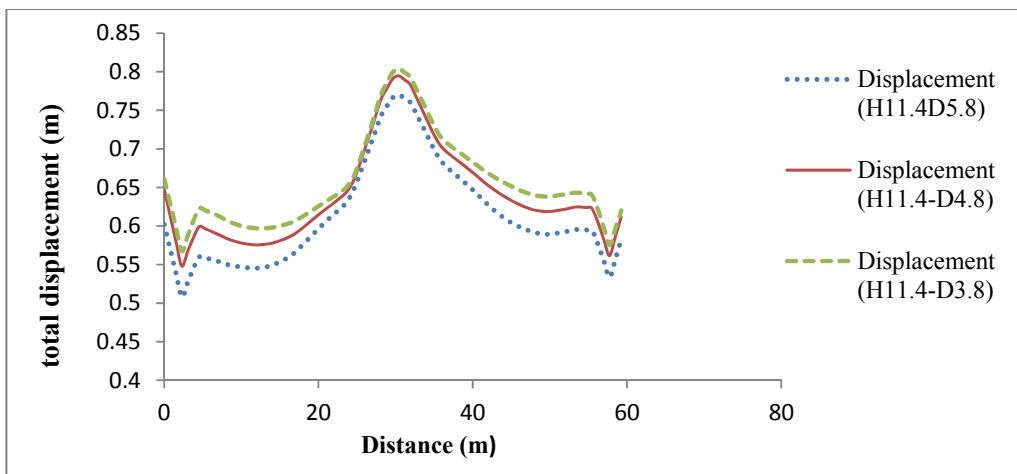
شکل ۱۰. پروفیل طولی نشست برای فواصل تونل ۳٫۸، ۴٫۸ و ۵٫۸ متر در عمق قرارگیری ۱۱٫۴ متر



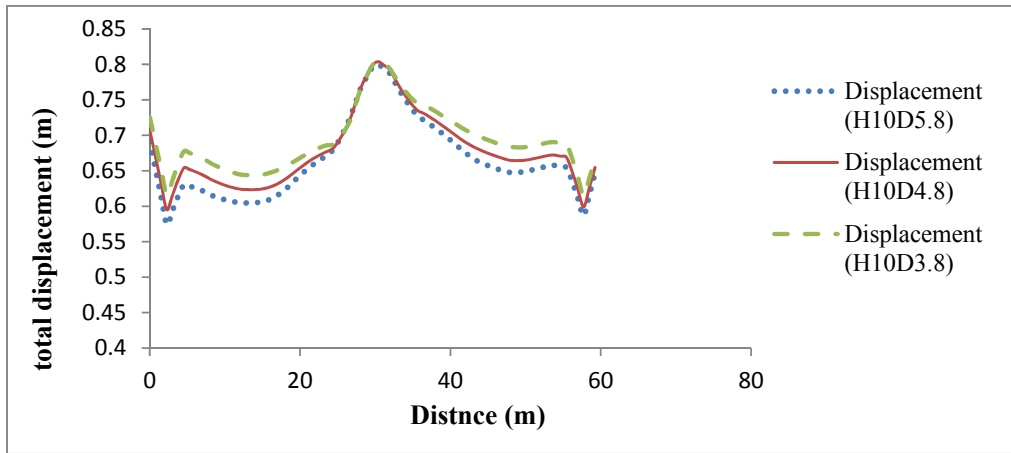
شکل ۱۱. پروفیل طولی نشست برای فواصل تونل ۳٫۸ و ۴٫۸ و ۵٫۸ متر در عمق قرارگیری ۱۰ متر

با کاهش حدود ۱۲ درصدی عمق قرارگیری تونل تغییر شکل کل به میزان ۳ درصد کاهش می‌یابد که نشان از عملکرد مناسب تغییر عمق تونل در کنترل نشست ناشی از تحکیم خاک بستر را دارد. افزایش حجم سربار و تنش موثر بر توده خاک بالای تونل، باعث تثبیت نسبی در خاک بستر تونل شده که در نهایت باعث ایجاد تغییرشکل کمتری در بستر تونل می‌شود. مقایسه میان بیشترین و کمترین تغییرات در نشست و جابه‌جایی کل در جدول ۴ ارائه گردیده است.

نمودارهای شکل‌های ۱۲ و ۱۳ حاصل از ترسیم پروفیل طولی بر روی سطح خاک برای جابجایی کل و مقایسه برای عمق‌های قرارگیری تونل در ۱۱٫۴ و ۱۰ متر بدست آمده است. طبق شکل‌های بدست آمده و این نمودارها حداکثر جابه‌جایی کل در طول تونل و محل تقاطع تونل‌ها می‌باشد و بیشترین مقدار آن مربوط به فاصله بین تونل ۳٫۸ متر و عمق قرارگیری تونل در ۱۰ متر می‌باشد. مقایسه میزان این تغییرشکل‌ها در اعماق قرارگیری تونل در ۱۱٫۴ و ۱۰ متر را نشان می‌دهد که با افزایش عمق قرارگیری تونل، مقدار جابه‌جایی کل افزایش می‌یابد یعنی



شکل ۱۲. پروفیل طولی برای فواصل تونل ۳٫۸ و ۴٫۸ و ۵٫۸ متر در عمق ۱۱٫۴ متر



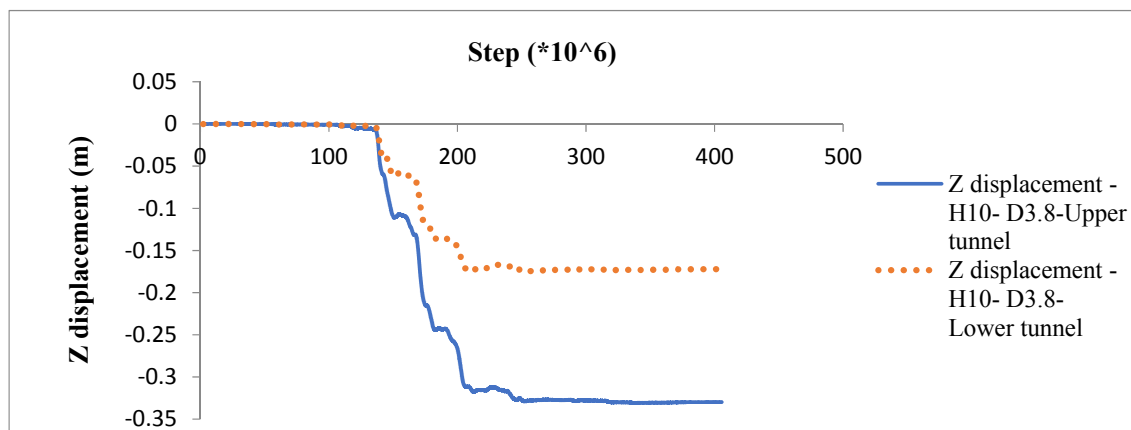
شکل ۱۳. پروفیل طولی برای فواصل تونل ۳.۸ و ۴.۸ و ۵.۸ متر در عمق ۱۰ متر

جدول ۴. مقایسه جابجایی در حالت $S_1 \theta_0$

| نام مدل | نشست (متر) | درصد تغییرات نشست | جا به جایی کل (متر) | درصد تغییرات جا به جایی کل |
|-----------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| بیشترین تغییرات | $S_1 H_{10} D_{3.8} \theta_0$ | ۰.۸۲۳ | ۰.۹۰۵ | ۶.۰۷ |
| کمترین تغییرات | $S_1 H_{11.4} D_{5.8} \theta_0$ | ۰.۷۷۶ | ۰.۸۵ | ۶.۰۵۶ |

