

مدل سازی فیزیکی تونل کم عمق در خاک دانه‌ای سست با سطح زمین شیب‌دار

پژوهشی

نادر موسائی^۱؛ محمد حسین خسروی^{۲*}؛ محمد فاروق حسینی^۲؛ سید فرید آل رسول^۴

۱- دانشجوی مقطع دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، n.moussaei@ut.ac.ir

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، mh.khosravi@ut.ac.ir

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن و منابع انرژی، دانشگاه UNSW، سیدنی، استرالیا، s.hossaini@unsw.edu.au

۴- دانش آموخته مقطع کارشناسی؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، faridalerasoul@ut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹

شماره صفحات: ۱۴۹ تا ۱۶۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.9268.1386

چکیده	واژگان کلیدی
پیش‌بینی جابه‌جایی‌های سطحی و زیرسطحی در عملیات حفاری فضاهای زیرزمینی، یک امر حیاتی در راستای ایمنی و برنامه‌ریزی حوادث احتمالی است. مدل‌سازی فیزیکی به دلیل انجام مدل‌سازی در یک محیط واقعی و همچنین با استفاده از مواد طبیعی، نقش بسیار مهمی در این زمینه بخصوص در زمین‌های نرم ایفا کرده است. این پژوهش، نتایج یک سری مدل‌سازی فیزیکی حفر تمام مقطع تونل در اعماق کم خاک‌های ماسه‌ای، در شرایط شیب‌دار بودن سطح زمین را ارائه کرده است. استفاده از صفحات شفاف در ساخت محفظه این مدل، اجازه عکس‌برداری از جابجایی‌های خاک هنگام حفر تونل را میسر کرده که با توجه به این امکان، از آنالیز تصویری به منظور ثبت جابجایی‌های خاک و نشست سطح زمین استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها در این پژوهش، حاکی از آن است که در صورت شیب‌دار بودن سطح زمین بالای تونل، منحنی نشست سطح، نامتقارن بوده و سطح شکست ایجاد شده در بالادست شیب به صورت دوخطی با زاویه شیب‌های متفاوت ظاهر می‌شود. گرچه حتی با وجود سطح شیب‌دار، حداکثر نشست سطح در راستای تاج تونل اتفاق می‌افتد، اما در عمق یکسان تونل، مقدار نشست برای سطح زمین شیب‌دار، حدود ۲۵ درصد بیشتر از حالت سطح زمین افقی است. براساس کنتورهای جابجایی، محدوده تخریب شده در اطراف تونل به دو ناحیه نزدیک تونل و ناحیه نزدیک به سطح زمین تقسیم‌بندی شد. در ناحیه نزدیک تونل، شیب دیواره مرز تخریب در بالادست شیروانی، حدود ۱۰ درجه کمتر از دیواره مرز تخریب در پایین دست شیروانی بوده که نشان از گستردگی بیشتر محدوده تخریب به سمت بالادست شیروانی دارد. در ناحیه نزدیک به سطح زمین، شیب دیواره مرز تخریب مستقل از عمق تونل بوده و در همه مدل‌ها مقدار ثابت ۵۴ درجه را نشان می‌دهد.	تونل کم عمق سطح زمین شیب‌دار خاک دانه‌ای سست مدل‌سازی فیزیکی پردازش تصویر

تونل‌های سنتی، تونل‌های با بارگذاری نامتقارن یا به عبارت بهتر، حفاری تونل‌هایی که سطح زمین افقی نبوده و شیب‌دار است، دارای مکانیسم پیچیده‌تری می‌باشند و ساخت آن‌ها دشوارتر و همین‌طور مستعد خطرات مهندسی

۱- پیش‌گفتار

به دلیل محدودیت‌های عوارض و ترازهای زمین‌شناسی، بارگذاری نامتقارن تونل‌ها در ورودی تونل‌ها، کوهپایه‌ها و دره‌ها، اغلب غیر قابل اجتناب خواهد بود. در مقایسه با

* تهران؛ تقاطع خیابان کارگر شمالی و اتوبان شهید گمنام (چهارراه امیر آباد)، روبروی کوچه نهم، ساختمان شماره ۲، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن؛ کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱؛ شماره تلفن: ۰۲۱-۸۲۰۸۴۳۹۸؛ دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۰۸۸۳۸

تونل‌زنی در محیط‌های با سطح زمین شیب‌دار، روی تخمین فشار وارد بر سیستم نگهداری متمرکز بوده و تاثیر پارامتر هم‌گرایی تونل (افت زمین) بر جابجایی نواحی اطراف تونل و نشست سطح زمین، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. البته برای حالتی که سطح زمین افقی باشد، برخی مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده که نشان دهنده تقارن کامل در نواحی تغییر شکل یافته اطراف تونل و منحنی نشست سطح زمین است (Fazel, et al, 2015; Moussaei, et al, 2016; Gharehdash & Barzegar, 2013; Rahman nezhad, et al, 2013, Hossaini, et al, 2010; al, 2010).

در عملیات حفاری تونل‌هایی با سطح زمین شیب‌دار، فاکتورهای مختلفی از جمله، مشخصات فیزیکی و مکانیکی زمین، عمق و شیب سطح زمین و ابعاد سازه ممکن است، در پروفیل نشست سطح زمین و مکانیزم ناپایداری تونل تأثیر گذار باشند؛ لذا در این پژوهش سعی بر آن شد که تأثیر عمق تونل بر گستردگی ناحیه نشست و پروفایل نشست سطح زمین شیب‌دار، مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، از یک جعبه مدل‌سازی استفاده شده است که در آن قابلیت شبیه سازی حفاری تونل تمام مقطع دایروی وجود داشته و می‌توان در مدل تأثیر افزایش میزان همگرایی تونل بر نحوه گسترش ناحیه تخریب شده اطراف تونل را مشاهده کرد.

۲- مدل‌سازی فیزیکی

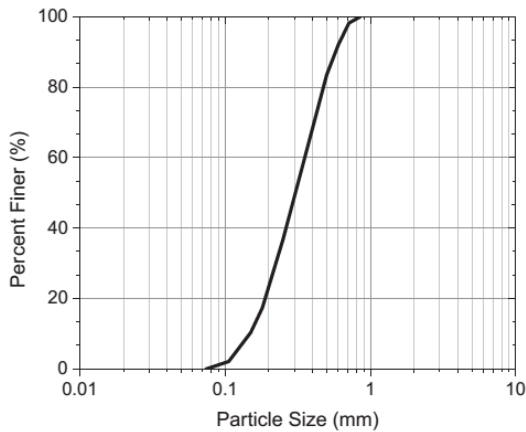
۲-۱- جعبه مدل‌سازی

مدل فیزیکی از یک جعبه مدل‌سازی با ابعاد داخلی، $30 \times 145 \times 120$ سانتی‌متر تشکیل شده است که در شکل ۱، نشان داده شده است.

