

ارائه یک روش به منظور کاهش نشست سطحی زمین و جلوگیری از گیر افتادن ماشین TBM-EPB - مطالعه موردی

پژوهشی

هادی فتاحی^{۱*}؛ حسین قائدی^۲؛ فرشاد ملک محمودی^۳

۱- دانشیار؛ دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، h.fattahi@arakut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، iron.azar1@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی؛ دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، malekmahmodi12@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

شماره صفحات: ۱۹ تا ۳۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2021.2188

چکیده

در سال‌های اخیر و همزمان با توسعه و گسترش شهرها، افزایش جمعیت و وسایل نقلیه، ساخت خطوط ریلی زیرزمینی با روش تونل‌سازی مکانیزه رو به افزایش است. یکی از مشکلات رایج حفاری مکانیزه EPB-TBM در مناطق ضعیف و ناپایدار، همگرایی تونل است که موجب بروز مشکلاتی از قبیل گیرکردن سپر ماشین EPB-TBM، نشست سطح زمین و آسیب دیدن ساختمان‌های اطراف تونل در محیط‌های شهری می‌شود. به دلیل عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای خاک منطقه، برآورد فشار سینه‌کار، فشار جک‌های تراست و گشتاور کله‌ی حفاری در کیلومترهای مختلف امری بسیار مهم برای جلوگیری از همگرایی بیش از حد تونل، گیر کردن سپر ماشین EPB-TBM و نشست سطح زمین است. به دلیل وجود عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای سنگ و خاک، در این مقاله میزان فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست، گشتاور کله حفاری و میزان نشست سطح زمین ناشی از حفاری در کیلومترهای مختلفی در پروژه ساخت مترو فرودگاه جدید استانبول در ترکیه با استفاده از نرم‌افزار عددی PLAXIS^{3D}2020 مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد در خیلی از مواقع به منظور جلوگیری از گیر افتادن سپر ماشین می‌توان فشار سینه‌کار توسط اپراتور را افزایش داد؛ همچنین علاوه بر فشار سینه‌کار می‌توان با اضافه کردن سیلندرها بین انتهای سپر و آخرین حلقه پوشش سگمنتی، باعث عبور ماشین حفاری از منطقه ریزشی شد. مطابق با نتایج بدست آمده در این مقاله، تنظیم فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست و گشتاور کله حفاری علاوه بر حل مشکل گیر افتادن سپر ماشین حفاری، سبب کاهش نشست سطح زمین و آسیب به سازه‌ها روی سطح زمین خواهد شد.

واژگان کلیدی

مدلسازی عددی

نشست سطح زمین

فشار سینه کار

نیروی جک‌های تراست

گشتاور کله حفاری

گیر افتادن EPB-TBM

۱- پیش‌گفتار

گشتاور کله حفاری از پارامترهای مهم در حفاری تونل در زمین‌های خاکی و آبرفتی با استفاده از ماشین حفاری EPB-TBM است.

به‌طور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک و زمین سست منجر به تغییر سیستم توزیع تنش‌ها و همگرایی تونل می‌شود. تعیین فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست و

حین حفاری مورد استفاده قرار گیرند (Hasanpour, et al., 2014). فرخ و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش همگرایی-همجواری، روش جدیدی را برای محاسبه فشار اعمال شده بر روی سپر *TBM* در مجاورت جبهه کار در تونل قمرود ارائه دادند. آن‌ها در این تحقیق تأکید کردند که وجود ساختارهای ضعیف در توده سنگ منجر به همگرایی بالا تونل می‌شود (Farrokh, et al., 2006). آتس و همکاران در سال ۲۰۱۴ با بررسی تعداد ۳۰ پروژه حفاری تونل با ماشین *TBM* در کشور ترکیه سعی در تخمین گشتاور، نیروی پیشران و سایر پارامترهای طراحی داشته‌اند و در نهایت با مقایسه مقادیر نیروی پیشران و گشتاور طراحی شده و واقعی به اهمیت مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل اشاره نمودند (Ates, et al., 2014). مایکل و جیکوپ در سال ۲۰۱۶ به نقش پارامترهای فشار جبهه کار و فشار دوغاب در *TBM*‌ها بر روی تغییر شکل زمین و گیر افتادن ماشین ناشی از تغییر شکل زمین پرداختند (Mooney, et al., 2016). منصور در سال ۱۹۹۶ اثرات فشار نگهداری جبهه کار، فشار تزریق و مشخصات خاک را بر نشست سطح زمین که منجر به همگرایی و گیر کردن ماشین می‌شود را توسط مدل‌سازی سه بعدی بررسی کردند (Mansour, 1996). ابوکریشا در سال ۱۹۹۸ مدل ارائه شده توسط منصور را برای بررسی اثر آب زیرزمینی بر تغییر شکل سطح زمین استفاده کرد. او تأثیر خصوصیات خاک و عمق حفاری بر تغییر شکل‌های زمین و سیستم نگهداری را با روش دوبعدی و اثر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر افزایش فشار منفذی را با روش سه بعدی مورد مطالعه قرار داد (Abu-Krishna, 1998). بجاری و حمیدی در سال ۲۰۱۸ از روش‌های نیمه تجربی و مدل‌های عددی برای ارزیابی عوامل تغییر شکل و جابه‌جایی بالای زمین‌های نرم در حفر تونل زاگرس استفاده کردند. آنها علاوه بر روش‌های فوق از روش‌های تحلیلی (همگرایی-همجواری) برای ارزیابی و شناسایی فشردگی زمین‌های نرم، جهت گیر کردن سپر ماشین حفاری استفاده کردند (Bejari & Hamidi, 2018). بناردوس و همکاران در سال ۲۰۰۴ با بررسی‌های خود نشان دادند که مشکل اصلی تونل‌زنی در زمین‌های مجاله‌شونده و لهیده تغییر شکل‌های زیاد سقف و دیواره تونل است که می‌تواند به گیر افتادن و متوقف شدن

زمانی که این پارامترها کمتر از حد مجاز باشد، از یک طرف باعث ریزش سینه کار شده و سبب همگرایی و گیر کردن ماشین *EPB-TBM* می‌شود و از طرف دیگر باعث افزایش هزینه‌های ناشی از آزادسازی سپر ماشین *EPB-TBM* خواهد شد که همین امر سبب پایین آمدن نرخ نفوذ و نرخ پیشروی شده که نهایتاً منجر به بالا رفتن زمان پایان پروژه خواهد شد (Fattahi, 2016; Fattahi & Babanouri, 2017). به علاوه در طراحی تونل‌ها در اعماق کم و در زمین‌هایی با شرایط نامناسب، عدم کنترل و نگهداری سینه کار منجر به نشست زیاد در سطح زمین و بدنبال آن خرابی ساختمان‌ها می‌شود (Fattahi, 2019; Fattahi & Moradi, 2017). تعیین دقیق میزان پارامترها برای جلوگیری از ناپایداری سینه کار و همگرایی تونل به فاکتورهای مختلف زمین‌شناسی از قبیل میزان چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بستگی دارد که با توجه به عدم قطعیت در این پارامترها، بدیهی است که مقادیر آن‌ها در کیلومترها و نقاط مختلف زمین متفاوت باشد. به همین منظور در این پژوهش سعی شده است تا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی، با ارائه یک روش حتی الامکان از گیر افتادن ماشین *EPB-TBM* درون تونل جلوگیری کرد. در سال‌های اخیر در زمینه تونل‌سازی در زمین‌های لهیده و گیر افتادن ماشین حفاری تحقیقاتی انجام شده است که در اینجا به برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. رامونی و آناگنوستو در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ با استفاده از نتایج حاصل از روش‌های عددی، علاوه بر اندرکنش بین سپر و زمین به مشکل گیر افتادن سپر ماشین در زمین‌های تحت فشار پرداختند (Ramoni & Anagnostou, 2008). حمیدی و همکاران در سال ۲۰۰۸، با استفاده از نرم‌افزار *FLAC2D*، حداکثر جابجایی شعاعی را در تعیین مشخصه جابه‌جایی زیاد زمین در تونل نوسود محاسبه کردند و برخی اقدامات پیشگیرانه را برای کاهش مشکلات تغییر شکل زیاد و گیر کردن سپر ماشین پیشنهاد دادند (Hamidi, et al., 2008). حسن‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که تحلیل‌های عددی می‌تواند به طور مؤثر برای پیش‌بینی بارهای روی سپر، نیروی رانش چک‌های تراست و گیر کردن سپر ماشین *TBM* در زمین‌شناسی نامطلوب و ریزشی در

