

تأثیر متقابل حفرات و سازه‌های زیرزمینی بر نشست سطح زمین

محسن کریمی^{۱*}، محمدرضا عرب^۲، مجید اسلامی^۳، امید روشنی^۴

۱- کارشناس ارشد پژوهشکده خاتم‌الانبیا(ص)، ۲- کارشناس ارشد شرکت مهندسی مشاور ایمن سازان تدبیر پارس،

۳- کارشناس ارشد شرکت کیان معدن پارس، ۴- کارشناس ارشد مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳)

چکیده

با گسترش شهرنشینی، نیاز به گسترش سازه‌های زیرزمینی امری بدیهی است. یکی از تهدیدات احداث سازه‌های زیرزمینی تأثیر سازه‌ها بر روی سطح زمین می‌باشد که طیف گسترده‌ای را شامل می‌گردد. در صورت احداث صحیح سازه زیرزمینی می‌توان انتظار داشت که این تأثیرات به حداقل میزان خود خواهد رسید. اما وجود برخی عوامل نظیر سازه‌های مدفون (قنات‌ها، چاه‌ها، لوله‌های انتقال آب) زمینه‌ساز بروز تغییر شکل‌های بزرگ بر روی سطح زمین خواهند شد. در این تحقیق سعی بر آن شده تا با مدل‌سازی عددی، به بررسی تأثیر هندسه و موقعیت فضاهای خالی (حفره) در بالای تونل پرداخته شود و با پیش‌بینی میزان و هندسه نشست ایجاد شده در سطح زمین، رابطه‌ای به‌منظور برآورد آن ارائه گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که انرژی کرنشی توده خاک قرار حفره و تونل، بر میزان جابجایی تاج تونل تأثیرگذار می‌باشد. همچنین شکل حفره و نسبت حجم حفره به عمق قرارگیری آن، بر میزان نشست، تأثیر گذار بوده و حفره‌هایی که نسبت حجم به عمق قرارگیری آن‌ها برابرند، شرایط یکسانی بر پایداری تونل اعمال خواهند نمود.

کلیدواژه‌ها: حفاری زیر زمینی، حفره، فرو نشست، مدل‌سازی عددی

۱. مقدمه

بحرانی، سبب شده است تا اطلاعات دقیقی از فراوانی آن بخصوص در مواقعی که آثار آن چندان مشهود نیست، در دسترس نباشد. اما شواهد موجود دلالت بر رایج بودن این پدیده در جوامع شهری دارد. برای نمونه فرونشستی که در شهر فوکوکا ژاپن با احداث خط مترو هاکاتا در سال ۲۰۱۶ رخ داد (شکل ۱-الف) و دلیل اصلی بوجود آمدن این حفره از سوی کارشناسان، شکستگی خط لوله آب اعلام گردیده است و فروچاله رخ داده در اثر حفاری زیرزمینی در شهر گوانجو چین در سال ۲۰۱۳ می‌توان اشاره نمود (شکل ۱-ب) [۳].

پدیده نشست زمین به خودی خود امری طبیعی بوده که متأثر از ساختارهای زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی مصالح و عواملی همچون تراز آب زیرزمینی است [۱]، [۲]. اما در مناطق شهری با پیشینه تاریخی نسبتاً طولانی مانند تهران، عواملی دیگری نیز مانند خشک شدن یا شسته شدن خاک، ترکیب‌های لوله‌های آب می‌تواند موجب افزایش نشست گردد. با توجه به بازتاب اجتماعی پدیده نشست زمین، غیر محسوس بودن آن و عدم تمایل پیمانکاران به اطلاع رسانی این پدیده غیر از موارد