پایینی نزدیک مرکز شروع ارتعاشات دینامیکی می‌باشد کمتر از تونل بالا دچار نشست شده است که نشان دهنده تاثیر مشهود عمق قرارگیری تونل در کنترل نشست و تغییر مکان تونل می‌باشد. (شکل ۱۴)

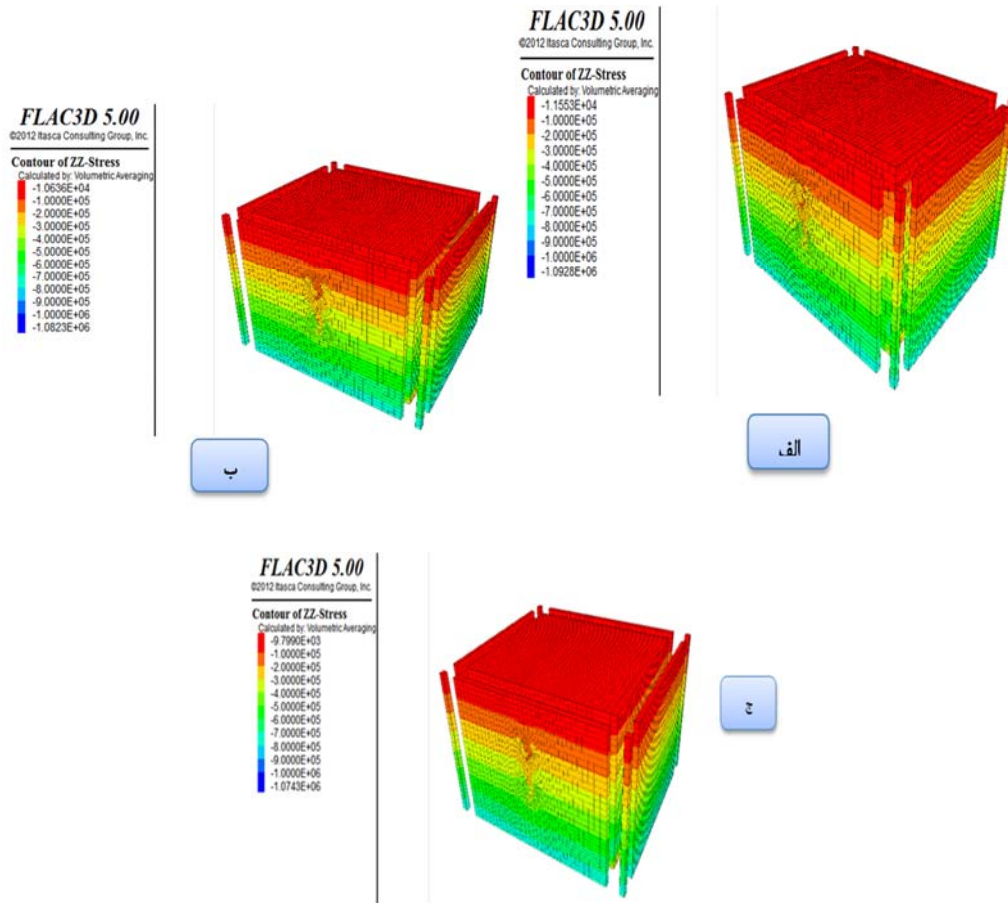
با مشاهده روند توزیع شتاب زلزله، دو نکته کاملاً مشهود است: یکی اینکه ورود نوسانات ارتعاش از یک مد مشخص در خاک بستر بطور ناگهانی افزایش می‌یابد که در اینجا تا ۱۵ برابر مقدار اولیه در یک فاصله زمانی بوده و ثانیاً با وجود اینکه تونل



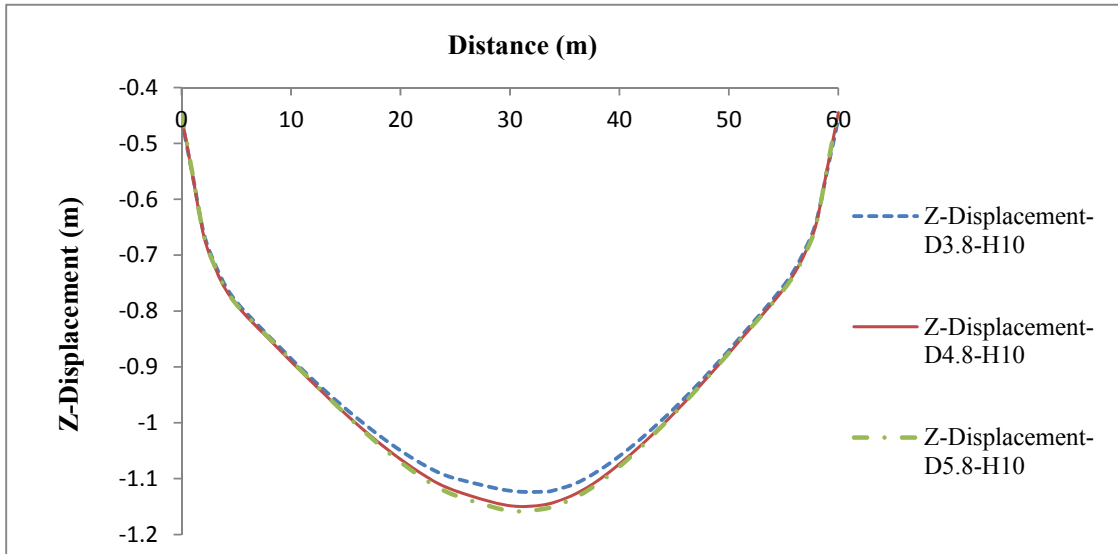
شکل ۱۴. نمودار تاریخچه زمانی تاج تونل در مدل با سربار ۱۰ و فاصله بین تونل ۳.۸ متر

نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی در مدل‌های با عمق‌های قرارگیری تونل در ۱۰ و ۱۱٫۴ متری در حالی که فاصله بین دو تونل ۳٫۸، ۴٫۸ و ۵٫۸ متری نشان می‌دهد. پروفیل از وسط مدل در $Y=25$ متر رسم شده است و تونل‌ها موازی و خاک بستر ریز دانه و سست‌تر می‌باشد.

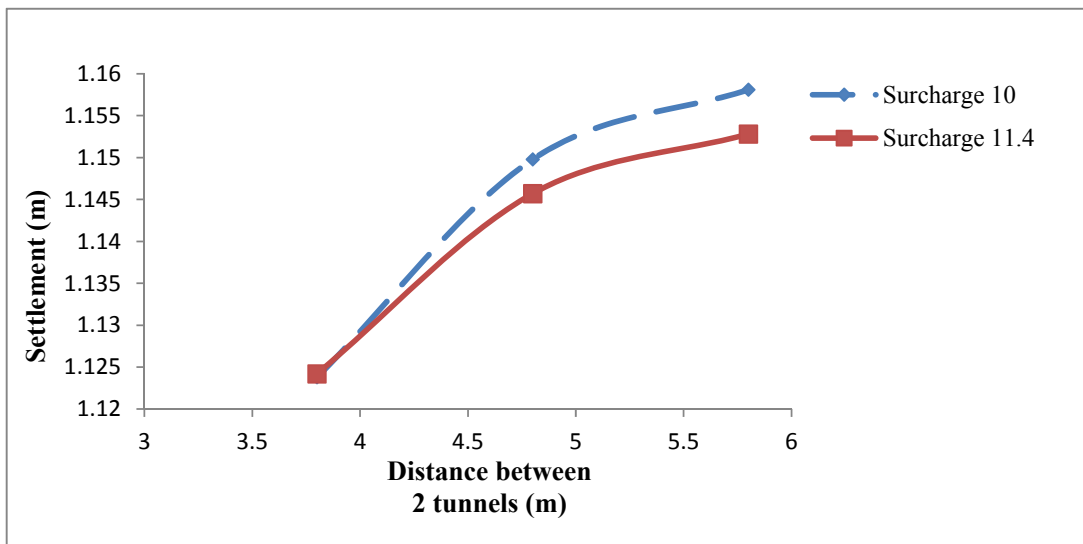
شکل ۱۵ تنش قائم در مدل‌های یادشده را نمایش می‌دهد. کانتورهای تنش قائم σ_{zz} نمایشگر آنست که تنش با توجه به آنکه شتاب از بستر زیرین خاک در مدلسازی وارد می‌شود در کف بیشترین مقدار و با حرکت به سمت بالا از میزان آن کاسته گشته و در سطح به حداقل میزان خود می‌رسد. نمودارهای ۱۶ و ۱۷ نحوه نشست خاک را با مقایسه



