«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۱۱ الی ۱۹

علمی– تخصصی

بررسی تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر منحنی نشست زمین در اثر حفاری تونل EPB-TBM در محیط‌های شهری دارای خاک آبرفتی با مدل‌سازی عددی

محمدعلی ایرانمنش[1*]، علی آرین‌فر، [2]، صادق آمون[3]

۱– دکتری تخصصی دانشگاه صنعتی شریف، ۲– دکتری تخصصی دانشگاه صنعتی شاهرود،

۳– دکتری تخصصی دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۸)

چکیده

در تحقیق حاضر، جهت تعیین تاثیرپذیری منحنی نشست سطحی و سطح ریسک ساختمان‌های سطحی از پارامترهای ژئوتکنیکی، پارامترهای سربار تونل، مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نیز وجود آب زیرزمینی به عنوان پارامترهای مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. در مدل‌سازی عددی، از مدل رفتاری سخت شوندگی پلاستیک استفاده شده است. در ادامه با داشتن رابطه نشست سطحی حاصل از مدل‌سازی عددی رده ریسک ساختمان در هر حالت تعیین شده است. با تعیین رده ریسک ساختمان در هر حالت، تاثیرپذیری ریسک از پارامترهای یاد شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و آب زیرزمینی تاثیر نسبتا کمی در ریسک متوجه ساختمان‌های سطحی دارند. از طرفی، پارامترهای سربار و مدول الاستیسیته نقش زیادی در شکل منحنی نشست و سطح ریسک دارند. با شناخت تاثیر هر یک از پارامترها، امکان پیش بینی ریسک بالقوه ساختمان‌ها و بهینه‌سازی تمهیدات لازم جهت کاهش این خطرات فراهم می‌شود.

کلید واژه‌ها: تونل‌سازی مکانیزه، نشست سطحی، سطح ریسک ساختمان‌ها، مدل‌سازی عددی، اندیس آسیب‌پذیری

۱– مقدمه

افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی از یک طرف و بالا رفتن استانداردهای زندگی از سوی دیگر باعث بروز معضلی به نام ترافیک شده و لزوم ایجاد و توسعه شبکه‌های قطار شهری را باعث شده است. بنابراین ناچار به حفر تونل در محیط‌های شهری، که عمدتا دربرگیرنده مصالح خاکی هستند و نیز احداث سازه‌های زیرزمینی مربوط به ایستگاه‌های مترو هستیم که طبیعتا این کار در مجاورت و زیر ابنیه و تاسیسات شهری صورت خواهد گرفت. بدیهی است که به دلیل تنوع مصالح و همچنین به خاطر اینکه تونل‌های مترو اکثرا کم عمق هستند، ابنیه و تاسیسات شهری مذکور تاثیر پذیری بالایی از حفر تونل و ایستگاه‌های وابسته خواهند داشت که حتی می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را در پی داشته باشد. یکی از مسائل بسیار رایج و مورد بحث در این زمینه، نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل‌های مترو می‌باشد.

نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل در مناطق کم عمق شهری دارای خاک نرم و آبرفتی و اثرات آن بر سازه‌های سطحی چه به لحاظ اقتصادی و چه به لحاظ روانی در جامعه از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این راستا، ارائه روشی کارامد و دقیق با در نظر گرفتن مشخصات زمین به لحاظ پارامترهای مقاومتی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد.

تخمین نشست سطح زمین از مهم‌ترین اصول طراحی تونل‌های شهری می‌باشد که باید به صورت صحیح و دقیق انجام شود تا از بروز خسارت به سازه‌های سطحی و غیرسطحی جلوگیری شود.

اخیرا استفاده از حفاری مکانیزه بویژه نوع سپر تعادلی[1] با توجه به قابلیت‌های فراوان آن در محیط‌های شهری و حتی در زیر مناطق مسکونی با بافت فرسوده متداول شده است. با توجه به تراکم بیشتر و ساخت و ساز غیر اصولی در بافت‌های فرسوده و قدیمی کلان‌شهرها، امکان استفاده از فضاهای زیرزمینی با ریسک پایین از جمله زیر خیابان‌ها و بزرگراه‌ها در تمام طول مسیر متروها وجود نداشته و عبور از زیر سازه‌ها و مناطق مسکونی با بافت فرسوده اجتناب ناپذیر است.

* رایانامه نویسنده مسئول: mohammadali.iranmanesh@gmail.com.

[1] Earth Pressure Balance, TBM

حفاری تونل در زمین‌های نرم ممکن است با نشست سطح زمین همراه باشد و موجب آسیب‌دیدگی سازه‌های مجاور گردد مگر اینکه آنالیز ریسک با دقت بالا انجام شده و تمهیدات نگهداری مناسب برای آن‌ها اندیشیده شود. این موضوع یکی از مسائل اساسی و مهم در حفاری محیط‌های شهری می‌باشد، جایی که ممکن است بیش از صدها ساختمان در مسیر تونل مورد حفاری قرار گرفته باشد. فرایند توسعه فضاهای زیرزمینی در سال‌های اخیر با افزایش وقایعی نیز همراه بوده است. از آن جمله می‌توان به واقعه کولون در آلمان در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد که در اثر آن هزاران سند تاریخی از دست رفت [۱].

در جدول (۱)، تعداد وقایع مرتبط با حفاری‌های تونلی در چند دهه گذشته ارائه شده است [۲]. علت وجود روند افزایشی را می‌توان به افزایش حجم و تعداد حفاری‌های زیر زمینی نسبت داد.