جذبی را می‌توان از زمره آن برشمرد. از دیگر دلایل عمده فرو نشست در شهرها، نشست آب از لوله‌ها بواسطه عمر زیاد و یا شکستگی آن‌ها می‌باشد. به‌عنوان نمونه در ژاپن سالانه حدود ۴ تا ۵ هزار مورد فرونشست در ابعاد مختلف در رابطه با مشکل در لوله‌های انتقال آب ثبت می‌گردد [۷]. پیدا کردن ارتباط بین حفاری زیرزمینی و میزان نشست سطح زمین یکی از مشکلات اصلی فعالیت‌های زیرزمینی در مناطق مسکونی برای پیمانکاران اجرای طرح‌های زیرسطحی است. به‌طور کلی می‌توان گفت که حفر فضای زیرزمینی در مناطق با سابقه سکونت طولانی مانند شهر تهران به واسطه وجود حفرات و کانال‌های زیرزمینی که عمدتاً از مکان آن‌ها اطلاع چندانی در دسترس نیست، امری مشکل و پرهزینه است. حوادث و نشست‌هایی که اخیراً در مسیر عبور خطوط مترو صورت پذیرفته است شکل (۲)، در نگاه اول در مناطقی رخ داده است که وجود گودال‌ها و عوارض زیر سطحی مدفون امری مشترک در تمامی آن‌ها است لذا یافتن ارتباط بین این قبیل حفرات و تونل می‌تواند راهگشای پیش بینی بسیاری از این نشست‌ها باشد.



شکل (۲). فروچاله‌های ایجاد شده در شهر تهران ناشی از حفر فضای زیر زمینی

۳. مدل‌سازی عددی شکست ناشی از حفره

با هدف تعیین تاثیرپذیری فروچاله‌ها و نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین ناشی از حفرات زیر سطحی و محاسبه وابستگی مورفولوژی نشست با حفر تونل مدل‌سازی عددی انجام گرفته است. بدین منظور حفره‌هایی در موقعیت، شکل و ابعاد مختلف در بالای تونلی دایره‌ای با قطر ۹ متر در عمق ۲۵ متری مدل‌سازی گردید. به‌دلیل عدم فرض کرنش صفحه‌ای، از



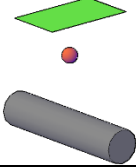
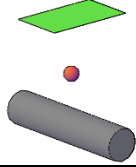
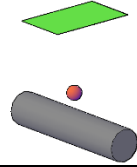
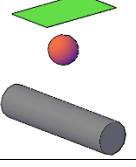
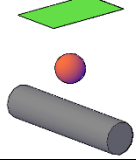
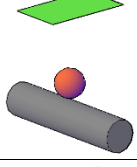
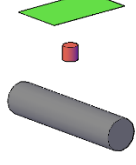
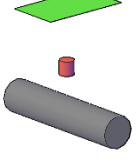
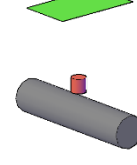
شکل (۱). نشست‌های ناشی از حفاری‌های زیر زمینی الف) فرو نشست فوکوکا ژاپن، ب) فرو نشست در شهر گوانجو چین

۲. علل پدیده فرونشست

دلایل عمده فرو نشست را می‌توان به دو دسته اجرایی و زمین‌شناسی تقسیم‌بندی نمود. از مهم‌ترین نواقص اجرایی عدم پرکردن مناسب فضای بین تحکیم موقت تونل با زمین و یا اجرای ناقص تحکیمات [۴] و از تاثیرگذارترین اصول موثر بر ایجاد فرونشست‌ها، شرایط زمین‌شناسی بوده که با مصالح زمین، ساختارها و در نهایت محتوی آب در ارتباط می‌باشد. به‌طور کلی مصالح دانه‌ای با میزان چسبندگی کم، مستعدترین مناطق برای بروز فرونشست شمرده می‌شوند. یخرفت‌ها نیز یکی از شایع‌ترین علل ایجاد فروچاله در برخی از مناطق آمریکا محسوب می‌گردد [۵]. ساختارهای زمین‌شناسی به‌طور مستقیم و یا تسهیل‌کننده ایجاد پدیده فروچاله‌ها می‌باشند. این ساختارها به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شوند. در ساختارهای طبیعی می‌توان به عواملی مانند برخورد با زون‌های ناپایدار زمین‌شناسی از قبیل کارست‌ها، گسل‌ها و یا حفرات طبیعی اشاره نمود [۶]. اما ساختارهای مصنوعی طیف گسترده‌ای از آنومالی‌های زمین‌شناسی را در بر می‌گیرند که انواع تونل‌ها، خاک‌های دستی پرکننده، قنات‌ها و چاه‌های

متفاوت کره و استوانه استفاده گردید. تأثیر حفره‌ها از طریق تغییر در ابعاد حفره و عمق قرارگیری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به عمق قرارگیری تونل، حفره‌ها در عمق‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری از سطح قرار دارند.