جعبه مدل‌سازی طوری طراحی و ساخته شده است که در حین بارگذاری مدل، کوچک‌ترین تغییر شکلی نداشته باشد. قسمت جلویی و عقب جعبه مدل‌سازی، ورق پلاکسی گلاس شفاف با ضخامت ۲۰ میلی‌متر نصب شده است. لازم به ذکر است که براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، میزان خیز صفحه پلاکسی در طول آماده‌سازی مدل و آزمایش آن، کمتر از 0.1 میلی‌متر بوده که این مقدار کمتر از 0.3% درصد ضخامت مدل و 30 درصد از میانگین ابعاد دانه‌های

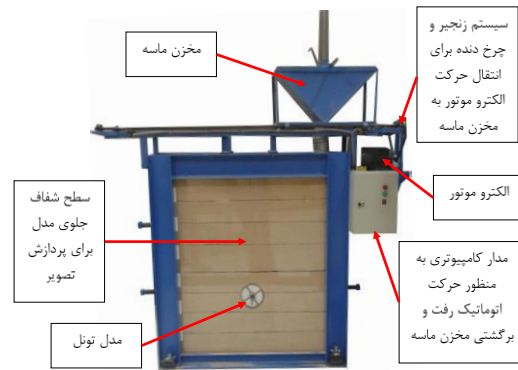
بسیاری هستند. اساساً این اتفاقات ممکن است، به دلیل کمبود دانش در مورد خصوصیات مکانیکی تونل‌های با بارگذاری نامتقارن باشد که در نهایت منجر به نداشتن یک طرح مناسب خواهد شد (Lei, et al, 2015). این مشکل، علاقه‌مندی بسیار زیادی را برای تحقیق جلب کرده است و تعدادی از مطالعات علمی و آنالیزهای عملی، درباره ویژگی‌های مکانیکی ساختار تونل، مکانیسم شکست زمین دربرگیرنده و روش‌های ساخت و نگهداری تونل صورت گرفته است. ژو و همکارانش، مدل‌های محاسباتی جدیدی را بر اساس فرضیات جدید و مدل‌های دیواره نگهدارنده مطرح کرده‌اند. آن‌ها همچنین فرمول‌های اصلاح شده‌ای را برای محاسبه فشار توده سنگ در مناطق کم عمق و تونل‌های با بارگذاری نامتقارن استخراج کرده و این فرمول‌ها را با استاندارد طراحی تونل‌ها در چین (روش کد) مقایسه نموده‌اند (Zuo, et al, 2011). آن‌ها نشان دادند که نتایج بدست آمده از این روش با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده در محل سایت مطابقت داشته و یک مکمل مناسب برای روش کد است. در مطالعات دیگری نیز، خصوصیات مکانیکی تونل‌های با بارگذاری نامتقارن، رفتار دینامیکی، اثر متقابل بین توده سنگ و لاینینگ و تأثیر پارامترهای خاص مانند زاویه‌داری مورد مطالعه قرار گرفته است (Pan, et al, 2011; Yang & Wang, 2008). لی و همکارانش با استفاده از یک مدل فیزیکی بزرگ مقیاس، اثر شیب سطح زمین بر مکانیزم ناپایداری و همچنین فشار وارده بر سیستم نگهداری در تونل تحت بارگذاری نامتقارن را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تغییرات فشار وارده بر دیواره تونل طی حفاری چند مرحله‌ای تونل را برداشت کرده و بعد از اتمام حفاری، بر سطح مدل تا جایی که تونل به طور کامل تخریب شود، بار سطحی وارد کرده‌اند و در انتها شیب دیواره ناحیه تخریب شده را برای سه حالت شیب زمین برداشت کردند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب سطح زمین، شیب دیواره ناحیه تخریب شده در بالادست افزایش و در پایین دست تونل کاهش پیدا می‌کند (Lei, et al, 2015). بای و وو روش تحلیلی را برای محاسبه فشار وارده بر دیواره تونل در حالت بارگذاری نامتقارن برای تونل‌های کم عمق و عمیق ارائه کرده‌اند (Bai & Wu, 2012). همان‌طور که اشاره شد، اکثر مطالعات انجام شده روی

چسبندگی صفر برای این ماسه، زاویه اصطکاک داخلی آن برابر ۳۶ درجه خواهد بود.

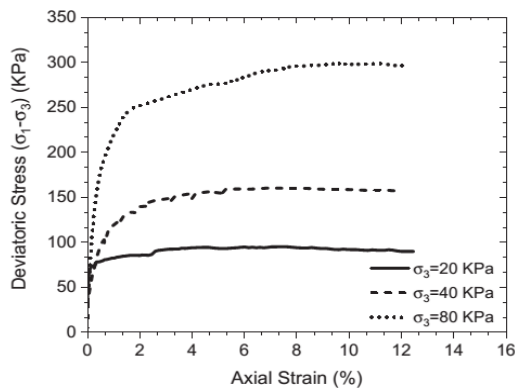


شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه فیروزکوه

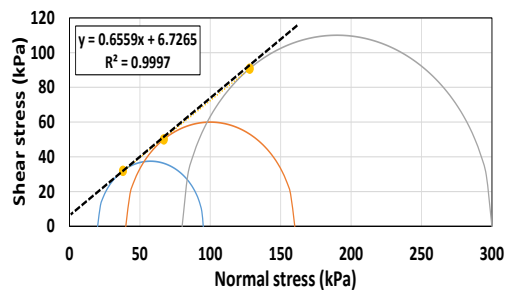
خاک استفاده شده در مدل است، بنابراین خمش و تغییر شکل ورق پلاکسی گلاس حین انجام مدل‌سازی، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است (Moussaei, et al, 2019).



شکل ۱- جعبه مدل‌سازی و معرفی اجزاء مدل



شکل ۳- نتایج آزمایش فشاری سه محوره



شکل ۴- پوش موهر-کولمب نتایج آزمایش سه محوره

بر طبق مطالعات انجام شده روی ماسه فیروزکوه که ۱۶۱، مقادیر نسبت پوکی حداکثر (e_{max}) و حداقل (e_{min}) این ماسه به ترتیب برابر ۰/۸۹۴ و ۰/۵۴۸ و چگالی