۲- عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

یکی از پارامترهای مؤثر برای احداث سازه‌های زیرزمینی از جمله متروها، تخمین درست و دقیق پارامترهای ژئومکانیکی خاک است؛ زیرا عدم درک شناخت صحیح این پارامترها یکی از دلایل اصلی و عمده همگرایی و گیرکردن ماشین *TBM* است؛ اما متفاوت بودن مقادیر پارامترهای خاک، اعتماد به نتایج پیش‌بینی شده را کاهش می‌دهد. این موضوع ناشی از عدم قطعیت در خاک است به طوری که این پارامترها (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته) در دو نقطه مختلف مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. به همین منظور برای بررسی میزان فشار سینه‌کار، نیروهای جک‌های تراست و گشتاور کله حفاری در خاک‌های سست و ضعیف به منظور جلوگیری از همگرایی و گیر افتادن ماشین *TBM* با توجه به عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای خاک منطقه، متغیرهایی با توزیع تصادفی نرمال با مقدار میانگین (μ) و انحراف معیار (σ)، مطابق جدول ۱، برای پروژه ساخت مترو فرودگاه جدید استانبول در نظر گرفته شده است. این کار باعث می‌شود، در هر نقطه با توجه به شرایط خاک منطقه مقادیر مختلفی از فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست و گشتاور کله حفاری را در نظر بگیرد تا در مناطقی که خاک سست‌تر و ریزش‌تر است مقادیر فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست و گشتاور کله حفاری بالاتر رود تا از همگرایی و گیر افتادن ماشین *TBM* جلوگیری شود؛ همچنین در مناطقی که خاک منطقه از مقاومت بالاتری برخوردار باشد، بایستی مقادیر فشار سینه‌کار، نیروی جک‌های تراست و گشتاور کله حفاری کمتر شود تا عمر ابزارهای برشی بالاتر رود و عملیات سخت و هزینه‌بر هایدروپاریک کمتر شود.

جدول ۱- متغیرهای تصادفی پارامترهای خاک با توزیع

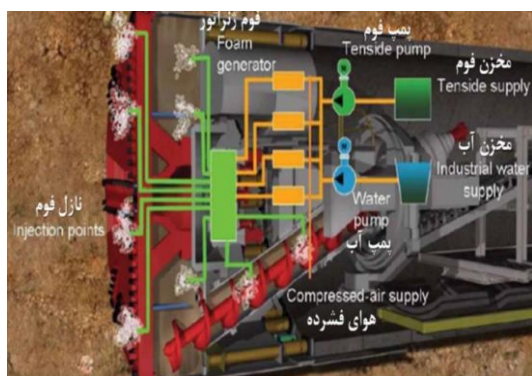
نرمال (Acun, et al., 2021)

پارامترها	واحد	میانگین	انحراف معیار
چسبندگی	MPa	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۰	۵
مدول الاستیسیته	MPa	۲۶/۹۱	۵/۳۸۲

TBM منجر شود. آنها برای غلبه بر این مشکل راه‌حل‌هایی پیشنهاد دادند (Benardos & Kaliampakos, 2004). جنول و همکاران در سال ۱۹۹۵ با استفاده از یک روش نیمه تجربی متمرکز بر عامل جابه‌جایی زیاد زمین با استفاده از تغییر شکل مورد انتظار توده‌سنگ اطراف تونل در یک میدان تنش هیدرواستاتیک استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل زیاد سبب همگرایی و گیر افتادن سپر ماشین شده و به همین منظور راه‌کارهایی را ارائه کردند (Goel, et al., 1995). شهریار و همکاران به ارزیابی ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی از جمله ویژگی‌های جابه‌جایی زیاد زمین برای انتخاب ماشین *TBM* ناشی از گیر افتادن سپر ماشین حفاری در شرایط بحرانی و سخت زمین‌شناسی پرداختند (Shahriar, et al., 2008). بیاتی و حمیدی در سال ۲۰۱۷ به تونل‌زنی *TBM* در مناطق گسله (تونل انتقال آب زاگرس) پرداختند که منجر به توقفات طولانی مدت ماشین *TBM* و گیر کردن سپر با عملکرد دوگانه ماشین می‌شوند. آنها از تکنیک‌های بهسازی و تزریق برای عبور دادن ماشین استفاده کردند و ماشین *TBM* با استفاده از این تکنیک بعد از ۸ ماه توقف، حفاری مجدداً آغاز شد (Bayati & Hamidi, 2017). گوئل در سال ۲۰۱۴ به تونل‌سازی در پروژه‌های مختلف برق آبی، جاده‌ها، متروها و راه‌آهن در هند (پروژه‌ها در هیمالیا) پرداخت. سپس تونل‌سازی در سنگ‌های ضعیف و شکننده با حضور آب زیرزمینی را به عنوان یک چالش به منظور همگرایی تونل در نظر گرفت و در هنگام تونل‌زنی با این مشکلات روبه‌رو شد به همین دلیل به راه‌کارهایی برای مقابله با این موضوع پرداخت (Goel, 2014).

در این مقاله، منطقه مورد مطالعه بخشی از پروژه ساخت مترو فرودگاه جدید استانبول است که در شمال غربی مرکز شهر به سمت ساحل دریای سیاه قرار دارد. در این مقاله سعی شده است با توجه به مبحث عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای زمین، یک راهکار جدید مبتنی بر اضافه کردن سیلندرها و فلنج‌های فولادی (قابل اجرا در ماشین‌ها) برای عبور دادن ماشین و جلوگیری از خرابی سگمنت‌ها از منطقه ریزشی ارائه شود و تأثیر آن در مدلسازی عددی مورد بررسی قرار گیرد.

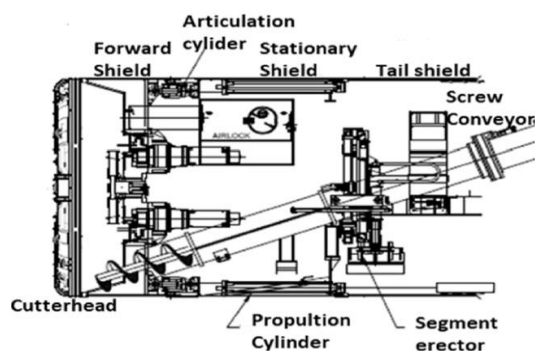
تأثیرگذارند. با میل به درشت‌دانه، به علت جداسازی ذرات و پلاستیسیته کم، خاک انتقال مواد حفاری شده سینه‌کار میسر نخواهد شد و در صورت کار در زیر سطح ایستایی آب بدلیل نفوذپذیری بالا حفاری با ماشین غیر ممکن می‌شود. در خاک‌های رسی، چسبندگی بالای خاک با وجود آب‌های زیرزمینی باعث توقفات طولانی مدت و گیرکردن ابزارآلات ماشین می‌شود (پدیده گل‌گرفتگی). کارپذیری مناسب برای ماشین حفاری EPB زمانی ایجاد می‌شود که خاک جمع شده در اتاقک فشار به یک ماده پلاستیسیته، همگن و خمیری تبدیل شود. در صورتی که خاک منطقه چنین ویژگی داشته باشد هم قابلیت اعمال فشار به سینه‌کار را دارد و هم قابلیت انتقال مصالح از طریق نقاله ماریپیچی شکل را دارند. در این حالت ماشین حفاری EPB بدون هیچ مشکلی خاک منطقه را حفاری می‌کند. در صورتی که خاک منطقه دانه‌درشت و چسبنده باشد از یکسری مواد افزودنی مانند پلیمر و فوم به خاک استفاده می‌شود که در حین حفاری به درون محفظه‌ی ماشین، ماریپیچ حلزونی و سینه‌کار تزریق می‌شوند تا بدین ترتیب علاوه بر مقابله با شرایط غیرایده‌آل، سرعت و راندمان حفاری نیز تا حدالامکان افزایش یابد و سبب افزایش عمر ابزارهای برشی و کاهش سایش و همچنین کاهش عملیات سخت و هزینه‌بر هایدروپاریک شود. در ادبیات تونلسازی مکانیزه به افزودن فوم و پلیمر به خاک جهت حفاری خاک منطقه توسط ماشین حفاری EPB عملیات، عمل آوری می‌گویند. شکل ۲، حفاری در شرایط نامناسب خاک و اجرای تمهیدات لازم (تزریق فوم) برای ماشین حفاری EPB را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایی شماتیک از تزریق فوم در ماشین EPB برای به‌عمل‌آوری خاک