مدل‌سازی سه بعدی به کمک FLAC3D استفاده شده است. این نرم افزار بر اساس روش عددی تفاضل محدود (Finite Difference) و به منظور مدل‌سازی محیط‌های همگن در وضعیت سه بعدی توسعه یافته است [۸]. در شکل (۳) شرایط هندسی مدل‌ها آورده شده است. در این مدل‌سازی به منظور تعیین دقیق اثر حفره بر روی تونل از دو هندسه

<p>شماره مدل : ۱ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۲ متر عمق حفره: ۱۰ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۲ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۲ متر عمق حفره: ۱۵ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۳ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۲ متر عمق حفره: ۲۰ متر</p> 
<p>شماره مدل : ۴ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۱۰ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۵ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۱۵ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۶ شکل حفره: کره شعاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۲۰ متر</p> 
<p>شماره مدل : ۷ شکل حفره: استوانه شعاع حفره: ۲ متر ارتفاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۱۰ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۸ شکل حفره: استوانه شعاع حفره: ۲ متر ارتفاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۱۵ متر</p> 	<p>شماره مدل : ۹ شکل حفره: استوانه شعاع حفره: ۲ متر ارتفاع حفره: ۴ متر عمق حفره: ۲۰ متر</p> 

شکل (۳). هندسه حفره در مدل‌های مختلف

می شوند، استفاده شده است. در گام بعدی تونل به صورت گام‌های یک متری حفاری شده و پوشش بتنی تونل متعاقباً نصب می گردد. این مراحل تا رسیدن تونل به حفره و سپس عبور از آن تکرار و نتایج عددی هر مدل استخراج شده است.

جدول (۱). مشخصات ژئوتکنیکی خاک و پوشش بتنی تونل در مدل‌سازی عددی

پوشش بتنی تونل	خاک	پارامتر
۵۰۰	۰/۰۸	چسبندگی (kg/cm^2)
۳۵	۳۲	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲/۵	۲/۱	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm^3)
۰/۲۰	۰/۳۰	ضریب پواسون
۲۰۰۰۰۰	۳۵۰	مدول الاستیسیته (kg/cm^2)

جهت انطباق عملیات حفاری با شرایط واقعی از داده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مطابق با مصالح خاک تهران در محدوده شمالی خط ۶ مترو استفاده گردیده است. مصالح موجود در این پروژه شامل مصالح ماسه رسی (SC) بوده که از تراکم متوسطی برخوردار می‌باشد. مشخصات مصالح مورد استفاده مطابق با جدول (۱) در تمامی مدل‌سازی‌ها با لحاظ مدل رفتاری موهر-کلمب در نظر گرفته شده است. از آنجایی که رفتار المان‌های سازه‌ای (Liner Element) مورد استفاده در نرم‌افزار FLAC به صورت الاستیک می‌باشد [۸]. بنابراین جهت ایجاد شرایط تسلیم سیستم نگهداری در مدل‌ها، از المان‌های الاستو-پلاستیک (Zone) در مدل‌سازی پوشش نگهدارنده تونل استفاده شده است. برای تأمین پایداری تونل از بتنی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و مشخصات ارائه شده در جدول (۱) استفاده شده است. مراحل مدل‌سازی بدین صورت است که در گام نخست مدل به صورت یکپارچه و متشکل از خاک حل می‌گردد و پس از ایجاد تعادل اولیه، حفره حفر می‌شود. سپس شرایط تعادل جدید در مدل ایجاد می‌گردد. در این مرحله از حفره‌هایی که خود پایدار بوده (با توجه به ابعاد حفره) و منجر به تعادل مدل عددی