۲-۲- مصالح مصرفی برای مدل‌سازی

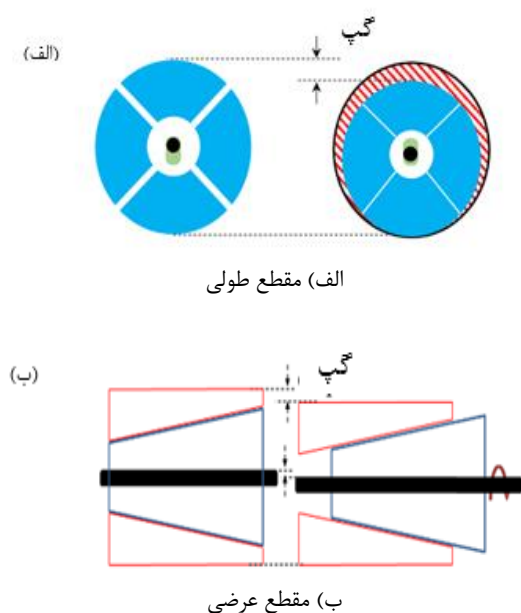
تمرکز این پژوهش روی تونل‌های کم عمق شهری احداث شده با ماشین حفاری مکانیزه (قطر ۹/۴ متر) است؛ بنابراین با در نظر گرفتن فاکتور مقیاس ۵۰، قطر تونل در مدل فیزیکی برابر ۱۸۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. براساس مطالعات کوتز (۱۹۹۴)، به‌منظور کاهش اثر اندازه دانه‌ها، نسبت قطر تونل به میانگین قطر دانه‌های خاک در مدل‌سازی فیزیکی باید بین ۵۰۰ و ۱۰۰۰ باشد (Kutter, 1994). با در نظر گرفتن این نکته، ماسه فیروزکوه (کد ۱۶۱) با قطر میانگین $D_{50}=300\mu m$ و ضریب یکنواختی $Cu=D_{60}/D_{10}=2.3$ مناسب این مدل‌سازی فیزیکی تشخیص داده شد. نمودار توزیع دانه‌بندی این ماسه در شکل ۲، نشان داده شده است.

به‌منظور تعیین خصوصیات مقاومتی این ماسه، چند تست مقاومت فشاری سه محوره با مقادیر تنش جانبی نشان داده شده در شکل ۳ روی ماسه خشک انجام شد. در شکل ۴، دوایر موهر و پوش شکست حاصل برای تست‌های انجام شده نشان داده شده است. براساس این نتایج، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب برابر ۳۶ درجه و ۶/۷ کیلوپاسکال بدست آمده است. لازم به توضیح است که مقدار حاصل شده به عنوان چسبندگی، در واقع ناشی از قفل‌شدگی بین دانه‌های ماسه بوده و بهتر است، به عنوان بخشی از اصطکاک در نظر گرفته شود. بنابراین، با فرض

مدل‌سازی، از روش پیشنهادی کاتو و همکاران برای کاهش یکنواخت قطر تونل استفاده شده است (Boonsiri & Takemura, 2015; Katoh, et al, 1998). در این روش، مدل تونل به صورت دو گوه تودرتو مطابق شکل ۶، در نظر گرفته شده که گوه بیرونی به چهار قسمت مساوی برش داده شده است.



شکل ۵- سیستم اتوماتیک پاشش ماسه



شکل ۶- طرح شماتیک شبیه سازی فرایند حفاری در مدل فیزیکی

در محور گوه داخلی، پیچ با قطر ۱۰ میلی‌متر کار گذاشته شده که میله به وسیله دو مهره که در دو انتهای

ویژه (GS) آن برابر ۲/۶۵ گزارش شده است (Dargahi, 2010). از آنجایی که چگالی ماسه در همه مدل‌های این پژوهش، یکسان و برابر ۱۴۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب نگه داشته شده است، نسبت پوکی (e) و چگالی نسبی (Dr) آن در مدل فیزیکی به ترتیب برابر ۰/۸۸۷ و ۰/۰۲ بدست آمده است؛ بنابراین بر طبق استاندارد ASTM D4253، ماسه در این شرایط مدل فیزیکی در رده ماسه خیلی سست (very loose) قرار گرفته است.

از آنجایی که انجام تست فشاری سه محوره روی خاک خیلی سست غیرممکن است، زیرا به محض اعمال تنش‌های جانبی و نرمال خاک متراکم می‌شود، در این پژوهش سعی شده است تا با پایین نگه داشتن سطوح تنش جانبی در تست‌های سه محوره شرایط بارگذاری نسبتاً مشابه مدل فیزیکی باشد. علاوه بر آن، برای آماده‌سازی نمونه آزمایش سه محوره به روش خشک به جای استفاده از قیف‌های مرسوم از قیف با لوله بسیار باریک استفاده شده است.

۲-۳- آماده‌سازی مدل

آماده‌سازی مدل به روش پاشش ماسه با استفاده از یک پخش کننده اتوماتیک با سرعت حرکت یکنواخت ۱/۸ متر در دقیقه انجام گرفته است. سرعت جریان خاک از پخش کننده برابر با ۲۶ کیلوگرم در هر دقیقه است که در هر حرکت رفت و برگشت ۷۰ میلی‌متر به ارتفاع لایه ماسه افزوده می‌شود. حرکت یکنواخت پخش کننده و همچنین تنظیم ارتفاع ریزش در طول آماده‌سازی مدل باعث می‌شد که چگالی ماسه در نقاط مختلف و ترازهای متفاوت، یکسان بوده و مدل، همگنی لازم را داشته باشد (شکل ۵). به این صورت که با هر بار رفت پخش کننده یک لایه ۳۵ میلی‌متری از ماسه اضافه شده و با هر بار چرخش اهرم تنظیم کننده، ارتفاع ریزش ۳۵ میلی‌متر بالاتر برده می‌شد؛ بنابراین به محض رسیدن پخش کننده به هر دو انتهای مدل، اهرم یک دور چرخانده شده است، تا اینکه ارتفاع ریزش ثابت بماند. با ثابت نگه داشتن ارتفاع ریزش ماسه، حدود ۱۰ سانتی‌متر، در طول آماده‌سازی مدل برای تمام مدل‌ها، چگالی ماسه در همه مدل‌ها، یکسان و برابر ۱۴۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب نگه داشته شده است.

۲-۴- شبیه‌ساز فرایند حفاری تونل

برای شبیه‌سازی فرایند حفاری تمام مقطع در این

انجام خواهد یافت که بعداً با شدت نگرش‌های تمامی نواحی در منطقه جستجو در تصویر دوم به کمک محاسبه با تابع همبستگی میانگین مقایسه می‌شود. زمانی که تطابق مناسبی در حرکت میان تصاویر اول و دوم یافت شد، آن‌گاه این کار برای هر ناحیه در تصویر اول تکرار می‌شود. در انتهای تحلیل *PIV*، حرکت هر ناحیه از تصویر اول به تصویر دوم به دست می‌آید. به علاوه با دانستن موقعیت شبکه علائم در دو تصویر، می‌توان هر یک از حرکات در فضای تصویر را به یک حرکت فیزیکی کمی در فضای هدف تبدیل کرد. به محض آنکه بردارهای تغییر مکان به دست آمدند، میدان‌های کرنش حجمی و برشی در مدل خاک را نیز می‌توان به دست آورد. از این روش برای بدست آوردن جایجایی‌ها در مدل‌های فیزیکی مختلف استفاده شده است (*Kirsch, 2010; marshall, et al., 2012; Khosravi, et al., 2013; Moussaie, et al., 2019*).

