

ارائه یک متدولوژی جدید در تخمین فشار سینه کار 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، hossein.ghaedi74@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی؛ دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، farshad.malekmahmoodi@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۰/۲۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

شماره صفحات: ۱۲۳ تا ۱۴۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11569.1444

چکیده

با گسترش روزافزون محیط‌های شهری، ایجاد و توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل درون شهری به منظور کاهش ترافیک، آلودگی‌ها و کاهش هزینه‌های ناشی از عبور و مرور درون شهری امری ضروری است. با توجه به اینکه بخش مهمی از هزینه ساخت مترو مربوط به حفاری و نگهداری تونل‌ها می‌شود. بنابراین یکی از مهم‌ترین تصمیم‌ها در بحث ساخت تونل‌های مترو روش حفاری در محیط‌های آبرفتی و ریزشی می‌باشد.

حفاری تونل توسط ماشین TBM-EPB در مقایسه با سایر روش‌های حفاری در خاک‌های نرم و مناطق ریزشی یک روش سریع، پر قدرت و همراه با نگهداری است. یکی از عوامل بسیار مهم در جلوگیری از ریزش سینه کار در حین حفاری در زمین‌های نرم و آبرفتی برآورد فشار سینه کار بهینه ماشین حفاری در هر مرحله حفاری (کیلومترهای مختلف) می‌باشد. زیرا کم و یا زیاد بودن فشار سینه کار ماشین حفاری منجر به افزایش هزینه‌ها، خسارت‌های جانی، سختی زیاد و همچنین منجر به وقفه در اتمام پروژه می‌شود. در این مقاله به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای ژئوتکنیکی و حساسیت تونل‌های شهری، مسئله از دیدگاه احتمالاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. به همین منظور، ابتدا برای ۵۰ حالت مختلف مدل‌سازی عددی خط ۲ مترو تبریز با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 صورت گرفته و در ادامه از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید اعداد تصادفی و اختصاص توزیع‌های احتمالاتی مناسب استفاده شده است. سپس با استفاده از الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری (GWO) فشار سینه کار ماشین TBM-EPB با کمک رابطه پیش‌بینی بدست آمده، تخمین زده شده است. در نهایت به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی رابطه بدست آمده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE)، جذر میانگین خطای مربع (RMSE) و میانگین خطای مربع (MSE) استفاده شده است. با توجه به اعتبارسنجی مدل، رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری به واقعیت مسئله بسیار نزدیک بوده و از آن می‌توان برای ادامه مسیر در مناطق مشابه دیگر استفاده کرد.

واژگان کلیدی

فشار سینه کار TBM-EPB
الگوریتم گرگ خاکستری
نرم‌افزار PLAXIS3D2020
شبیه‌سازی مونت کارلو

۱- پیش‌گفتار

در سال‌های اخیر با توجه به نیاز گسترش شبکه‌های مترو و راه‌های ارتباطی در شهرهای پرجمعیت و بزرگ به منظور کاهش ترافیک، کاهش هزینه‌های رفت و آمد و همچنین کاهش آلودگی‌های ناشی از وسایل نقلیه، استفاده از روش‌های مکانیزه تونل‌سازی در نواحی شهری اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از ماشین‌های حفاری تمام مقطع TBM-EPB برای محیط‌های خاک‌ها دانه‌ریز و ریزشی روشی پرکاربرد و شناخته شده برای حفر تونل است که امروزه اکثر تونل‌های طویل در جهان در محیط‌های خاکی حفر می‌شوند. در بحث تونل‌های شهری در محیط‌های آبرفتی و خاکی یکی از موارد مهم جهت کنترل پایداری زمین در سینه‌کار تونل فشار سینه‌کار ماشین حفاری می‌باشد.

در صورتی که فشار سینه‌کار ماشین حفاری کم باشد سبب بروز مشکلاتی نظیر نشست زیاد سطح زمین، اعوجاج سازه‌های سطحی، همگرایی تونل، خرابی سیستم‌های نگهداری منطقه حفاری شده، گیر کردن سپر ماشین حفاری و توقفات بی‌درپی خواهد شد. از طرف دیگر در صورتی که فشار سینه‌کار زیاد باشد منجر به سایش ابزارهای برشی، به عقب راندن ماشین حفاری جهت تعویض ابزارهای برشی، عملیات سخت و طاقت‌فرسای هایپرباریک به منظور نگهداری سینه‌کار به دلیل رها شدن سینه‌کار می‌شوند. لازم به ذکر است که در هر دو حالت به دلیل توقف ماشین حفاری، پایان پروژه به تعویق افتاده و هزینه‌ها بسیار زیاد خواهد شد. بنابراین هدف از تحلیل پایداری این است که میزان ایمنی در برابر ریزش خاک سینه‌کار حفاری ارزیابی شود. بدین منظور در حفاری مکانیزه باید بتوان حداقل فشار مورد نیاز در سینه‌کار تونل را تخمین زد. به طور کلی روش‌های تعیین فشار سینه‌کار را می‌توان به سه روش تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم کرد. در روش‌های تجربی براساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه‌ای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه‌کار برقرار می‌شود. در این روش فشار نگهدارنده حدی حداقل و حداکثر ارائه نشده و صرفاً فشار مورد نیاز برای انجام حفاری در شرایط مناسب توصیه می‌شود. روش‌های تحلیلی به دو دسته روش‌های تعادل حدی و روش‌های مبنی بر تئوری مرز بالا و پایین پلاستیک تقسیم می‌شوند. محققان زیادی با

استفاده از روش‌های تحلیلی به تخمین پایداری سینه‌کار در خاک‌های چسبنده و ریزدانه پرداخته‌اند. از معتبرترین روش‌های تعادل حدی برای خاک‌های غیرچسبنده و کمی چسبنده روش جانکسز-استاینز (Jancsecz & Steiner, 1994) و برای خاک‌های غیرچسبنده رابطه آنگونستا-کواری (Anagnostou & Kovári, 1996) است. که با استفاده از مکانیزم شکست پیشنهادی هورن در سال ۱۹۶۱ روابطی را برای محاسبه فشار پایداری سینه‌کار براساس گسیختگی گوه و سیلوی خاک تعادل حدی پیشنهاد کرده‌اند همچنین برویر در سال ۲۰۰۱ این روش را برای خاک لایه‌ای و وجود فشار آب گسترش داد (Broere, 2001). در روش‌های آنالیز حدی تنش، آنالیز تنش عمدتاً با ارائه کران بالا و پایین که به ترتیب از نقطه نظر استاتیکی و دینامیکی مطرح می‌شوند، صورت می‌گیرد. از معروف‌ترین روش‌های آنالیز حدی می‌توان روش‌های برومز و بنرمارک (خاک چسبنده و زهکشی نشده) و روش لکا-دومیر (خاک غیرچسبنده) را نام برد (Guglielmetti, et al., 2008). در یکی از پژوهش‌های اخیر در سال ۲۰۱۷ پین و دیاس با تحلیل حد بالا و مدل‌سازی عددی به بررسی پایداری سینه‌کار تونل پرداختند (Pan & Dias, 2017). روش‌های عددی که به دلیل امکان بررسی مراحل ساخت تونل، رفتار سه‌بعدی سینه‌کار، در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر خاک و در نظر گرفتن تقاطع در تونل‌ها از سایر روش‌ها بسیار پرکاربردتر می‌باشند. در همین راستا محققان زیادی به بررسی فشار سینه‌کار ماشین حفاری با استفاده از روش‌های عددی پرداختند که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است. گرین‌وود در سال ۲۰۰۳ با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته است (Greenwood, 2003). سان و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به مدل‌سازی فشار سینه‌کار پرداختند و نشان دادند که عدد پایداری N ارائه شده توسط دیویس و همکاران در سال ۱۹۸۰ با نتایج عددی همخوانی دارد. آن‌ها نشان دادند که نقاط نزدیک به کف تونل بیشتر در معرض ناپایداری می‌باشند موضعی که بعدها لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ نیز تایید شد. کسپر و مشکه در سال ۲۰۰۶ با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود، به مطالعه تأثیر پارامترهای ماشین حفاری شامل فشار

