

مطالعه عددی پارامتریک تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل

هوشنگ کاتبی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

امیر حسن رضایی*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز

مجتبی شیرزه حق، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: Rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۴

چکیده

استفاده از سیستم حمل و نقل زیرزمینی مترو یکی از ضروریات توسعه شهری است. حفاری تونل مترو در محیط‌های شهری معمولاً با استفاده از دستگاه TBM-EPB صورت می‌گیرد و نشست‌های سطحی ناشی از آن می‌تواند برای سازه‌های سطحی و زیرساخت‌های شهری خطرناک باشد. در این مطالعه، تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل مترو بررسی شده است. این بررسی شامل مقاطعی از متروی مادرید و سه مقطع فرضی یک لایه بوده و سه پارامتر جنس خاک، تعداد طبقات سازه سطحی و نسبت روباره به قطر تونل (C/D) به عنوان متغیر فرض گردیده است. بدین منظور، سه نوع خاک (ماسه آهکی، رس قهوه‌ای و رس پلاستیک آبی)، تعداد طبقات سازه سطحی (۳، ۵ و ۱۰) و سه نسبت C/D (۱، ۱/۵ و ۲) انتخاب شده است. در مدل‌سازی‌های دوبعدی حفاری تونل از روش کنترل افت حجم و مدل رفتاری موهر-کولمب برای خاک استفاده گردیده است. بر اساس نتایج حاصل، وجود سازه سطحی و تأثیر سختی ناشی از آن، همواره نشست‌های ناشی از حفاری تونل را کاهش داده است. البته میزان کاهش نشست‌ها بسته به نوع خاک، تعداد طبقات سازه سطحی و نسبت C/D تونل متفاوت بوده و با تعویض جنس خاک، میزان تأثیرگذاری دو پارامتر دیگر تغییرات محسوسی داشته است.

واژه‌های کلیدی: حفاری مکانیزه تونل، نشست، سازه سطحی، مدل‌سازی عددی، آباکوس.

۱. مقدمه

که از محدوده مجاز تجاوز نمایند، می‌توانند برای سازه‌های سطحی و زیرساخت‌های شهری خطرناک باشند. همچنین، اختلاف نشست می‌تواند باعث دوران صلب سازه یا تغییر شکل آن به خاطر اعوجاج گردد (کاستنر و همکاران، ۲۰۰۳). از این رو، بررسی نشست‌های ناشی از حفاری تونل در محیط شهری با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته

امروزه، با گسترش شهرها و افزایش جمعیت، استفاده از فضاهای زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. حفاری در زیر زمین، توزیع تنش موجود در زمین را تغییر داده و باعث وقوع نشست‌هایی در سطح زمین می‌گردد (حیدری و فهیمی‌فر، ۱۳۹۷). این نشست‌ها در صورتی

متغیر نبوده است. ربلو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش عددی المان مجزا، نشست سازه سطحی بالای تونل را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه، از نرم‌افزار 3DEC که محیط را با المان‌های بلوکی گسسته‌سازی می‌نماید، استفاده شده است. در سال ۲۰۱۵، کاتبی و رضایی تأثیر وجود سازه‌های سطحی بر نیروهای وارد بر پوشش تونل حفاری شده با TBM را بررسی نموده‌اند. در این مطالعه از مشخصات خط ۲ متروی تبریز استفاده شده است. جیاردینا و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از روش المان محدود، اندرکنش خاک ماسه و تونل را در حالت دوبعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعه، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صحت-سنجی شده است. علاوه بر روش‌های عددی متداولی مانند المان محدود، تفاضل محدود و المان مجزا، در سال‌های اخیر مطالعاتی با استفاده از روش‌های عددی مرزی صورت گرفته است. پنچی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش مرزی نیم‌صفحه، تحلیل تنش تونل‌های سطحی را انجام داده‌اند. پنچی و همکاران (۲۰۱۷) طی دو مطالعه دیگر، روش اجزای مرزی نیم‌صفحه را برای مدل‌سازی عددی لوله‌های مدفون در خاک و تونل‌های سطحی در خاک چندلایه توسعه داده‌اند.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که پیش از این، مطالعات بسیاری برای بررسی تأثیر متقابل سازه سطحی و حفاری تونل بر یکدیگر صورت گرفته، اما جای پژوهشی جامع با متغیر در نظر گرفتن پارامترهایی مانند عمق تونل، جنس خاک و تعداد طبقات سازه سطحی در یک پروژه واقعی یا یک تونل فرضی خالی است. بنابراین، در این مطالعه، در سه مقطع از تونل متروی مادرید و همچنین در سه مقطع فرضی تک‌لایه، تأثیر وجود سازه سطحی (۳، ۵ و ۱۰ طبقه) بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل ارزیابی شده است. در مقاطع فرضی برای خاک، سه جنس ماسه آهکی، رس قهوه‌ای و رس آبی پلاستیک که به صورت عمده در لایه‌بندی مسیر متروی مادرید حضور داشته‌اند، انتخاب شده

است. این مدل‌سازی‌ها معمولاً در دو حالت وجود سازه سطحی و عدم وجود سازه سطحی (زمین آزاد) انجام می‌گیرد. در سال ۲۰۱۲، در یکی از پُرستنادترین مطالعاتی که برای بررسی نشست‌های سطحی ناشی از حفاری مکانیزه تونل در محیط شهری صورت گرفته، لمبروگی و همکاران (۲۰۱۲) مقطعی از تونل متروی مادرید را در نرم‌افزار فلک به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی کرده و نشست‌های سطحی محاسبه شده را با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده با ابزار دقیق (فیلد) مقایسه نموده‌اند. در این مطالعه، تأثیر وجود سازه سطحی در نشست‌های حاصل مد نظر قرار نگرفته و مدل‌سازی‌ها در حالت زمین آزاد صورت گرفته است. پاتزو و ادنبروک (۱۹۹۷) روش سختی نسبی را که در آن ساختمان با یک تیر معادل الاستیک دوبعدی مدل می‌شود، ارائه داده‌اند. این روش، متداول‌ترین راه برای ارزیابی تأثیر سختی سازه بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل است. مروئه و شهرور (۲۰۰۲ و ۲۰۰۳) و جنک و دیاس (۲۰۰۴) اندرکنش تونل-ساختمان را با مدل‌سازی ساختمان به صورت قاب الاستیک مطالعه نموده‌اند. فرانزیوس و همکاران (۲۰۰۶) استفاده از روش سختی نسبی در مدل‌سازی اندرکنش سازه سطحی و حفاری تونل را توسعه داده‌اند. کونگلیس و آگارد (۲۰۰۹)، در یک مطالعه، نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل را در حالت وجود سازه سطحی با مدل‌سازی دوبعدی در دو نرم‌افزار المان محدود پلکسیس و استرنند بررسی کرده‌اند. آن‌ها در این مطالعه تنها وزن سازه سطحی را در نظر گرفته و سختی آن را در محاسبات دخالت نداده‌اند. میرحبیبی و سروش (۲۰۱۳)، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، بخشی از خط ۱ متروی شیراز را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی و در حالت وجود سازه سطحی مدل‌سازی کرده و نشست‌های حاصل را مورد بررسی قرار داده‌اند. البته در این مطالعه، پارامترهایی مانند عمق تونل و جنس خاک

¹ - Greenfield

روش کنترل افت حجم استفاده شده است. در روش کنترل افت حجم، مجموعه پارامترهای عملکردی تونل و روش اجرای آن در پارامتر افت حجم خلاصه می-شوند. در حفاری با TBM، عواملی که بر افت حجم زمین تأثیر می‌گذارند عبارتند از:

۱- جمع‌شدگی در جبهه کار: مته‌های دورانی سپر در جبهه کار به حفاری زمین می‌پردازند. در طول این فرایند، خاک پیرامون و جلوی مته در محدوده اثر آن، به سمت جبهه کار ریزش می‌کند.

۲- ایجاد لایه اضافه‌حفاری^۵ در پیرامون سپر^۶: از عواملی که باعث ایجاد این لایه در جبهه سپر می‌شوند می‌توان به بزرگ‌تر بودن جزئی قطر کله حفار^۷ نسبت به قطر مقطع حفاری و انتقال و جابه‌جایی سپر در طول مسیر حفاری اشاره کرد.