۳- بحث و تفسیر نتایج

به‌منظور بررسی تأثیر شیب زمین بر تغییر شکل محیط اطراف تونل و نشست سطح زمین، ابتدا برای ارتفاع روباره ۴۵ سانتی‌متر (حدود دو برابر قطر تونل)، مدل با سطح زمین افقی و شیب‌دار مدل‌سازی شده که نتایج آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به کنتورهای جایجایی قائم در شکل ۸، مشاهده می‌شود که در حالت سطح زمین افقی تغییر شکل ایجاد شده در مدل کاملاً متقارن بوده، در حالیکه در شرایط یکسان، شیب‌دار بودن سطح زمین منجر به ایجاد عدم تقارن در تغییر شکل مدل شده است. مقادیر جایجایی قائم نشان داده شده در این شکل مربوط به همگرایی تونل (افت زمین) به میزان ۱۶ درصد است. منظور از درصد همگرایی، نسبت مساحت قسمت هاشور خورده در شکل ۶-الف به مساحت اولیه تونل است.

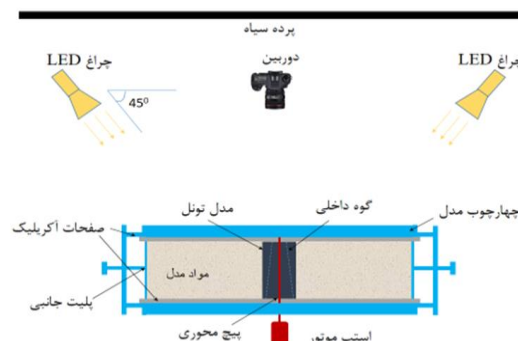
در ادامه به‌منظور بررسی تأثیر میزان روباره بر تغییر شکل محیط اطراف تونل (محدوده تخریب) و نشست سطح زمین، مدل‌هایی با ارتفاع روباره برابر با ۱۵، ۲۵ و ۵۵ سانتیمتر نیز ساخته شده است. لازم به ذکر است که در تمامی این مدل‌ها، شیب سطح زمین برابر با زاویه قرار ماسه یعنی ۳۶ درجه بوده است.

گوه ثابت شده‌اند، با آن در تماس است. با چرخش هرز گرد محور در جهت ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد (بدون چرخش خود گوه) به ترتیب گوه داخلی به سمت داخل و بیرون هدایت می‌شود؛ شبیه‌سازی فرایند حفاری با هدایت گوه داخلی به بیرون صورت گرفته که با این کار قطعات گوه بیرونی به هم نزدیک شده و قطر تونل کاهش می‌یافت.

همچنین در طراحی مدل فیزیکی طوری محور تونل جانمایی شده است که با کاهش قطر، مدل تونل به سمت پایین حرکت کند تا همواره کف آن در تماس با خاک زیرین خود باشد. قطر اولیه تونل، ۱۸۸ میلی‌متر است که قابلیت کاهش قطر با نرخ ثابت ۱/۳ میلی‌متر در دقیقه تا ۱۷۴ میلی‌متر را با حفظ شکل دایروی دارد.

۲-۵- پردازش تصویر

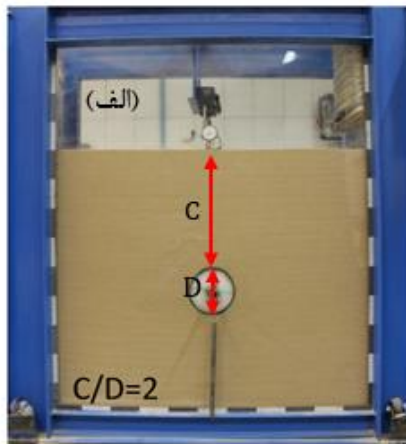
تجهیزات مربوط به فرایند پردازش تصویر و جانمایی آن‌ها در شکل ۷ به طور شماتیک نمایش داده شده است. در این پژوهش، برای انجام پردازش تصویر از کد *PIV (Particle Image Velocimetry)* قابل اجرا در محیط نرم افزار متلب استفاده شده است (*Sveen, 2004*).



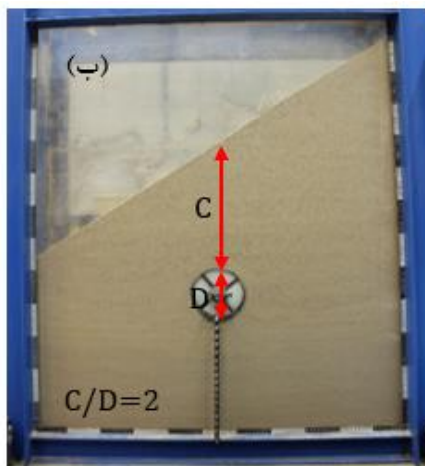
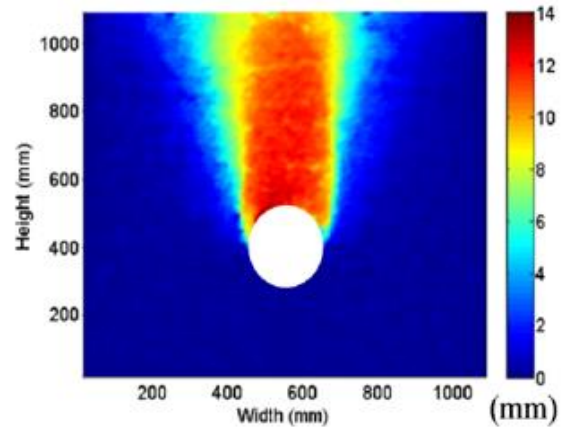
شکل ۷- شماتیک فرایند و جانمایی اجزای پردازش تصویر مدل فیزیکی تونل

ایده اصلی این روش بر مقایسه عکس‌های متوالی از مدل فیزیکی استوار است. تصویر برداری توسط یک دوربین دیجیتال عمود بر صفحه مورد نظر، از مدل انجام شده و تصاویر به نرم افزار منتقل می‌شوند. در نرم‌افزار هر تصویر به تعدادی مشخص از نواحی تقسیم‌بندی می‌شود و حرکت هرکدام از این نواحی در تصاویر متوالی دنبال می‌شود. این کار با حصول شدت نگرش ناحیه‌ای معین در اولین تصویر

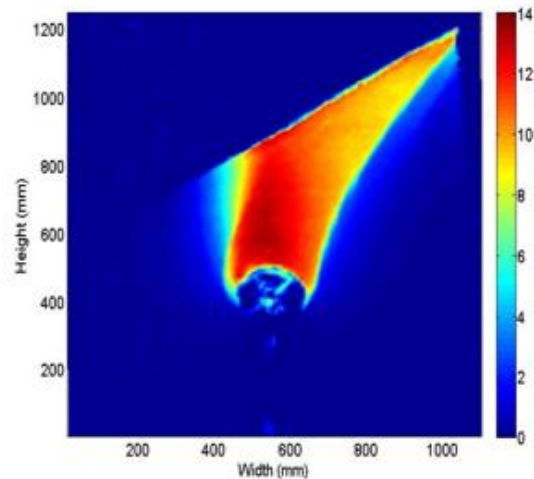
مدل‌سازی فیزیکی تونل کم عمق در خاک دانه‌ای سست با سطح زمین شیب‌دار، نادر موسائی و ...، ص ۱۴۹-۱۶۲