شکل ۱۵. عمق ۱۰ متر و فواصل بین دو تونل (الف) ۳٫۸ (ب) ۴٫۸ (ج) ۵٫۸ متر



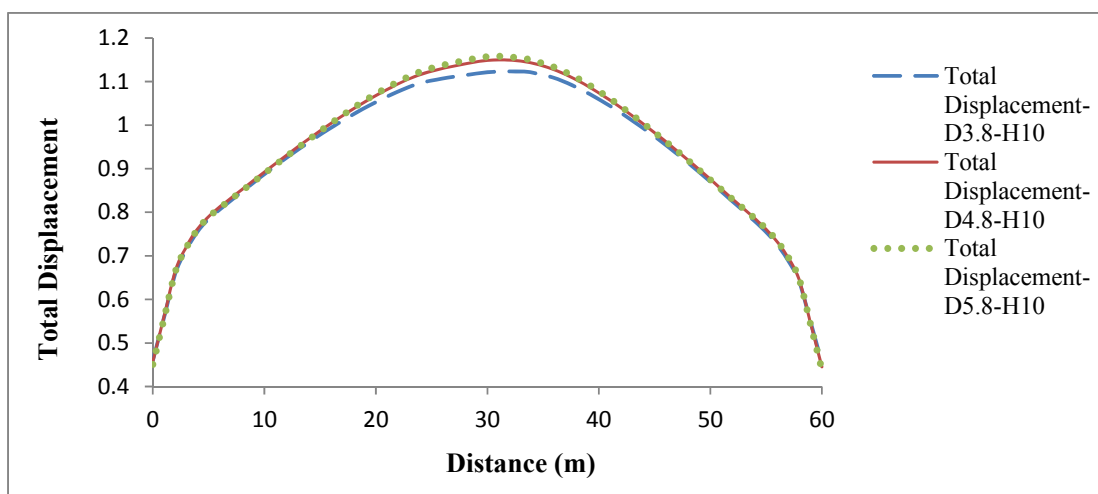
شکل ۱۶. نمودار نشست خاک در عمق قرار گیری تونل در ۱۰ متری



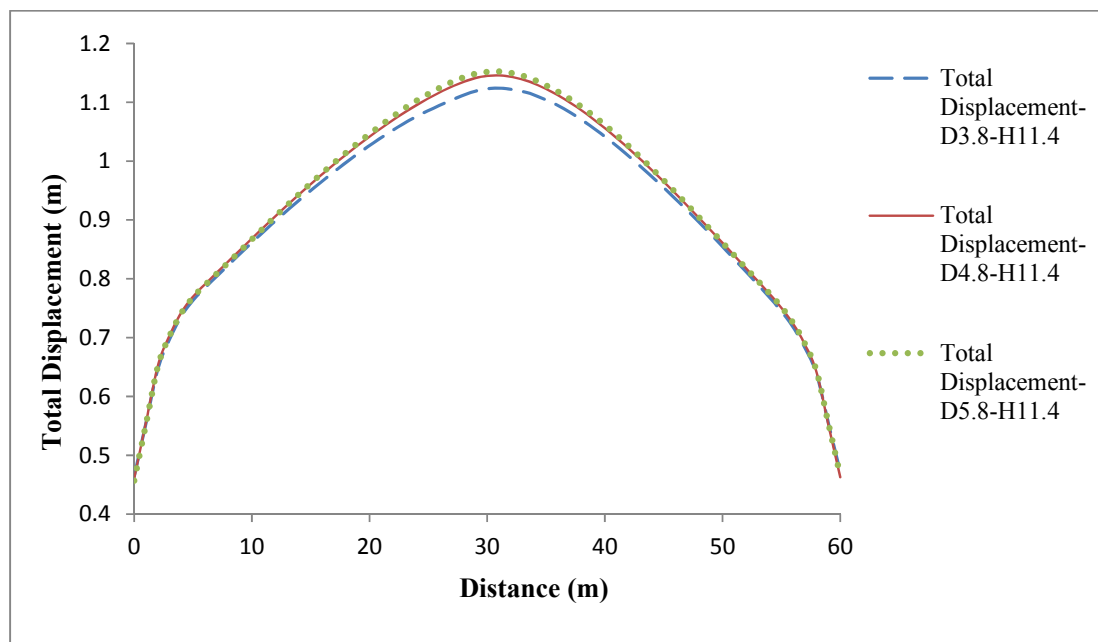
شکل ۱۷. نمودار مقایسه در دو نشست در دو قرار گیری تونل در ۱۰ و ۱۱٫۴ متری و فواصل بین تونل ۳٫۸ و ۴٫۸ و ۵٫۸ متری

کمتر نیروهای نامنظم ایجاد شده در اطراف دو تونل و رفتار نامتعارف خاک ریزدانه در حالت غیراشباع می‌باشد که اثرات اندرکنش خاک را دچار تغییر و تحول می‌نماید. نمودارهای ۱۸ و ۱۹ از ترسیم پروفیل طولی بر روی سطح خاک در $\gamma=25$ متر جهت بدست آوردن و مقایسه جابه‌جایی کل برای عمق قرارگیری تونل در ۱۰ و ۱۱٫۴ متر حاصل گشته است.

در نمودار ۱۶ نشست در یک مقطع به عرض ۶۰ متر از پروفیل خاک محل احداث تونل نشان داده شده است. با در نظر گرفتن عمق قرارگیری تونل در ۱۰ متر و آنالیز عددی تحت بار دینامیکی حاصل از طیف زلزله طبس، مشخص می‌شود که در این پروفیل بیشترین تاثیر در هسته مرکزی پروفیل -احداث التان تونل- ایجاد می‌شود. از طرفی فاصله طولی بین دو تونل هرچقدر بیشتر باشد نشست بیشتر خواهد بود. از دلایل آن می‌توان به تاثیر



شکل ۱۸. نمودار جابجایی کل در عمق قرارگیری تونل در ۱۰ متری برای فواصل بین تونل ۳٫۸ و ۴٫۸ و ۵٫۸ متری



شکل ۱۹. نمودار جابجایی کل در عمق قرارگیری تونل در ۱۱٫۴ متری برای فواصل بین تونل ۳٫۸ و ۴٫۸ و ۵٫۸ متری