۳- قطر پوشش^۸ تونل به طور جزئی از قطر سپر کوچک‌تر است و فضای استوانه‌ای خالی میان پوشش و خاک تزریق شده با دوغاب (گروت)^۹ پر می‌شود. بنابراین، در صورتی که تزریق به درستی انجام نشده - باشد، این امکان وجود دارد که زمین در مدت زمان گیرش و سخت‌شدگی کامل دوغاب به طور شعاعی به سمت داخل تونل همگرا گردد (گوگلیلمتی و همکاران، ۲۰۰۷).

بدین منظور، ابتدا در مقاطع مورد نظر روند حفاری تونل با TBM به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی گردیده تا میانگین همگرایی دیواره تونل در هر یک از آن‌ها محاسبه شده و با بهره‌گیری از آن، روش کنترل افت حجم در مدل‌سازی‌های دوبعدی به کار گرفته شود. برای انجام این مطالعه، سه مقطع از مسیر متروی مادرید انتخاب شده است. شماره و کیلومتر از این مقاطع عبارتست از:

است. برای نسبت روباره به قطر تونل (C/D) مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲، که مقادیر متداول در پروژه‌های شهری می‌باشند، انتخاب شده‌اند. برای مدل‌سازی عددی، از نرم‌افزار آباکوس که بر مبنای روش عددی المان محدود به محاسبه می‌پردازد، استفاده شده و روش کنترل افت حجم^۱ برای مدل‌سازی دوبعدی حفاری تونل و مدل رفتاری الاستیک- کاملاً پلاستیک (با معیار گسیختگی موهر-کولمب)، که متداول‌ترین مدل برای مطالعات عمومی مهندسی است، برای شبیه‌سازی رفتار خاک به کار گرفته شده است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۴).

۲. حفاری مکانیزه پروژه متروی مادرید

در این مطالعه، تونل متروی مادرید که به قطر ۹/۳۸ متر و با استفاده از دستگاه^۲ TBM-EPB حفاری شده، به عنوان مبنای کار انتخاب گردیده است. در مقاطع مختلفی از پروژه حفاری مکانیزه متروی مادرید، نشست‌های سطحی ناشی از تونل‌سازی با ابزار دقیق اندازه‌گیری شده است. جدول ۱، لایه‌بندی خاک در مسیر پروژه متروی شهر مادرید را نشان می‌دهد. در مقاطع مختلف این پروژه که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، لایه‌بندی خاک ترکیبی از ۷ نوع خاک مطرح شده در جدول ۱ است. چنانکه پیشتر اشاره گردید، در میان مطالعات پیشین، لمبروگی و همکاران (۲۰۱۲) مقاطع مختلفی از پروژه متروی مادرید را با نرم‌افزار فلک سه‌بعدی و با استفاده از سه مدل رفتاری الاستیک خطی^۳، موهر-کولمب و کم کلی اصلاح‌شده^۴، مدل‌سازی کرده و نشست‌های سطحی حاصل از مدل‌سازی عددی را با داده‌های فیلد مقایسه کرده‌اند.

برای مطالعه پارامتریک دوبعدی تأثیر سازه سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل متروی مادرید از

⁵ - Over-excavation

⁶ - Shield

⁷ - Cutter head

⁸ - Lining

⁹ - Grout

¹ - Volume loss control method

² - Earth Pressure Balanced-Tunnel Boring Machine

³ - Linear elastic

⁴ - Modified Cam Clay

- ۱- مقطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶
 ۲- مقطع شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰
 ۳- مقطع شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰
- در جدول‌های ۲ الی ۴ به ترتیب لایه‌بندی خاک و اطلاعات مربوط به تونل حفاری شده در مقاطع ۱، ۲ و ۳ نمایش داده شده است. مشاهدات گروت، پیش و پس از سخت شدگی کامل دوغاب، نشان می‌دهد که در نظرگرفتن مقدار صفر برای فشار تزریق به واقعیت
- موجود در این پروژه نزدیک‌تر است. همچنین، با توجه به وجود سفره‌های محدود آب زیرزمینی نامتصل به یکدیگر در خاک مادرید، مقدار درستی برای سطح آب زیرزمینی وجود ندارد. بنابراین، در یک حالت واقع-گرایانه، مدل‌سازی عددی بدون در نظر گرفتن آب زیرزمینی و با صرف‌نظر از فشار آب حفره‌ای انجام شده است (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲).

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لایه‌بندی خاک در مسیر متروی مادرید (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

ψ	ϕ'	C'	ν	E	γ	
°	°	(kPa)	-	(MPa)	(kN/m ³)	
۵	۲۸/۰	۰	۰/۳۵	۱۰	۱۸/۰	خاک دستی
۵	۳۸/۲	۴۹	۰/۳۰	۸۰	۲۰/۰	ماسه آهکی
۵	۳۳/۰	۱۱۲	۰/۲۸	۱۲۰	۲۰/۵	ماسه رسی
۵	۳۱/۷	۱۰۵	۰/۳۰	۱۲۳	۲۰/۸	رس ماسه‌ای
۵	۳۲/۵	۱۴۹	۰/۳۰	۱۷۲	۲۱/۰	رس قهوه‌ای
۵	۲۸/۰	۵۰	۰/۲۸	۳۰۰	۲۰/۶	رس پلاستیک آبی
۵	۲۸/۰	۷۰	۰/۲۶	۵۰۰	۲۳/۰	گچ

جدول ۲. جزئیات مقطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶ متروی مادرید (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)	عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱	خاک دستی	۲/۵۰	۱۴/۰۰	۹/۳۸	-	۳۴۰/۰۰
۲	رس ماسه‌ای	۳/۵۰				
۳	ماسه آهکی	۱۰/۰۰				
۴	ماسه رسی	۳۵/۵۲				

جدول ۳. جزئیات مقطع شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰ متروی مادرید (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)	عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی (m)	فشار جبهه کار (kPa)
۱	رس ماسه‌ای	۱۳/۰۰	۱۴/۰۰	۹/۳۸	-	۳۴۰/۰۰
۲	رس قهوه‌ای	۳/۰۰				
۳	رس ماسه‌ای	۹/۸۰				
۴	رس قهوه‌ای	۳۲/۵۲				

شماره لایه	جنس خاک	ضخامت (m)
۱	خاک دستی	۱/۳۰
۲	رس ماسه‌ای	۱/۰۰
۳	رس ماسه‌ای- ماسه رسی	۱/۶۰
۴	رس ماسه‌ای- ماسه آهکی	۴/۱۰
۵	رس ماسه‌ای- ماسه رسی	۴۶/۳۲
عمق محور تونل (m)	قطر تونل (m)	سطح آب زیرزمینی فشار جبهه کار (kPa)
۱۶/۸۰	۹/۳۸	۴۰/۰۰

جدول ۴. جزئیات مقطع شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰ متروی مادرید (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

۳. جزئیات مدل‌سازی عددی

۳-۱. مقدمه

برای مدل‌سازی عددی، از نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ نسخه ۶/۴۱۸ استفاده شده است. هدف از انجام مدل‌سازی سه‌بعدی، صرفاً ارزیابی متوسط میزان همگرایی تاج و کف دیواره تونل برای استفاده در روش کنترل افت حجم در مدل‌سازی‌های دوبعدی و افزایش هرچه بیشتر تطابق آن با واقعیت است.