جدول (۱). درصد وقایع حفاری تونل در زمین‌های نرم (Lace and Anderson, 2006)

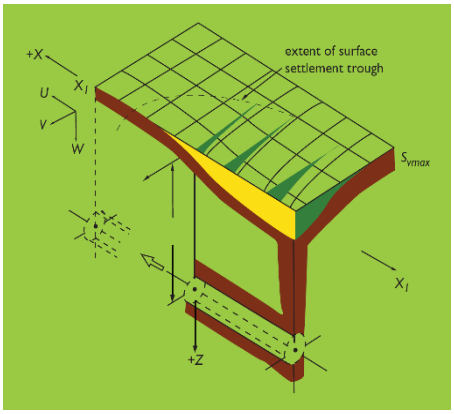
سال	درصد وقایع حفاری تونل
۱۹۷۰-۱۹۷۹	۲۲
۱۹۸۰-۱۹۸۹	۳۲
۱۹۹۰-۱۹۹۹	۴۶
۲۰۰۰-۲۰۰۵	۵۳

وقایع ناگوار مختلفی که در منابع مختلف گزارش شده است، هزینه‌های اضافی را بر پروژه تحمیل کرده‌اند. برای مثال پروژه تونل بندر دوبلین ایرلند با ۳۳۴ گزارش خسارت ساختمان (تقریبا ۱ مورد از هر ۸ ساختمان)، با افزایش حدود ۳/۵ میلیون پوندی هزینه‌های انجام پروژه همراه بود [۳]. این در حالی است که هزینه‌های انجام بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق به‌منظور پیشگیری از آسیب‌ها درصد خیلی کمی از پروژه را شامل می‌شد. در پروژه‌های حفاری تونل، نشست زمین و آسیب‌های ناشی از آن به بناهای فرهنگی و ساختمان‌ها تهدید جدی به شمار می‌رود. امروزه روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی این نشست‌ها و آسیب‌ها وجود دارد. تخمین میزان این نشست‌ها از مهم‌ترین اصول طراحی تونل‌های شهری می‌باشد که باید به صورت صحیح و دقیق انجام شود تا از بروز خسارت به سازه‌های سطحی جلوگیری شود. استفاده تنها از روش‌های تحلیلی که در آن‌ها مشخصات ژئوتکنیکی زمین به خوبی دیده نمی‌شود، نمی‌تواند راه‌حلی کارا جهت نیل به این هدف باشد. امروزه با پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت افزاری، استفاده از روش‌های عددی به عنوان راه حلی کارامد جهت تحلیل شرایط مختلف با دقت زیاد مطرح شده است. با استفاده از روش‌های عددی با دقت بسیار بالایی می‌توان شرایط واقعی مسئله را مدل کرد و به تخمین به مراتب دقیق‌تری نسبت به روش‌های تحلیلی دست یافت [۴].

در براورد میزان ریسک ناشی از حفاری تونل در محیط‌های شهری، بررسی تمامی پارامترهای دخیل در آسیب‌های ناشی از تونل‌سازی به سازه‌های سطحی و در نظر گرفتن اثرات آن‌ها در ارزیابی ریسک امری ضروری است. در همین راستا، در این تحقیق به تعیین سطح خطر مرتبط با نشست سازه‌های سطحی، با در نظر گرفتن رنج تغییرات انواع پارامترهای ژئوتکنیکی، روباره تونل، فاصله افقی ساختمان از محور تونل و اندیس آسیب‌پذیری ساختمان (که مشخصه ذاتی ساختمان است) خواهیم پرداخت. با تعیین سطح خطر برای هر حالت، گام مهمی جهت شناخت شرایط ساختمان و تاثیراتی که حفاری تونل بر روی آن خواهد گذاشت، جهت تعیین سطح اقدامات تحکیمی برداشته می‌شود. با ارزیابی چندین حالت مختلف، تاثیر پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی، عمق روباره، اندیس آسیب‌پذیری و فاصله افقی ساختمان از محور تونل بر روی سطح خطر ساختمان و لزوم اقدامات تحکیمی، به صورت کاملا همبسته روشن می‌شود. از نتایج این تحقیق می‌توان علاوه بر ایجاد دید اولیه نسبت به عوامل موثر و استفاده از آن‌ها در طرح اولیه، در طرح نهایی و تصمیم‌گیری‌های طراحی در تمام مراحل طراحی تونل بدون نیاز به مدل‌سازی‌های زیاد و بعضا وقت‌گیر استفاده کرد.

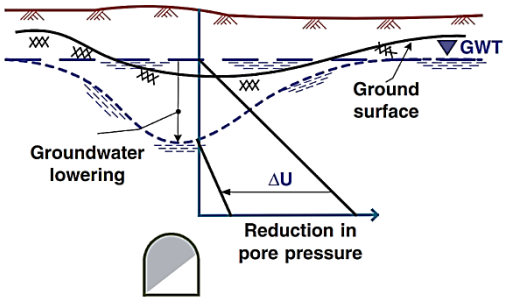
۲- روش تحقیق

حفر تونل در خاک موجب ایجاد جابجایی‌های عمودی و افقی در زمین می‌شود. بسته به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و پارامترهای حفاری تونل این جابجایی‌ها می‌تواند به سطح زمین رسیده و به سازه‌های سطحی آسیب برساند. به طور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و همگرایی دهانه تونل و به وجود آمدن نشست در سطح زمین می‌شود. میزان و نوع نشست زمین به عوامل زیر بستگی دارد: شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مانند مشخصات مکانیکی خاک و شرایط آب زیرزمینی و ...، عمق و هندسه تونل و روش احداث تونل. در شکل (۱) نشست زمین در اثر حفر تونل به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



شکل (۱). نشست سه بعدی زمین در اثر حفر تونل

در برخی مواقع به دلیل بالا بودن تراز آب زیرزمینی در محیط شهری، حفاری تونل در زیر سطح آب انجام می‌شود. حفاری در این شرایط باعث برهم خوردن تعادل هیدروژئولوژی شده و به دلیل نفوذ آب به داخل تونل حفاری شده، تراز آب زیرزمینی پایین می‌آید و فشار آب حفره‌ای در ناحیه بالای تونل کاهش می‌یابد و درنتیجه تنش مؤثر خاک افزایش می‌یابد و به دنبال آن نشست افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر یکی از موضوعات بسیار مهمی‌که باید مورد مطالعه قرار بگیرد، بررسی نشست زمین در اثر افت تراز آب زیرزمینی می‌باشد. در شکل (۲) نمایی شماتیک از نشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی نشان داده شده است.



