مقاله پژوهشی

فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست
دوره دوم، شماره ٦، تابستان ١٤٠٣ ، صفحات ٨١-٧٠
شاپا الکترونیکی: ٠٩٣٠-٢٩٨١

تحلیل زیست محیطی و عددی اثرات تغییرات تراز آب زیرزمینی بر پایداری جبهه حفاری در تونل‌سازی با روش TBM-EPB: تأثیرات قطر تونل و فشار وارد بر ماشین حفاری

محمدحسین احمدی عضو گروه عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران
امیر وکیلی* عضو گروه عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران
روزبه آقامجیدی عضو گروه عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه: امروزه روش‌های مختلفی جهت حفر تونل در محیط‌های شهری وجود دارد. عواملی چون سطح مقطع تونل، میزان پیشروی، میزان سرمایه مورد نیاز، مدت انجام پروژه و مهم‌تر از همه نوع خاک و سنگ و وضعیت آب زیرزمینی، نقش اساسی در انتخاب روش حفاری در محیط‌های شهری را دارند. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر بررسی عددی میزان تأثیر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی بر فشار وارد بر جبهه حفاری با تغییر قطر حفاری تونل‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه سه حالت کلی مورد بررسی قرار گرفته است در حالت اول فقط یک تونل اجرا گردیده و تونل‌ها در نزدیکی پاشنه شمع اجرا گردیده است. در حالت دوم دو تونل اجرا گردیده و موقعیت تونل‌ها در نزدیکی پاشنه شمع می‌باشد و در نهایت در حالت سوم هر دو تونل در نزدیکی وسط شمع اجرا گردیده است. به همین منظور در این مطالعه میزان تغییرات نشست در خاک ناشی از اجرای تونل‌های دوقلو در سه حالت ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج و بحث: نتایج تحقیق نشان داد که شدت افزایش بیشینه نشست به میزان قابل توجهی به قطر حفاری وابسته است. به گونه‌ای که در حفاری با قطر ۵ متر، بیشینه نشست حدود ۱۱ میلی‌متر است و این مقدار با افزایش ۹ درصدی به ۱۲ میلی‌متر در قطر حفاری ۷ متر می‌رسد. اگر تونل با قطر ۱۲ متر حفاری شود، بیشینه نشست نسبت به حالت حفاری با قطر ۵ متر، حدود ۴۴ درصد افزایش یافته و به ۱۶ میلی‌متر می‌رسد.

نتیجه‌گیری: در تمامی حالت‌های مدل‌سازی، با نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زمین، بیشینه نشست کاهش می‌یابد. در صورتی که تراز آب زیرزمینی در کف مدل باشد، افزایش قطر حفاری باعث تغییر محل بیشینه نشست در راستای عمق نخواهد شد و این نشست در تاج تونل باقی خواهد ماند. در نهایت، با افزایش قطر حفاری، نیاز به فشار بیشتر برای پایداری جبهه حفاری تونل نیز افزایش می‌یابد. نکته مهمی که در این پژوهش قابل مشاهده است، این است که نشست طولی در فاصله‌ای برابر با مجموع سربار و قطر تونل، از جبهه حفاری به کمتر از یک میلی‌متر می‌رسد و می‌توان نتیجه گرفت که طول ناحیه تحت تأثیر حفاری تونل به سطح تراز آب زیرزمینی و قطر حفاری وابسته نیست.

واژه‌های کلیدی: تغییرات تراز آب زیرزمینی، فشار جبهه حفاری، تغییر قطر حفاری، نرم‌افزار آباکوس، بررسی زیست‌محیطی

نویسنده مسئول: امیر وکیلی

نشانی: گروه عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران **تلفن:** ۰۹۱۷۷۰۳۹۲۳۲ **پست الکترونیکی:** amir.vakili@iau.ac.ir

استناد: احمدی محمدحسین، وکیلی امیر، آقامجیدی روزبه. تحلیل زیست محیطی و عددی اثرات تغییرات تراز آب زیرزمینی بر پایداری جبهه حفاری در تونل‌سازی با روش TBM-EPB: تأثیرات قطر تونل و فشار وارد بر ماشین حفاری. ۱۴۰۳؛ ۲(۶): ۸۱-۷۰.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه http://creativecommons.org/licenses/by/4.0 در فصلنامه پژوهش‌های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.