۳-۲. مدل‌سازی سه‌بعدی

در مدل‌سازی سه‌بعدی، پنج بخش زمین، سپر، اضافه حفاری، پوشش تونل و گروت جداگانه ساخته شده و گردآوری^۱ شده است. در مطالعه حاضر، پس از انجام حساسیت‌سنجی، ابعاد مرزهای مصنوعی زمین مطابق ابعاد پیشنهاد شده در ادبیات فنی (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۳) انتخاب گردیده است. بدین ترتیب، در مدل‌سازی سه‌بعدی، طول زمین برابر با $2(H+4D)$ ، عمق زمین برابر با $H+4D$ و عرض زمین برابر با $2(H+4D)$ مدل‌سازی گردیده که در آن H عمق محور مرکزی تونل و D قطر تونل است. با توجه به اینکه

عمق تونل بر خلاف قطر آن در طول مسیر مترو و در مقاطع مختلف مادرید تغییر می‌کند، در هر یک از این مقاطع، مدل ساخته شده ابعاد ویژه‌ای داشته است (شکل ۱- الف). عمق مدل‌سازی‌های دوبعدی مقاطع متروی مادرید مانند مدل‌سازی‌های سه‌بعدی برابر $H+4D$ و عمق مدل‌سازی‌های مقاطع فرضی تک‌لایه با خاک ماسه آهکی، رس قهوه‌ای و رس پلاستیک آبی با توجه به توصیه‌های موجود در ادبیات فنی و پس از حساسیت‌سنجی برابر $6D$ و عرض همه مدل‌سازی‌های دوبعدی برابر $12D$ در نظر گرفته شده است (شکل ۱- ب). مشخصات مکانیکی هر یک از این بخش‌ها در جدول‌های ۵ تا ۸ ارائه شده است. در این پروژه، نرخ پیش‌روی TBM برابر 1 m/hr فرض گردیده و مدل‌سازی سه‌بعدی فرایند حفاری به صورت زیر انجام شده است:

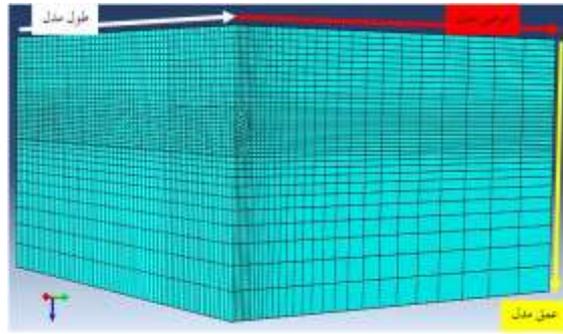
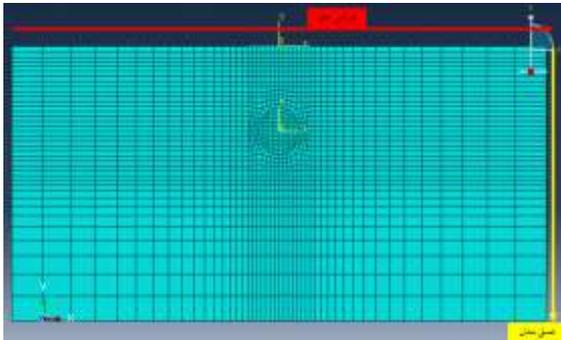
۱. تنش‌های برجای اولیه در زمین اعمال شده و مدل به تعادل اولیه رسیده است.
۲. المان‌های داخل مقطع تونل در طول $1/5$ متر (معادل عرض یک سگمنت^۲) غیرفعال شده است.
۳. فشار لازم به جبهه کار اعمال گردیده است.

² - Segment

¹ - Assemble

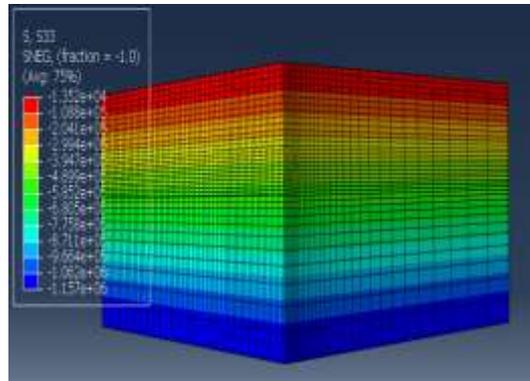
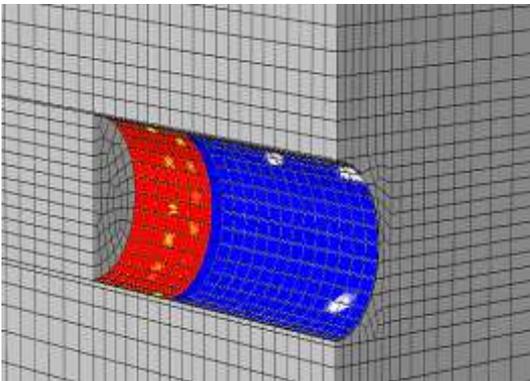
مطالعه عددی پارامتریک تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل

۴. المان‌های سپر و اضافه حفاری در بخش حفاری شده در مرحله ۲، فعال شده است.
۵. پس از انجام ۷ گام حفاری و پیش‌روی سپر، پوشش تونل در بخش حفاری شده در مرحله ۱، فعال گردیده و
- فاصله خالی میان پوشش و مقطع تونل، با گروت با سختی اولیه پوشش داده شده است.
۶. با پیش‌روی حفاری، سختی گروت تا رسیدن به سختی نهایی آن افزایش داده شده است.



ب) مرزهای مصنوعی و مش‌بندی مدل‌سازی دوبعدی

الف) مرزهای مصنوعی و مش‌بندی مدل‌سازی سه‌بعدی



د) ۲۱ گام حفاری و ۳۱/۵ متر پیش‌روی TBM در مدل سه‌بعدی

ج) مدل‌سازی سه‌بعدی به تعادل اولیه ژئواستاتیک رسیده است

شکل ۱. جزئیات مدل‌سازی سه‌بعدی حفاری مکانیزه تونل متروی مادرید

جدول ۵. مشخصات مکانیکی سپر (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

نسبت پواسون	مدول الاستیسیته بدنه	وزن سپر	طول سپر	قطر سپر با شکل استوانه‌ای (m)	قطر حفاری (m)
بدنه سپر <td>سپر (GPa)</td> <td>(kN)</td> <td>(m)</td> <td>(m)</td> <td>(m)</td>	سپر (GPa)	(kN)	(m)	(m)	(m)
۰/۱۲۵	۲۲/۵۰	۹۵۶۵	۱۰/۵۰	۹/۳۲	۹/۳۸

جدول ۶. مشخصات مکانیکی اضافه حفاری (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

ضخامت اضافه حفاری (m)	پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۰۳	۰/۲۰	۰/۱۰

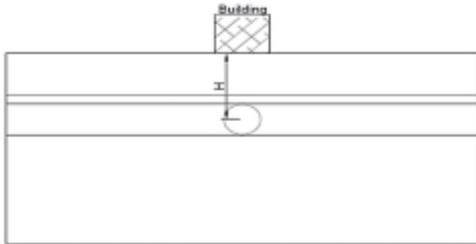
جدول ۷. مشخصات مکانیکی پوشش تونل (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت پواسون	دانسیتیه اولیه	دانسیتیه اصلاح شده با توجه به وزن واگن پشتیبانی (kg/m ³)	ضخامت (m)
(GPa)		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(m)

۰/۳۲	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۲۰	۳۸
------	------	------	------	----

جدول ۸. مشخصات مکانیکی گروت (لمبروگی و همکاران، ۲۰۱۲)

مدول الاستیسیته نهایی (GPa)	مدول الاستیسیته اولیه (GPa)	نسبت پواسون	دانسیته گروت (kg/m ³)	t ₀ (hr)	مدت زمان سخت‌شدگی کامل گروت (hr)
۲/۶۰	۰/۱۰	۰/۲۸۶	۲۴۰۰	۱	۱۲



شکل ۲. شماتیک وجود سازه سطحی در مقطع شماره ۲- کیلومتر ۳۱۰+۴

جدول ۹. معرفی پارامترهای روش سختی نسبی برای مدل‌سازی دوبعدی ساختمان

پارامتر	توضیح
L	بعد سوم دال
t _{slab}	ضخامت دال بتنی
I _{slab}	ممان اینرسی تیر معادل
A _{slab}	سطح مقطع تیر معادل
h _m	فاصله تار خشی کل ساختمان از هر طبقه
E _{eq}	مدول الاستیسیته معادل ساختمان
A _{eq}	سطح مقطع معادل ساختمان
t _{eq}	ضخامت معادل ساختمان

در این مطالعه، فرض شده است ساختمان‌ها از نوع بتنی مسلح با اسکلت و دال تخت و دارای m طبقه هستند. با لحاظ کردن سختی فونداسیون، تعداد طبقات ساختمان به m+1 افزایش پیدا کرده و ضخامت دال بتنی ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع کف تا کف طبقات برابر ۳

۳-۳. مدل‌سازی دوبعدی

۳-۳-۱. روش کنترل افت حجم

روش کنترل افت حجم از نظر عملکرد، مبتنی بر روش همگرایی-محصورشدگی^۱ است. در این روش، مقادیر آزادسازی تنش به صورتی انتخاب می‌شوند که میزان افت حجم مورد نظر را تولید نمایند. به عبارت بهتر، تمامی پارامترهای مؤثر در اجرای تونل و تغییرات تنش‌ها و کرنش‌های محیط در نهایت منجر به ایجاد افت حجم زمین می‌گردند (کاراکوس، ۲۰۰۷).