شکل (۲). نشست زمین در اثر پایین آمدن سطح آب زیرزمینی

تحقیقات نسبتا وسیعی در ارتباط با موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل صورت گرفته و در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای محاسبه مقدار نشست سطح زمین در اثر احداث تونل ارائه شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به روش‌های تحلیلی- تجربی و روش‌های عددی اشاره کرد. در این بخش سعی داریم تا مروری بر برخی از شاخص‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه از ابتدای شکل‌گیری این موضوع تا به حال داشته باشیم.

در حالت کلی دو روش برای پیش‌بینی نشست در اثر ایجاد حفریه در زمین در وجود دارد. در ادامه به شرح روابط تحلیلی و تجربی ارائه شده توسط محققان و مطالعات عددی صورت گرفته پرداخته می‌شود. روش تجربی بر اساس روابط تجربی حاصل از مشاهدات گذشته و استفاده از روش‌های عددی مانند روش المان محدود یا تفاضلات محدود که بر پایه پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کنونی، امروزه کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. روش تحلیلی- تجربی توسط تعدادی از محققین مانند [۵]، [۶]، [۷] برای محاسبه نشست زمین بدون در نظر گرفتن سازه‌های فوقانی در اثر حفاری تونل پیشنهاد شده است. این روش‌ها امروزه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین مطالعه جامع در این موضوع توسط پک در سال ۱۹۶۹ انجام گرفته است. مقاله پک در حقیقت زیربنای تمام مطالعات بعدی در زمینه نشست در اثر حفر تونل در زمین‌های نرم بوده است. در این روش برای تعیین برخی از پارامترها مانند افت حجم، از تجربیات پیشین استفاده شده و علاوه بر آن مواردی مانند روش تونل‌سازی و شرایط زمین نیز به حساب آورده می‌شود[۴].

روش‌های عددی ابزار مناسب و انعطاف پذیری برای برآورد نشست سطحی است که در دو حالت دوبعدی (2D) و سه‌بعدی (3D) قابل انجام می‌باشند اما به هر حال پیچیدگی روش‌های عددی و حساسیت این روش‌ها به پارامترهایی که در مدل‌سازی خاک، سازه و مراحل ساخت وجود دارد، استفاده از آنها را دشوار و نیازمند توجهات ویژه می‌سازد. در مجموع، با توجه به پیشرفت-های تکنولوژی کامپیوتر، روش‌های عددی ابزار قدرتمندی در پیش‌بینی مقادیر نشست خواهند بود.

روابط تجربی برعکس روش‌های نوین عددی، توانایی در نظر گرفتن تمامی شرایط موجود خاک با همه پیچیدگی‌های آن را ندارند. لذا محققین در دهه‌های اخیر تلاش کردند تا با استفاده از پتانسیل‌های روش‌های عددی ضعف‌های روش‌های تجربی را پوشش دهند. عملا به منظور پیش‌بینی رفتار زمین و نشست سطحی ناشی از عملیات تونل سازی به طور معمول از دو روش تحلیلی و عددی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مدل‌های تحلیلی پیش بینی نشست همگی بر فرضیات ساده کننده مختلفی استوار هستند، لذا پیش بینی نشست با استفاده از این مدل ها از دقت کافی برخوردار نبوده و گاهی به تخمین‌های دست بالا و غیر اقتصادی منجر می‌شود. از طرفی پیش‌بینی نشست در مقاطع متعدد در طول مسیر با استفاده از روش‌های عددی، با توجه به حجم بالای اطلاعات ورودی به آنها و مراحل لازم برای محاسبات، بسیار وقت‌گیر است. لذا بهترین روش ممکن برای پیش بینی دقیق‌تر نشست، تلفیق نتایج این دو روش است. به عبارت دیگر تعدادی مقطع شاخص در مسیر انتخاب شده و برای این مقاطع مقادیر نشست به روش عددی محاسبه می‌شود. سپس با مبنا قرار دادن نتایج روش عددی، پارامترهای رابطه تحلیلی پک به گونه ای تغییر داده می‌شود تا منحنی نشست بدست آمده از روش تحلیلی کمترین اختلاف را با منحنی بدست آمده از روش عددی داشته باشد. بدین ترتیب پارامترهای ورودی در روش تحلیلی براساس نتایج عددی اصلاح شده و مبنای محاسبات سایر مقاطع به روش تحلیلی قرار خواهد گرفت.