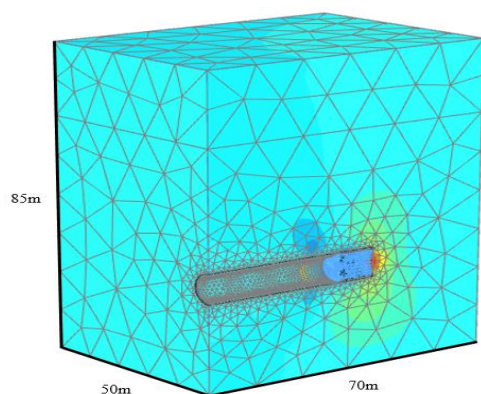
۳- مشخصات ماشین حفاری EPB-TBM مورد استفاده در پروژه

ماشین‌های EPB-TBM از لحاظ مکانیکی طوری طراحی شده است که از خود خاک حفاری شده به عنوان محیط نگهدارنده برای سینه‌کار حفاری استفاده می‌کند. مکانیزم حفاری این نوع ماشین به این صورت است که حفاری سینه‌کار توسط ابزارهای برشی انجام می‌گیرد و سپس خاک حفاری شده به درون اتاقک فشار (چمبر) که در پشت سر کاترهد قرار دارد، وارد می‌شود. با پر شدن محفظه اتاقک فشار، خاک به عنوان یک وسیله‌ای برای انتقال نیروی جک‌ها به سینه‌کار عمل کرده و باعث تعادل سینه کار حفاری می‌شود. تخلیه خاک حفاری شده در اتاقک فشار به وسیله نقاله ماریپیچی شکل انجام می‌شود. شکل ۱، شمایی از این ماشین و اجزای تشکیل دهنده آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سطح مقطع طولی EPB-TBM مورد استفاده در خاک

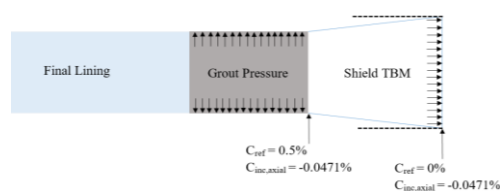
این ماشین‌ها علیرغم بهره‌گیری از یک تکنولوژی پیشرفته مکانیکی از توانایی لازم در حفاری تمامی محیط‌های خاکی برخوردار نیستند. بسته به آنکه محیط حفاری از نوع خاک درشت‌دانه یا ریزدانه باشد لزوم انجام عملیات اصلاحی غیرقابل اجتناب است. ایده‌آل‌ترین حالت خاک زمانی است که سینه‌کار حفاری ریزدانه (حداقل ۳۰ درصد خاک منطقه ریزدانه باشد) و غیرچسبنده باشد تا خاک جمع شده در اتاقک فشار قابلیت اعمال فشار و همچنین قابلیت انتقال را داشته باشد که در ادبیات حفاری مکانیزه، به ویژگی‌هایی همچون قابلیت اعمال فشار و انتقال خاک کارپذیری، مصالح گویند. این دو پارامتر به عنوان دو مشخصه اساسی در فرآیند حفاری ماشین‌های EPB بسیار



شکل ۳- ابعاد و هندسه مدل عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار *Plaxis^{3D2020}*

در این مقاله، روشی ساده برای شبیه‌سازی شکل مخروطی سپر با المان‌های پوسته‌ای در نرم‌افزار *Plaxis^{3D2020}* ارائه شده است. در این روش، از آنجا که طول سپر ۱۰/۸ متر است، سپر به شش قسمت ۱/۸ متر (گام حفاری) با مدول‌های الاستیک یکسان تقسیم می‌شود و قطر سپر با دور شدن از ابتدای سپر با گرادیان $0.462/0$ مطابق رابطه ۱ به اندازه ۰/۵ درصد در انتهای سپر کاهش می‌یابد. شکل ۴، نمایی از سپر مخروطی را نشان می‌دهد.

$$C_{inc, axial} = \frac{C_{ref}}{L_{shield}} \quad (1)$$



شکل ۴- نمایی از سپر مخروطی، فشار تزریق و پوشش بتنی جهت مدل‌سازی

در نتیجه، خاک اطراف انتهای سپر می‌تواند بیشتر از زمین اطراف ابتدای سپر به داخل تونل حرکت کند. علاوه بر آن انتهای سپر محل مناسبی برای نصب سنسورها جهت محاسبه فشار (فشار سنج) و جابجایی (کرنش‌سنج) سپر است. جدول ۳، پارامترهای مکانیکی سپر در مدل‌سازی در نرم‌افزار *Plaxis^{3D2020}* را نشان می‌دهد.

در این مقاله به دلیل وجود خاک سست و حفاری در زیر سطح ایستایی آب از ماشین حفاری *EPB-TBM* استفاده شده است. جدول ۲، مشخصات ماشین حفاری *EPB-TBM* از نوع سپر با عملکرد دوگانه برای مترو استانبول را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای طراحی ماشین *EPB-TBM* استانبول (Acun, et al., 2021)

پارامترها	واحد	مقدار
طول شیلد	m	۱۰/۸
قطر حفاری <i>TBM</i>	m	۶/۵۶
قطر شیلد	m	۶/۵۳
قطر دیسک‌ها	Inch	۱۷
تعداد دیسک‌ها	--	۴۰
تعداد اسکریپرها	--	۵۶

۴- مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار *Plaxis^{3D2020}*

۴-۱- هندسه، شرایط مرزی

برای ایجاد یک مدل عددی سه‌بعدی، ابعاد مدل عددی به اندازه‌ای انتخاب شده‌اند تا از تأثیر مرزها جلوگیری شود. نمایی از این مدل و ابعاد آن در شکل ۳، نشان داده شده است که از ۳۱۶۷۸ گره و ۱۸۷۷۸ المان تشکیل شده است. به منظور افزایش دقت و سرعت در محاسبات، چگالی مش‌بندی با دور شدن از اطراف تونل افزایش یافته است. تونل مذکور در زیر سطح ایستایی قرار دارد و تمامی محاسبات در شرایط آب زیرزمینی انجام شده است.

۴-۲- سپر مخروطی

با توجه به اینکه مترو در محیط خاکی، سست و آبرفتی حفاری می‌شود توجه به پایداری سقف و دیواره‌های تونل امری ضروری است. به همین منظور در بخش جلویی ماشین *EPB-TBM* که سگمنت‌گذاری انجام نمی‌شود برای نگهداری و جلوگیری از ریزش مصالح به درون ماشین که منجر به خرابی و توقفات طولانی مدت ماشین می‌شود از سپر استفاده می‌شود. در چند سال اخیر، شکل مخروطی سپر ماشین *EPB-TBM* به صورت یک سپر فرضی که در منابع (Do, et al., 2015; Mollon, et al., 2013) انجام شده، شبیه‌سازی و الهام گرفته شده است.

۴-۵- فشار سینه‌کار

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در همگرایی و گیر کردن ماشین *TBM* ناپایداری سینه‌کار حفاری است. به همین منظور برای جلوگیری از حرکت و ریزش سینه‌کار حفاری به داخل تونل می‌توان فشار سینه‌کار را توسط اپراتور افزایش داد اما از آنجا که مقادیر پارامترهای خاک منطقه دارای عدم قطعیت است و در هر بخش مشخصات خاک تغییر می‌کند، باید در کیلومترهای مختلف فشار سینه‌کار را متناسب با خاک منطقه تغییر داد. علاوه بر موارد فوق در صورتی که فشار سینه‌کار بیشتر از حد مجاز باشد سبب سایش بیشتر ابزارهای برشی و کاهش عمر آن‌ها می‌شود و کم بودن فشار جبهه‌کار سبب همگرایی، گیر افتادن ماشین *TBM*، توقفات طولانی مدت، افزایش نشست سطح زمین، آسیب دیدن ساختمان‌های اطراف مترو و کاهش نرخ نفوذ و پیشروی می‌شود که این مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی *Plaxis^{3D}2020* انجام شده است. شکل ۵، مدل‌سازی تونل مذکور با فشار سینه‌کار ۱۰۰ کیلوپاسکال با گرادیان ۱۴ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵، ماکزیمم جابجایی در فشار سینه‌کار ۱۰۰ کیلوپاسکال برابر ۱۲ سانتی‌متر بوده که در این حالت دایره موه‌ر در بالای خط شکست (پوش شکست) است و سبب ریزش سینه‌کار حفاری می‌شود؛ بنابراین در این حالت سینه‌کار ناپایدار بوده (شکم دادگی اتفاق افتاده) و بدلیل پایین بودن فشار سینه‌کار ماشین حفاری، سبب همگرایی تونل و گیر افتادن ماشین *EPB-TBM* شده است. به همین منظور برای حرکت ماشین حفاری و جلوگیری از گیر افتادن سپر ماشین *EPB-TBM*، فشار سینه‌کار به ۴۰۰ کیلوپاسکال افزایش پیدا می‌کند که در شکل ۶، نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۶، مشخص است با زیاد کردن فشار سینه‌کار از ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۴۰۰ کیلوپاسکال جابجایی سینه‌کار از ۱۲ سانتی‌متر به ۰/۶۵ سانتی‌متر کاهش پیدا کرده و به این ترتیب دیگر دایره موه‌ر زیر پوش شکست افتاده که نشان دهنده عدم ریزش سینه‌کار است. در این حالت ماشین *EPB-TBM* به راحتی و بدون گیر افتادن سپر، حفاری را انجام می‌دهد. همانطور که قبلاً گفته شد، به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای زمین، فشار سینه‌کار در