۳-۳-۲. روش سختی نسبی برای مدل‌سازی سازه

سطحی

برای استفاده از روش سختی نسبی، هر ساختمان به صورت یک تیر الاستیک با مدول یانگ (E)، ممان اینرسی (I) و سطح مقطع (A) معادل در سطح زمین تعریف می‌شود. پارامترهای مربوط به این روش در جدول ۹ ارائه شده است. در این مطالعه، وجود یک سازه فرضی سطحی بتن آرمه با عرض ۱۴ متر (عمود بر محور تونل) در بالای تاج تونل فرض شده است (شکل ۲). برای در نظر گرفتن وزن سازه، به ازای هر طبقه، فشاری معادل ۱۰ kPa در سطح زمین اعمال گردیده است (کاتبی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لامبروگی و همکاران، ۲۰۱۲).

¹ - Convergence-confinement method

متر در نظر گرفته شده است.

$$(E_c I)_{structure} = E_c \sum_1^{m+1} (I_{slab} + A_{slab} h_m^2) = E_{eq} t_{eq}^3 L / 12 \quad (3)$$

ممان اینرسی و سطح مقطع تیرهای معادل به ترتیب از معادلات ۱ و ۲ به دست آمده و در جدول ۱۰ ارائه گردیده است.

$$(E_c A)_{structure} = (E_c A)_{slab} (m + 1) = E_{eq} t_{eq}^3 L \quad (4)$$

$$A_{eq} = t_{eq} = \sqrt{(12 E_c I)_{structure} / (E_c A)_{structure}} \quad (5)$$

پس از مشخص شدن ضخامت معادل تیر سطحی و با فرض سختی محوری یکسان، مدول الاستیسیته معادل تیر سطحی متناظر با ساختمان‌های سطحی از معادله ۶ به دست آمده است.

$$E_{eq} = (E_c A)_{structure} / t_{eq} \quad (6)$$

با احتساب مقدار $f'_c = 210 \text{ kg/m}^2$ برای بتن سازه-ای متداول ساختمان‌ها، مدول یانگ بتن برابر $E_c = 2.2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ به دست آمده است. بر این اساس، ضخامت و مدول الاستیسیته معادل تیر سطحی متناظر با ساختمان‌های ۳، ۵ و ۱۰ طبقه به صورت جدول ۱۱ محاسبه شده است (پاتز و ادنبروک، ۱۹۹۷؛ رضایی، ۱۳۹۳).

جدول ۱۰. ممان اینرسی و سطح مقطع تیر معادل الاستیک

$I_{slab} (m^4/m)$	$A_{slab} (m^2/m)$
۰/۰۰۲۸	۰/۱۵

$$I_{slab} = t_{slab}^3 L / 12 \quad (1)$$

$$A_{slab} = t_{slab} L \quad (2)$$

با توجه به معادلات ۳ الی ۵، مدول الاستیسیته، سطح مقطع و ضخامت معادل تیر محاسبه گردیده است. در حالت دوبعدی مقادیر سطح مقطع و ضخامت معادل تیر سطحی یکسان بوده و از معادله ۵ تعیین شده است.

جدول ۱۱. ضخامت و مدول الاستیسیته معادل تیر سطحی برای ساختمان‌هایی با تعداد طبقات مختلف

تعداد طبقات ساختمان بتنی	۳ طبقه	۵ طبقه	۱۰ طبقه
ضخامت معادل تیر (m)	۱۲/۳۰	۱۸/۹۰	۳۵/۰۰
مدول الاستیسیته معادل تیر (kPa)	۱۱۲۰۸۵۰	۱۰۹۷۲۴۰	۱۰۸۳۹۰۰

۳-۳-۳. روند مدل‌سازی دوبعدی

الاستیک، فشار سطحی معادل وزن ساختمان در موقعیت سازه سطحی اعمال می‌گردد. ۳. با غیرفعال کردن المان‌های داخل مقطع تونل، حفاری صورت گرفته است. پس از انجام حفاری، برای مدل‌سازی اضافه حفاری، به مرزهای مقطع تونل امکان جابه‌جایی شعاعی به سمت داخل تونل داده شده است. برای اینکه اضافه حفاری خاک و وجود سپر در شرایط واقعی، در حالت دوبعدی به درستی مدل‌سازی شود، میزان جابه‌جایی شعاعی مرزهای مقطع تونل در این

مدل‌سازی عملیات حفاری و ساخت تونل در حالت دوبعدی در ۵ مرحله صورت گرفته است. این مراحل عبارتند از:

۱. تنش‌های اولیه بر جای زمین بر مدل اعمال شده و مدل به تعادل اولیه رسیده است.
۲. سازه سطحی که با روش تیر الاستیک معادل جایگزین شده، فعال می‌گردد. هم‌زمان با فعال‌سازی تیر

پلاستیک آبی همگرایی دیواره تونل برابر ۲۰ میلی‌متر فرض شده است.

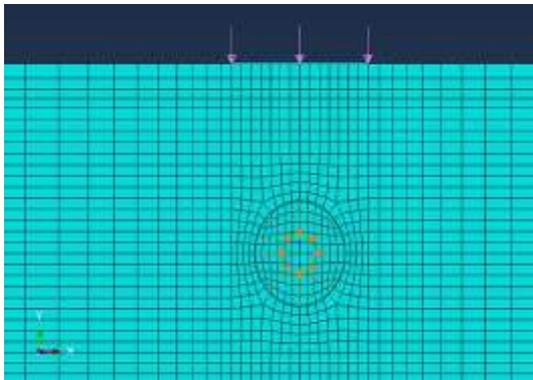
۴. شرط مرزی همگرایی شعاعی دیواره مقطع تونل حذف گردیده و پوشش و گروت با سختی اولیه فعال شده است.

۵. با فرض گذشت زمان لازم، گروت به سختی نهایی خود رسیده و مدول الاستیسیته آن به مقدار کاملاً سخت شده تبدیل گردیده است.

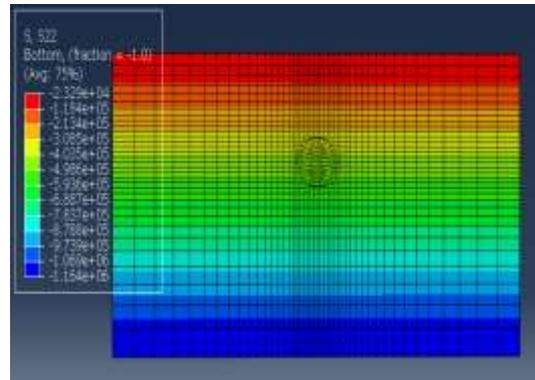
مرحله، با استفاده از میانگین همگرایی نهایی دیواره تونل در مدل‌های سه بعدی در نظر گرفته شده است. جدول ۱۲ مقادیر مربوط به میانگین همگرایی دیواره تونل در مقاطع پروژه متروی مادرید را نشان می‌دهد. بر این اساس، واضح است که همگرایی مقاطع تقریباً برابر ۲۰ میلی‌متر بوده است. به همین دلیل، در مقاطع فرضی تک‌لایه با خاک ماسه آهکی، رس قهوه‌ای و رس