امروزه توسعه کامپیوتر، ارائه مدلهای رفتاری پیشرفته و توسعه استفاده از روشهای عددی در ژئوتکنیک، باعث شده است تا نرم افزارهای مختلفی برای تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی

همچون تونل‌ها ایجاد شود. این نرم افزارها، توانایی مدل‌سازی و محاسبات پیچیده ژئوتکنیکی با توجه به رفتار غیرخطی مصالح را دارا بوده و از تکنیک‌های عددی مختلفی برای حل معادلات بیان کننده رفتار استفاده می‌کنند. با استفاده از روش‌های عددی میتوان شرایط مختلف هندسی، بارگذاری و رفتار مصالح زمین و سازه را با تقریب و دقت مناسب و بدون محدودیت‌های موجود در روش‌های پیشین تعیین کرد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از روش عددی استفاده شده‌است، در این بخش، خلاصه‌ای از انواع روشهای عددی مورداستفاده در تحلیل‌های ژئوتکنیکی بیان می‌شود[۹].

هدف این مطالعه، تعیین میزان اثرگذاری عوامل مختلف بر سطح خطر ساختمان‌های قرار گرفته در نزدیک سطح زمین در اثر حفاری تونل مکانیزه است. لذا علاوه بر عواملی همچون عمق روباره، اندیس آسیب‌پذیری ساختمان مورد نظر و فاصله افقی ساختمان از محور تونل، پارامترهای ژئوتکنیکی زمین نیز به طور خاص مد نظر است که در این پروژه با در نظر گرفتن یک سری مقادیر پایه برای پارامترهای ژئوتکنیکی و هر بار تغییر دادن یکی از آن‌ها در محدوده مشخصی، تاثیر هر یک از پارامترها به همراه عوامل دیگر سنجیده می‌شود. مقادیر پایه به همراه تغییرات آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. همچنین دانسیته خاک در تمامی مدل‌ها ۲/۰۳ تن بر مترمکعب، ضریب پواسون ۰/۳، زاویه اتساع صفر و مقاومت کششی خاک صفر منظور شده است.

جدول (۲). پارامترهای ژئوتکنیکی

Number	OB(m)	E(Mpa)	C(Kpa)	Phi(D)
2	1.0D	80	9	**34**
1	**1.5D**	**80**	**9**	34
3	2.0D	80	9	**34**
4	1.5D	10	9	**34**
5	1.5D	45	9	**34**
6	**1.5D**	**80**	**9**	34
7	**1.5D**	**80**	**9**	34
8	1.5D	80	27	**34**
9	1.5D	80	45	**34**
10	1.5D	80	9	**24**
11	1.5D	80	9	**29**
12	**1.5D**	**80**	**9**	34

در جدول فوق، سطرهای ۱ تا ۳ مربوط به تغییر سربار، سطرهای ۴ تا ۶ مربوط به تغییر مدول الاستیسیته، سطرهای ۷ تا ۸ مربوط به تغییر چسبندگی و نهایتا سطرهای ۱۰ تا ۱۲ مربوط به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند. همچنین مدل پایه به صورت Bold در هر قسمت نشان داده شده است.

مراحل تحلیل دو بعدی انجام شده به شرح زیر است:

ساخت هندسه مدل: به منظور تحلیل دوبعدی و استفاده از فرضیات شرایط کرنش مسطح، مقطع عمود بر محور تونل در نرم‌افزار مدل شده‌است. با توجه به عمق تونل، مشخصات ساختمان‌های سطحی و فاصله افقی آنها از محور تونل، هندسه مدل‌ها متفاوت می‌باشند. در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLAC، عرض مدل ۸۰ متر و ارتفاع آن ۶۰ متر در نظر گرفته شده‌است. این ابعاد به گونه‌ای انتخاب شده است که شرایط مرزی غیر واقعی بر روی مدل تاثیر نگذارد و از طرفی تلاش محاسباتی زیادی به مسئله تحمیل نشود.

شرایط مرزی: بعد از تعریف هندسه، نوبت به شرایط مرزی می‌رسد که در کف مدل مرز ثابت (در هر دو جهت x و y) و در کناره‌ها مرز غلتکی که در جهت x ثابت است، در نظر گرفته شده است.

خصوصیات مصالح و شرایط تنش اولیه: مشخصات خاک در هر مقطع از پروفیل ژئوتکنیک استخراج می‌شود. خصوصیات مکانیکی هر لایه نیز بر اساس نتایج آزمایشات بدست آمده از گمانه‌های نزدیک به هر مقطع و بر اساس قضاوت مهندسی تعیین می‌شود. مدل رفتاری به کار رفته در این تحقیق، مدل سخت شوندگی پلاستیک است که یکی از مزایای زیاد این مدل پیشرفته در نظرگیری مدول باربرداری است که برای مسائلی مانند حفاری تونل که در آن‌ها باربرداری و ترخیص تنش اتفاق می‌افتد، نتایج واقع بینانه‌تری نسبت به مدل‌های رفتاری متداول مانند مور-کولمب به دست می‌دهد. شرایط اولیه مربوط به تنش کل با در نظر گرفتن ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون محاسبه و به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

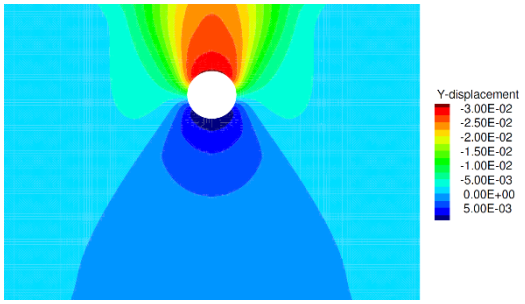
ایجاد تعادل اولیه در مدل: پس از ساخت هندسه مدل، اختصاص خصوصیات مصالح، تعیین مدل رفتاری آن‌ها و برقراری شرایط اولیه تنش، مدل اجرا می‌شود تا به تعادل اولیه برسد.