الف) سطح زمین افقی



ب) سطح زمین شیب‌دار

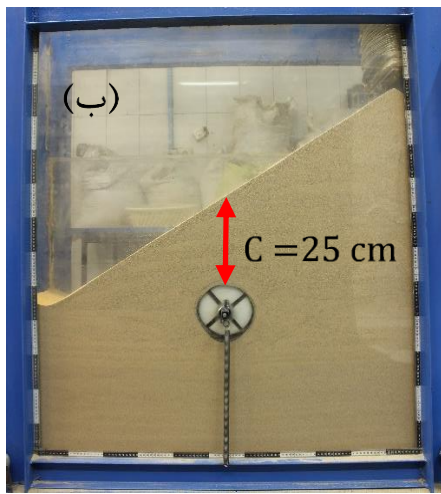


شکل ۸- مدل فیزیکی برای نسبت روباره به قطر تونل برابر با ۲ و میزان جابجایی قائم در مدل برای سطح زمین افقی و شیب‌دار

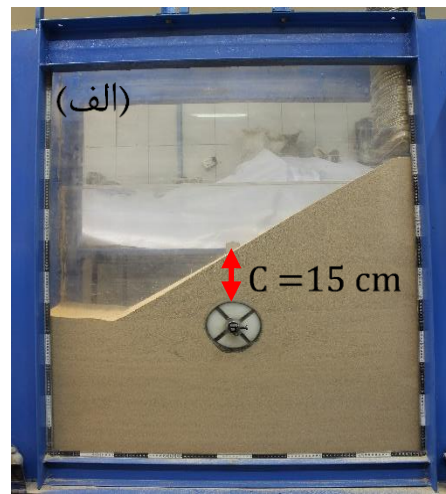
تراز کف تونل شروع شده و تا سطح زمین ادامه پیدا کرده است. هندسه کلی محدوده تخریب شده در اطراف تونل، شامل مشخصات شیب مرزهای این نواحی، در جدول ۱، آمده است. طبق نتایج این جدول، با افزایش عمق تونل، شیب مرزهای ناحیه تخریب افزایش یافته است. در حالت کلی، شیب مرز تخریب در ناحیه نزدیک تونل در سمت بالادست شیروانی حدود ۱۰ درجه کمتر از آن در سمت پایین دست بوده و تقریباً دو برابر زاویه اصطکاک داخلی ماسه (۳۶ درجه) است.

در شکل ۹، مدل‌های فیزیکی با سطح زمین شیب‌دار برای اعماق مختلف تونل و در شکل ۱۰، کنتورهای جابجایی کل متناظر با هر مدل نشان داده شده است. براساس کنتورهای جابجایی کل، محدوده تخریب در مدل را می‌توان به دو ناحیه نزدیک به تونل و ناحیه نزدیک به سطح زمین تقسیم‌بندی کرد.

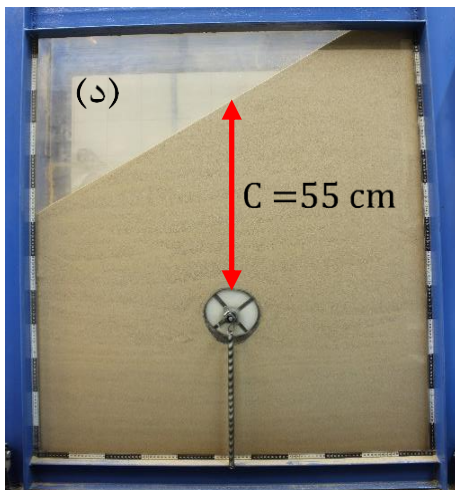
در شکل ۱۰، خط چین بالایی نشان دهنده مرز بین این دو ناحیه و خط چین پایینی، نشان دهنده پایین‌ترین تراز محدوده تخریب است. محدوده تخریب کمی بالاتر از



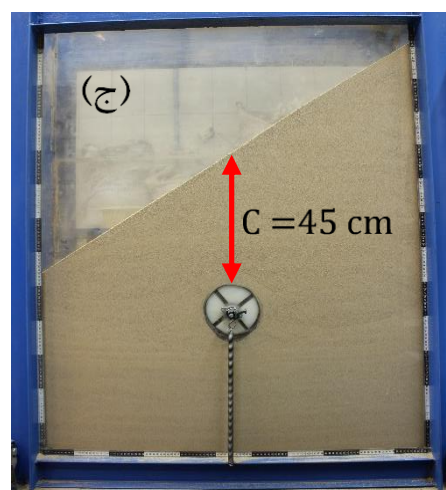
25cm (ب)



15cm (الف)



55cm (د)



45cm (ج)