جدول ۱۲. میانگین همگرایی نهایی دیواره تونل در مدل‌سازی‌های سه‌بعدی

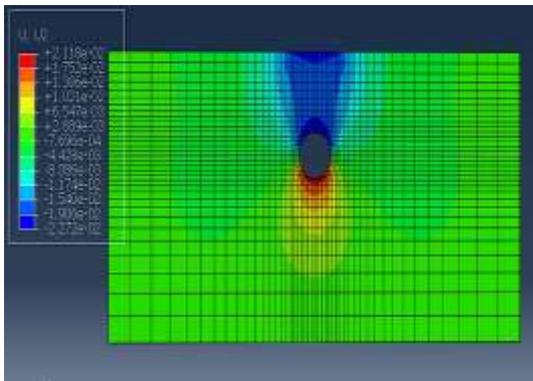
مقاطع متروی مادرید	میانگین همگرایی دیواره تونل (میلی‌متر)
شماره ۱، کیلومتر ۲+۵۲۶	۲۱/۰۷۲۵
شماره ۲، کیلومتر ۴+۳۱۰	۱۹/۷۳۶۳
شماره ۳، کیلومتر ۲+۲۶۰	۱۹/۴۳۴۲



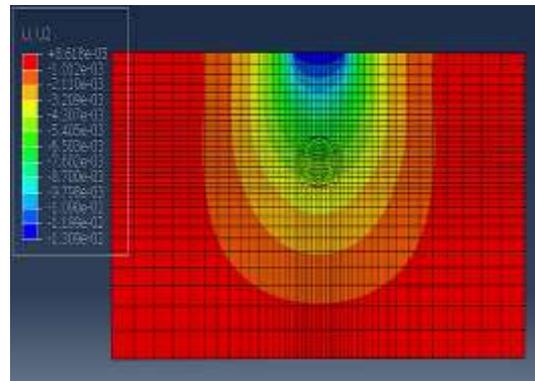
ب) اعمال وزن سازه سطحی و همگرایی دیواره تونل



الف) مدل دوبعدی به تعادل اولیه ژئواستاتیک رسیده است



د) کنتور نشست‌های قائم پس از پایان حفاری تونل



ج) کنتور نشست‌های قائم پس از اعمال وزن و سختی سازه

شکل ۳. جزئیات مدل‌سازی دوبعدی حفاری تونل متروی مادرید

بعدی مقاطع متروی مادرید در حالت زمین آزاد در شکل ۴، نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی

۴. نتایج و بحث

۴-۱. مقایسه مدل‌سازی‌های دوبعدی و سه-

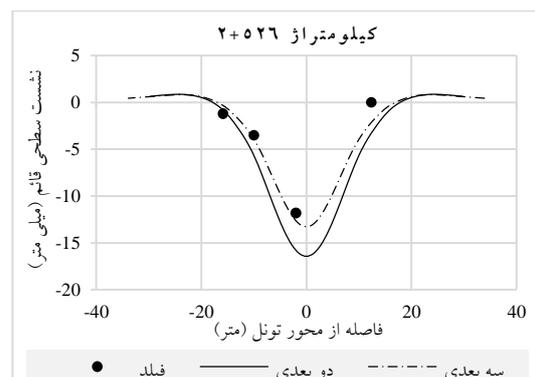
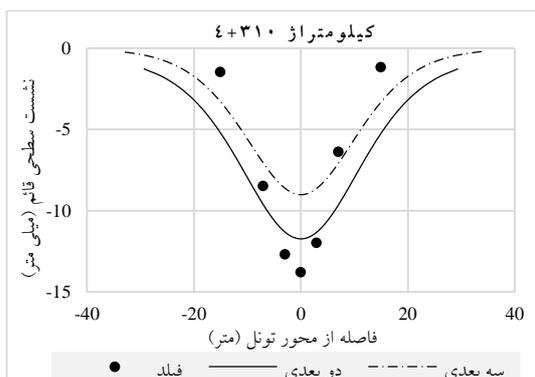
نتایج متفاوتی را رقم زده است. اعمال وزن و سختی معادل سازه ۱۰ طبقه، بیشینه نشست سطحی قائم در بالای تاج تونل را تا حدود ۶۰٪ نسبت به حالت زمین آزاد کاهش داده است. از این رو، می‌توان گفت که وجود سازه سطحی با تعداد طبقات زیاد (مانند ۱۰ طبقه) تأثیر بسیاری بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل گذاشته و فرض ساده‌کننده زمین آزاد برای محیط‌های شهری می‌تواند نشست‌ها را تا ۱۶۷٪ بیش از آن‌چه که در واقعیت رخ می‌دهد، ارائه نماید. همچنین، وجود لایه خاک دستی و روباره کم باعث افزایش تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل گردیده است. ضمن آنکه در مقاطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶ و شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰، منحنی‌های نشست سطحی قائم در نقاط انتهایی تیر الاستیک معادل، دارای جهش پله‌مانندی است که می‌تواند ناشی از روباره کم، لایه ضعیف خاک دستی و گستردگی نوع خاک ماسه رسی در آن مقاطع باشد. در مقطع شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰ که در آن محور تونل در عمق ۲۰/۸ متری سطح زمین قرار گرفته و لایه‌بندی خاک ترکیبی از دو خاک رس ماسه‌ای و رس قهوه‌ای با مشخصات مکانیکی تقریباً یکسان است، منحنی‌های نشست‌های سطحی قائم بدون جهش پله‌ای بوده و وجود سازه سطحی در این مقطع تأثیر کمتری بر نشست‌ها گذاشته است.

مقاطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶، شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰ و شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰ پروژه متروی مادرید نمایش داده شده است. با توجه به این شکل واضح است که در همه مقاطع، مدل‌سازی دوبعدی حفاری مکانیزه تونل با روش کنترل افت حجم، نشست‌های سطحی را بیش‌تر از مدل‌سازی سه‌بعدی محاسبه کرده و در نزدیکی محور تونل نتایج نزدیکی به آن‌چه که در واقعیت رخ داده، ارائه نموده است. از این رو صحت و دقت مدل‌سازی دوبعدی حفاری با روش کنترل افت حجم در نرم‌افزار آباکوس مورد تایید واقع شده و در ادامه کار از آن استفاده شده است.

۴-۲. تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های

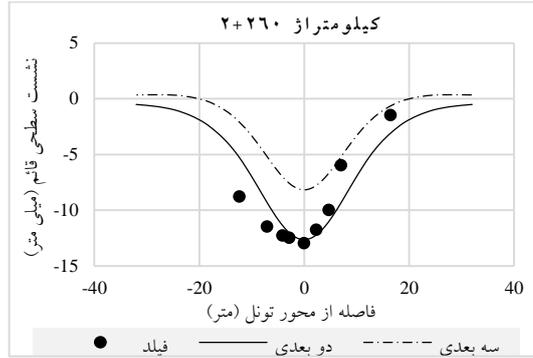
ناشی از حفاری تونل متروی مادرید

چنانچه پیشتر اشاره گردید، وجود سازه سطحی می‌تواند نشست‌های ناشی از حفاری تونل را تحت تأثیر قرار داده و شکل منحنی‌های نشست را تغییر دهد. در این بخش، نتایج مدل‌سازی مقاطع متروی مادرید با وجود سازه سطحی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در شکل ۵ ارائه گردیده است. برای مقایسه بهتر تأثیر وجود سازه سطحی، منحنی‌های نشست‌های سطحی قائم عرضی در حالت زمین آزاد در این شکل گنجانده شده است. اولین نکته‌ای که با مشاهده شکل ۵ مشخص می‌شود این است که در همه مقاطع وجود سازه سطحی باعث کاهش نشست‌های سطحی نسبت به حالت زمین آزاد گردیده است. البته تغییر تعداد طبقات سازه سطحی



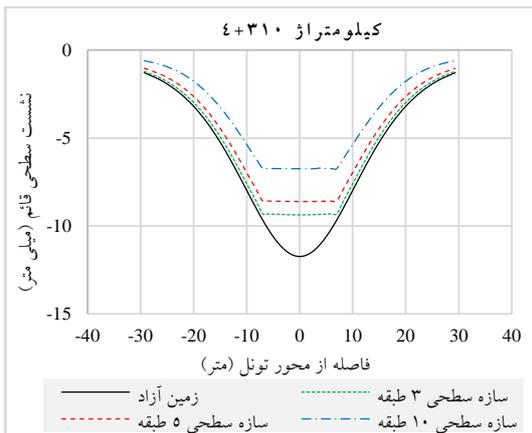
مقطع شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰

مقطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶

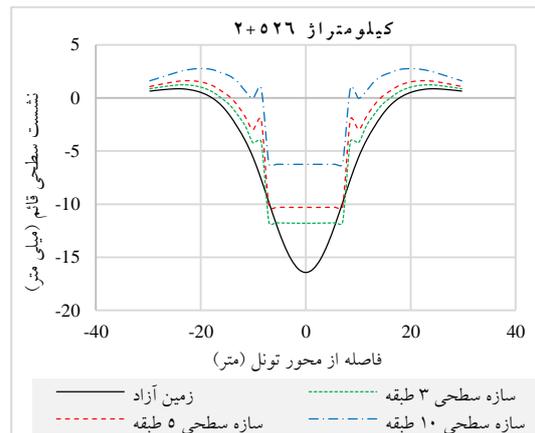


مقطع شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰

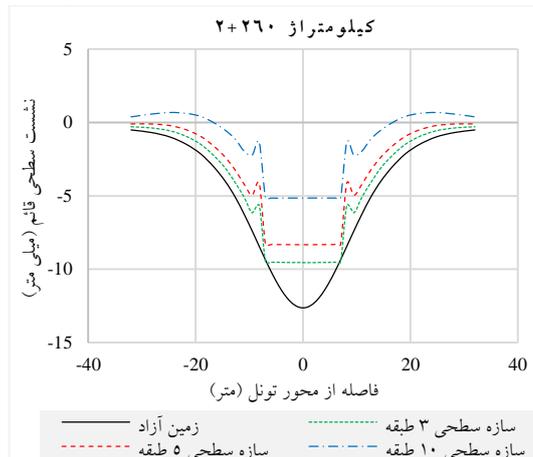
شکل ۴. نشست‌های سطحی قائم مقاطع متروی مادرید در حالت زمین آزاد



مقطع شماره ۲- کیلومتر ۴+۳۱۰ (ب)



مقطع شماره ۱- کیلومتر ۲+۵۲۶ (الف)



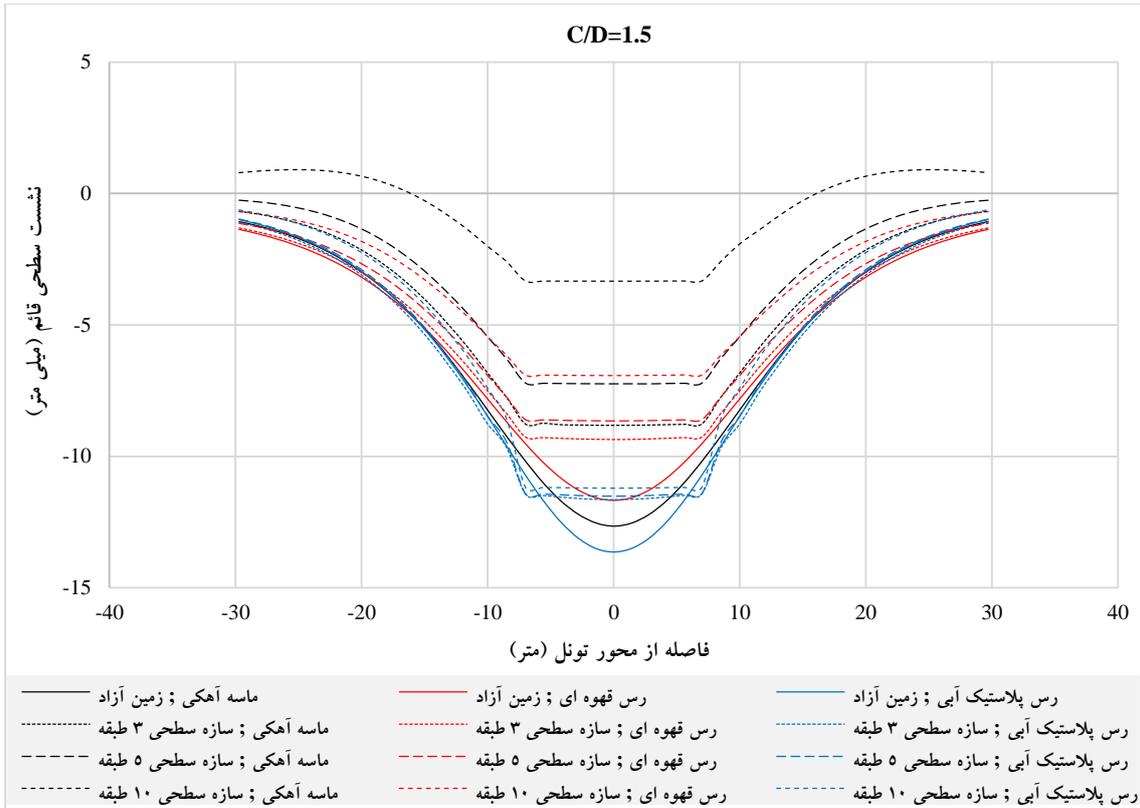
مقطع شماره ۳- کیلومتر ۲+۲۶۰ (ج)

شکل ۵. تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های سطحی قائم مقاطع متروی مادرید

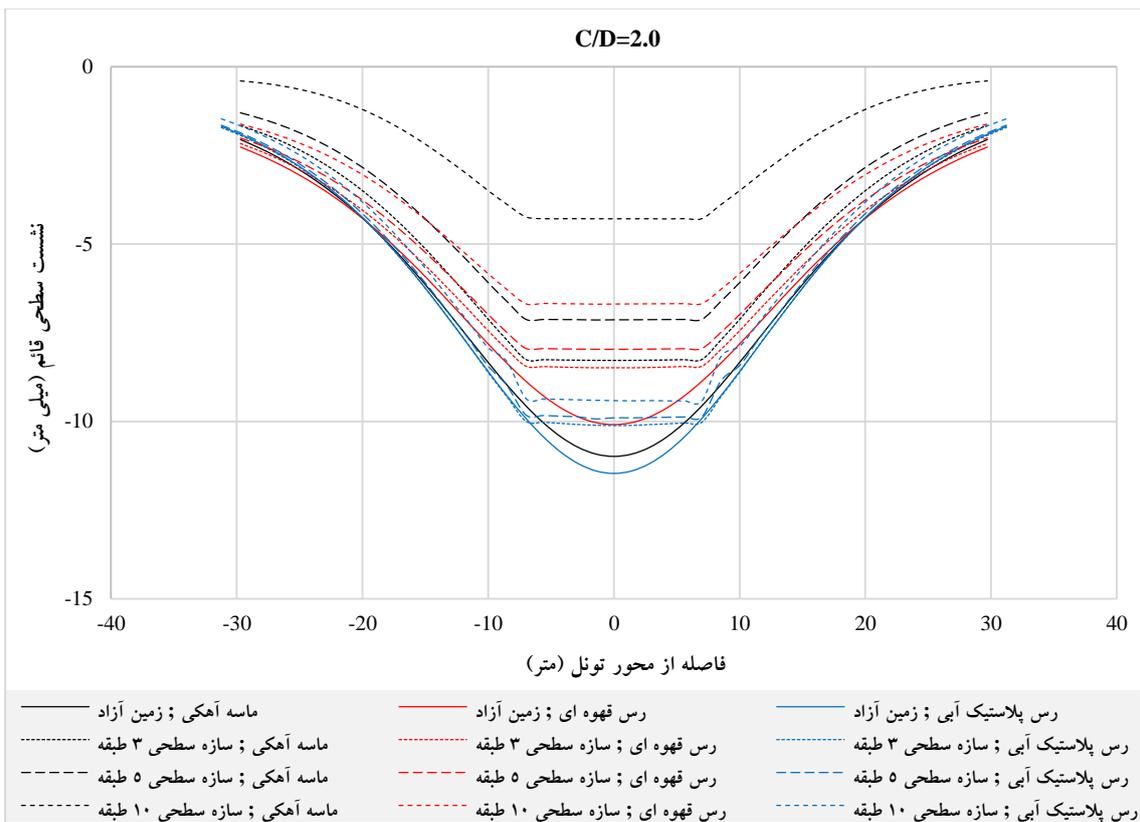
در این بخش، نتایج مطالعه پارامتریک تأثیر وجود سازه سطحی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل در خاک یک‌لایه ماسه آهکی، رس قهوه‌ای و رس پلاستیک آبی با نسبت روباره به عمق محور