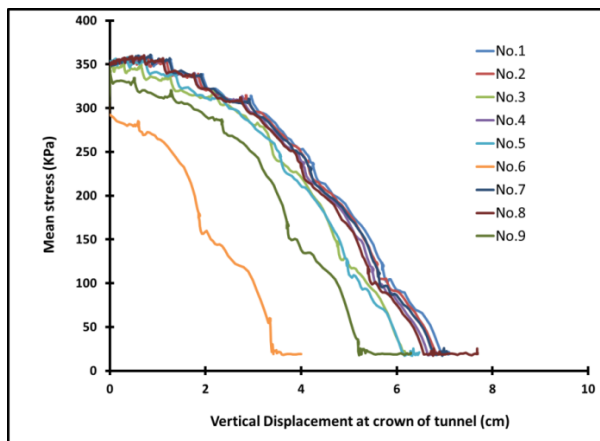
۴. بحث و بررسی نتایج عددی

در این تحقیق جهت بررسی نتایج مدل از نمودارهایی که به صورت تاریخچه محاسباتی در نرم افزار ارائه می شود، استفاده گردید. این تاریخچه ها در موقعیت تاج تونل و سطح زمین در راستای مرکز حفره به مدل معرفی شده اند. تاریخچه ها پاسخ مدل از گام اولیه مدل سازی شامل تعادل اولیه، حفر حفره و حفر تونل را در شرایط بار استاتیکی در بر می گیرند. تاریخچه تغییرات جابجایی قائم تاج تونل در شکل (۴) آورده شده است. محور افقی این نمودارها گام محاسباتی نرم افزار بوده که جهت کاهش نیروهای نامتعادل کننده و تعادل به مدل ها اعمال شده است. همان طور که در نمودار جابجایی قائم تاج تونل مشخص است، جابجایی قائم تاج تونل در مدل شماره ۶ کمترین مقدار (۴ سانتی متر) را نشان می دهد. این مدل متعلق به حفره کروی با شعاع ۴ متر و عمق ۲۰ متری می باشد (بزرگترین حفره و نزدیکترین به تونل). پس از آن، مدل شماره ۹ که متعلق به استوانه نزدیک تونل می باشد، جابجایی کمتری را در تاج تونل نشان می دهد. به عبارتی به ترتیب مدل های شماره ۶ و ۹ جابجایی کمتری نسبت به سایر مدل ها نشان می دهند که آن را می توان ناشی از انرژی کرنشی توده خاک بین حفره و تونل

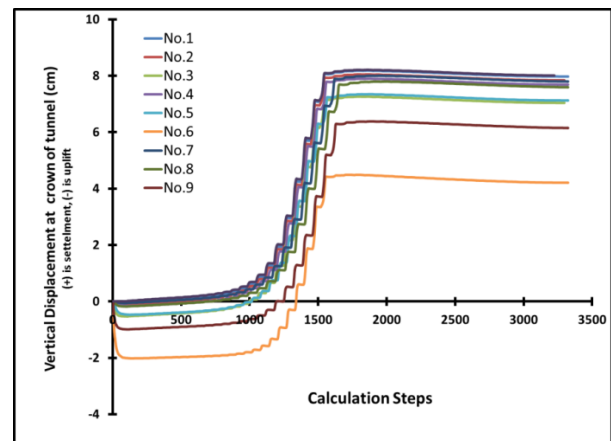
دانست. انرژی کرنشی معادل مساحت زیر نمودار تنش - کرنش می باشد [۹]. این انرژی طبق رابطه (۱) قابل تعریف است.

$$\varphi_{sp} = \int_0^{\varepsilon} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

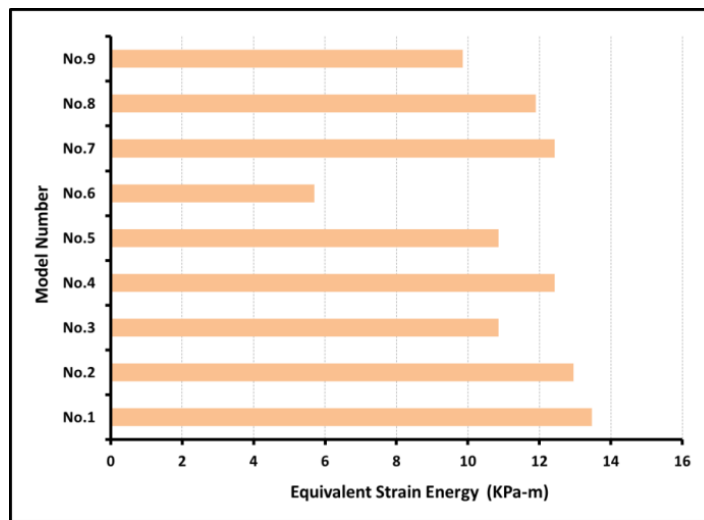
φ_{sp} انرژی مصرف شده در یک سیکل از باربرداری و ε کرنش ناشی از تغییر شکل در یک سیکل باربرداری می باشد. با متناسب بودن جابجایی و کرنش می توان سطح زیر نمودار تنش - جابجایی را مورد بررسی قرار داد. به همین منظور این نمودار برای تمامی مدل ها ترسیم شده است (شکل ۴). طبق این نمودار انرژی کرنشی به ترتیب در مدل های شماره ۶ و ۹ کمترین مقدار را نسبت به سایر مدل ها دارد. مقادیر عددی انرژی کرنشی برای تمامی مدل ها در شکل (۵) آورده شده است. با در نظر گرفتن اشکال (۳) و (۵)، مشخص است که مدل های با انرژی کرنشی نزدیک، دارای جابجایی های برابری نیز هستند. مدل های ۱ تا ۳ (متعلق به کره با قطر ۴ متر) و مدل های ۷ تا ۹ (متعلق به استوانه با قطر و ارتفاع ۴ متر) بوده که از لحاظ تصویر مقطع هندسی در صفحه قائم و افق با هم برابر می باشند، اما طبق نتایج بدست آمده در شرایط حفره استوانه ای، تاج تونل، جابجایی بیشتری را نشان می دهد.