شکل ۹- مدل‌های فیزیکی تونل در اعماق مختلف با سطح زمین شیب‌دار

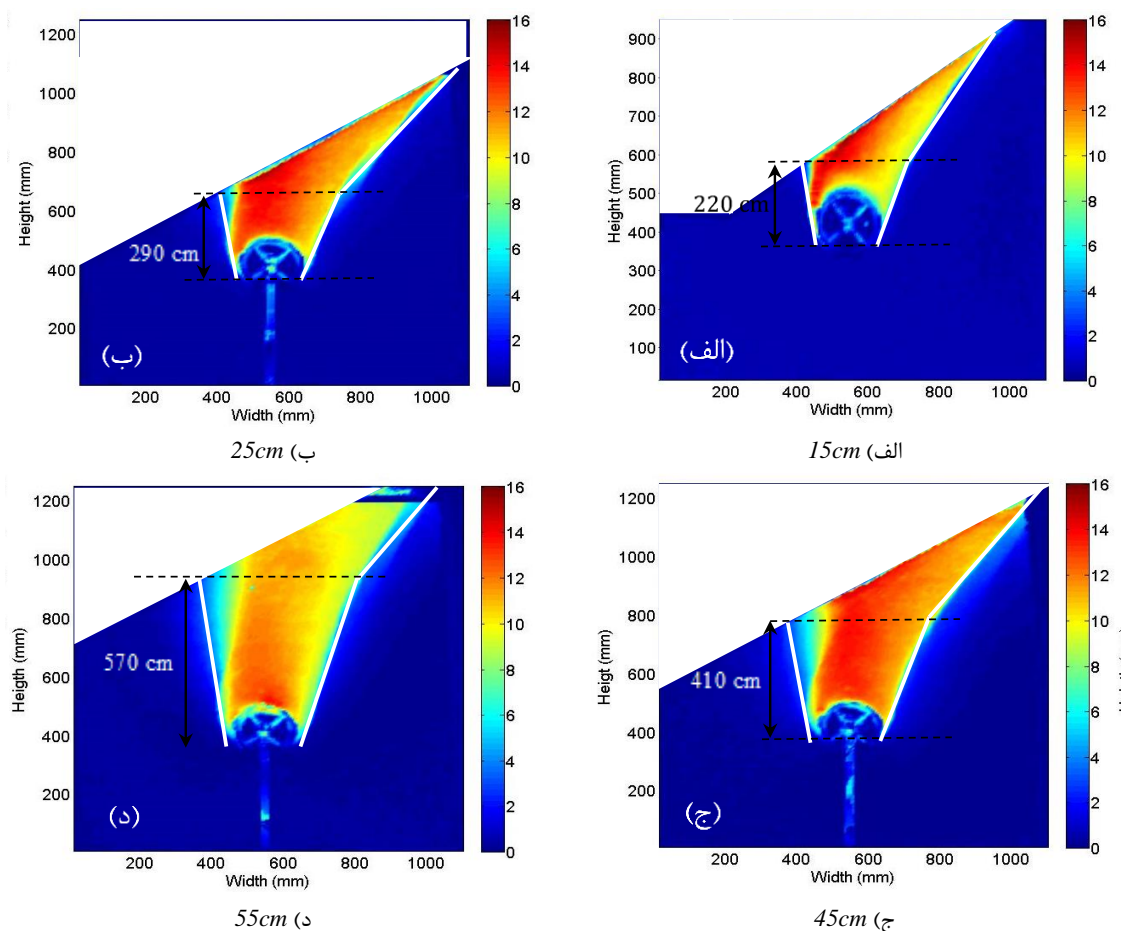
نمودار نشست سطح زمین در مدل گواه این موضوع است که با وجود شیب‌دار بودن سطح زمین، همچنان حداکثر نشست سطح در راستای قائم تاج تونل اتفاق افتاده که با شرایط سطح افقی زمین مطابقت دارد. با این وجود، منحنی نشست سطح زمین شیب‌دار نامتقارن بوده و به سمت بالادست شیب گسترده شده است. با مقایسه میزان نشست‌ها در حالت افقی و شیب‌دار سطح زمین به ازای روباره یکسان در بالای تونل، مشاهده شد که حداکثر نشست در حالت سطح زمین شیب‌دار، حدود ۲۵ درصد بیشتر است.

نکته قابل توجه این است که شیب دیواره در ناحیه تخریب نزدیک به سطح زمین مستقل از عمق تونل بوده و در همه مدل‌ها برابر ۵۴ درجه است. چنین به نظر می‌رسد که شیب این دیواره تابعی از پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و تراکم خاک باشد. البته با توجه به ثابت بودن همه این پارامترها در مدل‌های ساخته شده در این پژوهش، تخمین رابطه بین این پارامترها و زاویه شیب مرزهای ناحیه تخریب شده نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

نمودار نشست سطح زمین با بزرگنمایی ۱۰ برابر در

شکل ۱۱، نمایش داده شده است.

مدل‌سازی فیزیکی تونل کم عمق در خاک دانه‌ای سست با سطح شیب‌دار، نادر موسائی و ...، ص ۱۴۹-۱۶۲



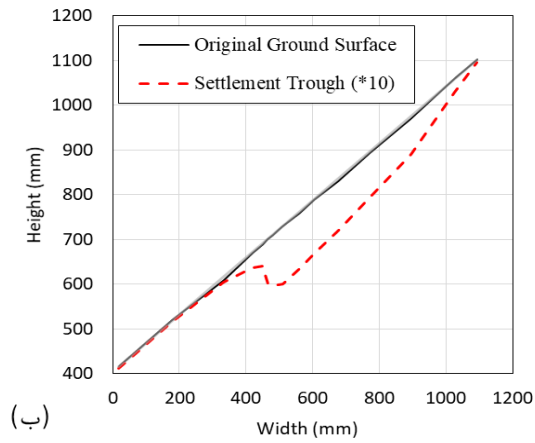
شکل ۱۰- جابجایی کل اتفاق افتاده در مدل‌های فیزیکی و در عمق‌های مختلف تونل

جدول ۱- مشخصات مدل فیزیکی و نواحی تخریب اطراف تونل

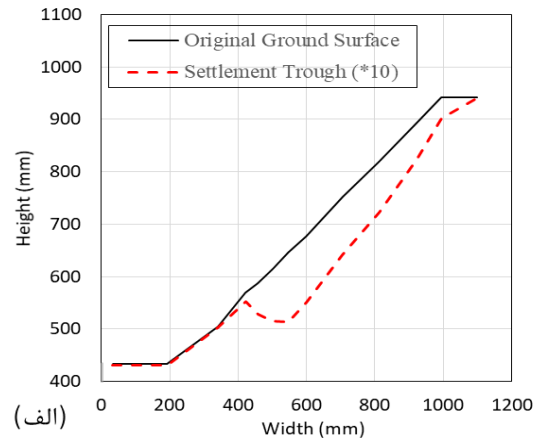
شماره آزمایش	عمق تونل (mm)	شیب سطح زمین (درجه)	ناحیه تخریب نزدیک تونل		حداکثر نشست (mm)
			شیب دیواره بالا دست شیروانی (درجه)	شیب دیواره پایین دست شیروانی (درجه)	
۱	۱۵۰	۳۶	۶۷	۷۸	۱۳/۲
۲	۲۵۰	۳۶	۶۹	۷۹	۱۲/۹
۳	۴۵۰	۳۶	۷۳	۸۲	۱۲/۰۳
۴	۵۵۰	۳۶	۷۴	۸۳	۹/۸
۵	۴۵۰	۰	۷۴	-	۹/۶

افقی بیشتر بوده، ولی در سمت پائین دست، جابجایی‌ها کنترل شده و تغییرات آن در مدل‌ها کم است. نکته قابل توجه این است که حداکثر نشست دقیقاً در محور قائم تونل اتفاق افتاده است.

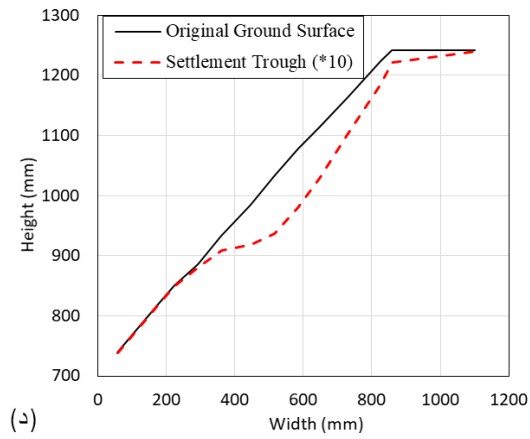
در شکل ۱۲، نمودار نشست سطح زمین برای تمامی مدل‌ها با هم مقایسه شده است. واضح است که میزان دستخوردگی و یا گستردگی محدوده تغییر شکل یافته در حالت شیب‌دار، در بالادست شیروانی نسبت به حالت زمین