اعمال بارهای سطحی: پس از برقراری تعادل اولیه، بار ترافیکی و بار ساختمان‌های سطحی اعمال می‌شود و مجددا مدل به تعادل می‌رسد. در این تحقیق بار ساختمان‌های سطحی ۵۰

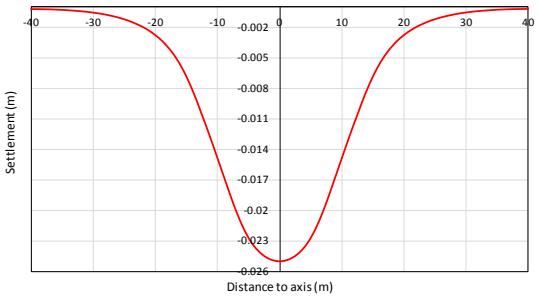
کیلوپاسکال معادل بار ۵ طبقه ساختمان به سطح بالایی مدل اعمال می‌گردد.

حفر تونل و ترخیص تنش: پس از حفر تونل به قطر ۹/۴۹ متر، مقداری اجازه به دیواره‌ها داده می‌شود تا به داخل تونل جمع شوند. مقدار جابجایی دیواره به میزانی در نظر گرفته می‌شود که برابر با افت حجم بحرانی در نظر گرفته شده در روش تحلیلی شود. در این تحقیق، افت حجم برابر با ۰/۷ درصد در نظر گرفته شده و لذا تا جایی به دیواره‌های تونل اجازه جمع‌شدگی به داخل تونل داده می‌شود تا افت حجم، به میزان ۰/۷ درصد برسد.

در ادامه، نتایج مدل‌سازی عددی مقاطع پایه ذکر گردیده‌اند، شامل شبکه استفاده شده در مدل عددی، ابعاد مدل و محل حفاری تونل، دیاگرام نیروی نامتعادل گرهی نسبت به تعداد گام‌های محاسباتی، کنتور جابجایی قائم پس از ترخیص تنش تا رسیدن به افت حجم ۰/۷ درصد و منحنی نشست سطحی ارائه شده‌است.



شکل (۳). کنتور جابجایی قائم پس از حفر تونل در مدل پایه

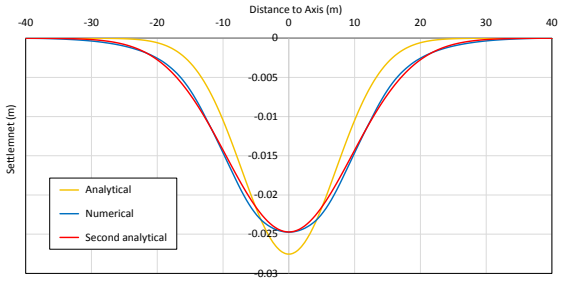


شکل (۴). منحنی نشست سطح زمین در مدل پایه

جهت محاسبه پارامترهای کنترلی نشست ساختمان‌ها در اثر تغییرشکل سطح زمین ناشی از حفاری تونل، نیاز است تا رابطه منحنی نشست سطحی مشخص باشد. بر این اساس و با توجه به دقیق‌تر بودن نتایج روش عددی، منحنی نشست بدست آمده از مدل عددی مبنا قرار گرفته و پارامترهای رابطه Peck به گونه‌ای تغییر داده می‌شود[۱۰]. که منحنی نشست روش تحلیلی بر منحنی روش عددی منطبق شود. با توجه به ثابت بودن مقدار افت حجم در هر دو روش، پارامترهای قابل تغییر شامل مقدار k و C (که عموما ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود) می‌باشند. مقدار ضریب k در رابطه تحلیلی پک با توجه به نوع خاک محل حدود ۰/۴۵ براورد شده است. در ادامه نمودار نشست حاصل از نتایج آنالیز اولیه (حل تحلیلی با پارامترهای k و C به ترتیب برابر با ۰/۴۵ و ۲/۵)، حل عددی و نیز آنالیز ثانویه (رابطه نشست تغییر داده شده بر مبنای نتایج حل عددی) برای مدل پایه در شکل (۵) ارائه شده‌است. همچنین پارامترهای C و k حاصل از برازش منحنی تحلیلی نشست بر نتایج حاصل از حل عددی در جدول (۳) نشان داده شده است[۱۱].

جدول (۳). پارامترهای I و k حاصل از برازش منحنی نشست بر نتایج حاصل از حل عددی

Model Number	K		C	
	Analiytical	Numerical	Analiytical	Numerical
1	0.45	0.60	2.5	2.10
2	0.45	0.63	2.5	2.28
3	0.45	0.58	2.5	2.04
4	0.45	0.71	2.5	1.98
5	0.45	0.69	2.5	1.96
6	0.45	0.60	2.5	2.10
7	0.45	0.60	2.5	2.10
8	0.45	0.60	2.5	2.12
9	0.45	0.61	2.5	2.14
10	0.45	0.61	2.5	2.17
11	0.45	0.62	2.5	2.19
12	0.45	0.60	2.5	2.10



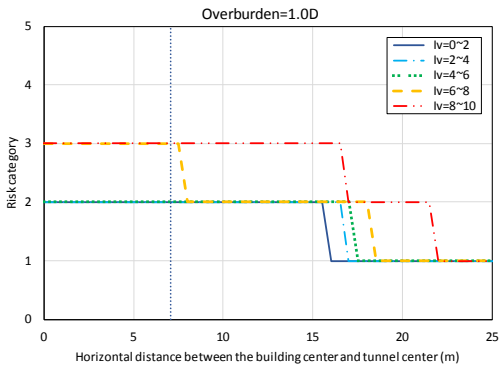
شکل (۵). منحنی نشست حاصل از حل تحلیلی، عددی و آنالیز ثانویه در مدل پایه