2013). کینچاه و بنمبارک در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر تسلیح سینه کار تونل تولون در فرانسه با استفاده از الیاف شیشه در کنترل تغییر شکل‌های آن پرداخته است. وی با استفاده از جابه‌جایی سنج و شیب سنج به اندازه‌گیری نشست‌های سطحی حین حفاری مقطع تونل و جابه‌جایی‌ها و فشار سینه‌کار در حین حفاری پرداخته و نتایج به دست آمده را با مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تونل، ساخته شده با نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC* مقایسه کردند (*Kitchah & Benmebarek, 2016*). وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ پژوهشی در رابطه با آنالیز پایداری جبهه‌کار تونل *EPB* در شرایط خاک دانه‌ای خشک با توجه به تأثیر فرایند حفاری دینامیکی ارائه دادند. در تحقیق آنها تأثیر عمق حفاری تونل و زاویه اصطکاک خاک بر روی پایداری جبهه‌کار مشخص شد و تغییرات فشار در مقابل جبهه‌کار تونل مورد بررسی قرار گرفت تا اثر قوس خاک را آشکار کند (*Wang, et al., 2019*). هرناندز و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی پایداری و همچنین فشار سینه کار حفاری با استفاده از روش‌های تحلیلی و روش عددی اجزای محدود به کمک نرم‌افزار *ABAQUS^{3D}* در یک تونل کم عمق و نشست سطح زمین ناشی از حفاری پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که روش عددی در مقایسه با روش تحلیلی نتیجه واقعی‌تری را نشان می‌دهد (*Hernández, et al., 2019*). شاهمرادی و همکاران در سال ۲۰۲۰ پژوهشی بر روی آنالیز پایداری جبهه‌کار تونل‌های *EPB* در خاک‌های لایه‌ای ناهمگن انجام دادند. در پژوهش آن‌ها پایداری جبهه‌کار تونل با روش‌های تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. مکانیزم شکست براساس مدل‌سازی عددی سه‌بعدی و مطابق با وضعیت تونل قمرود مورد بررسی قرار گرفت (*Shahmoradi, et al., 2020*). بیلگین و آکون در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش‌های عددی به بررسی تأثیر درجه‌های مختلف هوازدگی یک توالی ماسه‌سنگ، گل سنگ، سیلت بر عملکرد دستگاه حفاری تونل تعادل فشار زمین پرداختند. آنها تغییرات فشار سینه کار ماشین، رانش دستگاه، گشتاور و نفوذ در سنگ‌شناسی‌های مختلف را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اصلاح خاک تأثیر بسزایی بر روی عملکرد ماشین خواهد داشت (*Bilgin & Acun, 2021*). اگرچه تحقیقاتی که در بالا به آنها اشاره شد همگی

جبهه‌کار، فشار تزریق، وزن ماشین و مخروطی بودن سپر ماشین بر نشست سطح زمین پرداخته و نتیجه گرفتند که فشار جبهه کار، فشار تزریق و مخروطی بودن دستگاه حفاری تأثیر قابل توجهی در نشست سطح زمین دارد (*Kasper & Meschke, 2006b*). لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به مقایسه نحوه ناپایداری جبهه‌کار و بالازدگی زمین پرداخته و نشان دادند که شباهت زیادی بین مدل‌های تحلیلی و عددی در مدل تخریب وجود دارد. آنها نشان دادند که در بالازدگی تنها نیمه بالایی جبهه‌کار حفاری دچار ناپایداری می‌شود (*Li, et al., 2009*). چن و همکاران در سال ۲۰۱۱ با روش عددی المان گسسته مکانیزم گسیختگی و فشار حدی جبهه‌کار ماشین حفاری را در خاک ماسه‌ای بررسی کردند (*Chen, et al., 2011*). لامبروگی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری مختلف خاک و بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین برای پروژه مترو مادرید پرداخته‌اند (*Lambrugh, et al., 2012*). همچنین بورتز و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرایند تونل‌سازی، روابطی برای فشار جبهه کار ارائه دادند (*Berthoz, et al., 2012*). کارانزا تورس و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از نرم‌افزار *FLAC^{3D}* حداقل فشار نگهداری مور نیاز برای حفظ پایداری سینه‌کار در حین حفاری مکانیزه را در تونل‌های کم عمق استوانه‌ای تعیین کردند (*Carranza-Torres, et al., 2013*). چن و همکاران در سال ۲۰۱۳ با مدل‌سازی عددی المان گسسته در کنار مدل‌سازی فیزیکی کوچک مقیاس پایداری جبهه کار تونل‌های با نسبت سربار به قطر مختلف در خاک ماسه‌ای را مطالعه نمودند (*Chen, et al., 2013*). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی مکانیزم گسیختگی و پایداری جبهه‌کار و تأثیر آن بر نشست سطح زمین در تونل‌های دایره‌ای کم عمق پرداختند (*Zhang, et al., 2015*). حیدری و همکاران در سال ۲۰۱۳ پارامترهای فشار سینه‌کار و تزریق را با روش المان محدود بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که فشارهای مختلف جبهه‌کار حفاری تأثیر بسیار زیادی بر روی نشست سطحی حداکثر ناشی از تونل‌زنی داشته و ممکن است از فشار کم سینه‌کار منجر به خرابی سازه‌های سطحی شوند (*HEIDARI, et al.,*

صورت فشرده شده وارد اتاقک حفاری (Chamber) می‌شود. مصالح حفاری شده موجود در اتاقک حفاری توسط یک نقاله حلزونی از درون اتاقک قابل تخلیه می‌باشد که با تنظیم نرخ تخلیه مصالح می‌توان فشار اعمالی به سینه‌کار را تنظیم کرد. به عبارت دیگر همزمان با باز شدن جک‌های پیشران دستگاه، دوغاب مصالح درون اتاقک تحت فشار قرار گرفته و این فشار به سینه‌کار اعمال می‌شود و تنظیم میزان فشار با کنترل نرخ تخلیه مصالح توسط نقاله حلزونی انجام می‌گیرد. معمولاً فشار وارد به سینه‌کار در حدی تنظیم می‌شود که حالت تعادلی بین فشار وارده از سوی دستگاه به سینه حفاری و فشار برجای خاک وجود داشته باشد. اگر فشار نگهداری دوغاب تا بالاتر از میزان تعادل افزایش یابد به بالا آمدگی زمین در جلو سپر منجر می‌شود. همچنین در صورت تخلیه مصالح با سرعت بالا، به دلیل خالی شدن اتاقک حفاری و با کاهش فشار در سینه‌کار، خاک زمین ممکن است به داخل محفظه ریزش کرده و سبب ایجاد نشست در سطح زمین، همگرایی تونل و گیر کردن سپر ماشین شود. همزمان با حفاری و پیشروی دستگاه، در انتهای سپر فلزی قطعات پیش‌ساخته بتنی نصب می‌شوند که نسبت به خط حفاری شده زمین فاصله دارند. پس از اتمام شدن طول سپر، این قطعات در تماس با سطح حفاری شده قرار گرفته و وظیفه نگهداری زمین را برعهده خواهند داشت. برای جلوگیری از تغییر شکل زمین و نشست‌های سطحی، فضای خالی مابین پشت پوشش‌های بتنی تا زمین با استفاده از گروت، تزریق و پر می‌شود. با گذشت زمان و پیشرفت عملیات این گروت به تدریج سخت شده و نیروی ناشی از زمین اطراف به پوشش بتنی تونل منتقل می‌شود. شکل ۱، نمایی از یک ماشین حفار TBM-EPB و اجزای آن را نشان می‌دهد (Slinchenko, 2006).