جدول ۳- پارامترهای مکانیکی سپر (Acun, et al., 2021)

پارامترها	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته	<i>GPa</i>	۲۰۰
ضریب پواسون	-	۰/۱
ضخامت سپر	<i>m</i>	۰/۱۷

۴-۳- پوشش سگمنتی

پوشش سگمنتی تونل از سگمنت‌های پیش‌ساخته با بتن پیش‌تنیده با طول ۱/۸ متر ساخته شده و در منطقه حفاری شده پشت سپر نصب می‌شود. هر رینگ دایره‌ای از این بتن‌ها نشان دهنده کیلومترهای حفاری شده توسط ماشین است. از آنجا که مترو در محیط آبرفتی و سست حفاری شده است، مطابق شکل ۴، ۲۵ متر حفاری (ناحیه گذار) و توسط پوشش سگمنتی نگهداری شده است. مشخصات ساختاری پوشش سگمنتی در مدل‌سازی در نرم‌افزار *Plaxis^{3D}2020* مطابق جدول ۴، است.

جدول ۴- پارامترهای سگمنت مترو استانبول ترکیه

(Acun, et al., 2021)

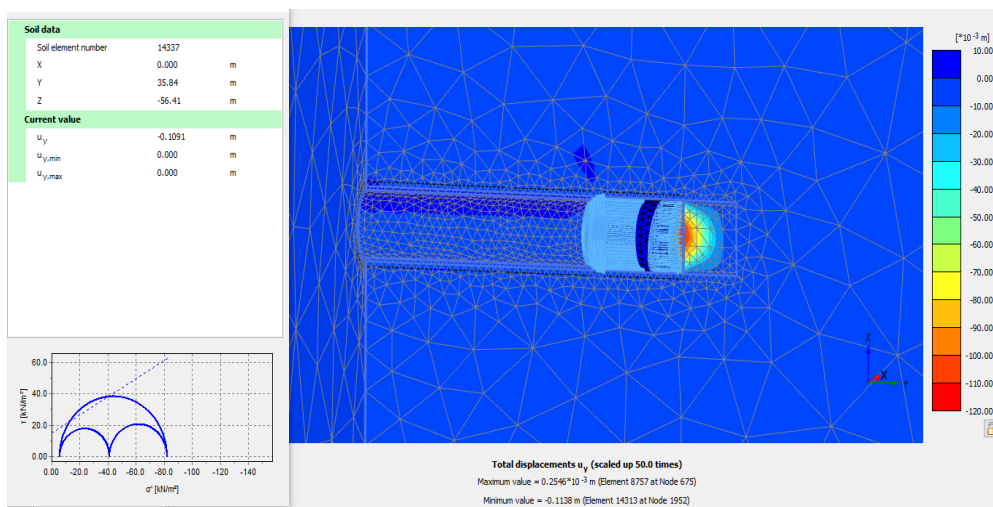
پارامترها	واحد	مقدار
مدول یانگ	<i>GPa</i>	۳۱
ضریب پواسون	<i>KN/m³</i>	۰/۱
دانسیته پوشش بتنی	<i>m</i>	۲۷
ضخامت سگمنت	<i>m</i>	۰/۳۵
طول رینگ پوشش	<i>m</i>	۱/۸

۴-۴- تزریق دوغاب

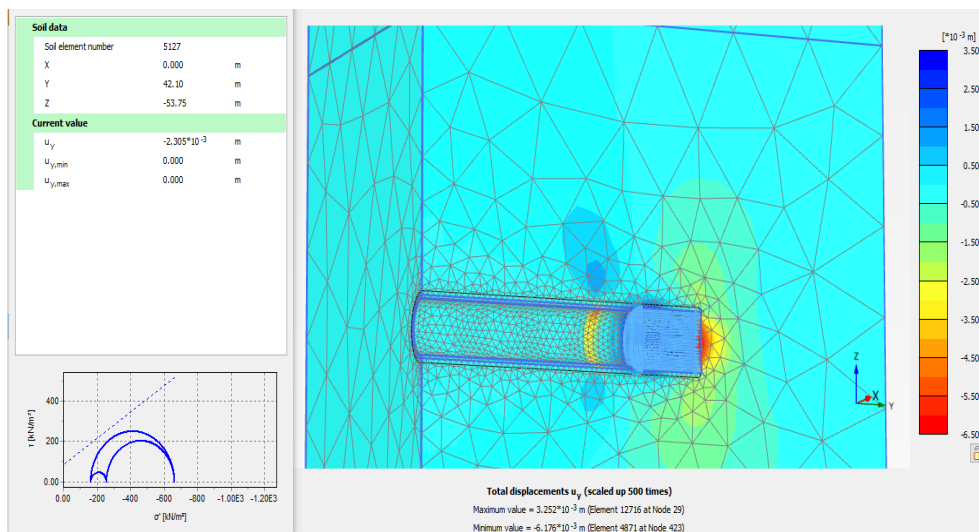
تزریق دوغاب در پشت آخرین حلقه سگمنت (محل نشینمن جک‌های تراست) با روش بسیار ساده‌ای با اعمال توزیع فشار مرزی در زمان تزریق در نرم‌افزار *Plaxis^{3D}2020* شبیه‌سازی شده است. در این مدل، میانگین فشار تزریق دوغاب برابر با ۱۰۰ کیلوپاسکال در سقف و توزیع فشار تزریق در کف به طور خطی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا تأثیر چگالی دوغاب نیز در نظر گرفته شود (گرادیان ۲۰ کیلوپاسکال). به علاوه، لایه بسیار نازکی بین پوشش و خاک با المان‌های زون ایجاد شد تا اندرکنش بین دوغاب - پوشش و دوغاب-خاک از آغاز تزریق دوغاب در نظر گرفته شود.

فشار سینه کارهای مختلف در شرایط بحرانی و ریزشی پروژه در حین تونل‌زنی برای ساخت مترو، فرودگاه جدید استانبول را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در شماره رینگ ۲۷۰۰ مطابق با شکل ۵ و شکل ۶، برای عبور ماشین حفاری از منطقه ریزشی به فشار سینه‌کار ۴۰۰ کیلوپاسکال نیاز است. در صورتی که با فشار سینه‌کار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال موجب گیر افتادن سپر ماشین حفاری و افزایش نشست سطح زمین خواهد شد.

کیلومترهای مختلف متفاوت است. از آنجا که روش‌های عددی قطعی (*Deterministic*) هستند و تنها یک مقدار برای یک پارامتر را قبول می‌کنند، باید در کیلومترهای مختلف مدل‌سازی انجام شود تا فشار سینه‌کار را در نقاط مختلف به دست آید. از آنجا که فشار سینه‌کار زیاد موجب سایش ابزارهای برشی و فشار سینه‌کار پایین، موجب گیر افتادن سپر ماشین می‌شود، محاسبه فشار سینه‌کار در هر سیکل حفاری با توجه به تغییرات خصوصیات زمین امری مهم و اجتناب ناپذیر است. به همین منظور مطابق شکل ۷،