شکل (۴). تاریخچه تغییرات تنش - جابجایی تاج تونل در مدل ها



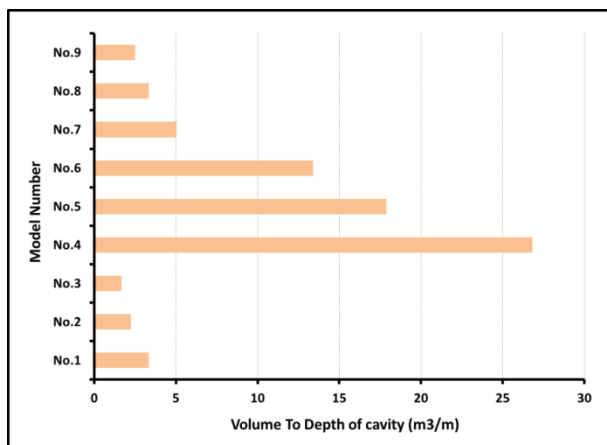
شکل (۳). تاریخچه جابجایی تاج تونل در مدل ها



شکل (۵). تغییرات انرژی کرنشی معادل در مدل‌ها

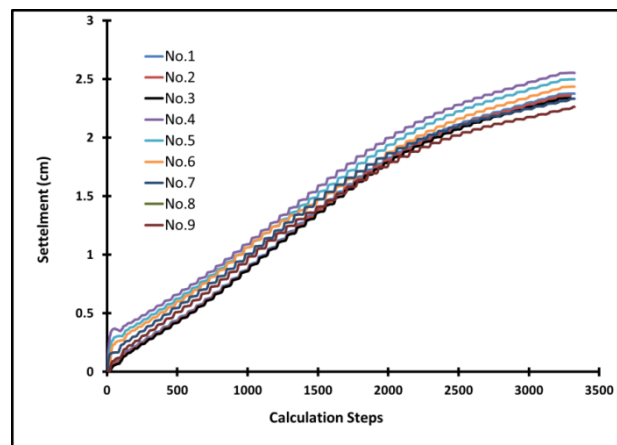
به افزایش تنش محصور کننده می‌شود. ابعاد حفره را می‌توان متناسب با حجم حفره و تنش محصور کننده را می‌توان متناسب با عمق مدل در نظر گرفت. از اینرو حفره‌هایی که نسبت حجم حفره به عمق قرارگیری آن بیشتر باشد، منجر به نشست بیشتر خواهد شد (شکل ۷). طبق نمودار ارائه شده در شکل (۷) این نسبت برای مدل شماره ۸ و ۱ برابر بوده، بنابراین نشست آن نیز می‌بایست برابر باشد که نمودار نشست حاصل از مدل‌سازی این موضوع را تایید می‌نماید.