کنترل نشست زمین، یکی از مهمترین مزیت‌ها در حفاری تونل با TBM-EPB می‌باشد. به طور کلی نشست زمین در حفاری مکانیزه ناشی از اضافه حفاری ماشین، کاهش فشار سینه‌کار در اتاقک حفاری و تزریق ناکافی فضای خالی پشت پوشش بتنی می‌باشد. با راهبری صحیح دستگاه، کنترل دقیق فشار سینه‌کار و تنظیم مناسب نرخ تخلیه مصالح از درون اتاقک حفاری متناسب با نرخ پیشروی دستگاه و همچنین تزریق پیوسته دوغاب همراه با پیشروی تونل به

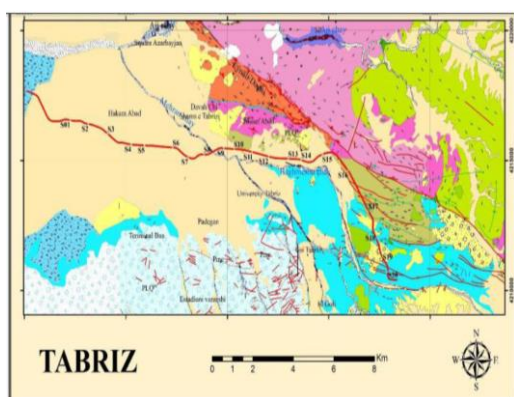
ارزشمند هستند اما به دلیل پیچیدگی، عدم قطعیت و ناهمگونی ذاتی در سنگ/خاک قابل تعمیم نیستند. همچنین در روش‌های تحلیلی به دلیل ساده‌سازی مسئله در شرایط پیچیده کاربردی نبوده و از دقت پایینی برخوردار هستند. علاوه بر موارد ذکر شده در روش‌های عددی به دلیل اینکه تنها یک مقدار (معمولاً میانگین مقادیر) از پارامترهای ژئوتکنیکی در مدلسازی وارد می‌شود و از طرفی با توجه به تغییرپذیری خواص سنگ و خاک در نقاط مختلف، این مدلسازی‌ها شرایط واقعی را نمی‌توانند نشان دهند لذا بایستی از روش‌های عددی به عنوان یک ابزار کمکی برای تحلیل روش‌های احتمالاتی استفاده کرد.

بعلاوه طی سالیان گذشته با پیشرفت‌هایی که در زمینه هوش مصنوعی در دنیا صورت گرفته، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای تخمین مقاومت فشاری سینه‌کار ماشین حفاری می‌تواند بسیار کاربردی، دقیق و قابلیت استفاده برای مناطق مشابه باشد. به همین منظور در این مقاله ابتدا با داشتن مقادیر ژئوتکنیکی (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به عنوان ورودی مسئله) خط ۲ مترو تبریز، ۵۰ مدل عددی در حالت‌های مختلف را با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* ایجاد و فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* برای هر مدل بدست آمد. سپس با استفاده از کدنویسی الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری در محیط *MATLAB* به تخمین فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* پرداخته شد که در ادامه با استفاده از شاخص‌های آماری، کارایی روش پیشنهادی در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مختصری از عملکرد ماشین سپر تعادلی فشار زمین (TBM-EPM)

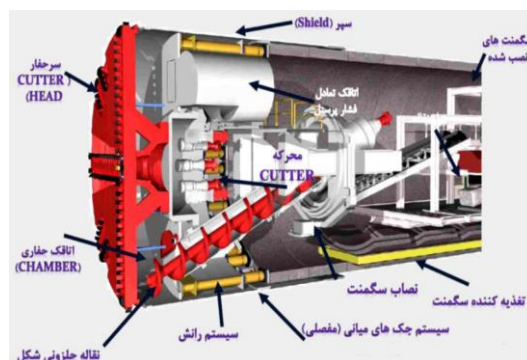
با توجه به کاربرد گسترده ماشین سپر تعادل فشار زمین در محیط شهری در این قسمت عملکرد این ماشین بررسی می‌شود. در این نوع *TBM*‌ها نگهداری سینه‌کار بدون وجود ابزار نگهداری ثانویه (هوای فشرده، دوغاب، صفحات فشارنده سینه‌کار) و توسط بخشی از مواد حفاری شده انجام می‌گیرد. زمین بوسیله ابزار برشی روی کله حفاری (Cutter Head) کنده شده و از طریق دریچه‌های موجود بر روی سرمت به

آبرفتی در قسمت‌هایی از شمال غرب و غرب و جنوب تا مرکز آبرفت‌های عهد حاضر محدوده این ناحیه به صورت رگه باریکی از شرق شهر شروع و از مرکز به طرف شمال غربی شهر ادامه پیدا می‌کند. بخش وسیعی از سطح جلگه تبریز به وسیله آبرفت‌های جدید پوشانده شده است. به علاوه بستر کلیه مجاری فرسایشی اطراف جلگه نیز پوشیده از این نهشته‌ها است. این آبرفت‌ها از عناصر درشت و ریز تشکیل یافته که موجبات عبور آب را فراهم می‌سازد. در برخی از مقاطع، این نهشته‌ها متناوباً از توده‌های ماسه‌ای و سلیتی ریز و درشت تشکیل شده است. به سمت غرب جلگه، لایه‌های ماری که منشأ دریاچه‌ای دارند و در بین آنها آهک‌ها و رس‌ها به صورت چینه‌های داخلی مشاهده می‌شوند به صورت لایه‌های غیرقابل نفوذ در آمده‌اند. مجموعاً آبرفت‌های جدید در جلگه بر روی تشکیلات میوسن یا پلیوسن قرار گرفته که از قابلیت نفوذ بالایی نیز برخوردار بوده و ضخامت کلی آن ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر است. رسوبات دریاچه‌ای پلیوسن عموماً زیر چینه آبرفت‌های جدید، چاله تبریز را اشغال کرده‌اند. ضخامت این سازند در برخی نقاط بسیار قابل ملاحظه است. این رسوبات از مارن، سیلت و رس‌های خاکستری رنگ همراه با ماسه‌های بسیار نرم و ریز دانه تشکیل یافته است. این رسوبات از قابلیت نفوذ بسیار ضعیفی برخوردار بوده و یکی از موانع عمده استخراج آب سفره‌های عمیق محسوب می‌شود. شکل ۲، مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰

منظور اطمینان از پر شدن فضای خالی پشت پوشش بتنی، می‌توان نشست سطحی و در نتیجه آسیب به سازه‌های سطحی را به حداقل مقدار ممکن رساند (Slinchenko, 2006).