مقدمه

توجه به گسترش سریع مناطق شهری، ساخت تونل‌های زیرزمینی به امری ضروری تبدیل شده است که با چالش‌های قابل توجهی از لحاظ زمین‌شناسی، به‌ویژه در شهرهایی که بر روی بسترهای ناپایدار بنا شده‌اند، همراه است. در چنین محیط‌هایی، حفر تونل، چه با روش‌های سنتی و چه با تکنیک‌های مکانیزه تمام مقطع مانند دستگاه‌های حفاری تونل (TBM)، با مخاطرات زیادی روبرو است. پایداری جبهه تونل در طول عملیات حفاری اهمیت بسیاری دارد زیرا فشار نگهداری ناکافی می‌تواند منجر به ریزش جبهه تونل و نشست سطح زمین شود، در حالی‌که فشار بیش از حد ممکن است باعث بالازدگی سطح زمین گردد. یکی از پارامترهای اساسی در ساخت تونل‌های شهری با استفاده از دستگاه‌های TBM، روش تعادلی فشار زمین (EPB) است که با اعمال فشار متعادل، پایداری جبهه تونل را حفظ می‌کند. اعمال فشار نادرست، چه خیلی زیاد و چه خیلی کم، می‌تواند به ترتیب منجر به ریزش جبهه تونل یا بالازدگی زمین شود که نتیجه آن توقف در عملیات حفاری، نشست یا بالازدگی سطح زمین، آسیب به سازه‌های اطراف تونل و افزایش هزینه‌های پروژه است. در حفاری تونل با دستگاه TBM، نگهداری شعاعی و آب‌بندی توسط سپر یا غلاف و پوشش بتنی انجام می‌شود. با این‌حال، استفاده از چنین روش‌های مکانیکی در جبهه تونل عملاً غیرممکن است و باید از روش‌های نگهداری غیرمستقیم استفاده کرد. هدف اصلی در طول حفاری تونل، حفظ استحکام جبهه تونل است تا تغییر شکل‌ها به حداقل برسد. برای دستیابی به این هدف، فشار باید به گونه‌ای اعمال شود که پایداری جبهه تامین گردد. روش‌های مختلفی بر اساس مکانیزم‌های خرابی توسعه یافته‌اند که به صورت تجربی، تحلیلی و عددی تعیین فشار تعادلی را ممکن می‌سازند. از نظر تئوریک، روش‌های مختلف حفاری با ایجاد تعادل بین فشار خاک و فشار هیدرواستاتیک در جبهه تونل، از نشست خاک جلوگیری می‌کنند. نکته مهم در نگهداری جبهه حفاری، اعمال فشار صحیح به جبهه تونل است. مطالعات و تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است. لیو و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه مشابهی بر روی اندرکنش تونل‌های موازی در سیدنی انجام دادند و از مدل‌سازی عددی برای تحلیل نتایج استفاده کردند. حسینی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی جابجایی‌های زمین اطراف تونل‌ها ناشی از حفاری با دستگاه‌های EPB در خط ۳ متروی تهران پرداختند. نتایج نشان داد که بیشینه نشست سطحی در این بخش ۲/۵ سانتی‌متر بود که ۰/۵ سانتی‌متر بیشتر از حد مجاز بود. همچنین جابجایی‌های افقی در داخل توده خاک نیز مشاهده شد که با افزایش عمق، این جابجایی‌ها افزایش می‌یافت. رضایی و نورزاده (۱۳۹۳) به بررسی حداقل فشار جبهه حفاری در تونل‌های انتقال آب دز به قمرود با استفاده از روش‌های EPB و TBM پرداختند. نتایج نشان داد که به دلیل خصوصیات ضعیف ژئومکانیکی تونل، مقادیر جابجایی در بخش اول بیشتر بوده که نشان از انتخاب صحیح نوع دستگاه حفاری دارد. صادقی و سنایی (۱۳۹۴) به بررسی تعیین فشارهای تعادلی زمین در جبهه حفاری تونل پرداختند. نتایج نشان داد که فشار بیش از حد می‌تواند منجر به بالا آمدن سطح خاک یا از هم‌گسیختگی آن شود، در حالی که فشار کم موجب نشست خاک و لغزش جبهه می‌گردد. شلابی (۲۰۱۷) به بررسی اثرات نشست ناشی از حفاری تونل‌های دوقلو به روش TBM-EPB در شهر استانبول پرداخت. فانگ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی نشست زمین ناشی از اجرای تونل‌های موازی با فاصله محدود و چینش‌های هندسی مختلف در روش حفاری NATM پرداختند. این مطالعه نشان داد که نحوه چینش تونل‌ها نسبت به یکدیگر و فاصله آن‌ها، بر روی نشست حداکثری زمین، کاهش حجم خاک و پروفیل نشست عرضی سطح زمین تأثیرگذار است. چهاد و شهرور (۲۰۰۸) به بررسی اندرکنش تونل‌های دوقلو و تأثیر جانمایی نسبی و فرآیند اجرای این تونل‌ها پرداختند و نتایج نشان داد که فرآیند اجرای تونل‌ها تأثیر چشم‌گیری بر نشست زمین دارد. چانابساوراج و ویسوانات (۲۰۱۳) در مدل‌سازی عددی به بررسی تأثیر جانمایی نسبی تونل‌های دوقلو پرداختند و نشان دادند که اجرای تونل‌ها به صورت عمودی بیشترین نشست سطحی زمین را به همراه دارد. الانوار و البتال (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر زاویه و فاصله اجرای تونل جدید بر تونل موجود پرداختند و نشان دادند که در صورتی که تونل‌ها تحت زاویه کمتر از ۳۰ درجه نسبت به یکدیگر و با فاصله بیشتر از ۲ قطر اجرا شوند، تأثیر قابل توجهی بر تغییر شکل شعاعی تونل موجود نخواهند داشت. بایومی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اندرکنش تونل‌های دوقلو در خاک بیروت با مدل‌سازی عددی غیرخطی پرداختند و نشان دادند که فاصله بین تونل‌ها تأثیر قابل توجهی بر ممان خمشی پوشش بتنی و نشست سطح زمین دارد، به ویژه زمانی که تونل‌ها به صورت عمودی اجرا می‌شوند. ژو و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی رفتار شکست تونل‌های مترو تحت فشار آب موضعی پرداختند و نشان دادند که فاصله ایمن بین منبع آب و تونل‌ها و درجه تأثیر آب‌شستگی بر روی تونل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. سان ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی نشست القایی زمین ناشی از حفاری در مجاورت مناطق با تراز آب بالا پرداختند و نشان دادند که فشار آب حفره‌ای تأثیر زیادی بر پایداری جبهه

حفاری تونل دارد. با توجه به بررسی ادبیات پژوهش، مشخص شد که تاکنون تحقیق مستقلی در مورد تاثیر تراز آب زیرزمینی و اثرات اندرکنش تونل‌ها بر یکدیگر انجام نشده است. بنابراین در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن اثرات تراز آب زیرزمینی و اندرکنش حفاری تونل‌های مجاور یکدیگر، میزان نشست که مهمترین پارامتر طراحی و پایداری تونل می‌باشد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

- ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

با توجه به اهمیت فزاینده توسعه پایدار و حفاظت از محیط‌زیست شهری، نمی‌توان اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های تونل‌سازی، به‌ویژه در شرایط زمین‌شناسی چالش‌برانگیز را نادیده گرفت. حفاری تونل‌های شهری، به‌ویژه در مناطقی با سطح آب زیرزمینی بالا و خاک‌های ناپایدار، چندین خطر زیست‌محیطی مانند آلودگی خاک، اختلال در سیستم‌های آب زیرزمینی و آسیب به سازه‌های سطحی را به‌دنبال دارد. این اثرات نیازمند ارزیابی‌های دقیق اثرات زیست‌محیطی (EIA) و اجرای راهبردهای کاهش هستند. یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی در تونل‌سازی شهری، امکان اختلال در سیستم‌های آب زیرزمینی است. عملیات حفاری تونل می‌تواند الگوهای جریان آب زیرزمینی را تغییر داده و باعث تغییر در سطح آب و امکان آلودگی آن شود. به عنوان مثال، در زمان حفر تونل در مناطقی با سطح آب زیرزمینی بالا، خطر کاهش سطح آب وجود دارد که می‌تواند بر دسترسی به منابع آب زیرزمینی برای استفاده شهری تأثیر بگذارد. علاوه بر این، استفاده از مواد شیمیایی یا روان‌کننده‌ها در عملیات TBM می‌تواند در صورت مدیریت نادرست، به آلودگی آب زیرزمینی منجر شود. نشست سطحی زمین، که به عنوان یکی از پیامدهای رایج حفاری تونل شناخته می‌شود، خطرات قابل توجهی برای زیرساخت‌های شهری به همراه دارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فشار ناکافی یا بیش‌ازحد در جبهه تونل در طول حفاری می‌تواند منجر به نشست یا بالازدگی زمین شود که به نوبه خود می‌تواند به سازه‌های سطحی مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها و تأسیسات زیربنایی آسیب برساند. در مناطق شهری پرجمعیت، حتی حرکات جزئی زمین نیز می‌تواند خسارت‌های بزرگی به همراه داشته باشد که منجر به تعمیرات هزینه‌بر و تعهدات قانونی احتمالی می‌شود. بنابراین، باید سیستم‌های پایش محیطی برای شناسایی علائم اولیه نشست ایجاد شود تا امکان مداخله به موقع فراهم گردد. با توجه به اهمیت فزاینده توسعه پایدار و حفاظت از محیط‌زیست شهری، نمی‌توان اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های تونل‌سازی، به‌ویژه در شرایط زمین‌شناسی چالش‌برانگیز را نادیده گرفت. حفاری تونل‌های شهری، به‌ویژه در مناطقی با سطح آب زیرزمینی بالا و خاک‌های ناپایدار، چندین خطر زیست‌محیطی مانند آلودگی خاک، اختلال در سیستم‌های آب زیرزمینی و آسیب به سازه‌های سطحی را به دنبال دارد. این اثرات نیازمند ارزیابی‌های دقیق اثرات زیست‌محیطی (EIA) و اجرای راهبردهای کاهش هستند.

جدول ۱- ارزیابی اثرات زیست‌محیطی حفاری تونل‌های شهری

نوع اثر زیست‌محیطی	توضیحات	میزان اهمیت
تأثیر بر سیستم‌های آب زیرزمینی	تغییر الگوهای جریان آب زیرزمینی، کاهش سطح آب و احتمال آلودگی آب زیرزمینی	بسیار بالا
نشست سطح زمین	خطر نشست یا بالازدگی زمین که می‌تواند به سازه‌های سطحی آسیب برساند	بالا
آلودگی خاک	تولید پسماند حفاری و خطر نشت مواد شیمیایی به خاک	متوسط
تأثیرات صوتی و لرزش	نویز و لرزش‌های ناشی از عملیات حفاری که ممکن است به ساکنین و سازه‌های مجاور آسیب برساند	متوسط
آلودگی هوا	انتشار گرد و غبار و ذرات معلق در هوا که کیفیت هوا را کاهش می‌دهد	پایین

جدول ۲- اقدامات کاهش‌دهنده اثرات زیست‌محیطی در حفاری تونل‌های شهری

نوع اثر زیست‌محیطی	اقدامات کاهش‌دهنده	اثر پیش‌بینی‌شده
تأثیر بر سیستم‌های آب زیرزمینی	استفاده از سیستم‌های آب‌بندی پیشرفته و مانیتورینگ مستمر سطح آب زیرزمینی	کاهش خطر کاهش سطح آب
نشست سطح زمین	پایش مستمر نشست زمین و تنظیم دقیق فشار جبهه تونل	کاهش خطر نشست و بالازدگی
آلودگی خاک	مدیریت صحیح پسماند حفاری و استفاده از مواد غیرمضر در عملیات TBM	کاهش خطر آلودگی خاک

نوع اثر زیست‌محیطی	اقدامات کاهش‌دهنده	اثر پیش‌بینی‌شده
تأثیرات صوتی و لرزش	استفاده از تجهیزات کاهنده نویز و لرزش، و زمان‌بندی عملیات در ساعات کم‌ترافیک	کاهش نویز و لرزش
آلودگی هوا	استفاده از سیستم‌های مهار گرد و غبار و نظارت بر کیفیت هوا در اطراف محل حفاری	کاهش آلودگی هوا

جداول ۱ و ۲ نشان‌دهنده اهمیت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و اعمال اقدامات پیشگیرانه برای کاهش این اثرات در طول عملیات حفاری تونل‌های شهری هستند. با استفاده از این رویکرد، می‌توان آسیب‌های زیست‌محیطی را به حداقل رساند و به توسعه پایدار شهری کمک کرد.

- روش‌های حفاری تونل های زیر زمینی

برای انجام حفاری در روی کله حفار به یک سری ابزار برش مورد نیاز می‌باشد که جنس و نوع این ابزارهای برشی متناسب با شرایط ژئوتکنیک زمین انتخاب می‌گردند. بعد از حفاری تونل نیاز به یک سیستم پوشش بتنی پیش‌ساخته دارد که لاینینگ تونل نامیده میشود. این قطعات به نام سگمنت در یک کارخانه مجزا با استفاده از قالب‌های مخصوص و فرآوری بخار با مقاومت بالا تا ۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تولید و جهت نصب به داخل تونل انتقال می‌یابند. بر این اساس پارامترهای پیشنهادی مطابق جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ - پارامترهای ژئوتکنیکی لایه خاک

پارامتر		لایه خاک
مدول الاستیسیته	Mpa	۴۵
ضریب پوآسن	-	۰/۳۲
وزن مخصوص خشک	$\frac{kg}{m^3}$	۲۰۰۰
زاویه اصطکاک	degree	۲۶
چسبندگی	$\frac{kg}{m^2}$	۲۳۰۰

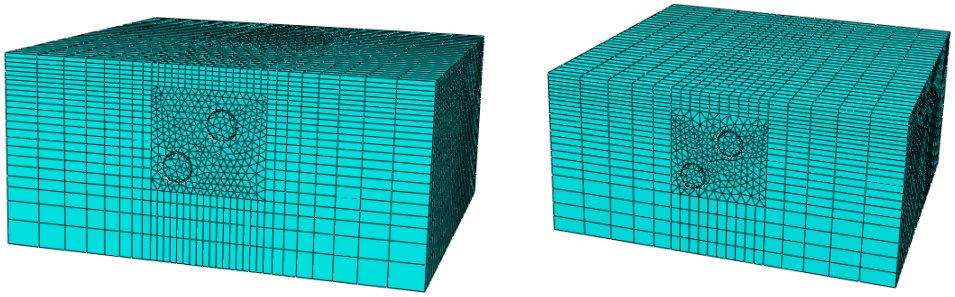
جدول ٤ - خصوصیات مصالح بتنی

پارامتر		پوشش بتنی
مدول الاستیسیته	Mpa	۳۳۰۰
ضریب پوآسن	-	۰/۲۱
وزن مخصوص	$\frac{kg}{m^3}$	۲۶۰۰