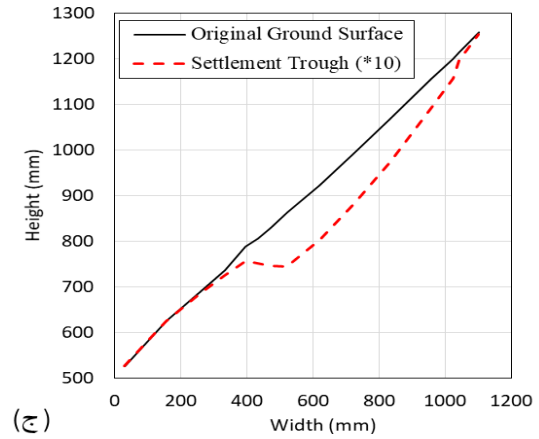
25cm (ب)



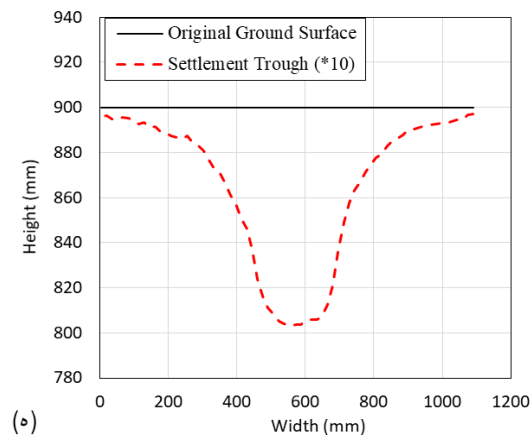
15cm (الف)



55cm (د)

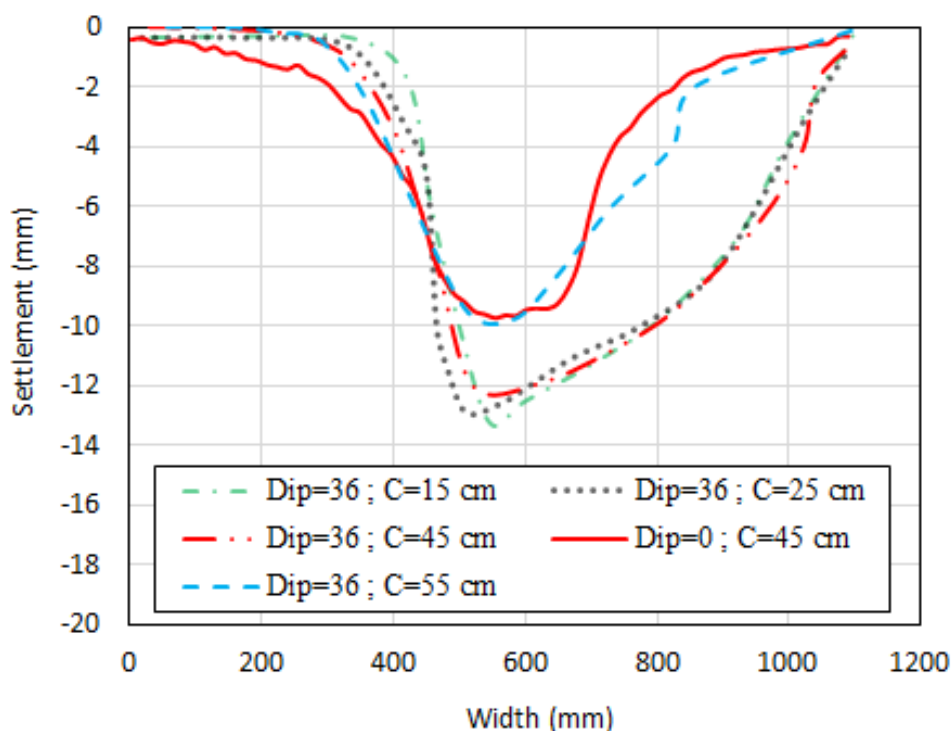


45cm (ج)



45cm-افقی (ه)

شکل ۱۱- نمودار نشست اتفاق افتاده در مدل فیزیکی و بر اساس عمق‌های مختلف تونل



شکل ۱۲- نمودار نشست سطح زمین در مدل‌های فیزیکی؛ Dip : شیب سطح زمین؛ C : روباره.

زمین کاملاً متقارن بوده، درحالی‌که در حالت سطح زمین شیب‌دار، جابجایی محیط و نشست سطح زمین نامتقارن بوده و ناحیه تخریب و منحنی نشست سطح زمین به سمت بالادست شیروانی گسترده شده است. در مدل‌های با سطح زمین شیب‌دار، ناحیه تخریب را می‌توان به دو ناحیه نزدیک تونل و ناحیه نزدیک سطح زمین تقسیم‌بندی کرد. در ناحیه تخریب نزدیک تونل، شیب دیواره در بالادست شیروانی حدود ۱۰ درجه کمتر از شیب دیواره تخریب پایین دست است و با افزایش عمق تونل، شیب هر دو دیواره به طور متناسب افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که شیب مرز ناحیه تخریب نزدیک سطح زمین مستقل از عمق تونل بوده و در همه مدل‌ها مقدار ثابت ۵۴ درجه است. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم نامتقارن بودن نشست سطح زمین در حالت سطح شیب‌دار، حداکثر نشست سطح همچنان در راستای تاج تونل اتفاق می‌افتد. در مقادیر یکسان از عمق تونل، مقدار نشست برای سطح زمین شیب‌دار حدود ۲۵ درصد بیشتر از حالت سطح زمین افقی است. برای حالتی که میزان روباره کمتر و یا مساوی دو برابر قطر تونل باشد،

براساس نمودار شکل ۱۲، می‌توان دریافت که برای حالتی که میزان روباره کمتر و یا مساوی دو برابر قطر تونل باشد، در بالادست تخریب کلی اتفاق خواهد افتاد، ولی با افزایش میزان روباره از گستردگی میزان محدوده تخریب شده در بالادست به طور چشمگیری کاسته می‌شود؛ در نتیجه می‌توان میزان روباره بحرانی که مرز میان پایداری نسبی و ناپایداری است را دو برابر قطر تونل برای تونل‌های حفر شده در زمین‌های ماسه‌ای سست، عنوان کرد. حداکثر نشست اتفاق افتاده در مدل‌ها (جدول ۱) نیز گواه این ادعا است.

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق یک سری مدل‌سازی فیزیکی تونل کم عمق (نسبت روباره به قطر تونل کمتر از ۳) با بارگذاری متقارن و نامتقارن با عمق‌های مختلف در زمین‌های ماسه‌ای سست انجام شده است. براساس نتایج مدل‌سازی، مشخص شد که در حالت سطح زمین افقی، جابجایی محیط و نشست سطح

۵- سپاس‌گزاری

گسترده‌ی نشست سطح زمین به سمت بالادست شیروانی قابل توجه است، ولی با افزایش میزان روباره از گسترده‌ی آن به طور چشم‌گیری کاسته می‌شود.