شکل ۱- طرح شماتیک از قسمت‌های اصلی ماشین

۳- پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز

شهر تبریز در مختصات جغرافیایی ۴۵-۵۰ تا ۴۶-۳۶ طول شرقی و ۳۷-۴۲ تا ۲۹-۳۸ عرض شمالی واقع شده است. مساحت این شهر در حدود ۲۳۷ کیلومتر مربع بوده و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد ۱۳۴۰ متر تا ۱۵۶۰ متر است. این شهر در جلگه وسیع و در بستر ملایم مهران‌رود و دره آجی‌چای قرار گرفته، که این جلگه حدود ۳۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. این شهر از تمام جهات به جز غرب و شمال غرب با شیب‌های تند کوه‌های اطراف محدود شده است. به طوری که از شمال با رشته‌کوه‌های شرقی-غربی عون‌ابن‌علی و از جنوب توسط بلندی‌های نه چندان مرتفع که جنس آن‌ها از رسوبات آبرفتی سخت شده و کنگلوراست محصور شده است. ارتفاعات شرقی-غربی مذکور باعث شده تا تبریز به صورت دشتی کشیده با امتداد شرقی-غربی درآید. شیب کلی دشت و در نتیجه جهت زهکشی عمومی آب‌های سطحی و زیرزمینی به سمت غرب است. واحد لیتولوژیکی که شهر بر روی آن بنا شده است عبارتند از واحد ماسه‌سنگ قرمز و مارن در شمال و شمال شرقی تبریز، واحدهای مارن‌های سبز خاکستری در قسمت‌های شرقی شهر، واحد نهشته‌های دانه‌ریز آواری در قسمت شرق و جنوب شرقی، واحد کنگلومرای نیمه‌سخت در قسمت‌هایی از مناطق جنوبی شهر، پادگانه‌های آبرفتی جوان و پشته‌های

شکل ۳، نقشه هوایی مسیر مورد مطالعه خط ۲ مترو تبریز نمایش داده شده است. همانطور که از نقشه هوایی مشخص است بایستی بار ساختمان‌ها و ترافیک ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه در مدل‌سازی در نظر گرفته شود.



شکل ۳- نقشه هوایی تبریز به همراه مسیر و ایستگاه‌های خط ۲ مترو تبریز

۴- عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی منطقه

در این مطالعه، با توجه به اینکه مقادیر پارامترهای زمین‌شناسی در هر نقطه از زمین متغیر می‌باشد یکی از چالش‌های مهم و اساسی برای مدل‌سازی پروژه خط ۲ مترو تبریز عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی در هنگام حفاری است. متفاوت بودن مقادیر پارامترهای زمین‌شناسی، اعتماد به نتایج مدل‌سازی را کاهش داده و تحلیل نتایج تنها در همان نقطه اعتبار دارد و برای تحلیل در نقطه بعدی بایستی این مقادیر تغییر کنند. به همین منظور برای تحلیل در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های احتمالاتی مطرح می‌شوند؛ به ویژه اگر متغیرها از عدم قطعیت بالایی برخوردار بوده یا به طور کلی مسأله مورد نظر از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار باشد. بنابراین از آنجا که متروها در شهرها حفاری می‌شوند توجه به نشست سطح زمین ناشی از حفاری، ریزش سینه‌کار، هزینه‌های زیاد ناشی از توقفات پی‌درپی و تعمیرات و نگهداری‌ها و همچنین به خطر افتادن جان افراد در تونل‌ها، در نظر گرفتن روش‌های احتمالاتی بسیار حیاتی و مهم می‌باشد.

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از روش‌های مؤثر و

بطور کلی، از لحاظ ژئوتکنیکی لایه‌های زیرسطحی مسیر پروژه در بخش عمده‌ای از آن عمدتاً تناوبی از خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای می‌باشند که در مجموعه به دو گروه رسوبات درشت دانه‌ای (ماسه‌ای) و ریزدانه قابل تقسیم است. مشخصات لایه‌های خاک در محدوده مورد مطالعه برای مدل‌سازی خط ۲ مترو تبریز در جدول ۱، نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات لایه‌های خاک منطقه مورد مطالعه (Rezaei & Ahmadi-adli, 2020)

مشخصات	دانسیتته (gr/cm^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (KPa)
خاک دستی	۱/۵	۴۰	۲۵	۵
سیلت فوقانی	۱/۷	۱۵	۲۵	۲۰
ماسه سیلتی	۱/۹	۵۰	۳۵	۵
سیلت تحتانی	۱/۷	۳۵	۲۸	۲۵

اما پروژه خط ۲ خط قطار شهری تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر دارای ۲۰ ایستگاه زیرزمینی است که به صورت تونل تکی از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع می‌شود و بعد از گذشتن از خیابان‌های قره‌آغاچ، جمهوری، میدان دانشسرا، خیابان عباسی به منطقه باغمیشه می‌رسد. در ادامه به سمت شرق امتداد یافته و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز خاتمه می‌یابد. طول مسیر پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز به شکل مکانیزه به وسیله دو دستگاه حفاری فشار تعادلی زمین حفاری شده است. مشخصات این نوع دستگاه حفاری در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات کلی ماشین‌های حفاری خط ۲ مترو تبریز (Rezaei & Ahmadi-adli, 2020)

شرح	واحد	توضیحات
نوع دستگاه	-	EPB (Shield)
قطر حفاری	متر	۹/۴۹
قطر تمام شده	متر	۸/۴۸
وزن دستگاه	تن	۹۷۵
طول دستگاه	متر	۸۶
میانگین طول قطعات نگهداری	متر	۱/۵
طول سپر	متر	۹

شبیه‌سازی مونت کارلو با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار و سپس اختصاص توزیع احتمالاتی مربوطه برای هر پارامتر در نرم‌افزار *Easy Fit* انجام گرفته است.

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی

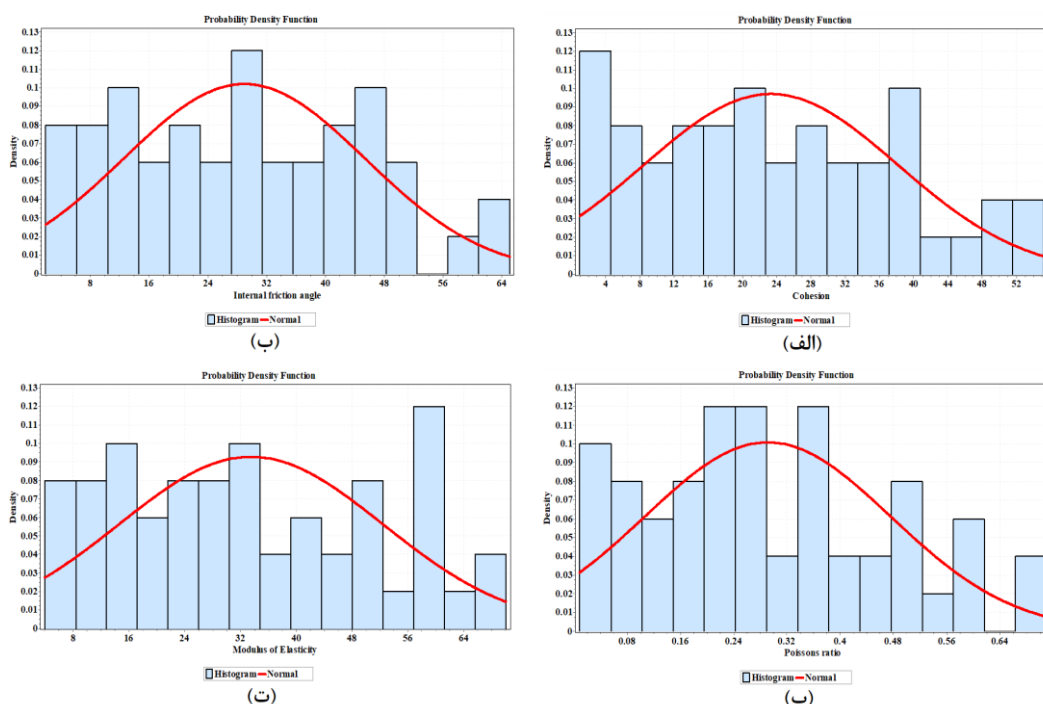
پارامترها	واحد	میانگین	انحراف معیار
C	KPa	۲۳/۳۲۶	۱۴/۸۶۱
ν	-	۲۸/۹۶	۱۶/۴۲۹
ϕ	درجه	۰/۲۹۱۲۴	۰/۱۸۴۸
E	MPa	۳۳/۵۰۶	۱۸/۹۱