با توجه به نظریه هوک- براون در صورتی که اندازه ابعاد مدل تا ۴ برابر اندازه فضای زیرزمینی باشد اثر شرایط مرزی بر روی توزیع تنش‌ها و کرنش‌های اطراف فضای زیرزمینی قابل صرف‌نظر کردن است. از طرفی پانگ و همکاران (۲۰۰۵) مطالعه‌ای بر روی پارامترهای موثر بر مدل‌سازی عددی تونل انجام دادند. آن‌ها فاصله مرزهای جانبی و کف را بر اساس قطر حفاری و سربار مورد بررسی قرار داده‌اند.

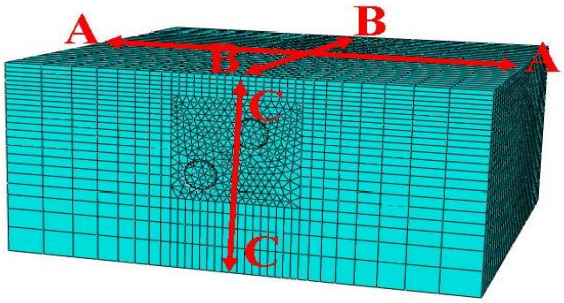
- مش بندی مدل

برای مدل‌سازی خاک در مدل از دو نوع المان استفاده شده است. در این مدل از المان‌های ۸ گرهی و نقاط انتگرالی کاهش یافته (C3D8R) و المان ۶ گرهی گوه‌ای (C3D6) استفاده شده است. تعداد مش‌های استفاده شده ۱۲۴۵ عدد می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- حالت‌های مختلف مش‌بندی آزمایشی جهت مدل‌سازی تونل‌ها

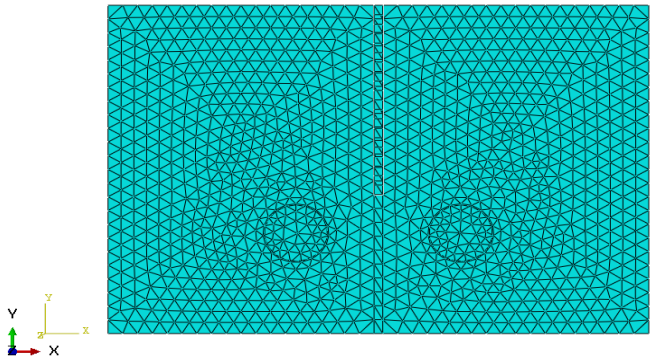
تغییرات نشست در طول عمق زمین نیز مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل ۲ مسیرهای پایش مشاهده می‌گردد. مسیرهای نشان داده در شکل ۲ نیز با توجه به این مسئله در نظر گرفته شده‌اند. ذکر این نکته لازمست که مسیر پایش C-C از مرکز مدل عبور می‌کند.



شکل ۲- مسیرهای پایش شده در مدل تحلیل شده

- صحت سنجی مدلسازی

به منظور بررسی و صحت‌سنجی مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس از مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط ان‌جی و همکاران (۲۰۱۳) استفاده گردید. در این مدل آزمایشگاهی تاثیر تونل‌های دوقلو اجرا شده بر شمع‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مدل بر روی ماسه خشک مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور در این مطالعه سه حالت کلی مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در حالت اول فقط یک تونل اجرا گردیده و تونل‌ها در نزدیکی پاشنه شمع اجرا گردیده است و در حالت دوم دو تونل اجرا گردیده و موقعیت تونل‌ها در نزدیکی پاشنه شمع می‌باشد و در نهایت در حالت سوم هر دو تونل در نزدیکی وسط شمع اجرا گردیده است. به همین منظور در این مطالعه میزان تغییرات نشست در خاک ناشی از اجرای تونل‌های دوقلو در سه حالت ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی صحت‌سنجی مدل مورد نظر به صورت دوبعدی و با استفاده از اطلاعات مقاله مورد نظر مدل‌سازی گردید. در شکل ۳ مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. براساس مقایسه مدل‌ها مشخص شد که بیشینه نشست در مدل فیزیکی و عددی در هر دو حالت مورد بررسی دارای اختلاف کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