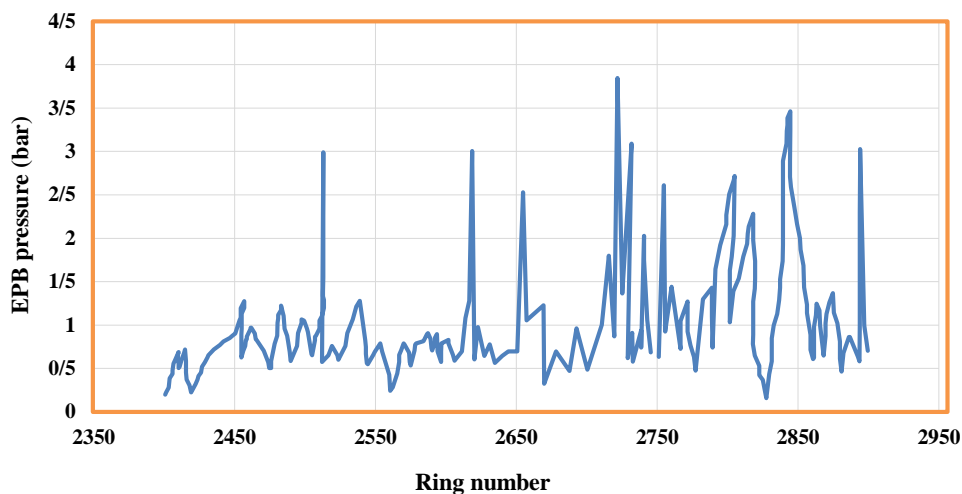


شکل ۵- مدل‌سازی تونل با فشار سینه‌کار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۶- مدل‌سازی تونل با فشار سینه‌کار ۴۰۰ کیلوپاسکال

ارائه یک روش به منظور کاهش نشست سطحی زمین و جلوگیری از ... هادی فتاحی و ...، ص ۱۹-۳۴

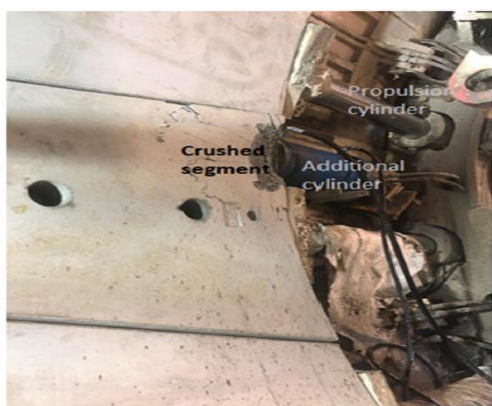


شکل ۷- نمودار فشار سینه کار توسط ماشین *EPB-TBM* در کیلومترهای مختلف

و آسیب دیدن سگمنت‌ها جلوگیری می‌شود.

۴-۶- جک‌های تراست

نیروی هیدرولیکی، بارهای خارجی هستند که بر آخرین رینگ نصب شده توسط جک‌های تراست برای هل دادن ماشین به سمت جلو اعمال می‌شود. نیروی پیشران توسط جک‌های تراست از جمله فاکتورهایی است که بر روی پایداری سینه‌کار تأثیر بسزایی دارد به طوری که نیروی رانش جک‌های تراست برای غلبه بر اصطکاک با خاک‌های اطراف در حین حفاری به طور پیوسته به طول سپر، ضریب اصطکاک سپر و سرعت پیشروی بستگی دارد (Ramoni & Anagnostou, 2011). همگرایی سریع زمین ممکن است، فشار زیادی روی سپر ماشین وارد کند که در این صورت نیروی رانش توسط جک‌های تراست برای غلبه بر اصطکاک سپر کافی نمی‌باشد و موجب مسدود شدن ماشین می‌شود؛ بنابراین هر چقدر نیروی جک‌های تراست بیشتر باشد، موجب آزاد شدن ماشین *EPB-TBM* از گیر افتادن سپر ماشین در تونل می‌شود. در شکل ۸، مشاهده می‌شود که با اضافه کردن سیلندرهایی بین انتهای سپر و آخرین حلقه پوشش سگمنتی، به منظور افزایش نیروهای جک‌های تراست برای عبور از منطقه ریزشی، به دلیل استفاده نکردن از فلنج‌های فولادی حلقه‌ها بخاطر اعمال نیروی بیش از حد در حال ترک خوردن هستند. در حالی که مطابق شکل ۹، برای اعمال یکنواخت بار سیلندرهای اضافی به حلقه‌های سگمنتی، هنگامی که از فلنج‌ها استفاده می‌شوند، از خرابی



شکل ۸- استفاده از سیلندرهای اضافی نصب فلنج‌های فولادی (Acun, et al., 2021)



شکل ۹- نحوه اضافه کردن سیلندرهای اضافی به منظور افزایش نیروی جک‌های تراست با استفاده از فلنج‌های فولادی (Acun, et al., 2021)

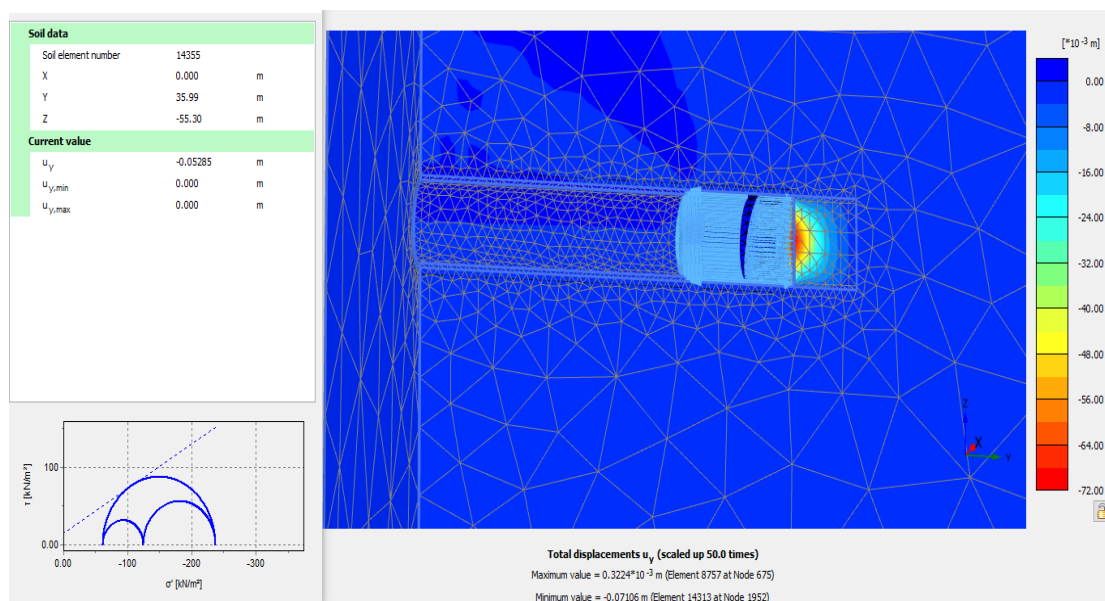
پیشران بهینه توسط جک‌های تراست در طول مسیر حفاری شده را نشان می‌دهد

۴-۷- گشتاور کله حفاری

یکی از فاکتورهای اساسی برای بررسی عملکرد ماشین، گشتاور کله حفاری است. گشتاور کله حفار وظیفه چرخاندن کله حفار برای برش زمین و انتقال مواد حفر شده به اتاقک حفاری را بر عهده دارد. همچنین گشتاور کله حفار رابطه مستقیمی با نیروی پیشران دارد و از جمله فاکتورهایی است که مقدار آن در حین حفاری مستقیماً توسط اپراتور ماشین تنظیم نمی‌شود؛ بلکه تابعی از فاکتورهای دیگر است. شکل ۱۳، متوسط گشتاور اندازه‌گیری شده را در کیلومترهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اینکه فشار زیاد جبهه‌کار سبب افزایش گشتاور کله‌حفاری و جلوگیری از گیر افتادن سپر ماشین حفاری می‌شود؛ بنابراین، مطابق شکل ۱۳، در کیلومترهایی که مقدار گشتاور کله حفاری بالاتر است نشان دهنده ریزشی بودن منطقه منطقه بوده و در صورتی که گشتاور کله حفاری از این مقدار کمتر باشد، سبب گیر افتادن کله حفاری می‌شود. همچنین در مناطقی که مقدار گشتاور کله حفاری پایین‌تر است، خاک منطقه از مقاومت بالاتری برخوردار است و زیاد کردن فشار سینه‌کار به منظور افزایش گشتاور کله حفاری سبب سایش ابزارهای برشی، توقفات پی‌درپی و بالا رفتن هزینه‌ها خواهد شد.