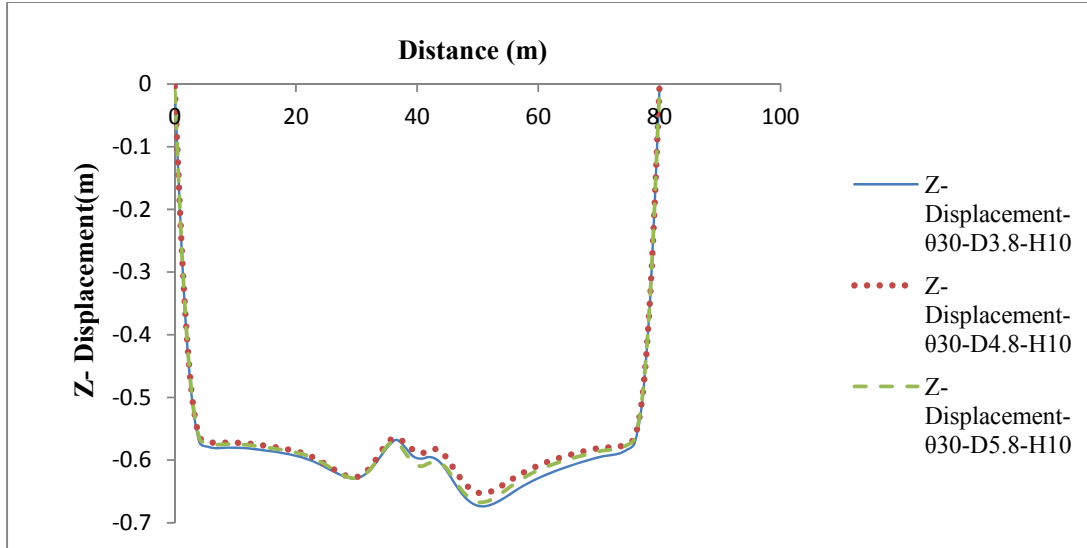
کاهش برآیند تغییر مکان المان تونل را نشان می‌دهد. تنها تفاوت آن با تغییر مکان ناشی از نشست آنست که، افزایش فاصله بین دو تونل تا حد معینی در افزایش جابجایی کل تاثیر دارد و اگر مقدار این افزایش زیاد شود بواسطه اندرکنش بیشتر خاک بستر تونل، روند افزایش تغییر مکان کاهش خواهد بود.

در نمودار ۱۸ روند تغییرات جا به جایی کل توده خاک تحت تاثیر طیف حاصل از بار دینامیکی مذکور نشان داده شده و به مانند نشست، بیانگر کاهش جا به جایی کل در فواصل بیشتر هسته مرکزی دو تونل از هم می‌باشد. از طرفی نمودار ۱۹ نیز تاثیر افزایش عمق قرارگیری تونل در تثبیت خاک بستر و در نتیجه

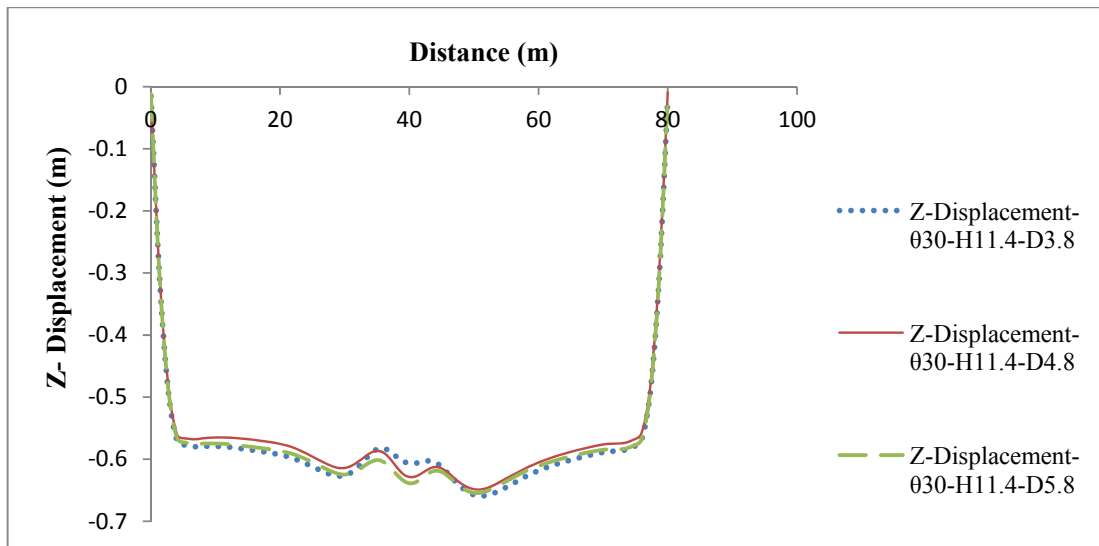
۴-۲- مدل‌های تعریف شده با زاویه ۳۰ درجه بین تونل‌ها

و قرارگیری تونل‌ها در عمق بستر، به میزان ناچیز ۲٪ می‌باشد. در شکل ۲۲ حداکثر جا به جایی در فواصل حداقل و حداکثر تونل از یکدیگر رخ می‌دهد و نشست با نزدیک شدن به مقدار میانگین این فاصله بیشتر شده بطوریکه در مقدار میانگین فاصله بین دو تونل، جا به جایی حداکثر می‌شود. این روند با افزایش میزان سربار، به صورت کاهشی می‌شود دلیل آن هم به نحوه توزیع و اعمال بار هامونیک طیف زلزله به توده خاک می‌باشد.

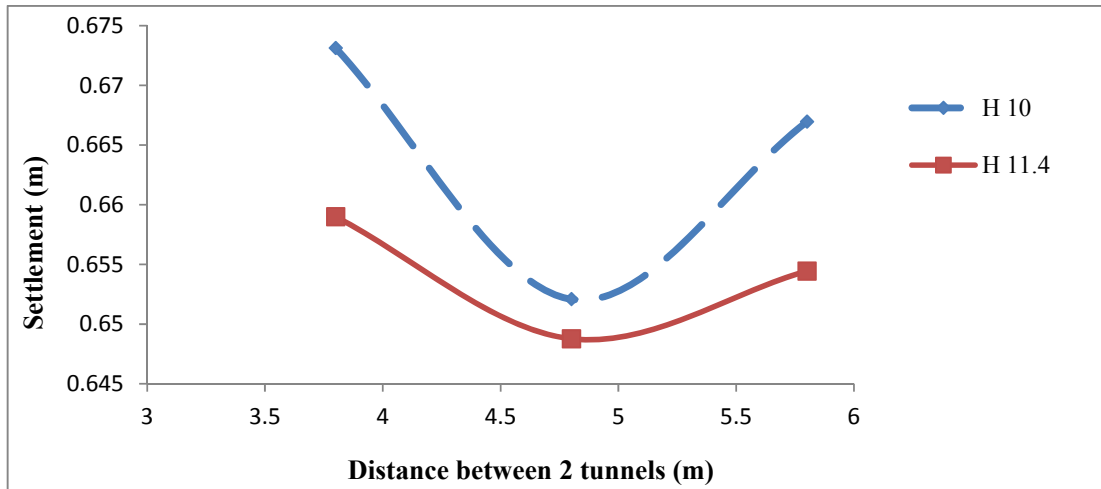
نمودارهای ۲۰ و ۲۱ نحوه نشست خاک و شکل ۲۲ مقایسه میان حداکثر نشست برای این فواصل و عمق‌های قرارگیری تونل‌ها را نشان می‌دهد در این نمودارها زاویه بین دو تونل ۳۰ درجه می‌باشد از این رو طول پروفیل ۸۰ متر انتخاب گردیده است. حداکثر نشست در محدوده قرارگیری تونل اتفاق می‌افتد و دلیل آن هم اعمال بار هامونیک به توده خاک می‌باشد. در این میان تاثیر عمق قرارگیری تونل به دلیل غالب بودن بار هامونیک



شکل ۲۰. پروفیل طولی نشست خاک برای فواصل تونل ۳.۸، ۴.۸ و ۵.۸ متر در عمق ۱۰ متر و زاویه ۳۰ درجه



شکل ۲۱. پروفیل طولی نشست خاک برای فواصل تونل ۳.۸، ۴.۸ و ۵.۸ متر در عمق ۱۱.۴ متر و زاویه