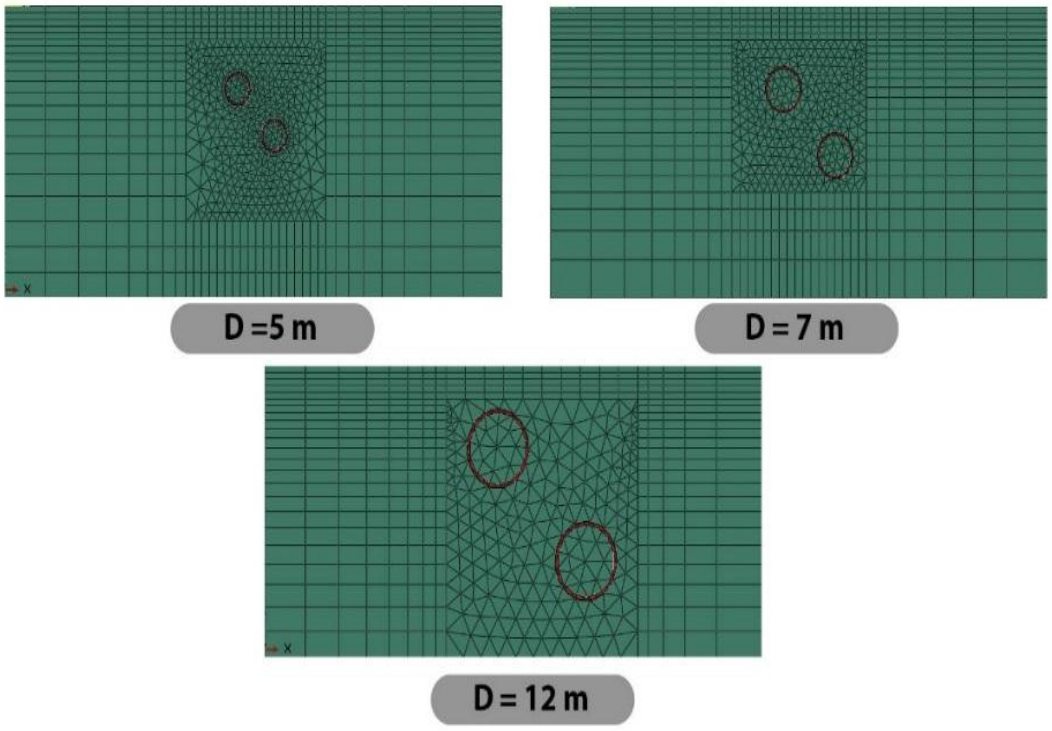


شکل ۳- مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس

نتایج و بحث

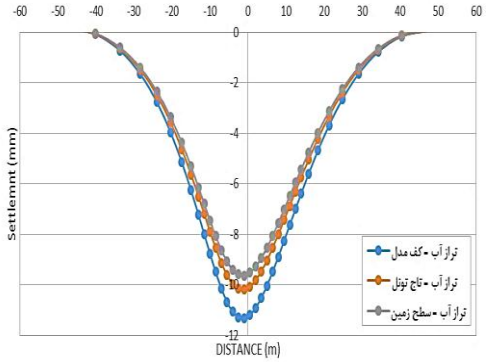
- اثر تغییر قطر حفاری تونل‌ها

منظور بررسی تاثیر تغییر قطر حفاری تونل‌ها، مساله به ازای ۳ قطر متفاوت ۵ متر، ۷ متر (مدل پایه) و ۱۲ متر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۴ مدل‌های مورد بررسی بر اساس میزان قطر حفاری تونل‌ها بر حسب پارامتر D نشان داده شده است.

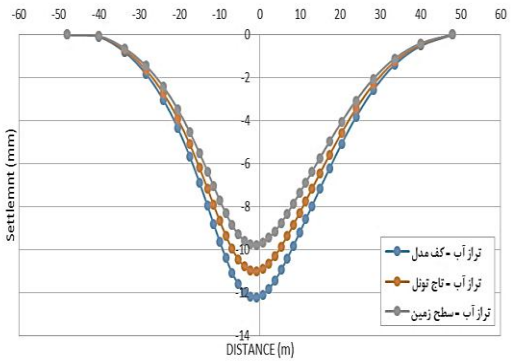


شکل ٤ - مدل‌های مورد بررسی بر اساس میزان قطر حفاری تونل‌ها بر حسب پارامتر D

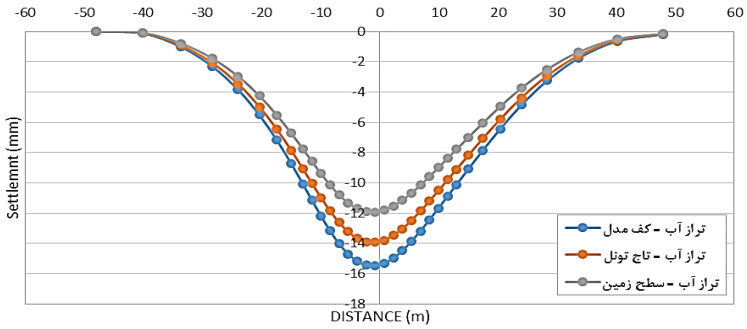
در شکل‌های ۵ الی ۷ منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم و به ازای قطرهای مختلف اجرای تونل‌ها در ترازهای مختلف آب زیرزمینی و در مسیر A-A نمایش داده شده است. با توجه به اشکال ۵ الی ۷ می‌توان بیان نمود که با افزایش قطر حفاری تونل‌ها بیشینه نشست افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زمین در تمامی حالت‌ها بیشینه نشست نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۵- منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم و به ازای قطرحفاری ۵ متر در ترازهای مختلف آب زیرزمینی و در مسیر A-A

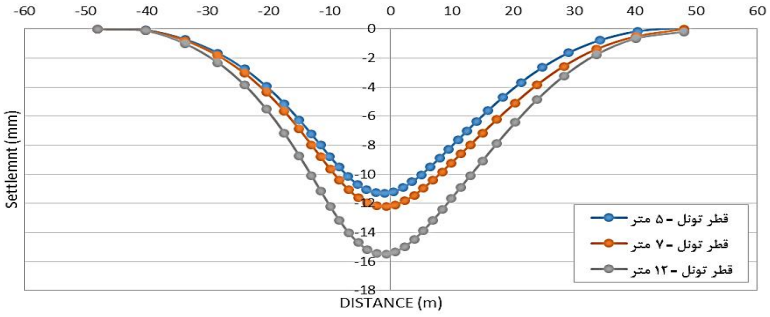


شکل ٦- منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم و به ازای قطرحفاری ۷ متر در ترازهای مختلف آب زیرزمینی و در مسیر A-A



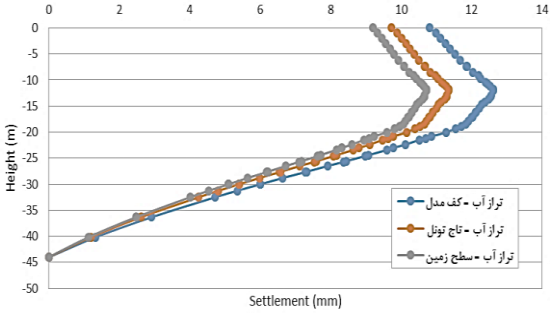
شکل ۷- منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم و به ازای قطرحفاری ۱۲ متر در ترازهای مختلف آب زیرزمینی و در مسیر A-A

در شکل ۸، منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم، برای قطرهای مختلف تونل و با فرض قرار داشتن تراز آب زیرزمینی در کف مدل، در مسیر A-A نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که با افزایش قطر حفاری، بیشینه نشست نیز افزایش می‌یابد. همچنین باید به این نکته توجه داشت که میزان افزایش بیشینه نشست به شدت تحت تأثیر قطر حفاری قرار دارد. به عنوان مثال، حفاری با قطر ۵ متر منجر به بیشینه نشستی حدود ۱۱ میلی‌متر می‌شود. با افزایش ۹ درصدی قطر حفاری به ۷ متر، این میزان به ۱۲ میلی‌متر می‌رسد. در حالی‌که اگر تونل با قطر ۱۲ متر حفاری شود، بیشینه نشست تقریباً ۴۴ درصد بیشتر از حالت حفاری با قطر ۵ متر خواهد بود و به ۱۶ میلی‌متر می‌رسد.