در این مطالعه فرض بر این است که پس از تولید ۵۰ عدد تصادفی توسط میانگین و انحراف معیار برای هر پارامتر، از آنها می‌توان برای مدل‌سازی استفاده شود. با توجه به نرمال بودن توزیع‌های احتمالاتی بیشترین احتمال وقوع مختص مقادیر میانگین است. لازم به ذکر است که در مواردی که اطلاعات کافی از مجموعه داده‌ها برای پارامترها در اختیار نباشد، در نظر گرفتن توزیع نرمال فرض صحیحی برای پارامترهای ژئوتکنیکی می‌باشد.

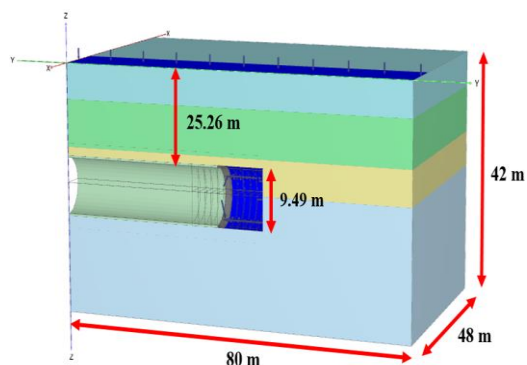
کاربردی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها است که بر مبنای انتخاب اعداد تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی استوار است (Hoek, 2007). در این روش، برای مجموعه مقادیر موجود در هر پارامتر، یک توزیع احتمالاتی اختصاص داده می‌شود و یا اینکه با توجه به مقادیر میانگین و انحراف معیار و فرض حاکم بودن یک نوع توزیع مشخص برای یک پارامتر، اعداد تصادفی آن در دامنه مشخص تولید می‌شود و یک توزیع احتمالاتی مناسب به آنها اختصاص داده می‌شود. مزیت استفاده از روش‌هایی مانند شبیه‌سازی مونت کارلو هوشمندانه بودن تولید و انتخاب اعداد تصادفی است (Wang, et al., 2010).

در مطالعه حاضر، پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده است. مقادیر میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) برای توزیع نرمال، با توجه به بیشترین و کم‌ترین مقادیر احتمالی آن متغیر در جدول ۳، ارائه شده است.

مطابق شکل ۴، تولید اعداد تصادفی توسط روش



شکل ۴- نمودار توزیع احتمالاتی نرمال متغیرهای تصادفی: الف) چسبندگی، ب) زاویه اصطکاک داخلی، پ) ضریب پواسون، ت) مدول الاستیسیته



شکل ۵- ابعاد مدل و اعمال بار سطحی

۵-۲- مش‌بندی مدل

با توجه به روش عددی اجزای محدود (*Finite Element Method*) برای تحلیل تونل مذکور، محیط پیوسته به اجزای هندسی ساده و کوچکتری که المان نامیده می‌شوند، تقسیم می‌شود و نقاط مشترک المان‌ها را گره می‌نامند و تمامی تحلیل‌ها اعم از تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در گره‌ها صورت می‌گیرد. در صورتی که مدل به اجزای خیلی کوچک تقسیم شوند دقت تحلیل‌ها بالاتر رفته و می‌توان تنش‌ها و کرنش‌ها را در نقاط بیشتری از مدل نمایش داد. اما ریز در نظر گرفتن المان‌ها سبب پایین آمدن سرعت اجرای برنامه شده و در سیستم‌هایی با قدرت پردازش پایین ممکن است با مشکلاتی روبه‌رو شود. از طرف دیگر در صورتی که المان‌ها بزرگ در نظر گرفته شود از دقت تحلیل‌ها کاسته شده و تنش‌ها و کرنش‌ها در قسمت‌هایی از مدل در نظر گرفته نمی‌شود. ولی سرعت اجرای برنامه در این حالت بالاتر خواهد رفت. بنابراین در این مطالعه به منظور افزایش دقت و سرعت در محاسبات، مش‌بندی در اطراف تونل به دلیل وجود اغتشاش ناشی از حفاری و همچنین مش‌بندی در اطراف منطقه بار ناشی از ترافیک و سازه‌های سطح زمین ریزتر و با دور شدن از مناطق ذکر شده افزایش یافته است. این مدل شامل ۳۸۰۰۷۸ المان ۱۵ گره‌ای و ۴۸۸۵۸ گره تشکیل شده است. تونل مذکور در بالای سطح آب زیرزمینی قرار دارد بنابراین تمامی محاسبات در شرایط عدم وجود آب زیرزمینی انجام شده است. شکل ۶، نحوه مش‌بندی تونل را نشان می‌دهد.

۵- مدل‌سازی تونل شهری خط ۲ تبریز

در این مرحله، پس از مطالعه زمین‌شناسی منطقه و همچنین در نظر گرفتن توزیع احتمالاتی به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی، نوبت مدل‌سازی تونل مذکور در هر نقطه از زمین می‌باشد. به همین منظور در ادامه به طور خلاصه به نحوه مدل‌سازی تونل مدنظر در نرم‌افزار اجزای محدود *PLAXIS^{3D}2020* پرداخته می‌شود.

۵-۱- ابعاد و شرایط مرزی مدل

اولین قدم برای اجرای مدل‌سازی و تحلیل تونل‌ها در نرم‌افزارهای عددی ساخت هندسه مدل است. به همین دلیل، با توجه به قطر تونل، ابعاد مدل بایستی به گونه‌ای انتخاب شود تا تأثیر حفاری تونل بر روی رفتار مدل و مرزهای کناری، به حداقل و یا به صفر برسد تا مدل‌سازی به درستی انجام گیرد. لازم به ذکر است ابعاد مناسب برای تونل معمولاً بین ۵ تا ۱۰ برابر شعاع تونل در اطراف متغیر است. در این مطالعه با توجه به راهنمای نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* و مطابق معادلات کرش در محیط‌های پیوسته حداکثر زون تأثیر در یک حفاری دایره‌ای شکل حدود ۴/۵ برابر قطر تونل در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵ و همچنین با توجه به مطالب ذکر شده مدلی با ابعاد ۴۲×۴۸×۸۰ در نظر گرفته شده است. در این مدل به دلیل نمایش فشار سینه‌کار، فشار جک‌های تراست، سپر ماشین *TBM-EPB*، گام حفاری تونل و همچنین سرعت بالای اجرای نرم‌افزار به صورت تقارن محور و نیمه مقطع در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی و اولیه که شامل کلیه بارها، نیروها و جابه‌جایی‌ها در محیط مدل است در هنگام مدل‌سازی باید به مدل اعمال شود. با توجه به شکل ۳، به دلیل عبور مترو از زیر ساختمان‌ها و عبور وسایل نقلیه روی سطح زمین باری حدود ۲۰ کیلوپاسکال به عرض ۱۲ متر به سطح زمین اعمال شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی نیز از مرزهای استاندارد موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. در این نوع شرایط مرزی، مرزهای پایین در دو جهت افقی ثابت ولی در جهت قائم به دلیل اعمال بار روباره مقید و ثابت نبوده و جابه‌جایی دارند.