این پژوهش با حمایت مالی موسسه حرا (قرب نوح (ع))- قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص)) انجام شده است که بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی از این موسسه ابراز می‌گردد.

۶- مراجع

- Abdoli Fazel, A., Emami Tabrizi, M., & Afshin, H., 2015. Physical modeling of settlement in sandy soil due to mechanized tunneling. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)* 69-84.
- Bai, Z., & Wu, S. C. (2012). Calculation method of surrounding rock pressure for shallow and unsymmetrical tunnel under deep valley terrain. *Advanced Materials Research*, 170-173, 1382-1387.
- Boonsiri, I., & Takemura, J. (2015). A Centrifuge Model Study on Pile Group Response to Adjacent Tunnelling in Sand. *Japan Society of Civil Engineers*, 3, 1-18.
- Dargahi, M., 2010, Study of the Effect of Plastic Fines on the Anisotropic Behavior of Saturated Sands under Undrained Loading Condition, Bachelor Thesis, University of Tehran, College of Engineering.
- Gharehdash, S., Barzegar, M., 2013. Numerical Analysis of the Effect of Tunnel- Building Interaction on Surface Settlement. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)* 49-64.
- Hossaini, S.M.F., Shaban, M., Talebinezhad, A., (2010). Effect of space between twin tunnel faces on the surface settlement. *International Mining Congress and Expo, Tehran*.
- Katoh, Y., Miyake, M., & Wada, M. (1998). Ground deformation around shield tunnel. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge'98).
- Khosravi, M., Pipatpongsa, T., & Takemura, J. (2013). Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode. *Geotechnique*, 63(12), 1020.
- Kirsch, A. (2010). Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand. *Acta Geotechnica*, 5(1), 43-62.
- Kutter, B. (1994). Collapse of cavities in sand and particle size effects. *Proceedings of Centrifuge 94*, 809-815.
- Lei, M., Peng, L., & Shi, C. (2015). Model test to investigate the failure mechanisms and lining stress characteristics of shallow buried tunnels under unsymmetrical loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46, 64-75. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.11.003
- Marshall, A., Farrell, R., Klar, A., & Mair, R. (2012). Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements. *Geotechnique*, 62(5), 385.
- Moussaie, N., Khosravi, M. H., Hosseini, M. F., Alerasoul, S. F., 2016. Numerical study of the influence of depth, Gap parameter and in situ stresses on the surface settlements. 6th Iran Rock Mechanics Conference (IRMC)

- Moussaei, N., Khosravi, M. H., & Hossaini, M. F. (2019). *Physical modeling of tunnel induced displacement in sandy grounds. Tunnelling and Underground Space Technology, 90, 19-27.*
- Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K., & Khosravi, M. H. (2019). *A new classification of failure mechanisms at tunnels in stratified rock masses through physical and numerical modeling. Tunnelling and Underground Space Technology, 91, 103017.*
- Pan, H. K., Zhang, Y. G., & Hu, J. C. (2011). *The mechanics analysis and feedback design for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure. Advanced Materials Research, 261-263, 1114-1118.*
- Rahman Nezhad, R., Esfandiari, M., Namazi, A., Jamshidi, H., 2013. *Numerical Analysis of Longitudinal and Transverse Surface Settlement Induced by EPB Tunneling- A Case Study: Shiraz Subway Tunnels, Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE), 88-100*
- Yang, X. L., & Wang, J. M. (2008). *Stress dilatancy analysis of shallow tunnels subjected to unsymmetrical pressure. Central South University of Technology, 15, 28-33.*
- Zuo, C. Q., Chen, J. P., & Liu, H. (2011). *Load calculation method of tunnels with shallow buried depth and unsymmetrical pressure in regions of weak fissured surrounding rock. Advanced Materials Research, 243-249, 3364-3369.*

Physical Modeling of Shallow Tunnels in Loose Granular Soils with a Sloping Ground Surface

N. Moussaei¹; M.H. Khosravi²; M.F. Hossaini³; S.F. Alerasoul⁴

*1- PhD Candidate, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran,
n.moussaei@ut.ac.ir*

*2- Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran,
mh.khosravi@ut.ac.ir*

*3- Professor, School of Minerals and Energy Resources Engineering, UNSW, Sydney, Australia,
s.hossaini@unsw.edu.au*

4- BSc Student, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, faridalerasoul@ut.ac.ir

Received: 8 Jan 2020; Accepted: 8 Jun 2020

DOI: 10.22044/tuse.2020.9268.1386

Keywords

*Shallow Tunnel
Sloping Ground Surface
Loose Granular Soil
Physical Modeling
Image Processing*

Extended Abstract

Summary

Prediction of the surface settlement and ground displacement due to underground excavation is a key factor for the stabilization and planning to control probable incidents. Due to the real condition and natural modeling materials, physical modeling has critical role in this field. This study presents the results of a series of physical model tests of shallow tunnels under sloping sandy grounds. Based on the recorded images from transparent side of the model, image processing techniques have been used to investigate the deformation zone around the excavated area of the model. In this research, a series of physical model tests was conducted to study the influence of tunnel depth on the ground deformation and ground surface settlement in a loose sandy ground. Particle Image Velocimetry (PIV) technique, as an image processing technique, was used to measure the ground deformation and surface settlement during the tunneling process.

Introduction

In the existence of a sloping ground surface above the tunnel, an asymmetric distribution of loads is applied on the tunneling machine and tunnel lining system. Some analytical, numerical and experimental studies have been carried out to investigate the failure mechanism around the tunnel in such a situation. However, the deformation zone above the tunnel and the ground surface settlement are rarely investigated in these study. This research investigates the ground deformation and surface settlement during the tunneling process.

Methodology and Approaches

A stainless steel frame was built with dimensions of 142 cm×152 cm×42 cm. Two acrylic plates with a thickness of 2 cm were placed in front and back sides of the model to make these sides transparent for image processing purpose. The material for the model consists of silica sand with a bulk density of 1392 kg/m³, internal friction angle of 36⁰, and zero cohesion. Model tests were carried out for horizontal and sloping ground surfaces, where the soil rests at its angle of repose. Four different depths of the tunnel placements in the models were considered. Digital images were captured during the tunneling process. The tunnel excavation process was simulated by reducing the tunnel diameter with a constant rate of 1.3 mm/min.

Results and Conclusions

The results showed that in case of a sloping ground surface, the settlement trough was asymmetric and the deformed zone and ground settlement were extended upward the slope. Although the maximum surface settlement still appeared

along the crown of the tunnel, its value increased up the 25%, compared to the case of a horizontal ground surface with a tunnel at the same depth.

The deformed areas in the models were divided into two district portions; the deformed zone close to the tunnel and the deformed zone close to the ground surface. In the deformed zone close to the tunnel, in general, the dip of the boundary increased with an increase of the tunnel depth. Moreover, the lower side boundary was about 10 degrees steeper than the upper side boundary. In the deformed zone close to the ground surface, the deformed boundary had an inclination of 54 degrees for all the models, independent of the tunnel depth.