۳-۴. نتایج مطالعه پارامتریک تأثیر وجود سازه

سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل



شکل ۷. تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های سطحی قائم ناشی از حفاری تونل با نسبت $C/D = 1.5$



شکل ۸. تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های سطحی قائم ناشی از حفاری تونل با نسبت $C/D = 2.0$

جدول ۱۳. بیشینه نشست سطحی قائم در بالای تاج تونل در حالت زمین آزاد (میلی‌متر)

C/D	ماسه آهکی	رس قهوه‌ای	رس پلاستیک آبی
۱/۰	۱۵/۱۲	۱۴/۰۵	۱۷/۲۴
۱/۵	۱۲/۶۵	۱۱/۶۷	۱۳/۶۳
۲/۰	۱۰/۹۸	۱۰/۰۹	۱۱/۴۶

با توجه به نتایج، می‌توان گفت که پراکنندگی نتایج در خاک ماسه آهکی بیشتر است. به عبارت بهتر، در این نوع خاک، تغییر دو پارامتر تعداد طبقات سازه سطحی و نسبت C/D تغییرات بیشتری نسبت به خاک رس قهوه‌ای و خاک رس پلاستیک آبی در نشست‌های ناشی از حفاری تونل ایجاد کرده است. در خاک رس پلاستیک، که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارد، تأثیر پارامتر تعداد طبقات سازه سطحی کمتر از بقیه است.

جدول ۱۴ نشان می‌دهد که در خاک ماسه آهکی، افزایش تعداد طبقات سازه سطحی، تأثیر قابل توجهی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل گذاشته است. برای مثال، افزایش تعداد طبقات سازه سطحی از ۳ به ۱۰ در نسبت $C/D = 1.0$ ، بیشینه نشست سطحی ناشی از حفاری تونل را در موقعیت سازه بیش از ۷۶٪ کاهش داده است. حال آنکه، در خاک‌های رس قهوه‌ای و رس پلاستیک آبی، افزایش تعداد طبقات سازه سطحی از ۳ به ۱۰، بیشینه نشست سطحی را به ترتیب ۳۱/۶۴ درصد و ۶/۹۸ درصد کاهش داده است. از این‌رو، می‌توان گفت که جنس خاک و مشخصات مکانیکی آن اهمیت بسیاری در نشست‌های ناشی از حفاری تونل دارد. در خاک ضعیفی مثل رس پلاستیک آبی، افزایش تعداد طبقات سازه تأثیر چندانی بر کاهش نشست‌ها نگذاشته، در حالی که در خاک ماسه آهکی و رس قهوه‌ای چنین نبوده است. با یادآوری اینکه زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه آهکی $38/2^\circ$ و چسبندگی آن مانند چسبندگی رس پلاستیک آبی برابر ۴۹ kPa است، می‌توان گفت زاویه اصطکاک داخلی خاک اهمیت بسیاری

در حالت زمین آزاد، مقدار نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل در خاک رس قهوه‌ای کمتر از خاک ماسه آهکی و در خاک ماسه آهکی کمتر از خاک رس پلاستیک آبی بوده است. در این میان، نکته جالب توجه آن است که اگرچه مدول الاستیسیته خاک رس پلاستیک آبی برابر ۳۰۰ kPa است، اما کم‌بودن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن که به ترتیب برابر ۵۰ kPa و 28° است، باعث شده تا نشست‌های سطحی ناشی از حفاری در آن بیشتر باشد. حال آنکه کمترین نشست‌ها در خاک رس قهوه‌ای با چسبندگی ۱۴۹ kPa و زاویه اصطکاک داخلی $32/5^\circ$ رخ داده است. از طرف دیگر، نشست‌های سطحی خاک ماسه آهکی با مدول الاستیسیته ۸۰ kPa چسبندگی ۴۹ kPa و زاویه اصطکاک داخلی $38/2^\circ$ کمتر از خاک رس پلاستیک آبی است. این نتایج نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک داخلی خاک در تکامل نشست‌های ناشی از حفاری تونل اهمیت بسیاری دارد و در مقایسه با مدول الاستیسیته و چسبندگی تأثیر بیشتری بر نتایج گذاشته است. در مطالعات پیشین، عامل مشخصات مکانیکی خاک چندان مورد توجه واقع نشده است.

از دیگر نکات قابل توجه این است که در صورت وجود سازه سطحی ۱۰ طبقه، بالازدگی در همه خاک‌ها در نسبت $C/D = 1.0$ به وقوع پیوسته است. البته مقدار بالازدگی در خاک ماسه آهکی بیشتر بوده و در این نوع خاک، وجود سازه سطحی ۵ طبقه نیز منجر به وقوع بالازدگی در منحنی نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل گردیده است.

دیگر، افزایش دو برابری روباره تونل، بیشینه نشست‌های سطحی ناشی از حفاری را در موقعیت سازه بیش از ۳۰٪ کاهش داده است. حال آنکه با افزایش تعداد طبقات سازه سطحی از ۳ به ۱۰، نشست‌های ناشی از حفاری در خاک رس پلاستیک کمتر از ۰.۷٪ کاهش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد که در خاک رس پلاستیک، که مشخصات مکانیکی ضعیف-تری نسبت به رس قهوه‌ای و ماسه آهکی دارد، پارامتر C/D تأثیرگذاری بیشتری در قیاس با مشخصات سازه سطحی داشته است. نتایج در سایر خاک‌ها بدین گونه نبوده و در خاک ماسه آهکی منحنی‌های نشست بیشتر تحت تأثیر مشخصات سازه سطحی بوده و با افزایش دو برابری عمق تونل، بیشینه نشست‌های سطحی کم‌تر از ۲۰٪ کاهش پیدا کرده است.

نکته مهم اینکه تیر الاستیک معادل به صورت گیردار به زمین متصل شده است. در گره‌هایی که در سطح زمین قرار گرفته و نشست‌های تونل در آن‌ها قرائت شده، تغییرشکل‌های ناشی از فعال کردن المان تیر الاستیک، حذف شده و تغییرشکل‌هایی که در بخش نتایج ارائه شده، صرفاً ناشی از تونل‌سازی بوده است. البته لازم به ذکر است که تغییرشکل‌های ناشی از فعال-کردن المان تیر نیز ناچیز بوده است.

دارد. به ویژه، با در نظر گرفتن اینکه خاک رس قهوه‌ای با چسبندگی 149 kPa و زاویه اصطکاک داخلی 31.7° تأثیرپذیری کمتری نسبت به خاک ماسه آهکی در برابر افزایش تعداد طبقات سازه سطحی و عمق تونل از خود نشان داده است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش روباره تونل و نسبت C/D ، مقدار بالازدگی‌ها کاهش یافته و در نسبت $C/D = 2.0$ ، هیچ بالازدگی، حتی در صورت وجود سازه سطحی ۱۰ طبقه، رخ نداده است.

در خاک رس پلاستیک آبی، جهشی که در موقعیت سازه سطحی در منحنی‌های نشست‌های سطحی قائم عرضی رخ داده، نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر است. به بیان دیگر، در خاک رس پلاستیک، که چسبندگی و زاویه اصطکاک کمتری نسبت به ماسه آهکی و رس قهوه‌ای دارد، شبیه‌سازی سازه سطحی شوک بیشتری بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل وارد کرده است. البته این جهش با افزایش عمق تونل کاهش یافته، تا جایی که در خاک‌های ماسه آهکی و رس قهوه‌ای در $C/D = 2.0$ جهشی دیده نشده است.