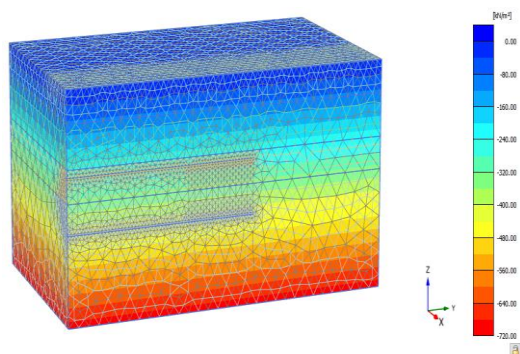
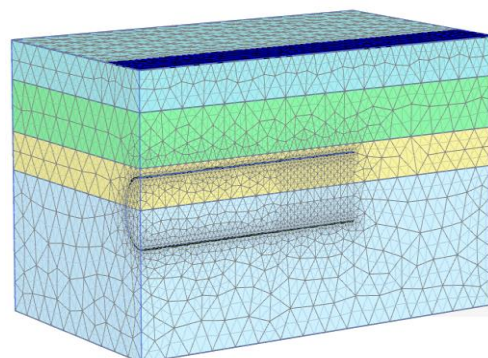


Figure 7: Cartesian total stress σ_{zz} (scaled up 5.00×10^{-3} times)
Maximum value = 0.00 kN/m² (Element 1 at Node 18552)
Minimum value = -720.1 kN/m² (Element 23727 at Node 9131)

شکل ۷- کنترل تنش‌های قائم قبل از حفاری



شکل ۶- مش‌بندی مدل

۵-۴- مدل‌سازی سپر مخروطی

با توجه به انواع ماشین‌های حفاری و همچنین پروژه خط ۲ مترو تبریز که در محیط خاکی و آبرفتی حفاری شده است به منظور پایداری در سقف و دیواره‌های تونل، جلوگیری از ریزش مصالح به درون ماشین، توقفات پی‌درپی ناشی از خرابی دستگاه‌های ماشین و جلوگیری از همگرایی در بخش جلویی ماشین که پوشش بتنی وجود ندارد از سپر استفاده شده است. سپر ماشین *TBM-EPB* با استفاده از المان‌های پوسته‌ای با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. مدل سپر مخروطی شکل به صورت یک استوانه با قطر ثابت با باریک شونده‌گی سپر ۰/۵ درصد در انتهای سپر اختصاص داده شده است. در این مقاله از آنجا که طول سپر ماشین ۹ متر می‌باشد سپر به شش بخش ۱/۵ متر (گام حفاری) با مدول‌های الاستیسیته یکسان تقسیم می‌شود. مطابق شکل ۸، مدل‌سازی سپر ماشین *TBM-EPB* در نرم‌افزار *PLAXIS^{3D2020}* به دو رینگ ۱/۵ متر برای سپر عقب (*Rear shield*)، دو رینگ ۱/۵ متر برای سپر میانی (*Middle shield*)، و دو رینگ ۱/۵ متر برای سپر جلو (*Front shield*) در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی سپر ماشین *TBM-EPB* خط ۲ مترو تبریز در مدل‌سازی توسط نرم‌افزار *PLAXIS^{3D2020}* را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد از آنجا که در بخش جلویی ماشین امکان نصب پوشش بتنی وجود ندارد، سپر ماشین *TBM-EPB* نقش پوشش بتنی را در ناحیه جلویی ماشین ایفا می‌کند. مطابق با شرایط زمین‌شناسی، بارهای روباره و

۵-۳- حل مدل قبل از حفاری

در این مرحله، پس از تعریف هندسه تونل، شرایط مرزی در حالت استاتیکی و همچنین مش‌بندی تونل، ابتدا بایستی مدل قبل از حفاری حل شده و به تعادل اولیه برسد. قبل از حفاری تونل تنش‌ها در شرایط اولیه یا برجا ناشی از وزن طبقات بالایی قرار دارند. تنش‌های برجا در روش‌های تخمینی در نرم‌افزار شامل تنش قائم (σ_{zz}) در جهت ثقلی و تنش افقی متوسط (σ_{xx}, σ_{yy}) هستند. در قسمت بالایی مدل در صفحه $Z=0$ بار ناشی از ساختمان‌ها و ترافیک به صورت گسترده و یکنواخت در راستای عمود بر صفحه برابر ۲۰ کیلوپاسکال اعمال شده است. برای محاسبه تنش‌های قائم (بار عمودی ناشی از وزن لایه‌ها به علاوه بارهای سطحی) در نرم‌افزارهای *PLAXIS^{3D2020}* از رابطه ۱ استفاده شده است:

$$\sigma_v = \rho gh + 20kpa \quad (1)$$

ضریب فشار افقی زمین و همچنین مؤلفه‌های افقی زمین برای مدل‌سازی مطابق رابطه ۲ و ۳ بیان می‌شوند:

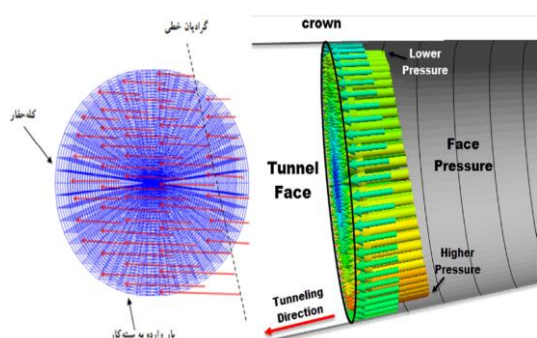
$$k = 1 - \sin \phi \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k\sigma_{zz} \quad (3)$$

مطابق با روابط فوق، کنترل‌های تنش قائم اولیه قبل از حفاری در مقطع شکل ۷، نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۷، مشخص است هر چقدر عمق افزایش می‌یابد، به دلیل زیاد شدن بار روباره مقدار تنش‌ها نیز بیشتر می‌شود.

۵-۵- فشار سینه‌کار

یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مباحث در حین حفاری ماشین‌های TBM-EPB در خاک‌های سست و ریزشی به منظور جلوگیری از شکم‌دادگی و پایداری سینه‌کار، محاسبه فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB می‌باشد. فشار سینه‌کار به صورت دوزنقه‌ای و با یک فشار گرادپانی با دانسیته ۱۰ کیلونیوتن بر متر مکعب در جهت محور Z به صورت خطی بر روی سینه‌کار تونل وارد شده و نسبت به عمق افزایش می‌یابد (Do, et al., 2015, 2016; Kasper & Meschke, 2004, 2006a). توزیع دوزنقه‌ای فشار سینه‌کار اعمال شده در شکل ۱۰، نشان داده شده است. در این مقاله با استناد به تغییرپذیری خواص ژئوتکنیکی در هر مرحله حفاری فشار سینه‌کار متفاوت در نظر گرفته شده است که در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود.