تاریخچه جابجایی نشست سطح زمین در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، نشست مدل‌ها در محدوده ۲ تا ۲/۵ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. بیشترین نشست به ترتیب متعلق به مدل‌های شماره ۴، ۵ و ۶ می‌باشد که می‌توان آن‌ها را با تنش محصور کننده حفره در ارتباط دانست. با کاهش تنش محصور کننده حفره، پایداری حفره نیز کاهش یافته و در نتیجه جابجایی بیشتری را در اطراف خود ایجاد می‌نماید. به عبارتی حفره‌های بزرگ‌تر منجر به کاهش تنش محصور کننده در یک عمق ثابت شده و همچنین افزایش عمق حفره با ابعاد ثابت منجر



شکل (۷). تغییرات حجم به عمق حفره در مدل‌ها

اصطکاک بحرانی) که منجر به شکست می‌شود از نرم‌افزار استخراج شده است. جهت نتیجه‌گیری بهتر، شکل سه‌بعدی این شکست در شکل (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها حفره‌هایی که نزدیک تونل (عمق زیاد) قرار گرفته بر پایداری تونل تاثیر گذار می‌باشد (مدل‌های شماره ۳، ۶ و ۹). به عبارتی در مابقی مدل‌ها شکست حفره تا عمق تونل گسترش