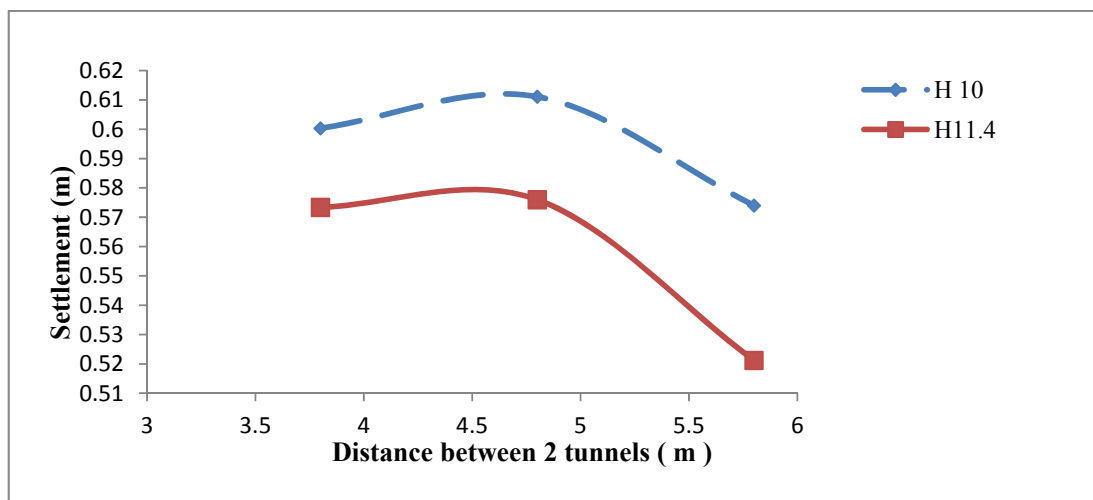


شکل ۲۲. مقایسه حداکثر نشست خاک بالای تونل در فواصل و عمق‌های مختلف قرارگیری تونل در مدل‌های ۳۰ درجه

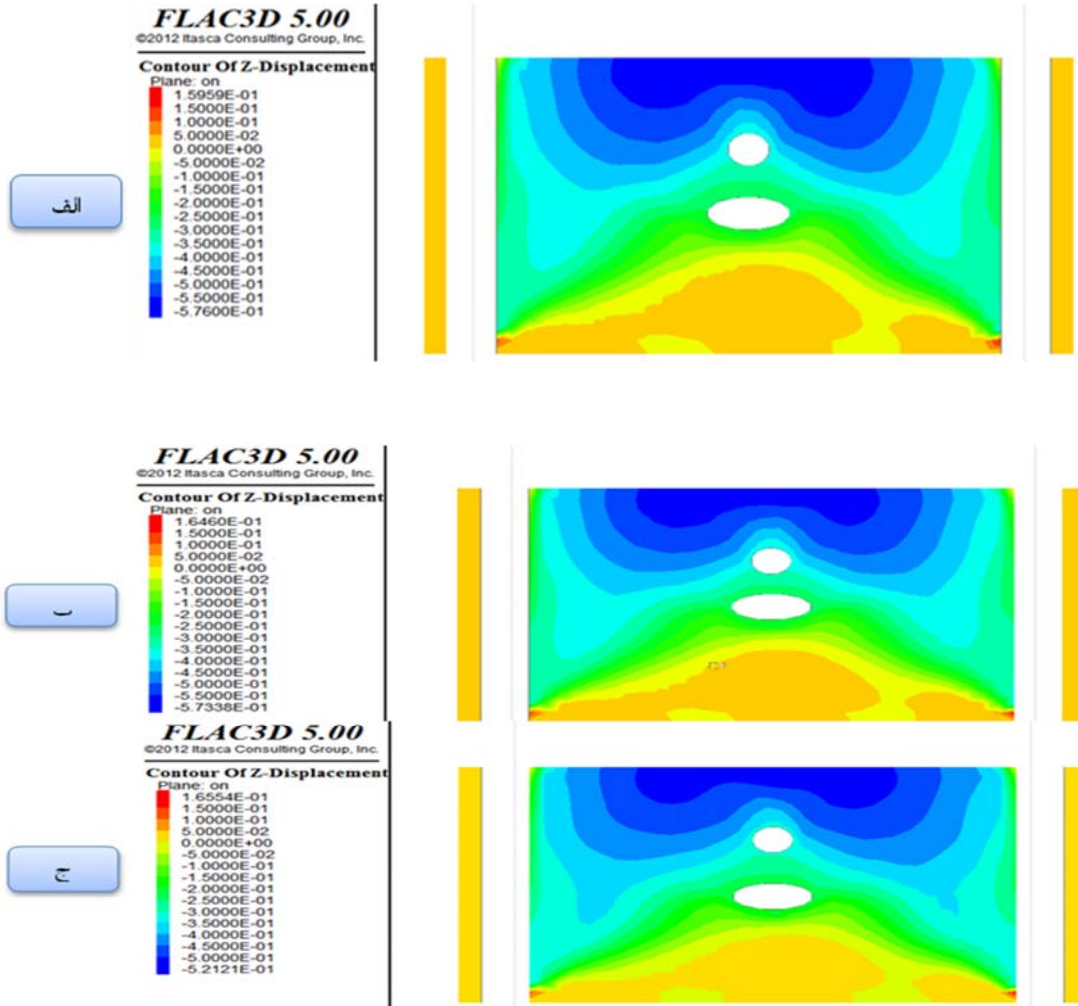
۴-۳- مدل‌های تعریف شده با زاویه ۶۰ درجه بین تونل‌ها

نشان داده شده است، در این زاویه قرارگیری نیز میزان حداکثر نشست در فاصله میانگین دو تونل از یکدیگر رخ می‌دهد و در زمانی که عمق قرارگیری تونل بیشتر است در اثر تحکیم لایه خاک، این نشست کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه، کاهش محسوس میزان نشست کل خاک بالای تونل در اثر افزایش زاویه تقاطع محور دو تونل از ۳۰ به ۶۰ درجه می‌باشد. از دلیل آن هم به تعادل رسیدن نیروهای نامنظم حاصل از اندرکنش خاک و بدنه تونل در این زاویه قرارگیری می‌باشد.

در شکل ۲۳ توزیع نشست خاک در محل تقاطع تونل‌ها در کانتور حاصل از آنالیز عددی تحت بار دینامیکی نشان داده شده است. (تونل پایین به دلیل زاویه برش حاصل از شکل سه بعدی بیضی به نظر می‌رسد.) همانطوری که مشخص است در دو عمق قرارگیری مختلف پخش جابجایی در نقاط اطراف تونل به صورت منظم و جا به جایی در مقدار بهینه خود می‌باشد. نکته قابل توجه تاثیر ناچیز میزان تغییرات در عمق قرارگیری تونل در نحوه و شکل توزیع جابه‌جایی حداکثر است. در نمودار شکل ۲۴، تاثیر فاصله و میزان عمق قرارگیری تونل در نشست تونل



شکل ۲۴. مقایسه حداکثر نشست بالای تونل در فواصل و عمق‌های مختلف قرارگیری تونل در مدل‌های ۶۰ درجه



شکل ۲۳. نشست خاک در محل تقاطع تونل‌ها در حالت ۶۰ درجه و عمق قرارگیری تونل در ۱۱,۴ متری (الف). فاصله بین تونل‌ها ۳,۸ متر (ب). فاصله بین تونل‌ها ۴,۸ متر (ج). فاصله بین تونل‌ها ۵,۸ متر

خاک تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل و تنش‌های موثر قائم می‌باشد.