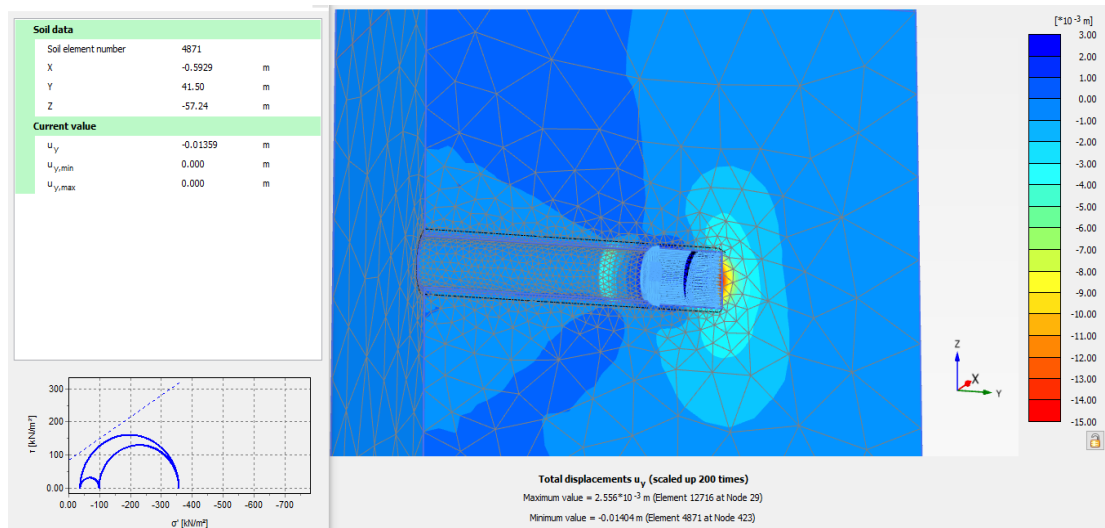
در این مقاله، نیروی جک‌های هیدرولیکی با اعمال توزیع نیروی افقی به گره‌های انتهایی رینگ تازه نصب شده شبیه‌سازی شده است. مطابق شکل ۱۰، نیروی جک‌ها برابر ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱۰، نشان داده شده است، ماکزیمم جابجایی در جلوی سینه‌کار برابر ۷/۲ سانتی‌متر است که موجب ریزش و حرکت خاک در جلوی سینه‌کار به درون تونل می‌شود و نیروی جک‌های تراست برای مقابله با فشار سینه‌کار و غلبه بر اصطکاک بین سپر و خاک اطراف کافی نبوده و منجر به جابجایی بالا و همگرایی تونل شده است. با توجه به این که دایره موهر بر خط شکست مماس شده و همگرایی تونل زیاد است موجب گیر افتادن سپر ماشین می‌شود و عملاً ماشین حفاری متوقف شده و هیچ‌گونه حفاری صورت نمی‌گیرد. به همین منظور براساس شکل ۱۱، نیروی جک‌ها تراست را از ۱۰۰۰۰ به ۲۵۰۰۰ کیلونیوتن افزایش یافته است تا تأثیر آن بر روی پایداری سینه‌کار مشخص شود.

همانطور که در شکل ۱۱، نشان داده شده است، با افزایش نیروی جک‌های تراست جابجایی جلوی سینه‌کار از ۷/۲ سانتی‌متر به ۱/۵ سانتی‌متر کاهش می‌یابد که در این حالت بر اصطکاک بین سپر و خاک اطراف غلبه کرده و سبب حرکت ماشین حفاری می‌شود. شکل ۱۲، متوسط نیروی

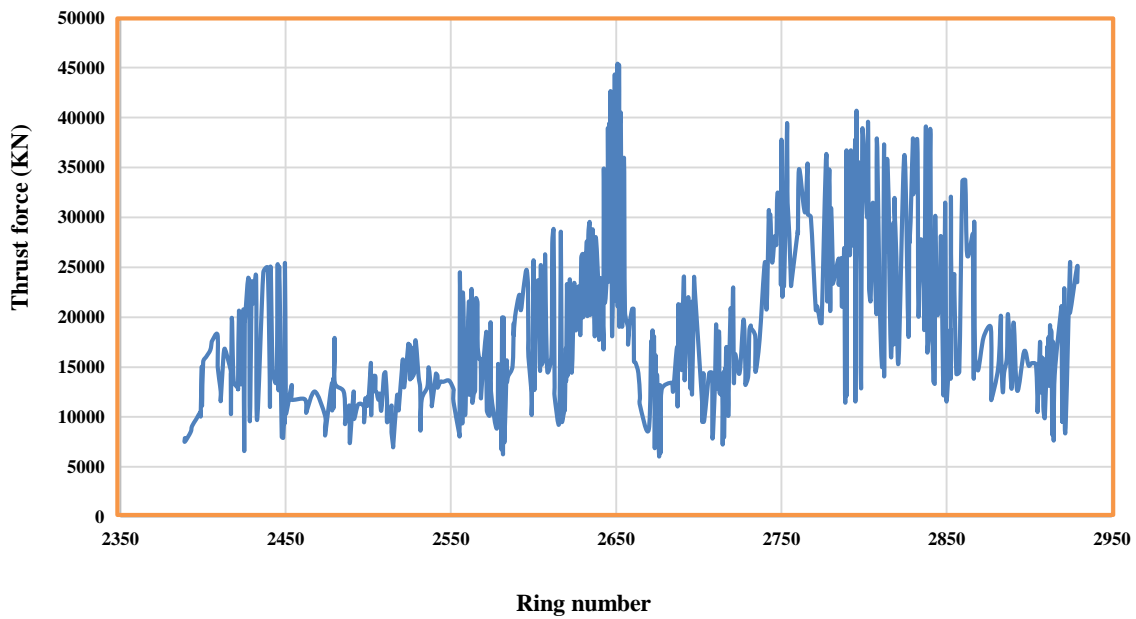


شکل ۱۰- مدل‌سازی تونل با نیروی جک‌های تراست ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن

ارائه یک روش به منظور کاهش نشست سطحی زمین و جلوگیری از ... هادی فتاحی و ...، ص ۱۹-۳۴



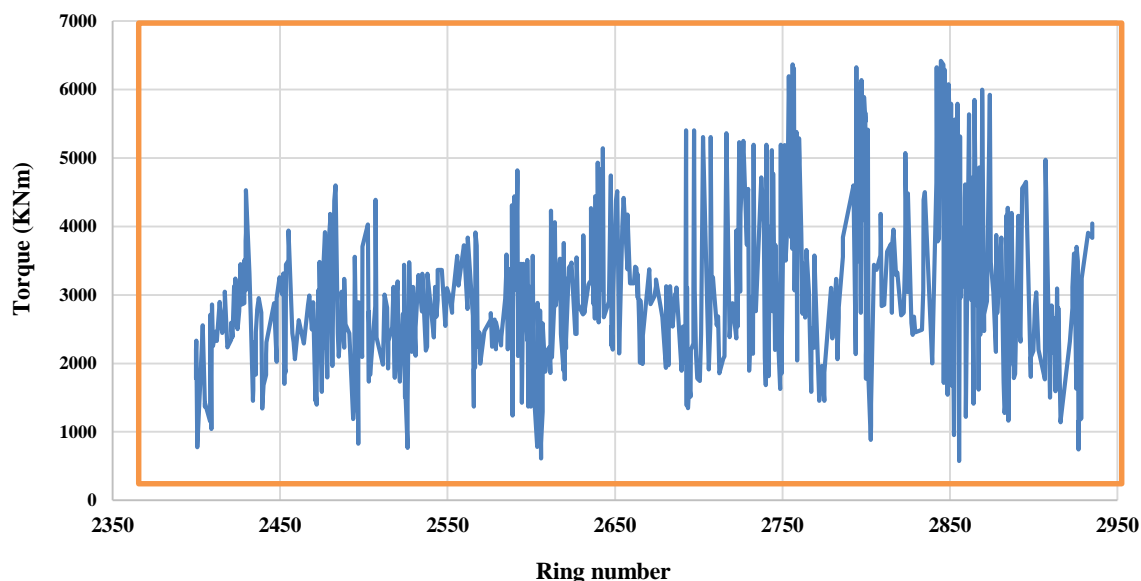
شکل ۱۱- مدل سازی تونل با نیروی جک های تراست ۲۵۰۰۰ کیلونیوتن (سیلندرهاى اضافى در اجرا)



شکل ۱۲- نمودار نیروی بهینه جک های تراست ماشین EPB-TBM در کیلومترهای مختلف

دلیل متفاوت بودن شرایط زمین شناسی در هر شماره رینگ متفاوت خواهد بود.