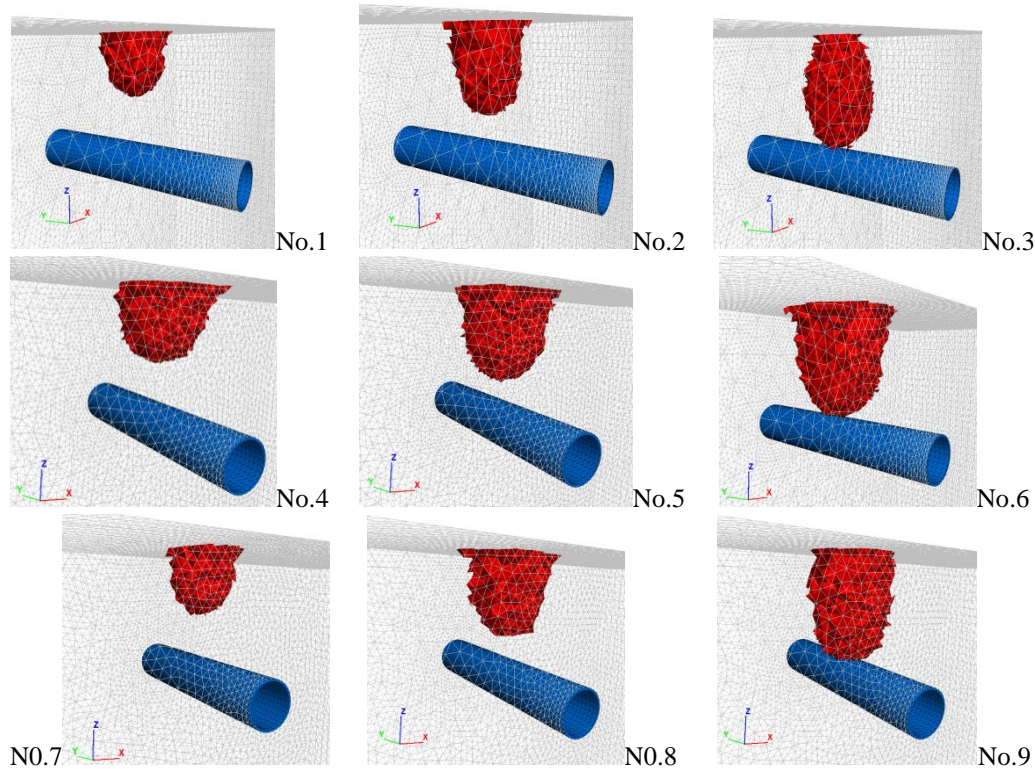


شکل (۶). تاریخچه نشست زمین در مدل‌ها

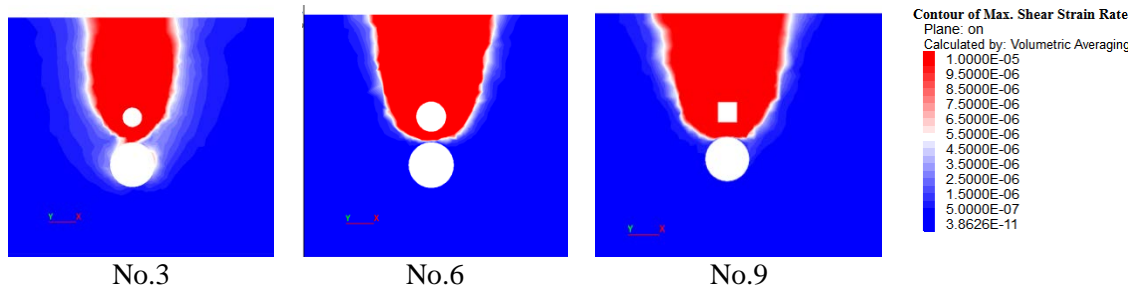
از دیگر نتایج این مدل‌سازی می‌توان به شکل شکست زمین اشاره نمود. جهت بررسی این موضوع از روش کاهش مقاومت خاک که جهت تعیین ضریب اطمینان استفاده می‌گردد بهره گرفته شده است. با بررسی نرخ کرنش برشی در مدل‌ها می‌توان صفحه شکست را تعیین نمود. در تمامی مدل‌ها ضریب اطمینان مدل و نرخ کرنش برشی در حالت بحرانی (چسبندگی و زاویه

به صورت بیضوی می‌باشد. این مدل متعلق به حفره کوچک در عمق زیاد بوده که می‌توان این شکل از شکست را ناشی از قوس فشار که توسط آقای ترزاقی ارائه شده [۱۰] در ارتباط دانست.

نمی‌یابد. شکست تونل در شکل (۹) با استفاده از نمایش دوبعدی ارائه شده است. در ارتباط با شکل شکست نیز چنین استنتاج می‌شود که در تمامی مدل‌ها به غیر از مدل شماره ۳، شکل شکست به صورت مخروط بوده اما در این مدل شکل شکست



شکل (۸). شکل سه بعدی فرونشست در مدل‌های مختلف



شکل (۹). شکست تونل ناشی از حفره نزدیک تونل

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر پذیری فروچاله‌ها و نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین ناشی از حفرات زیر سطحی و محاسبه وابستگی مورفولوژی نشست با حفر تونل، مدل‌سازی عددی انجام گرفته، تاثیر شکل، ابعاد و عمق حفره‌ها در زمان عبور تونل از زیر آن بررسی و نتایج زیر حاصل شده است:

- با توجه به ابعاد و موقعیت قرار گیری حفره، انرژی کرنشی توده خاک بین حفره و تونل متفاوت می‌باشد. انرژی کرنشی کمتر که از سطح زیر نمودار تنش - جابجایی خواهد شد. به عبارتی حفره‌های بزرگتر که در نزدیکی تونل قرار می‌گیرند، در صورت پایداری حفره، جابجایی کمتری در تاج تونل نشان خواهند داد.
- جابجایی تاج تونل در حفره‌های استوانه‌ای شکل بیشتر از حفره‌های کروی می‌باشد.

- حفره‌هایی که نسبت حجم به عمق قرارگیری حفره بیشتری داشته باشند، منجر به نشست بیشتر در سطح زمین خواهند شد.
- تنها حفره های نزدیک مقطع تونل، بر پایداری تونل تاثیر گذار می‌باشند.
- شکل شکست (گودال ایجاد شده) در حفره‌های کوچک که در عمق زیاد قرار دارند، به‌صورت بیضوی ایستاده می‌باشد.

۶. مراجع

1. P. Gattinoni, E. M. Pizzarotti, and L. Scesi, "Engineering geology for underground works," vol. 9789400778, 2014.
2. C. Yoo, "Ground settlement during tunneling in groundwater drawdown environment – Influencing factors," *Undergr. Sp.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–29, 2016.
3. F. Perry, "The biggest city sinkholes around the world – in pictures," *the guardian*, London, Nov. 2016.
4. W. Shani, "Cairo Metro tunnel collapse," *Tunneltalk*, Sep. 2009.
5. D. Gregg, H. Alan, J. Lonnie, P. Robert, and Z. Brett, "North American Tunneling: 2014 Proceedings," p. 1214, 2014.
6. G. B. Muckel, "Understanding Soil Risks and Hazards," 2004.
7. Tunnel Talk reporting, "Sinkhole disrupts routine in Fukuoka, Japan," *Tunneltalk*, Nov. 2016.
8. Itasca, *FLAC3D Manual: fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions—version 5.0*. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc, 2016.
9. M. Daum, "Simplified presentation of the stress-energy method for general commercial use," *J. Test. Eval.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–3, 2007.
10. K. Terzaghi, "Theoretical soil mechanics," *Géotechnique*, p. 510, 1943.