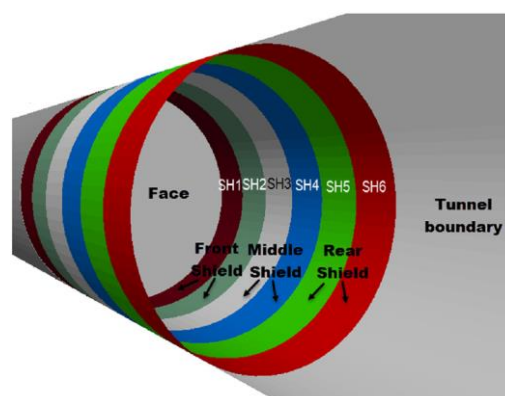


شکل ۱۰- نحوه اعمال بار به سینه‌کار تونل در مدلسازی

۵-۶- پوشش بتنی

در این پروژه به منظور پایداری دیواره و سقف‌های بخش حفاری شده (گذار) از پوشش‌های بتنی پیش ساخته با بتن پیش‌تنیده با طول ۱/۵ متر (گام حفاری) استفاده شده است. برای مدل‌سازی پوشش تونل در نرم‌افزار PLAXIS^{3D}2020 از المان‌های سازه‌ای با رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. پوشش‌های بتنی استفاده شده علاوه بر پایداری تونل ناشی از حفاری و روباره نقش نشیمن‌گاه جک‌های تراست را داشته و سبب جلو رفتن ماشین TBM-EPB می‌شود به نحوی که اگر رینگ‌های پوشش بتنی به درستی نصب نشود با فشار جک‌های تراست ماشین TBM-EPB سبب لب‌پریدگی (Stepping) و پله‌شدگی (Spalling) پوشش بتنی خواهد شد که در این حالت منجر به خرابی رینگ‌های

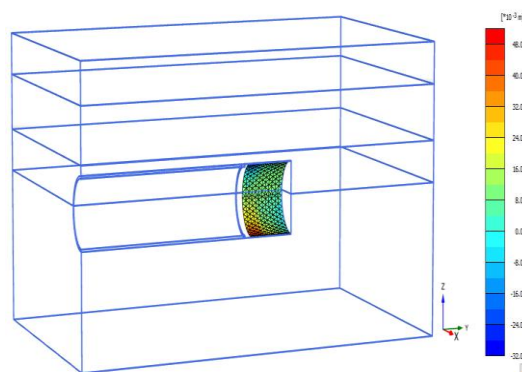
همچنین پارامترهای مکانیکی سپر ماشین TBM-EPB تنش وارده بر روی سپر ماشین TBM-EPB بصورت شکل ۹، می‌باشد. در صورتی که ماشین TBM-EPB فاقد سپر باشد به دلیل سست بودن و حرکت خاک اطراف ماشین، علاوه بر همگرایی تونل، نشست سطح زمین و اعوجاج سازه‌های سطحی ممکن است مصالح و آب زیرزمینی (در صورت وجود) وارد تجهیزات ماشین شده و منجر به خرابی تجهیزات و توقف ماشین TBM-EPB شود که در ادامه این توقفات منجر به مشکلات زیادی اعم از دیر شدن پایان پروژه و هزینه‌های اضافی ناشی از توقف ماشین می‌شود.



شکل ۸- نمایی از سپر مخروطی پیشنهادی در مدل عددی

جدول ۴- پارامترهای مکانیکی سپر ماشین TBM-EPB (Rezaei & Ahmadi-adli, 2020)

مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (m)	دانسیته (Kg/m ³)	ضریب پواسون
۲۱۰	۰/۱	۷۸۵۰	۰/۱۷



شکل ۹- کنتور تنش وارد بر سپر ماشین TBM-EPB

۵-۸- نتایج و مدل‌سازی فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB*

در مراحل مدل‌سازی این پژوهش تلاش شده است برای نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به واقعیت، مطابق روش اجرایی حفر تونل توسط حفاری تمام مکانیزه فرایند حفاری گام‌به‌گام رعایت شود. بدین ترتیب که ابتدا به منظور حفاری تونل چک‌های تراست به اندازه پوشش بتنی و گام حفاری ۱/۵ متر باز شده و با فشار وارد کردن بر روی آخرین حلقه پوشش بتنی سبب حرکت ماشین *TBM-EPB* شده و به سینه‌کار حفاری فشار وارد می‌کند و پس از حرکت ماشین *TBM-EPB* به سمت جلو پوشش بتنی پیش ساخته توسط ارکتور (*Erector*) ماشین در انتهای سپر نصب و عملیات تزریق پشت آخرین حلقه پوشش بتنی در حین حفاری صورت می‌گیرد. در این حالت خاک منطقه به اندازه یک گام حفاری، حفر شده و در ادامه به ازای هر مرحله ۱/۵ متر حفاری در سینه تونل، یک مرحله نصب پوشش در انتهای سپر انجام شده و این عملیات به طور متوالی تکرار می‌شود. یکی از عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در هنگام حفاری گام‌به‌گام ماشین *TBM-EPB* فشار سینه‌کار حفاری می‌باشد. با توجه به روش *ADECO-RS* در صورتی که سینه‌کار حفاری ناپایدار و دچار شکم‌دادگی شود (کم بودن فشار سینه‌کار ماشین (*TBM-EPB*) بخش حفاری شده یا منطقه گذرا دچار همگرایی شده و نتیجه همگرایی منجر به قفل شدن ماشین *TBM-EPB*، نشست سطح زمین، اعوجاج سازه‌های سطحی و همچنین خرابی سیستم‌های نگهداری نصب شده در ناحیه گذار می‌شوند. اما از سوی دیگر در صورتی که فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* زیاد باشد منجر به سایش ابزارهای برشی کاترهد می‌شود که در این حالت بایستی ماشین *TBM-EPB* را به عقب رانده و ابزارهای برشی ماشین *TBM-EPB* تعویض شود که این عقب کشیدن ماشین منجر به رها شدن سینه‌کار شده و مشکلات گفته شده رخ می‌دهد. اما می‌توان با استفاده از روش هایبرباریک از ریزش سینه‌کار در هنگام تعویض ابزارهای برشی استفاده کرد که این روش به دلیل سختی بسیار بالا و توقف عملیات تا حدودی از انجام آن بایستی دوری کرد (Lunardi, 2008). بنابراین با توجه به نکات گفته شده بایستی فشار سینه‌کار حفاری به صورتی بهینه

قبلی شده و در نهایت ممکن است منجر به از بین رفتن پوشش بتنی شوند. مشخصات ساختاری پوشش بتنی در مدل‌سازی در نرم‌افزار *Plaxis^{3D}2020* مطابق جدول ۵ است.

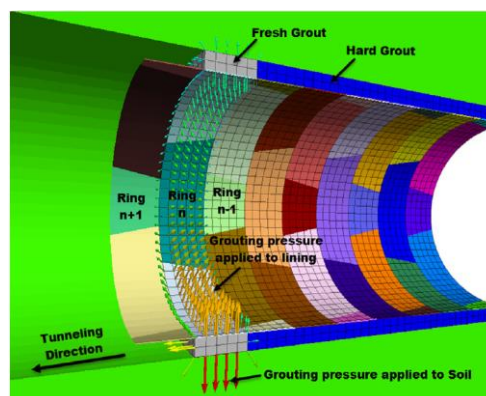
جدول ۵- مشخصات پوشش بتنی تونل

(Rezaei & Ahmadi-adli, 2020)

مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (m)	دانسیته (Kg/m ³)	ضریب پواسون
۳۰	۰/۳۵	۲۵۰۰	۰/۲