برای تعیین سطح خطر، باید پارامترهای کنترلی نشست ساختمان‌ها برای هر یک از حالات ذکر شده در جدول(۲) و برای اندیس‌های آسیب‌پذیری مختلف و نیز فواصل (بصورت افقی)

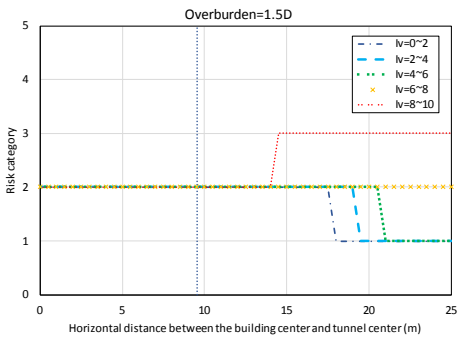
مختلف مرکز ساختمان از محور تونل محاسبه شده و نهایتا سطح خطر مرتبط با هر یک از حالات تعیین شود. برای این منظور و همانطور که قبلا گفته شد، ساختمان فرضی (با اسکلت بتنی یا فولادی) به عرض ۱۰ متر و فواصل ستون‌های ۵ متر، به ارتفاع ۱۵ متر و عمق دفن ۳ متر (کف فونداسیون از سطح زمین برابر با ۳ متر) در نظر گرفته شده و برای هر حالت، پارامترهای کنترلی نشست محاسبه شده و بر این اساس، سطح ریسک ساختمان تعیین می‌گردد[۱۲].

۳- نتایج و بحث

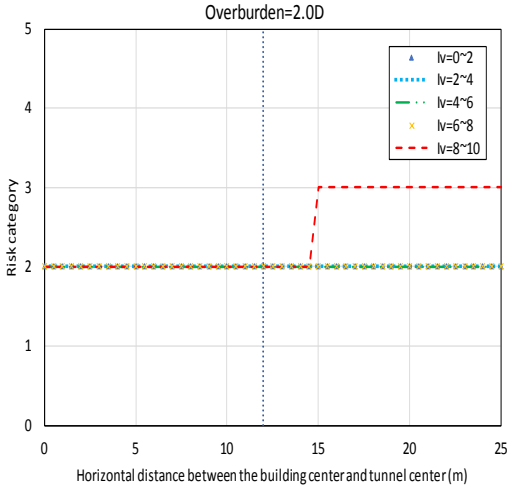
در این بخش، سطح ریسک ساختمان فرضی برای هر یک از حالات مندرج در جدول (۲) به ازای آسیب‌پذیری‌های مختلف ساختمان و نیز به ازای فواصل افقی مختلف از محور تونل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بر این اساس، ریسک ساختمان در حالتهای مختلف بر حسب فاصله افقی مرکز ساختمان از محور تونل محاسبه شده و نتایج برای سربارهای مختلف ارائه شده است. خط‌چین‌های موجود در نمودارها، محل نقطه عطف منحنی تغییرشکل را نشان می‌دهد؛ جایی که تقعر منحنی نشست سطحی تغییر می‌کند و وضعیت تغییرشکل با فاصله گرفتن از محور تونل از حالت مقعر به محدب تغییر می‌کند.



شکل (۶). منحنی سطح ریسک ساختمان با فرض OB=1.0D و به ازای آسیب‌پذیری‌های مختلف

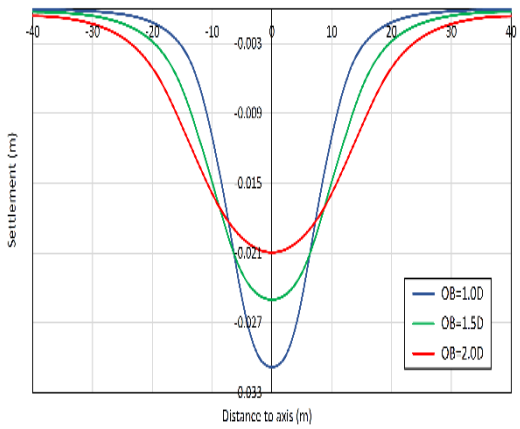


شکل (۷). منحنی سطح ریسک ساختمان با فرض OB=1.5D و به ازای آسیب‌پذیری‌های مختلف



شکل (۸). منحنی سطح ریسک ساختمان با فرض OB=1.5D و به ازای آسیب‌پذیری‌های مختلف

شکل‌های (۶) تا (۸) سطح ریسک ساختمان فرضی به ازای سربارهای مختلف و فواصل مختلف مرکز ساختمان از محور تونل را برای آسیب‌پذیری‌های مختلف ساختمان نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که با کاهش سربار، در فواصل کمتر مرکز ساختمان از محور تونل، ریسک ساختمان بیشتر بوده و با افزایش سربار، در فواصل دورتر ریسک بیشتری متوجه ساختمان است. دلیل این امر اینست که مطابق شکل (۹) در سربارهای کم، در فواصل افقی کم از محور تونل شیب منحنی نشست زمین (نسبت به سربارهای بیشتر) بیشتر بوده و لذا کرنش بیشتری به ساختمان تحمیل می‌شود؛ اما در سربارهای زیاد، در فواصل دورتر از محور تونل نشست بیشتری رخ داده و شیب منحنی نشست زمین در این نواحی بیشتر می‌باشد و لذا کرنش بیشتری به ساختمان تحمیل می‌شود. به علاوه، مشاهده می‌شود که با افزایش اندیس آسیب‌پذیری، ریسکی که متوجه ساختمان است افزایش می‌یابد.