۴-۵- مقایسه مدل‌های ساخته شده

در این بخش مقایسه حالت‌های مختلف نتایج این پژوهش مشاهده می‌شود که در قالب جداول به صورت کلی آورده شده است. قابل ذکر است که در بخش‌های قبلی تمامی تحلیل‌ها در قالب نمودارها و جداول و مقایسه بیان گشته است. جداول ۵ تا ۹ خلاصه‌ای از نتایج پژوهش حاضر ارائه می‌دهند.

۴-۴- مدل‌های تعریف شده با زاویه ۹۰ درجه بین تونل‌ها

آنچه در این زاویه نسبت به حالات قبل مشهود است افزایش نشست در فواصل بیشتر دو تونل نسبت به یکدیگر می‌باشد (تا حدود ۱۹٪) که دلیل آن هم عدم به تعادل رسیدن نیروهای نامنظم اطراف تونل با افزایش فواصل تونل‌ها می‌باشد. تاثیر عمق قرارگیری تونل در نشست نیز به مانند حالت قبل (زاویه ۶۰) در مقادیر پایین‌تر عمق قرارگیری تونل مشهود است. بطوریکه با افزایش عمق قرارگیری از ۱۰ به ۱۱,۴ متری، روند تغییرات مقادیر نشست نیز ۱۹٪ کاهش می‌یابد. دلیل آن هم تحکیم بستر

جدول ۵. جدول مقایسه ای تنش- نشست- جابه جایی کل در حالت $S_1\theta_0$

| نام مدل | نشست (متر) | ادرسد تغییرات نشست با تغییر فاصله بین تونل ها | ادرسد تغییرات نشست با تغییر عمق قرار گیری تونل | جا به جایی کل (متر) | ادرسد تغییرات جا به جایی با تغییر فواصل تونل ها | ادرسد تغییرات جا به جایی با تغییر عمق قرار گیری تونل | تنش ZZ(MPa) | ادرسد تغییرات تنش با تغییرات فواصل بین تونل | ادرسد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل |
|------------------------------|------------|---|--|---------------------|---|--|-------------|---|---|
| $S_1H_{10}D_{3.8}\theta_0$ | ۰,۸۲۳ | | | ۰,۹۰۵ | | | -۱/۰۹ | | |
| $S_1H_{10}D_{4.8}\theta_0$ | ۰,۸۱۳ | ۲,۵۴ | | ۰,۸۸۹ | ۳,۲۹ | | -۱/۰۸ | ۱,۷۲ | |
| $S_1H_{10}D_{5.8}\theta_0$ | ۰,۸۰۳ | | | ۰,۸۷۶ | | | -۱/۰۷ | | |
| | | | ۳,۴۳ | | | ۲,۹۹ | | | ۰,۵۷ |
| $S_1H_{11.4}D_{3.8}\theta_0$ | ۰,۸۱۸ | | | ۰,۸۸۳ | | | -۱/۱۰ | | |
| $S_1H_{11.4}D_{4.8}\theta_0$ | ۰,۸۰۴ | ۵,۳۳ | | ۰,۸۶۸ | ۳,۷۸ | | -۱/۰۹ | ۱,۵۵ | |
| $S_1H_{11.4}D_{5.8}\theta_0$ | ۰,۷۷۶ | | | ۰,۸۵ | | | -۱/۰۸ | | |

جدول ۶. جدول مقایسه ای تنش- نشست- جا به جایی کل در حالت $S_2\theta_0$

| نام مدل | نشست (متر) | ادرسد تغییرات نشست با تغییر فاصله بین تونل ها | ادرسد تغییرات نشست با تغییر عمق قرار گیری تونل | جا به جایی کل (متر) | ادرسد تغییرات جا به جایی با تغییر فواصل تونل ها | ادرسد تغییرات جا به جایی با تغییر عمق قرار گیری تونل | تنش ZZ(MPa) | ادرسد تغییرات تنش با تغییرات فواصل بین تونل | ادرسد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل |
|------------------------------|------------|---|--|---------------------|---|--|-------------|---|---|
| $S_2H_{10}D_{3.8}\theta_0$ | ۱,۱۲۴ | | | ۱,۱۶۹ | | | -۰,۹۰۸ | | |
| $S_2H_{10}D_{4.8}\theta_0$ | ۱,۱۵ | ۳,۰۵ | | ۱,۱۷۵ | ۰,۵۳ | | -۰,۹۲۲ | ۳,۰۸ | |
| $S_2H_{10}D_{5.8}\theta_0$ | ۱,۱۵۸ | | | ۱,۱۷۳ | | | -۰,۹۳۶ | | |
| | | | ۰,۴۶ | | | ۱,۰۲ | | | ۶,۵۹ |
| $S_2H_{11.4}D_{3.8}\theta_0$ | ۱,۱۲۴ | | | ۱,۱۵۷ | | | -۰,۹۴۷ | | |
| $S_2H_{11.4}D_{4.8}\theta_0$ | ۱,۱۴۶ | ۲,۵۴ | | ۱,۱۶۴ | ۰,۵۹ | | -۰,۹۵۹ | ۵,۳۱ | |
| $S_2H_{11.4}D_{5.8}\theta_0$ | ۱,۱۵۳ | | | ۱,۱۶۲ | | | -۰,۹۹۷ | | |

جدول ۷. جدول مقایسه ای تنش - نشست - جا به جایی کل در حالت $S_1\theta_{30}$

| نام مدل | نشست (متر) | ٪ درصد تغییرات نشست با تغییر فاصله بین تونل ها | ٪ درصد تغییرات نشست با تغییر عمق قرار گیری تونل | جا به جایی کل (متر) | ٪ درصد تغییرات جا به جایی با تغییر فواصل تونل ها | ٪ درصد تغییرات جا به جایی با تغییر عمق قرار گیری تونل | تنش ZZ (MPa) | ٪ درصد تغییرات تنش با تغییرات فواصل بین تونل | ٪ درصد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل |
|---------------------------------|------------|--|---|---------------------|--|---|--------------|--|--|
| $S_1H_{10}D_{3.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۷۳ | | | ۰,۷۹۳ | | | -۱/۰۶ | | |
| $S_1H_{10}D_{4.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۵۲ | ۳,۲۳ | | ۰,۷۷۹ | ۱,۸۰ | | -۱/۰۶ | ۰,۴۹ | |
| $S_1H_{10}D_{5.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۶۷ | | ۲,۱۴ | ۰,۷۸۶ | | ۰,۶۹ | -۱/۰۶ | | ۰,۴۴ |
| $S_1H_{11.4}D_{3.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۵۹ | | | ۰,۷۸۸ | | | -۱/۰۶ | | |
| $S_1H_{11.4}D_{4.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۴۹ | ۱,۵۸ | | ۰,۷۷۷ | ۱,۳۱ | | -۱/۰۷ | ۰,۳۶ | |
| $S_1H_{11.4}D_{5.8}\theta_{30}$ | ۰,۶۵۴ | | | ۰,۷۸۵ | | | -۱/۰۶ | | |