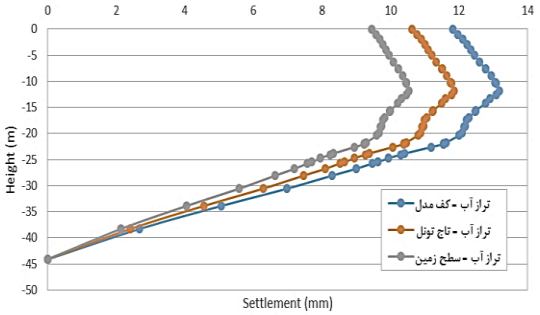


شکل ۸ – منحنی نشست عرضی در سطح زمین پس از حفاری تونل دوم و به ازای قطرهای مختلف اجرای تونل ها و در تراز آب زیرزمینی در کف مدل و در مسیر A-A

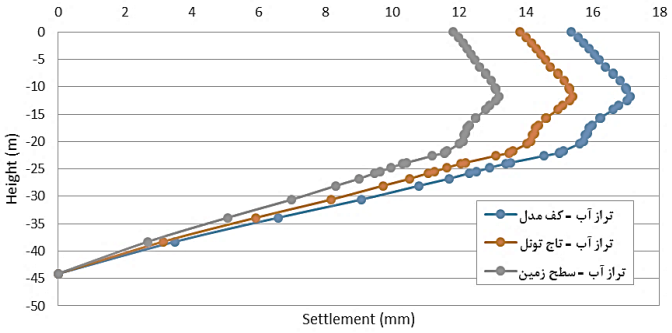
در شکل‌های ۹ تا ۱۱ تغییرات نشست مقطع محور تونل در عمق خاک پس از حفاری تونل دوم به ازای قطرهای مختلف اجرای تونل‌ها و در ترازهای مختلف آب زیرزمینی در مسیر C-C نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های ۹ الی ۱۱ می‌توان بیان نمود که در تمامی حالت‌های مورد بررسی نمودارها دارای رفتار یکسانی بوده و در تاج تونل بیشینه نشست در راستای عمق رخ می‌دهد. همچنین می‌توان بیان نمود که در تمامی حالت‌ها با نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زمین بیشینه نشست کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات نشست مقطع محور تونل در عمق خاک پس از حفاری تونل دوم به ازای قطر حفاری تونل‌ها برابر ۵ متر و در ترازهای مختلف آب زیر زمینی در مسیر C-C

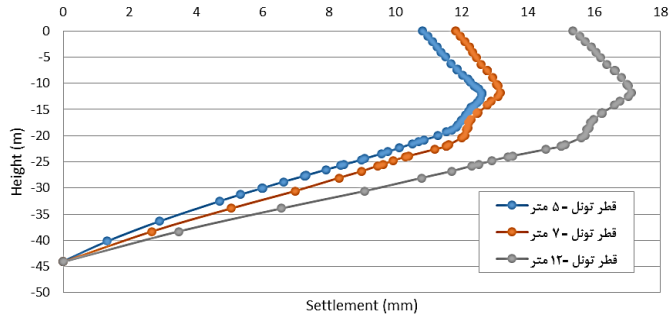


شکل ۱۰- تغییرات نشست مقطع محور تونل در عمق خاک پس از حفاری تونل دوم به ازای قطر حفاری تونل‌ها برابر ۷ متر و در ترازهای مختلف آب زیر زمینی در مسیر C-C



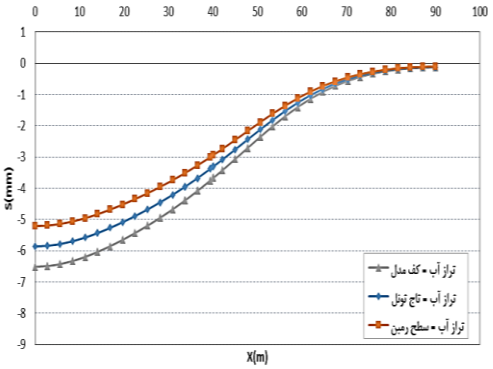
شکل ۱۱ - تغییرات نشست مقطع محور تونل در عمق خاک پس از حفاری تونل دوم به ازای قطر حفاری تونل ها برابر ۱۲ متر و در ترازهای مختلف آب زیر زمینی در مسیر C-C

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان بیان نمود، در صورتی که تراز آب زیرزمینی در کف مدل باشد، با افزایش قطر حفاری تونل‌ها محل بیشینه نشست در راستای عمق تغییری نداشته و در تاج تونل رخ می‌دهد. همچنین ذکر این نکته لازم است که با افزایش قطر حفاری تونل‌ها بیشینه نشست افزایش می‌یابد.

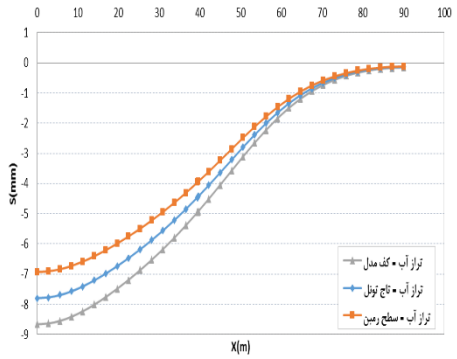


شکل ۱۲- تغییرات نشست مقطع محور تونل در عمق خاک پس از حفاری تونل دوم به ازای قطرهای مختلف اجرای تونل‌ها و در تراز آب زیر زمینی در کف مدل ، در مسیر C-C