با توجه به شکل ۱۳، گشتاور کله حفاری همانند فشار سینه کار و جک های تراست در کیلومترهای مختلف به

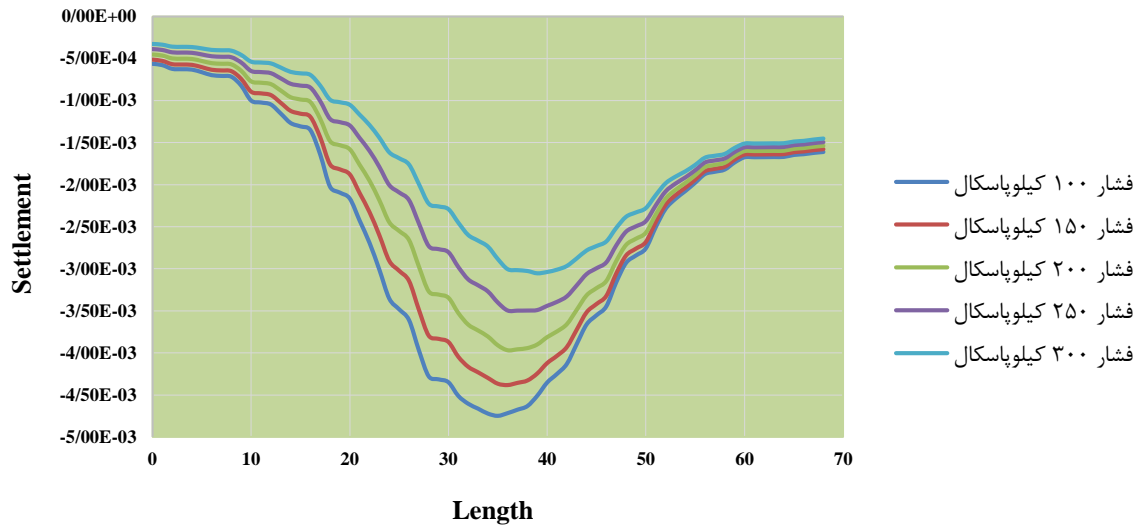


شکل ۱۳- نمودار گشتاور کله حفار ماشین EPB-TBM در کیلومترهای مختلف

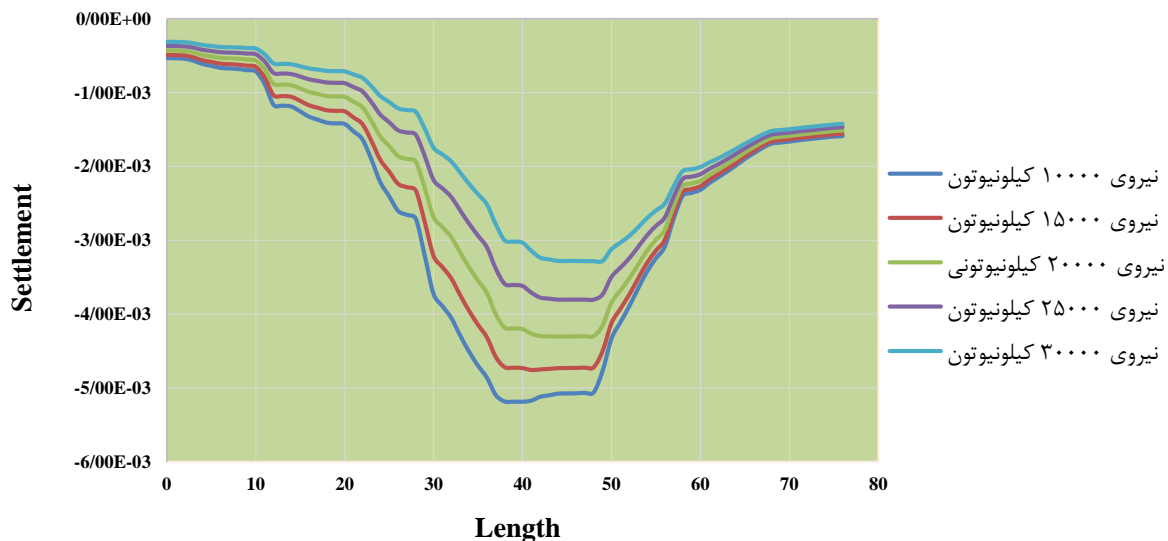
۵- آنالیز نشست سطح زمین

دلیل اصلی برای جابجایی‌های زمین در بالای تونل که نشست سطحی نامیده می‌شود، همگرایی زمین به داخل تونل بعد از حفاری است که حالت تنش‌های برجای زمین را تغییر می‌دهد و ناشی از آزادسازی تنش‌ها است (O'REILLY & New, 1982). در مناطق دارای سینه‌کار ریزشی، به دلیل جابجایی و حرکت سینه‌کار به درون تونل، نشست‌هایی روی سطح زمین اتفاق می‌افتد. رفتار وابسته به زمان برای زمین و وجود آب زیرزمینی وجه تمایز نشست‌های کوتاه مدت و بلند مدت است. نشست‌های کوتاه مدت در طول حفاری و یا بعد از گذشت چند روز از حفاری با فرض شرایط زهکشی نشده حاکم بر خاک رخ می‌دهند. نشست‌های بلند مدت اساساً به علت پدیده خزش، توزیع مجدد تنش و تحکیم خاک بعد از زهکشی آب زیرزمینی و حذف فشار منفذی آب در داخل خاک رخ خواهد داد که ممکن است چندین سال یا ماه ادامه یابد. در

این مقاله هدف از آنالیز نشست، بررسی نشست‌های کوتاه مدت در طی حفاری در خاک‌های سست و نرم است. همانطور که گفته شد، یکی از راه‌های کاهش نشست سطح زمین و جلوگیری از گیر افتادن سپر ماشین افزایش فشار سینه کار توسط اپراتور و استفاده از جک‌های هیدرولیکی و فلنج‌های فولادی به منظور افزایش نیروهای پیشران و نیروی جک‌های تراست است. افزایش فشار سینه‌کار و نیروهای جک‌های تراست سبب بالا رفتن گشتاور کله حفار شده و نشست سطح زمین کاهش می‌یابد که به دنبال آن ساختمان‌های اطراف مترو کمتر دچار آسیب و خرابی شده و همچنین سبب بالا رفتن نرخ نفوذ، نرخ پیشروی و کاهش توقفات طولانی مدت پروژه می‌شود. شکل ۱۴ و شکل ۱۵، به ترتیب اثرات افزایش فشار سینه‌کار و افزایش نیروهای جک‌های تراست را در نرم‌افزار *Plaxis3D2020* نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- نشست سطح زمین در فشار سینه کار مختلف ماشین EPB-TBM



شکل ۱۵- نشست سطح زمین در نیروی جک‌های تراست مختلف ماشین EPB-TBM

مدلسازی عددی در رینگ شماره ۲۷۰۰ با اعمال فشار سینه کار ۱۰۰ کیلو پاسکال، مقدار جابجایی ۱۲ سانتی‌متر بدست آمد. در حالیکه با افزایش فشار سینه کار به ۴۰۰ کیلو پاسکال، مقدار جابجایی به ۰/۶۵ سانتی‌متر کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین در این مدلسازی در رینگ شماره ۲۵۵۳ نیروی جک های تراست از ۱۰۰۰۰ به ۲۵۰۰۰ کیلو نیوتن افزایش یافت که نتیجه‌ی آن جابجایی سینه کار از ۷/۲ به ۱/۵ سانتی‌متر کاهش یافت. از طرفی با توجه به اینکه

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی تغییر شکل و جابه‌جایی زیاد مناطق ضعیف و سست به عنوان مناطق خرد شده بر عملکرد ماشین حفاری EPB-TBM پرداخته شد. مطابق با نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی در نرم‌افزار *Plaxis^{3D}2020*، سست و ریزشی بودن سینه‌کار حفاری منجر به همگرایی و گیر افتادن سپر ماشین حفاری EPB-TBM در تونل می‌شود. برای مثال در این مقاله، براساس

اما از آنجا که اضافه کردن سیلندرهای منجر به خرابی سگمنت‌ها می‌شود، می‌توان از یک سری فلنچ‌های فولادی به منظور اعمال بار یکنواخت از طرف جک‌ها بر روی سگمنت‌ها استفاده کرد؛ بنابراین با افزایش فشار سینه‌کار و همچنین افزایش نیروهای جک‌های تراست سبب افزایش گشتاور کله‌حفار در کیلومترهای مختلف شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش این پارامترها به توقف ریزش در مناطق ضعیف و بحرانی کمک می‌کند و سبب کاهش نشست‌های سطح زمین می‌شود.