شکل (۹). نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل به ازای سربارهای مختلف

مهمترین ویژگی تحقیق حاضر، استفاده از مدل رفتاری سخت‌شوندگی پلاستیک است که به تازگی به نرم‌افزار تفاضلات محدود FLAC اضافه شده است. دیده شده است که مدل رفتاری موهر-کولمب به دلیل عدم در نظر گیری مدول باربرداری، بالازدگی کف تونل و متعاقب آن سایر نقاط اطراف و بالای تونل را به طور غیر واقعی بسیار بیشتر از آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد و لذا نشست سطحی را به طور غیر واقعی کمتر از مقدار نشستی که در واقعیت اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که متعاقبا خطا در محاسبات ریسک ساختمان‌های مسیر وارد شده و در برخی موارد باعث تحمیل هزینه‌های اضافی بر پروژه گردد. از آنجا که مدل رفتاری سخت‌شوندگی پلاستیک نشست سطحی را واقعی‌تر پیش‌بینی می‌کند، لذا محاسبات سطح ریسک ساختمان‌های مسیر واقعی‌تر شده و از تحمیل هزینه‌های غیرضروری جهت تحکیم ساختمان‌ها یا هزینه‌های ناشی از ایجاد خسارت بر ساختمان‌ها جلوگیری می‌شود. لذا یکی از دستاوردهای مهم این پروژه که در ارتباط با ارزش افزوده پروژه نیز می‌باشد، محاسبه صحیح و نزدیک به واقعیت نشست سطحی و متعاقبا محاسبه صحیح سطح ریسک ساختمان‌های مسیر است که پیش از این به طور نادرست توسط مدل رفتاری موهر-کولمب محاسبه می‌شد[۱۳].

با کاهش سربار تونل، نشست سطح زمین در ناحیه بالای تاج تونل افزایش داشته، اما نشست نواحی با فاصله افقی بیشتر از محور تونل، به شدت کاهش می‌یابد.

با افزایش مدول الاستیسیته، نشست حداکثر، که نشست سطح زمین درست در بالای محور تونل است، افزایش یافته و نشست نواحی با فاصله افقی بیشتر از محور تونل کاهش یافته است.

با افزایش ضریب چسبندگی، نشست نواحی بالای محور تونل به مقدار کمی کاهش داشته و نشست نواحی دورتر از محور تونل مقادیر کمی افزایش نشان داده است.

با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، نشست حداکثر که نشست سطح زمین درست در بالای محور تونل است، به میزان کمی افزایش داشته و نشست نواحی با فاصله افقی بیشتر از محور تونل قدری کاهش نشان داده است.

با کاهش سربار، در فواصل کمتر مرکز ساختمان از محور تونل، ریسک ساختمان بیشتر بوده و با افزایش سربار، در فواصل دورتر ریسک بیشتری متوجه ساختمان است. دلیل این امر اینست که در سربارهای کم، در فواصل افقی کم از محور تونل شیب منحنی نشست زمین (نسبت به سربارهای بیشتر) بیشتر بوده و لذا کرنش بیشتری به ساختمان تحمیل می‌شود؛ اما در سربارهای زیاد، در فواصل دورتر از محور تونل نشست بیشتری رخ داده و شیب منحنی نشست زمین در این نواحی بیشتر می‌باشد و لذا کرنش بیشتری به ساختمان تحمیل می‌شود. به علاوه، مشاهده می‌شود که با افزایش اندیس آسیب‌پذیری، ریسکی که متوجه ساختمان است افزایش می‌یابد.

با فاصله گرفتن از محور تونل، در مدول الاستیسیته‌های کمتر ریسک بیشتری متوجه ساختمان می‌شود. به عبارت دیگر برای مدول الاستیسیته‌های پایین، ساختمان‌های در فواصل دورتر از محور تونل از ریسک بالاتری برخوردار هستند. در صورت قرارگیری مرکز ساختمان در نواحی نقطه عطف منحنی تغییرشکل، در همه حالت‌ها و برای تمامی مقادیر اندیس آسیب‌پذیری ساختمان، ریسک نسبتا کمی (کمتر از ۳) متوجه ساختمان است. دلیل این موضوع کرنش کمی است که در این حالت به ساختمان تحمیل می‌گردد.

تغییرات چسبندگی اثرات چندانی بر منحنی نشست ندارد. هرچند همانطور که ملاحظه شد، با افزایش چسبندگی، نشست حداکثر سطح زمین (بالای محور تونل) مقداری کاهش می‌یابد. دیده شد که تغییرات چسبندگی اثر قابل توجهی بر سطح ریسک ساختمان‌ها ندارد که دلیل آن می‌تواند عدم ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک و در نتیجه بی‌اثری پارامترهای مقاومت برشی از جمله چسبندگی باشد[۱۴].

با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، نشست در نواحی نزدیک محور تونل به مقدار کمی بیشتر شده و در نواحی دورتر مقداری کاهش می‌یابد. بر این اساس با تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک تاثیر چندانی بر سطح ریسک ساختمان‌ها دیده نشد که دلیل آن مشابه چسبندگی، می‌تواند عدم ایجاد تغییرشکل‌های