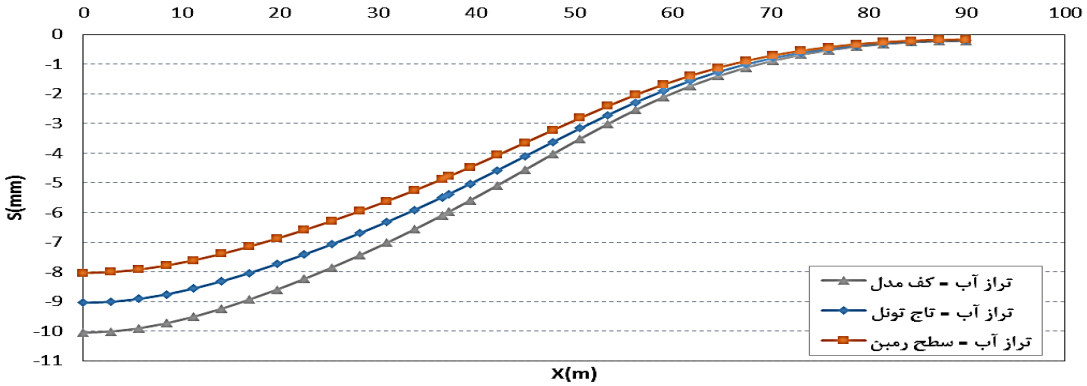
در با توجه به شکل های ۱۴ الی ۱۶ می‌توان بیان نمود که با قطر حفاری تونل‌ها بیشینه نشست افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار مورد نیاز برای پایداری جبهه حفاری تونل نیز افزایش می‌یابد. نکته مهمی که در این اشکال می‌توان مشاهده نمود این مسئله است که نشست طولی در فاصله‌ای به میزان مجموع سربار و قطر تونل از جبهه حفاری تونل به کمتر از یک میلی‌متر می‌رسد و می‌توان بیان نمود که در حفاری تونل‌ها، طول ناحیه‌ای که تحت تأثیر حفاری تونل قرار می‌گیرد به سطح تراز آب زیر زمینی و قطر حفاری تونل ها وابسته نمی‌باشد.



شکل ۱۳- نشست طولی به ازای قطر اجرای تونل‌ها برابر ۵ متر و ترازهای مختلف آب زیرزمینی در مسیر B-B

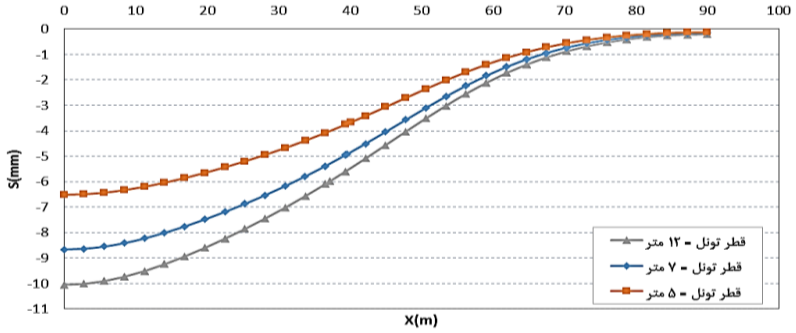


شکل ۱٤- نشست طولی به ازای قطر اجرای تونل‌ها برابر ۷ متر و ترازهای مختلف آب زیرزمینی در مسیر B-B



شکل ۱۵- نشست طولی به ازای قطر اجرای تونل‌ها برابر ۱۲ متر و ترازهای مختلف آب زیرزمینی در مسیر B-B

با توجه به شکل ۱۶ می‌توان بیان نمود، در حالتی که تراز آب زیرزمینی در کف مدل است، با افزایش قطر حفاری تونل‌ها، بیشینه نشست افزایش می‌یابد. به طوری که به ازای قطر تونل برابر ۵ متر در صورتی‌که جبهه حفاری تونل اول در وسط مدل باشد، بیشینه نشست برابر با ۶/۵ میلی‌متر بوده و به ازای قطر حفاری ۱۲ متر در حدود ۴۲ درصد افزایش یافته و به عدد ۱۰ میلی‌متر می‌رسد.



شکل ۱۶- نشست طولی به ازای قطرهای مختلف اجرای تونل‌ها تراز آب زیرزمینی در کف مدل

جدول ۵ نشان‌دهنده تغییرات بیشینه نشست به ازای قطرهای مختلف حفاری است. با افزایش قطر، بیشینه نشست به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

جدول ۵ - تغییرات بیشینه نشست بر اساس قطر حفاری

قطر حفاری (متر)	بیشینه نشست (میلی‌متر)	تغییرات (%)
۵	۱۱	-
۷	۱۲	۹
۱۲	۱۶	۴۴

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

توجه به گسترش سریع مناطق شهری، ساخت تونل‌های زیرزمینی به امری ضروری تبدیل شده است که با چالش‌های قابل توجهی از لحاظ زمین‌شناسی، به‌ویژه در شهرهایی که بر روی بسترهای ناپایدار بنا شده‌اند، همراه است. در چنین محیط‌هایی، حفر تونل، چه با روش‌های سنتی و چه با تکنیک‌های مکانیزه تمام مقطع مانند دستگاه‌های حفاری تونل (TBM)، با مخاطرات زیادی روبه‌رو است. پایداری جبهه تونل در طول عملیات حفاری اهمیت بسیاری دارد. زیرا فشار نگهداری ناکافی می‌تواند منجر به ریزش جبهه تونل و نشست سطح زمین شود. در حالی‌که فشار بیش از حد ممکن است باعث بالازدگی سطح زمین گردد. تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش قطر حفاری تونل‌ها، مقدار بیشینه نشست نیز افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زمین، منجر به کاهش بیشینه نشست در تمامی حالت‌ها می‌گردد. زمانی که تراز آب زیرزمینی در کف مدل قرار دارد، با افزایش قطر حفاری، بیشینه نشست افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که شدت افزایش بیشینه نشست به میزان قابل توجهی به قطر حفاری وابسته است. به گونه‌ای که در حفاری با قطر ۵ متر، بیشینه نشست حدود ۱۱ میلی‌متر است و این مقدار با افزایش ۹ درصدی به ۱۲ میلی‌متر در قطر حفاری ۷ متر می‌رسد. اگر تونل با قطر ۱۲ متر حفاری شود، بیشینه نشست نسبت به حالت حفاری با قطر ۵ متر، حدود ۴۴ درصد افزایش یافته و به ۱۶ میلی‌متر می‌رسد. در تمام حالت‌های مورد بررسی، نمودارها دارای رفتار مشابهی هستند و بیشینه نشست در تاج تونل در راستای عمق رخ می‌دهد. همچنین، می‌توان گفت که در تمامی حالت‌ها، با نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زمین، بیشینه نشست کاهش می‌یابد. در صورتی‌که تراز آب زیرزمینی در کف مدل باشد، افزایش قطر حفاری باعث تغییر محل بیشینه نشست در راستای عمق نخواهد شد و این نشست در تاج تونل باقی خواهد ماند. در نهایت، با افزایش قطر حفاری، نیاز به فشار بیشتر برای پایداری جبهه حفاری تونل نیز افزایش می‌یابد. نکته مهمی که در این پژوهش قابل مشاهده است، این است که نشست طولی در فاصله‌ای برابر با مجموع سربار و قطر تونل، از جبهه حفاری به کمتر از یک میلی‌متر می‌رسد و می‌توان نتیجه گرفت که طول ناحیه تحت تأثیر حفاری تونل به سطح تراز آب زیرزمینی و قطر حفاری وابسته نیست.