متروها در اعماق کم حفاری می‌شوند، همگرایی بیش از اندازه تونل سبب نشست سطح زمین و آسیب دیدن و از بین رفتن ساختمان‌های اطراف تونل (مترو) می‌شود. در این پژوهش مشاهده شد که به منظور جلوگیری از گیر افتادن سپر ماشین حفاری *EPB-TBM* و کاهش همگرایی در تونل، می‌توان اقدامات زیر را انجام داد:

- افزایش فشار ماشین در سینه کار توسط اپراتور
- اضافه کردن یکسری سیلندرهای بین انتهای سپر و آخرین حلقه سگمنت‌ها برای افزایش نیروی جک‌های تراست به منظور جلوگیری از کشیدن ماشین حفاری

۷- مراجع

- Abu-Krishna, A. A. M. (1998). *Numerical modelling of TBM tunneling in consolidated: clay*. na.
- Acun, S., Bilgin, N., & Erboylu, U. (2021). Contribution on the understanding of EPB-TBM drives in complex geologic structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 107, 103646.
- Ates, U., Bilgin, N., & Copur, H. (2014). Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 46-63.
- Bayati, M., & Hamidi, J. K. (2017). A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 162-170.
- Bejari, H., & Hamidi, J. K. (2018). A parametric study of two solutions for a TBM jamming problem in squeezing ground conditions. *Int. J. Civil Eng. Technol.(IJCIET)*, 9(8), 862-878.
- Benardos, A., & Kaliampakos, D. (2004). A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling—illustrated by the Athens Metro, Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), 987-999.
- Do, N.-A., Dias, D., & Oreste, P. (2015). 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground. *Environmental earth sciences*, 73(5), 2101-2113.
- Farrokh, E., Mortazavi, A., & Shamsi, G. (2006). Evaluation of ground convergence and squeezing potential in the TBM driven Ghomroud tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(5), 504-510.
- Fattahi, H. (2016). Adaptive neuro fuzzy inference system based on fuzzy c-means clustering algorithm, a technique for estimation of TBM penetration rate. *Iran University of Science & Technology*, 6(2), 159-171.
- Fattahi, H. (2019). Tunnel boring machine penetration rate prediction based on relevance vector regression. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 9(2), 343-353.
- Fattahi, H., & Babanouri, N. (2017). Applying optimized support vector regression models for prediction of tunnel boring machine performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 2205-2217.

- Fattahi, H., & Moradi, A. (2017). Risk assessment and estimation of TBM penetration rate using RES-based model. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(1), 365-376.
- Goel, R. (2014). Tunnelling through weak and fragile rocks of Himalayas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(6), 783-790.
- Goel, R., Jethwa, J., & Paithankar, A. (1995). Tunnelling through the young Himalayas—a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel. *Engineering Geology*, 39(1-2), 31-44.
- Hamidi, J. K., Bejari, H., Shahriar, K., & Rezai, B. (2008). Assessment of ground squeezing and ground pressure imposed on TBM shield.
- Hasanpour, R., Rostami, J., & Ünver, B. (2014). 3D finite difference model for simulation of double shield TBM tunneling in squeezing grounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 109-126.
- Mansour, M. A. M. (1996). *Three-dimensional numerical modelling of hydroshield tunnelling*. na.
- Mollon, G., Dias, D., & Soubra, A.-H. (2013). Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. *Acta Geotechnica*, 8(2), 181-199.
- Mooney, M. A., Grasmick, J., Kenneally, B., & Fang, Y. (2016). The role of slurry TBM parameters on ground deformation: Field results and computational modelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 57, 257-264.
- O'REILLY, M. P., & New, B. (1982). *Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction* (090048862X).
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2008). TBM drives in squeezing ground—Shield-rock interaction. AFTES international congress Monaco,
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2011). The effect of consolidation on TBM shield loading in water-bearing squeezing ground. *Rock mechanics and rock engineering*, 44(1), 63-83.
- Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Hamidi, J. K. (2008). Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 318-325.

A method to reduce the surface subsidence and to prevent getting stuck on EPB-TBM - a case study

H. Fattahi*¹; H. Ghaedi²; F. Malekmahmoudi³

1- Associate Professor; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, h.fattahi@arakut.ac.ir

2- Msc.Student; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, iron.azar1@gmail.com

3- Bsc.Student; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, malekmahmodi12@yahoo.com

Received: 18 Feb 2021; Accepted: 14 Aug 2021
DOI: 10.22044/TUSE.2021.2188

Keywords

Numerical modeling
Ground surface subsidence
Cutter head torque
Face pressure, Thrust force
Getting stuck on EPB-TBM

Extended Abstract

Summary

In recent years, along with the development and expansion of cities, population growth and vehicles, the construction of underground railways by mechanized tunneling is increasing. One of the common problems of EPB-TBM mechanized tunneling in weak and unstable areas is tunnel convergence, which causes problems such as getting stuck on EPB-TBM,

subsidence and damage to buildings around the tunnel in urban areas. Due to the uncertainty in the soil parameters of the region, estimating the face pressure, thrust jacks pressure and cutter head torque at different lengths of the tunnel is very important to prevent over-convergence of the tunnel, getting stuck on EPB-TBM and ground subsidence. In this study, the amount of face pressure, thrust jacks force, cutter head torque and ground subsidence due to tunneling at different lengths of the tunnel in the construction project of the new Istanbul Airport Metro in Turkey is modeled using numerical software, PLAXIS^{3D} 2020. The modeling results show that the operator can increase the face pressure by preventing getting stuck on EPB-TBM. According to the results obtained in this paper, adjusting the face pressure, thrust jacks force and cutter head torque, in addition to solving the problem of getting stuck on EPB-TBM, will reduce the ground subsidence and damage to the structures on the ground surface.

Introduction

Types of the underground traffic tunnels are increasingly demanded in line with population growth around the world. However, the convergence induced by the tunneling operation is always threatening the surface structures in urban and residential areas or other underground facilities such as pipelines. Hence, the tunnel construction is accompanied by measures to prevent the excessive ground subsidence in the urban areas, which may result in catastrophic damages. Different empirical, analytical and numerical methods have been used to analyze such a complex problem in which numerous parameters are involved. In this paper, the study area is part of the construction project of the new Istanbul Airport Metro, which is located in northwest of the city center towards the Black Sea coast. In this study, using numerical modeling (by Plaxis^{3D} 2020 software) and considering the uncertainty in the values of ground parameters, a new solution based on adding cylinders between the end of the stuck and the last segment of the segment cover in fall area is presented.

Methodology and Approaches

In this study, accurate three-dimensional analysis of deformation and stability in tunneling engineering and rock mechanics is performed using Plaxis^{3D}, the user-friendly finite element package with trusted computation, that is used by geotechnical engineers worldwide. The features of this software are:

- Analyze surface settlements in tunneling, mining or reservoir depletion

- Predict differential settlements of buildings adjacent to excavation pits
- Plan for stability and seepage into excavation pits or lateral displacements of diaphragm walls
- Calculate necessary consolidation time for pore pressure dissipation in undrained loading problems
- Estimate bearing capacity and foundation settlement analysis for high-rise buildings, LNG tanks, and other structures

In this paper, finite element Plaxis^{3D} 2020 software is used in the numerical modeling for providing a method to reduce the surface subsidence and preventing getting stuck on EPB-TBM.

Results and Conclusions

In this paper, the deformation and high displacement of weak and loose areas as crushed areas on the performance of EPB-TBM drilling machine were investigated. According to the results of numerical modeling in Plaxis^{3D} 2020 software, looseness of the face led to convergence and getting stuck on the EPB-TBM in the tunnel. For example, in this paper, based on numerical modeling in segment number 2700, by applying a working face pressure of 100 KPa, the displacement value of 12 cm was obtained. While with increasing face pressure to 400 KPa, the amount of displacement decreased to 0.65 cm. Moreover, as a result of this modeling, in the segment number 2553, the force of the thrust jacks increased from 10,000 to 25,000 KN, and subsequently, the displacement of the working face decreased from 7.2 to 1.5 cm. On the other hand, due to the fact that subways are excavated at shallow depths, excessive convergence of the tunnel causes the ground surface to collapse and damage or destruction of buildings around the tunnel (subway). In this study, it was observed that in order to prevent the EPB-TBM from getting stuck and to reduce convergence in the tunnel, the following measures can be taken:

- Increased machine pressure in the face by the operator
- Adding cylinders between the end of the stuck and the last segment of the segment cover in fall area

However, since addition of cylinders leads to the failure of the segments, a series of steel flanges can be used to apply a uniform load by the jacks on the segments. Therefore, with the increase of the face pressure as well as the increase of the thrust jacks force, the cutter head torque has been increased in different parts of the tunnel. According to the results, increasing these parameters helps to stop the fall in weak and critical areas and reduces subsidence.