جدول ۸. جدول مقایسه ای تنش - نشست - جا به جایی کل در حالت $S_1\theta_{60}$

| نام مدل | نشست (متر) | ٪ درصد تغییرات نشست با تغییر فاصله بین تونل ها | ٪ درصد تغییرات نشست با تغییر عمق قرار گیری تونل | جا به جایی کل (متر) | ٪ درصد تغییرات جا به جایی با تغییر فواصل تونل ها | ٪ درصد تغییرات جا به جایی با تغییر عمق قرار گیری تونل | تنش ZZ (MPa) | ٪ درصد تغییرات تنش با تغییرات فواصل بین تونل | ٪ درصد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل |
|---------------------------------|------------|--|---|---------------------|--|---|--------------|--|--|
| $S_1H_{10}D_{3.8}\theta_{60}$ | ۰,۶ | | | ۰,۶۰۹ | | | -۱/۶۴ | | |
| $S_1H_{10}D_{4.8}\theta_{60}$ | ۰,۶۱۱ | ۶,۴۶ | | ۰,۶۱۳ | ۵,۸۸ | | -۱/۶۵ | ۷,۴۰ | |
| $S_1H_{10}D_{5.8}\theta_{60}$ | ۰,۵۷۴ | | ۱۰,۱۳ | ۰,۵۷۹ | | ۸,۰۲ | -۱/۵۳ | | ۱۹,۲۵ |
| $S_1H_{11.4}D_{3.8}\theta_{60}$ | ۰,۵۷۳ | | | ۰,۵۷۹ | | | -۱/۶۳ | | |
| $S_1H_{11.4}D_{4.8}\theta_{60}$ | ۰,۵۷۶ | ۱۰,۵۱ | | ۰,۵۸۵ | ۹,۰۸ | | -۱/۳۸ | ۱۷,۳۴ | |
| $S_1H_{11.4}D_{5.8}\theta_{60}$ | ۰,۵۲۱ | | | ۰,۵۳۶ | | | -۱/۶۲ | | |

جدول ۹. جدول مقایسه ای تنش- نشست- جا به جایی کل در حالت $S_1\theta_{90}$

| نام مدل | نشست (متر) | فاصله بین تونل ها / درصد تغییرات نشست با تغییر | جا به جایی کل (متر) | تغییر عمق قرار گیری تونل / درصد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل | تنش ZZ (MPa) | فاصله بین تونل / درصد تغییرات تنش با تغییرات | تغییر عمق قرار گیری تونل / درصد تغییرات تنش با تغییر عمق قرار گیری تونل |
|---------------------------------|------------|---|---------------------|--|--------------|---|--|
| $S_1H_{10}D_{3.8}\theta_{90}$ | ۰,۶۰۲ | | ۰,۶۰۴ | | -۱/۱۶ | | |
| $S_1H_{10}D_{4.8}\theta_{90}$ | ۰,۶۴۵ | ۱۹,۰۲ | ۰,۶۵۱ | ۱۹,۴۷ | -۱/۱۷ | ۱,۳۵ | |
| $S_1H_{10}D_{5.8}\theta_{90}$ | ۰,۵۴۲ | | ۰,۵۴۵ | | -۱/۱۶ | | |
| | | ۱۹,۰۰ | | ۱۸,۹۷ | | | ۰,۴۷ |
| $S_1H_{11.4}D_{3.8}\theta_{90}$ | ۰,۵۲۸ | | ۰,۵۳ | | -۱/۱۶ | | |
| $S_1H_{11.4}D_{4.8}\theta_{90}$ | ۰,۵۴۲ | ۱۰,۸۹ | ۰,۵۴۷ | ۱۰,۶۸ | -۱/۱۸ | ۱,۶۷ | |
| $S_1H_{11.4}D_{5.8}\theta_{90}$ | ۰,۵۸۵ | | ۰,۵۸۶ | | -۱/۱۷ | | |

۵- نتیجه گیری

-افزایش عمق قرارگیری تونل عمدتاً سبب کاهش جا به جایی و نشست می شود، به طوریکه در این تحقیق افزایش حدود ۱۲ درصدی عمق قرارگیری تونل (از ۱۰ متر به ۱۱,۴ متر) نشست و جا به جایی کل حداقل حدود ۱٪ و حداکثر حدود ۱۹٪ کاهش یافت.

-کمترین جا به جایی در جهت Z مربوط به مدل هایی است که دارای خاک درشت دانه اند و زاویه بین دو تونل ۶۰ درجه می باشد و برابر با ۰,۵۲۱۲۱- متر می باشد. با توجه به مشاهدات می توان نتیجه گرفت که افزایش سختی و درشت دانه بودن خاک باعث کاهش جا بجایی می شود.

-همچنین بیشترین جا به جایی در جهت Z مربوط به حالتی است که خاک ریزدانه، عمق قرارگیری تونل ۱۰متر، فاصله بین تونل ها ۵,۸ متر و زاویه بین دو تونل صفر درجه بوده و به عبارت دیگر تونل ها در موازات یکدیگر قرار گرفته و بیشترین سطح تقاطع با یکدیگر را داشته باشند که مقداری برابر با

در مرحله اول مدل سازی، پارامترهای ثابت و پارامترهای متغیر مدل بررسی شدند. سپس پارامترهای موجود در متغیرهای ثابت و متغیر بصورت تک به تک توصیف شدند. در ادامه نحوه مدل سازی در نرم افزار FLAC 3D بصورت گام به گام شرح داده شد. سپس به بررسی تک به تک نتایج مدل ها و مقایسه بین حالات مختلف مدل سازی و تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج تحلیل و در آخر به معرفی مدل برتر پرداختیم.

-با توجه مدل سازی های انجام شده در حالت کلی کمترین میزان جابه جایی در $\theta=90$ رخ داد و مشاهده شد با افزایش زاویه تقریباً از میزان جا به جایی کاسته می شود. (فقط در $D_{5.8}H_{11.4}$ و $D_{4.8}H_{10}$ در زوایای ۶۰ و ۹۰ این اتفاق رخ نداده است).

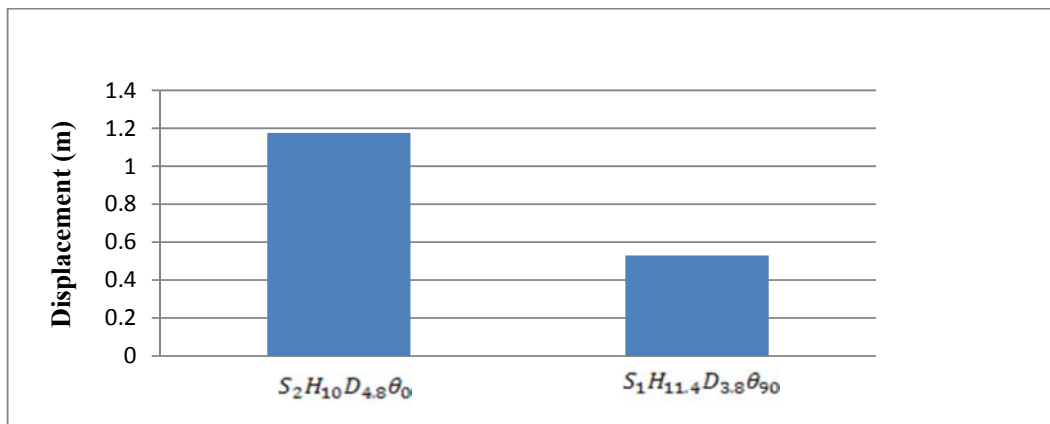
-نوع خاک و میزان سستی آن در تحلیل های لرزه ای از اهمیت ویژه ای برخوردار است و همانطور که مشاهده شد با کاهش مدول الاستیسیته (E) و ریزتر شدن دانه های خاک تاثیر امواج بر خاک و سازه به مقدار چشمگیری افزایش می یابد.

است. با ارزیابی نتایج مشاهده می‌شود که میزان عمق قرارگیری تونل تا ۱۹٪، فاصله بین دو تونل تا ۱۹٫۵٪ و نوع خاک تا ۳۷٪ و زاویه بین تونل‌ها تا ۶۷٪ در میزان جا به جایی کل موثر بودند. نتیجه نهایی آنکه هرچه تونل‌ها در فاصله عمیق‌تری از سطح خاک حفر شوند ایمنی بیشتری در برابر بار لرزه‌ای دارند و بهترین حالت برای مدل‌سازی در این مطالعه، حالتی است که خاک مدل از نوع درشت دانه، عمق قرارگیری تونل ۱۱٫۴ متر، زاویه بین دو تونل ۹۰ درجه (متعامد) و فاصله بین دو تونل ۳٫۸ متر می‌باشد و بحرانی‌ترین حالت، حالتی است که زاویه بین دو تونل صفر درجه (در یک راستا) و فاصله بین دو تونل ۳٫۸ متر و عمق قرارگیری تونل ۱۰ متر و خاک ریزدانه باشد و تفاوت این دو حالت حدود ۵۵٪ است.