References

1. Abo-Alanwar MM, Elbatal SA. Influence of Alignment and Spacing of Constructing a New Circular Tunnel on an Existing One. *IJETT*. 2021;42.
2. Bayoumi A, Abdallah M, Hage Chehade F. Non-Linear Numerical Modeling of the Interaction of Twin Tunnels-Structure. World Academy of Science. 2021.
3. Channabasavaraj W, Visvanath B. Influence of Relative Position of the Tunnels: A Numerical Study on Twin Tunnels. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2013.
4. Hage Chehade F, Shahrour I. Numerical Analysis of the Interaction Between Twin Tunnels: Influence of the Relative Position and Construction Procedure. *unn. Undergr. Space Technol*. 2008; 23:210-214.
5. Hosseini S, Shahryar K, Monjazi M. Prediction of Ground Displacements Around Tunnels Due to EPB Machine Excavation (Case Study: Line 3 of Tehran Metro). *J. Eng. Geol*. 2019;5(2):1250-1235.
6. Negro A, Queiroz BIP. Prediction and Performance of Soft Ground Tunnels. In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Tokyo, Japan: Balkema; 2013. p. 409–418.
7. Pang CH, Yong KY, Dasari GR. Some Considerations in Finite Element Analysis of Tunneling. In Proceedings of Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future. London: Taylor & Francis Group; 2005. p. 1149-1154.
8. Qian F, Tai Q, Zhang D, Wong LNY. Ground Surface Settlements Due to Construction of Closely-Spaced Twin Tunnels with Different Geometric Arrangements. *Tunn. Undergr. Space Technol*. 2016; 51:144-151.
9. Rezai N, Nourzadeh A. Calculation of Minimum Pressure in Tunnel Excavation Using EPB and TBM Methods (Case Study: Dez Water Transfer Tunnel to Qomrud). Proceedings of the Third Congress and Exhibition of Dams and Tunnels in Iran, Tehran. 2014.
10. Shalabi FI. Interaction of Twin Circular Shallow Tunnels in Soils, Parametric Study. Open Journal of Civil Engineering. 2017; 7:100-115.
11. Sun Z, Zhang D, Li A, Lu S, Tai Q, Chu Z. Model Test and Numerical Analysis for the Face Failure Mechanism of Large Cross-Section Tunnels Under Different Ground Conditions. Tunnelling and Underground Space Technology. 2022; 130:104735.
12. Zhu S, Que X, Zhu Z, Han B. Improved Polygonal Constitutive Model for Columnar Jointed Basalt and Its Application in Tunnel Stability Analysis. *unn. Undergr. Space Technol*. 2023; 142:105449.

Research Article

Journal of New Researches in Environmental Engineering

Volume 2, Issue 6, summer 2024, Pages 70-81

ISSN (Online): 2981-0930

Environmental and Numerical Analysis of the Effects of Groundwater Level Changes on Face Stability in Tunnel Construction Using the TBM-EPB Method: The Impacts of Tunnel Diameter and Pressure on the Excavation Machine.

Mohamadhossein Ahmadi Member of civil department , Faculty of Enginnering, Beyza branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

Amir Vakili* Member of civil department , Faculty of Enginnering, Beyza branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

Roozbeh Aghamajidi Member of civil department, Faculty of Civil, Sepidan branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran

Received: 03 Aug 2024

Accepted: 19 Sep 2024

Keywords: changes in underground water level, drilling front pressure, drilling diameter change, Abaqus software

Extended Abstract

Introduction: Nowadays, there are various methods for digging tunnels in urban environments. Factors such as the cross-section of the tunnel, the amount of progress, the amount of capital required, the duration of the project, and most importantly the type of soil and rock and the condition of the underground water, play a fundamental role in choosing the drilling method in urban environments. Based on this, the aim of this research is to numerically investigate the effect of changes in the underground water level on the pressure on the excavation front by changing the diameter of the tunnels.

Materials and Methods: In this study, three general cases have been examined. In the first case, only one tunnel was executed and the tunnels were executed near the heel of the pile. In the second case, two tunnels were executed and the position of the tunnels is near the heel of the pile, and finally, in the third case, both tunnels were executed near the middle of the pile. For this purpose, in this study, the changes in soil settlement due to the implementation of twin tunnels in the three mentioned cases has been investigated.

Results and Discussion: The results of the research showed that the intensity of the maximum settlement increase is significantly dependent on the drilling diameter; In a drilling with a diameter of 5 meters, the maximum settlement is about 11 mm, and this value reaches 12 mm with an increase of 9% in a drilling diameter of 7 meters. If the tunnel is dug with a diameter of 12 meters, the maximum settlement increases by 44% and reaches 16 mm compared to the case of digging with a diameter of 5 meters.

Conclusion: In all modeling modes, as the groundwater level approaches the ground surface, the maximum settlement decreases. If the underground water level is at the bottom of the model, increasing the drilling diameter will not change the location of the maximum settlement along the depth, and this settlement will remain at the crown of the tunnel. Finally, with the increase of the drilling diameter, the need for more pressure for the stability of the tunnel excavation front also increases. An important point that can be seen in this research is that the longitudinal settlement at a distance equal to the sum of the overhead and the diameter of the tunnel reaches less than one millimeter from the excavation front, and it can be concluded that the length of the area affected by the tunnel excavation reaches the level of the underground water level. And the drilling diameter is not dependent.

Corresponding author: Amir Vakili

Address: Member of civil department , Faculty of Enginnering, Beyza branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran.

Tel: +989177039232 **Email:** amir.vakili@iau.ac.ir

Citation: Ahmadi M, Vakili A, Aghamajidi R. Environmental and Numerical Analysis of the Effects of Groundwater Level Changes on Face Stability in Tunnel Construction Using the TBM-EPB Method: The Impacts of Tunnel Diameter and Pressure on the Excavation Machine.Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2024; 2(6): 70-81.

© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.