پلاستیک و در نتیجه بی‌اثری پارامترهای مقاومت برشی از جمله زاویه اصطکاک داخلی باشد[۱۵].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به موارد گفته شده و مقایسه عملکرد هر یک از پارامترهای دخیل در مسئله نشست، می‌توان تاثیر پذیری پارامترهای یاد شده را به این شرح جمع‌بندی کرد: تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، اگرچه در میزان نشست و شکل منحنی نشست سطحی و نیز ریسک وارده به ساختمان‌ها بی‌تاثیر نیستند، اما چنانچه مشاهده شد، تغییرات آن‌ها تاثیر عمده‌ای بر نشست سطحی ندارد که دلیل این موضوع را اینطور می‌توان بیان نمود که حفاری تونل مکانیزه EPB-TBM، به صورت کنترل شده بوده و اجازه تغییرشکل‌های زیاد به خاک داده نمی‌شود، لذا پلاستیسیته و تغییرشکل‌های پلاستیک نقش نسبتا کمی در ایجاد نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های مکانیزه ایفا می‌کنند. خصوصا اینکه با در نظر گرفتن مقداری ثابت برای افت حجم در مدل‌سازی عددی، اجازه تغییرشکل‌های بیشتر به خاک پس از رسیدن به این مقدار ثابت افت حجم داده نشده است. مقدار سربار (یا به عبارتی عمق تاج تونل) را اگر با مسامحه به عنوان یکی از پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر بگیریم، می‌توان گفت که این پارامتر نقش مهمی را در شکل و بزرگی منحنی نشست سطحی بازی کرده و از عوامل موثر در میزان ریسک وارد بر ساختمان‌هاست. می‌توان گفت از بین پارامترهای بررسی شده، مدول الاستیسیته نسبتا نقش بیشتری را در میزان ریسک وارد بر ساختمان‌ها داشته به طوری که در مدول الاستیسیته‌های پایین، ساختمان‌های با فاصله بیشتر از محور تونل ریسک بیشتری را تجربه می‌کنند. لذا در پیش‌بینی راهکارهای کنترلی، باید با توجه به سختی خاک، اندیس آسیب‌پذیری و فاصله ساختمان از محور تونل، نسبت به بهسازی خاک اقدام کرد.

۵- مراجع

[1] Ocak, I., (2009). Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: the case of Istanbul. Environ Earth Sci: p. 347-352.

[2] Atkinson, H., and Potts, D. (1977). Settlement above Shallow Tunnels in Soft Ground. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 103(4): 307-325.

[3] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2008). Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control (1st ed.). CRC Press.

[4] M. Keshuan, D. Lieyun, (2008). Finite element analysis of tunnel–soil–building interaction using displacement controlled model, 7th WSEAS International Conference on Applied Computer and Aplied Computational Science, Vol. 3, no. 3, pp 73-82.

[5] Hesami, S., Ahmadi, S., Hasanzadeh, A. (2013). Ground Surface Settlement Prediction in Urban Areas due to Tunnel Excavation. Electronic journal of geotechnical engineering, 18.

[6] Oteo, C. and Moya, J. F., (1979) , Evaluacion de parametros del suelo de Madrid con relacion a la construccion de tunnels, In Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol. 3, pp. 239–247.

[7] Attewell, P.B., Yeates, J., and Selby. A.R. (1986). Soil Movements Induced by Tunneling and their Effects on Pipelines and Structures. New York, Blackie.

[8] Burland, J.B. (1997). Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavation. Earthquake Geotechnical Engineering. Roterdam: Belkema. 1189-1201.

[9] Burland, J.B., Broms, B.B., and de Mello, V.F.B. (1977). Behaviour of foundations and structures. State of the Art Report. Proceeding of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo, Japan, 495-546.

[10] A.Mirhabibi, A. Soroush,(2012). Effect of surface buildings on twin tunneling-induced ground settlements. Tunneling and Underground Space Technology, vol. 29, pp. 40-51.

[11] Chou, W. I., and Bobet, A. (2002). Prediction of Ground Deformations in Shallow Tunnels in Clay. Tunnelling and Underground Space Technology. 17: 3-19

[12] Di Mariano, A., Persio, R., Gens, A., Castellanza, R., Arroyo, M. (2009). Influence of some EPB operation parameters on ground movements. 2 nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling. 9-11 September 2009.

Ruhr University Bochum, Aedificatio. 43-50.

[13] H.Chakeri, Y.Ozcelik, B.Unver, (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB, Tunneling and Underground Space technology, Vol.36, pp 14-23.

[14] R.J. Mair, (1998). Geotechnical Aspects of Design Criteria for Bored Tunneling in Soft Ground," Proceeding of Tunnels and Metropolises, Sao Paulo, Brazil, pp 183-199.

[15] Hou, J., Zhang, M.X., and Tu, M. (2009). Prediction of surface settlements induced by shield tunneling: An ANFIS model. In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Taylor & Francis Group, London. 551-554.

Numerical Investigation of the Effects of Geotechnical Parameters on Surface Settlement Curves Due to EPB-TBM Urban Tunneling in Alluvial Areas

M. A. Iranmanesh*, A. Arianfar, S. Amoon

Sharif University of Technology

Abstract

In this study, the effects of geotechnical parameters such as oberburden, elasticity modulus, cohesion, friction angle as well as ground water level on surface settlement and the corresponding risk on surface buildings are investigated through numerical analysis. The advanced constitutive law of Plastic Hardening is utilized to accurately reflect the Soil behavior in unloading. Using the surface settlement curves obtained from numerical analysis, the risk category of surface buildings are calculated and the effectiveness of each parameter on the risk level is investigated. The results show that the cohesion, friction angle and ground water level do not have a remarkable effect on surface settlement and the corresponding risk. However, the amount of overburden and the soil elastic modulus considerably affect the surface settlement and the risk level subjected to the surface buildings. Recognizing the role of each parameter, enables us to predict the potential risk on surface buildings and to optimize the approaches for mitigating these risks.

Keywords: Mechanized Tunneling, Surface Settlement, Risk Level of Buildings, Numerical Simulation, Vulnerability Index

Corresponding author E-mail: mohammadali.iranmanesh@gmail.com