بر اساس نتایج، افزایش نسبت C/D از ۱ به ۲ در خاک رس پلاستیک، دامنه نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل را در صورت وجود سازه سطحی از ۱۵ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر محدود نموده است. به عبارت

جدول ۱۴. کاهش بیشینه نشست سطحی قائم در موقعیت سازه سطحی (٪)

رس پلاستیک آبی	رس قهوه‌ای	ماسه آهکی		
۲/۰۱	۹/۳۲	۲۲/۰۹	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۵	$C/D = 1.0$
۱/۱۲	۷/۵۸	۱۷/۹۱	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۵	$C/D = 1.5$
۲/۱۸	۶/۱۳	۱۳/۸۹	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۵	$C/D = 2.0$
۵/۰۷	۲۴/۶۱	۷۰/۳۱	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۵ به ۱۰	$C/D = 1.0$
۲/۶۹	۲۰/۰۰	۵۴/۰۰	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۵ به ۱۰	$C/D = 1.5$
۴/۸۵	۱۵/۹۵	۳۹/۸۳	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۵ به ۱۰	$C/D = 2.0$

۶/۹۸	۳۱/۶۴	۷۶/۸۷	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۱۰	$C/D = 1.0$
۳/۷۸	۲۶/۰۷	۶۲/۲۴	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۱۰	$C/D = 1.5$
۶/۹۲	۲۱/۱۱	۴۸/۱۹	با افزایش تعداد طبقات سازه از ۳ به ۱۰	$C/D = 2.0$

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با کاربرد نرم‌افزار المان محدود آباکوس، مدل‌سازی سه‌بعدی و دوبعدی فرایند حفاری تونل‌های مکانیزه و انجام مطالعه پارامتریک، به بررسی تأثیر وزن و سختی سازه‌های سطحی بر میزان نشست‌های سطحی ایجاد شده در چندین نوع خاک، ناشی از حفاری تونل‌های مکانیزه با نسبت‌های مختلف سرپار به قطر پرداخته شده است. مشخصات تونل بر اساس پروژه مترو مادرید انتخاب شده و از نتایج ایزاربنندی پروژه مذکور برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است. مهمترین نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

□ روش کنترل افت حجم برای مدل‌سازی دوبعدی حفاری مکانیزه تونل مناسب بوده و نتایج حاصل از آن تطابق قابل قبولی با نشست‌های واقعی اندازه‌گیری شده در مقاطع متروی مادرید در حالت زمین آزاد داشته است.

□ با مدل‌سازی سازه‌های سطحی به روش تیر الاستیک معادل، وجود سازه سطحی، نشست‌های ناشی از حفاری تونل را کاهش داده است. دلیل این امر سختی بسیار زیاد سازه‌های سطحی در روش مدل‌سازی فوق‌الذکر بوده و تأثیرات سختی سازه‌ها در کاهش میزان نشست بیشتر از تأثیر وزن سازه‌ها، که منجر به افزایش میزان نشست‌های سطحی می‌شود، بوده است. بیشترین کاهش نشست‌ها در موقعیت سازه سطحی رخ داده و همواره با افزایش تعداد

طبقات سازه سطحی، به دلیل افزایش سختی تیر معادل، نشست‌ها کاهش بیشتری یافته است.

□ در مدل‌سازی دوبعدی مقاطع متروی مادرید، بیشترین تأثیر سازه‌های سطحی بر کاهش میزان نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل در حالت وجود خاک دستی در لایه سطحی و همچنین تونل‌های با روبراه کم (نسبت C/D کمتر) مشاهده شده است. به عبارت دیگر، با بهبود مشخصات ژئوتکنیک خاک پیرامون و بالای تونل و همچنین افزایش عمق تونل، از تأثیر سازه‌های سطحی کاسته می‌شود.

□ بر اساس نتایج حاصل، زاویه اصطکاک داخلی خاک در الگوی نشست‌های ناشی از حفاری تونل در مجاورت سازه‌های سطحی نقش قابل توجهی داشته و در مقایسه با مدول الاستیسیته و چسبندگی تأثیر بیشتری بر نتایج داشته است. در خاک رس پلاستیک، که چسبندگی و زاویه اصطکاک کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارد، افزایش تعداد طبقات سازه سطحی تأثیر چندانی بر میزان کاهش بیشینه نشست سطحی در موقعیت سازه نگذاشته است. حال آنکه در خاک ماسه آهکی، که چسبندگی آن با خاک رس پلاستیک برابر اما زاویه اصطکاک آن ۱۰ درجه از خاک رس پلاستیک بیشتر است، نشست‌ها کاملاً تحت تأثیر مشخصات سازه سطحی بوده است. برای مثال، افزایش تعداد طبقات سازه سطحی از ۳ به ۱۰، بیشینه نشست سطحی ناشی

از حفاری تونل را در خاک ماسه آهکی ۷۶٪ کاهش داده است. در صورتی که با افزایش تعداد طبقات سازه سطحی از ۳ به ۱۰ در خاک رس پلاستیک، نشست‌ها کمتر از ۷٪ کاهش پیدا کرده است.

□ پارامتر نسبت روباره به عمق محور تونل (C/D) در خاک ضعیف رس پلاستیک، تأثیر بیشتری بر نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل گذاشته‌است.

۶. مراجع

اکبری، ص.، زارع، ش. و میرزایی، ح. ۱۳۹۴. "ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۴): ۵۹-۷۸.

پنجی، م.، انصاری، ب. و عسگری مارنانی، ج. ۱۳۹۵. "تحلیل تنش تونل‌های سطحی در خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۱): ۱۷-۳۲.

حیدری، ر. و فهیمی‌فر، ا. ۱۳۹۷. "تأثیر وزن ناحیه شکسته بر توزیع تنش و جابجایی محیط اطراف تونل". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۴(۱): ۱۷-۲۶.

رضایی فرعی، ا. ح. ۱۳۹۳. "تأثیر سازه‌های سطحی، لایه‌بندی زمین و مشخصات هندسی تونل بر بارهای وارد بر پوشش تونل‌های کم عمق". رساله دکتری، دانشگاه تبریز.

- Franzius, J. N., Potts, D. M. and Burland, J. B. 2006. "The response of surface structures to tunnel construction". Proc. Inst. Civ. Eng.-Geotech. Eng., 159: 3-17.
- Giardina, G., DeJong, M. J. and Mair, R. J. 2015. "Interaction between surface structures and tunnelling in sand: Centrifuge and computational modeling". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 50: 465-478.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. 2008. "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control". Taylor & Francis Group, London, UK.
- Jenck, O., Dias, D. 2004. "3D-finite difference analysis of the interaction between concrete building and shallow tunnelling". Geotechnique, 54 (8): 519-528.
- Karakus, M. 2007. "Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 22: 47-56.
- Kastner, R., Standing, J. and Kjekstad, O. 2003. "Avoiding Damage Caused by Soil-structure Interaction: Lessons Learnt from Case Histories". Thomas Telford.
- Katebi, H., Rezaei, A. H., Hajjalilue-Bonab, M. and Tarifard, A. 2015. "Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM)". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 49: 67-78.
- Koungelis, D. K. and Augarde, C. E. 2008 "Comparative study of software tools on the effect of surface loads on tunnels: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground". Taylor & Francis Group, London, UK.
- Lambrughi, A., Medina Rodriguez, L. and Castellanza, R. 2012. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavation". Comp. Geotech., 40: 97-113.
- Mroueh, H., and Shahrour, I. 2002. "Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 26(3): 217-230.
- Mroueh, H., and Shahrour, I. 2003. "A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction". Comp. Geotech., 30(3): 245-253.
- Mirhabibi, A. and Soroush, A. 2013 "Effects of building three-dimensional modeling type on twin tunneling-induced ground settlement". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 38: 224-234.
- Panji, M. and Ansari, B. 2017. "Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM". Comp. Geotech., 81: 360-367.
- Panji, M. and Ansari, B. 2017. "Transient SH-wave scattering by the lined tunnels embedded in an elastic half-plane. Eng. Anal. Bound. Elem., 84: 220-230.
- Potts, D. M. and Zdravković, L. 1999. "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory". Vol. 1, Thomas Telford.

مطالعه عددی پارامتریک تأثیر وجود سازه سطحی بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل

Rebello, N., Sastry, V. R. and Shivashankar, R. 2014. "Study of surface displacements on tunnelling under buildings using 3DEC numerical modeling". *Int. Scholar. Res. Notices*, 2014: ID 828792, 13 p.