۱۰۵۸۱- متر داشت. تفاوت بیشترین و کمترین جا به جایی در جهت Z در مدل‌ها ۵۵٪ بود.

بیشترین و کمترین جابه‌جایی کل نیز به همین ترتیب مربوط به مدل با زاویه بین دو تونل صفر درجه با عمق قرارگیری تونل در ۱۰ متر و فاصله بین تونل ۴٫۸ متر و مدل با زاویه بین تونل ۹۰ درجه و عمق قرارگیری تونل در ۱۱٫۴ و فاصله بین تونل ۳٫۸ متر بود. نمودار شکل ۲۶ تغییرات جابه‌جایی کل در تراز سطح زمین برای این دو مدل را نمایش می‌دهد.

در بین مدل‌های ساخته شده، مشخص شد تغییر فاصله بین دو تونل بیشترین تأثیر خود را در حالتی می‌گذارد که زاویه بین تونل‌ها ۹۰ درجه و عمق قرارگیری تونل در ۱۰ متری باشد، و این مقدار حدود ۱۹٪ در نشست و ۱۹٫۵٪ در جا به جایی کل



شکل ۲۵. مقایسه جابه‌جایی کل در دو مدل با کمترین و بیشترین مقدار

۶- مراجع

loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 231-238.

-Banerjee, S. K., & Chakraborty, D. (2018). Stability analysis of a circular tunnel underneath a fully liquefied soil layer. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 78, 84-94.

-Boonyarak, T., & Ng, C. W. (2015). Effects of construction sequence and cover depth on crossing-tunnel interaction. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(7), 851-867.

-Boonyarak, T., & Ng, C. W. (2016). Three-dimensional influence zone of new tunnel excavation crossing underneath existing tunnel. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(42), 1513-1518.

-Do, N. A., Dias, D., & Oreste, P. (2015). 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin

- Dhamne, R. R., Mishra, S., Kumar, A., & Rao, K. S. (2021, October). Deformation behavior of D-Shaped shallow tunnels under dynamic loading conditions. *In Structures*, Elsevier, Vol. 33, 3973-3983.

-Kampas, G., Knappett, J. A., Brown, M. J., Anastasopoulos, I., Nikitas, N., & Fuentes, R. (2019). The effect of tunnel lining modelling approaches on the seismic response of sprayed concrete tunnels in coarse-grained soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 122-137.

- Varma, M., Maji, V. B., & Boominathan, A. (2019). Numerical modeling of a tunnel in jointed rocks subjected to seismic loading. *Underground Space*, 4(2), 133-146.

- Yang, W., Zhang, C., Liu, D., Tu, J., Yan, Q., Fang, Y., & He, C. (2019). The effect of cross-sectional shape on the dynamic response of tunnels under train induced vibration

- Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22-33.
- Liu, H. Y., Small, J. C., Carter, J. P., & Williams, D. J. (2009). Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 880-894.
- Liu, X., Fang, Q., & Zhang, D. (2018). Mechanical responses of existing tunnel due to new tunnelling below without clearance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 44-52.
- Liu, X., Fang, Q., Zhang, D., & Wang, Z. (2019). Behaviour of existing tunnel due to new tunnel construction below. *Computers and Geotechnics*, 110, 71-81.
- Liu, Z., Liu, J., Pei, Q., Yu, H., Li, C., & Wu, C. (2021). Seismic response of tunnel near fault fracture zone under incident SV waves. *Underground Space*, 6(6), 695-708.
- Moradi Maryam, Mehdi Hosseini, Mohsen Sharifi Boroujerdi, 2013, dynamic analysis of Tehran metro line seven tunnel using ground-structure interaction method using FLAC 3D software, *Mining Engineering*, 8(19), 108 -109.
- Sliteen, I., Mroueh, H., & Sadek, M. (2011, August). Three-dimensional modeling of the behavior of shallow tunnel under seismic loading. In CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- Sun, Q., Dias, D., & e Sousa, L. R. (2020). Soft soil layer-tunnel interaction under seismic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103329.
- Wang, T., Geng, P., Li, P., Wang, Q., & Wang, L. (2022). Deformation and failure of overburden soil subjected to normal fault dislocation and its impact on tunnel. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106747.
- Yang, H., Wang, M., Zhang, X., & Yu, L. (2024). Improved semi-analytical solution for longitudinal mechanical response of tunnels crossing active faults considering nonlinear soil-tunnel interactions and shear.
- Zhang, L., & Liu, Y. (2020). Numerical investigations on the seismic response of a subway tunnel embedded in spatially random clays. *Underground Space*, 5(1), 43-52.
- tunnels in soft ground. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2101-2113.
- Guo, W., Yang, W., Qian, Z., Yang, L., He, C., & Qu, S. (2023). The effect of internal structure on dynamic response of road-metro tunnels under train vibration loads: An experimental study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 138, 105182.
- Jin, D., Yuan, D., Li, X., & Zheng, H. (2018). Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 81, 209-220.
- Kong, F., Lu, D., Du, X., & Shen, C. (2019). Elastic analytical solution of shallow tunnel owing to twin tunnelling based on a unified displacement function. *Applied Mathematical Modelling*, 68, 422-442.
- Li, X., Zhang, C., & Yuan, D. (2013). An in-tunnel jacking above tunnel protection methodology for excavating a tunnel under a tunnel in service. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, 22-37.
- Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22-33.
- Ng, C. W., Boonyarak, T., & Mašin, D. (2013). Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(9), 935-946.
- Patil, M., Choudhury, D., Ranjith, P. G., & Zhao, J. (2018). Behavior of shallow tunnel in soft soil under seismic conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82, 30-38.
- Sahoo, J. P., & Gowtham, G. (2023). Stability evaluation of circular tunnels in cohesive frictional soil under earthquake loading using the modified pseudo-dynamic approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166, 107740.
- Sandoval, E., & Bobet, A. (2020). Effect of input frequency on the seismic response of deep circular tunnels. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 139, 106421.
- Shahrour, I., Khoshnoudian, F., Sadek, M., & Mroueh, H. (2010). Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 478-482.

Study of Seismic Behavior of Circular Crossing Tunnels under Different Conditions

Elham Salehi Mehraban, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Maryam Yazdi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Alireza Sadeghabadi, Ph.D., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Earth Resources, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: yazdi_ma@yahoo.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

With the increase in population and the development of urban transportation infrastructure, there is a trend of building more urban subways and, as a result, the intersection of tunnels. The present article investigates the seismic behavior of circular cross tunnels (metro) in FLAC 3D finite difference software. The variables of this research included the distances between two tunnels, the depth of the tunnels, the angles between the tunnels and the type of soil. Different models have been investigated and analyzed by comparing the amount of total displacement, settlement and stress. Finally, by evaluating the results, it was observed that by decreasing the depth of the tunnels, the displacements increased and also by increasing the angle between the tunnels, the amount of displacements decreased. The type of soil is of particular importance in seismic analysis, and with the decrease of the modulus of elasticity (E) and the finer grains of the soil, the impact of waves on the soil and the structure has increased significantly. The results show that the depth of the tunnels up to 19%, the distance between two tunnels up to 19.5%, the type of soil up to 37% and the angle between the tunnels up to 67% were effective in the amount of total displacement.

Keywords: Non-Coplanar Cross Tunnels, Circular Tunnel, FLAC3D, Dynamic Load