۵-۷- تزریق دوغاب پشت پوشش بتنی

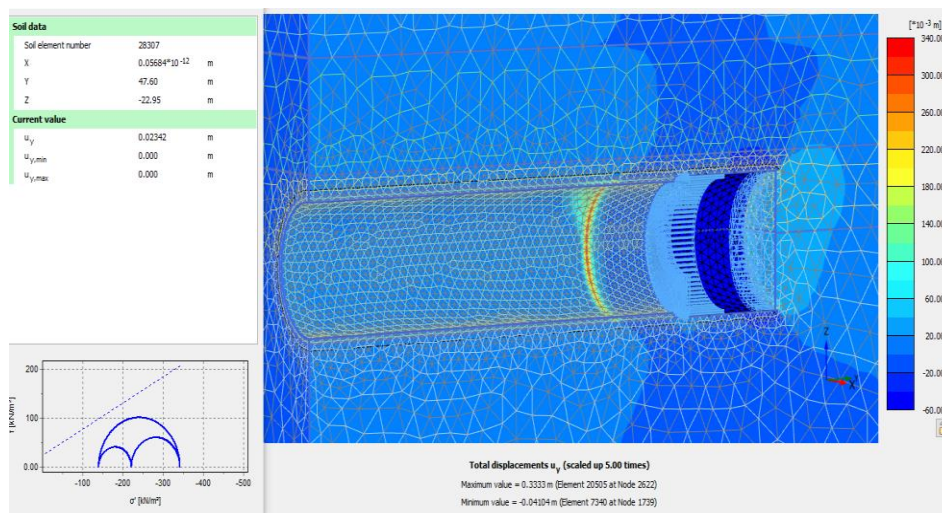
در این پروژه رفتار گروت پشت پوشش بتنی الاستیک خطی در نظر گرفته شده و بر اساس نتایج طرح اختلاط ارائه شده برای پروژه، مشخصات وابسته به زمان مصالح گروت در نتیجه هیدراسیون با در نظر گرفتن مدل الاستیسیته و ضریب پواسون وابسته به زمان مدل شده است. در مدل‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* میانگین فشار تزریق دوغاب برابر ۱۲۰ کیلوپاسکال در سقف در نظر گرفته شد که همانند فشار سینه کار با افزایش عمق با گرادین ۲۰ کیلوپاسکال فشار تزریق بصورت خطی افزایش می‌یابد. به علاوه، لایه بسیار نازکی بین پوشش و خاک با المان‌های زون ایجاد شده تا اندرکنش بین دوغاب-پوشش و دوغاب-خاک از آغاز تزریق دوغاب در نظر گرفته شود. شکل ۱۱، نحوه گروت پشت آخرین حلقه پوشش بتنی (محل نشیمن جک‌های تراست) و همچنین دوغاب تزریق شده در پوشش‌های بتنی در مرحله گذار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- نمای شماتیک از تزریق دوغاب در فضای خالی بین پوشش بتنی و دیواره

مدل‌سازی شود. شکل ۱۲، مدل‌سازی تونل خط ۲ مترو تبریز را با فشار سینه‌کار ۱۱۱/۵۴ کیلوپاسکال با گرادیان ۱۰ کیلونیوتن بر متر مکعب را نشان می‌دهد.

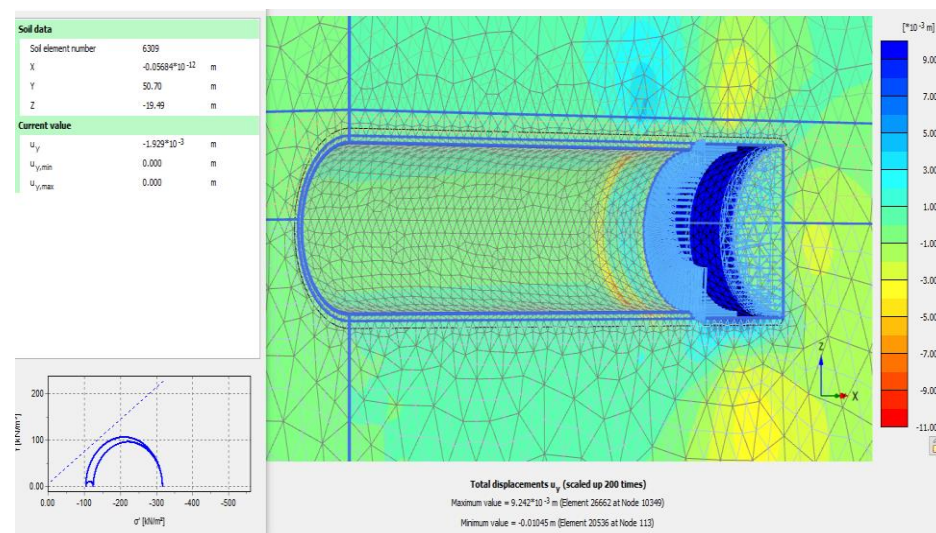
تعیین شود تا مشکلات عنوان شده اتفاق نیافتد. به همین دلیل در این مقاله، سعی شده است که با توجه به عدم قطعیت در پارامترهای ژئوتکنیکی فشار سینه‌کار بهینه در هر مرحله حفاری با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020*



شکل ۱۲- جابه‌جایی سینه‌کار با فشار ۱۱۱/۵۴ کیلوپاسکالی ماشین TBM-EPB

مطابق شکل ۱۲، حداکثر جابه‌جایی در فشار سینه‌کار ۱۱۱/۵۴ کیلوپاسکال برابر ۲ سانتی‌متر به دست آمده است که در این حالت سینه‌کار در حالت پایدار قرار دارد و سبب شکم‌دادگی سینه‌کار و همچنین همگرایی تونل نخواهد شد و به دلیل پایدار بودن سینه‌کار حفاری ماشین

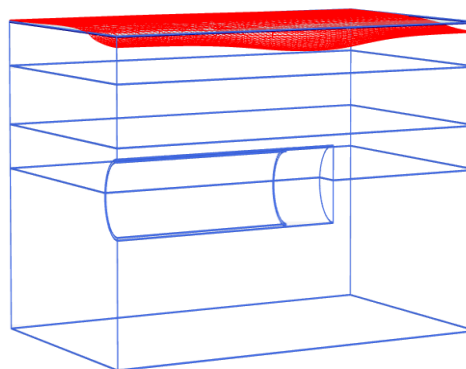
به سلامت از این منطقه عبور خواهد کرده و نشست‌های سطح زمین به حداقل می‌رسد. شکل ۱۳، فشار سینه‌کار ۵۳/۳۹ کیلوپاسکال با گرادیان ۱۰ کیلونیوتن بر متر مکعب را با پارامترهای ژئوتکنیکی دیگری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- جابه‌جایی سینه‌کار با فشار ۵۳/۳۹ کیلوپاسکالی ماشین TBM-EPB

وجود نداشته باشد نشست‌های سطح زمین بسیار کمتر خواهد بود. بنابراین با توجه به بارهای سطحی، به دلیل فشار سینه‌کار بهینه نشست سطح زمین بسیار کم بوده و اگر فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* پایین باشد نشست‌های سطح زمین بیشتر شده و سبب خرابی سازه‌های سطحی می‌شود. همانطور که گفته شد به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای زمین، بایستی اپراتور ماشین *TBM-EPB* فشار سینه‌کار را در کیلومترهای متفاوت، مختلف در نظر بگیرد. اما از آنجا که روش‌های عددی به صورت متعین (*Deterministic*) هستند و تنها یک مقدار برای هر پارامتر را در نظر می‌گیرند باید به ازای هر پارامتر ورودی یک فشار سینه‌کار بدست آید تا بتوان فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* را در نقاط مختلف به دست آورد. به همین دلیل برای دستیابی به یک رابطه کلی به منظور تخمین فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* در هر منطقه، با استفاده از روش‌های آماری بصورت تصادفی ۵۰ داده تولید و به ازای هر کدام از مقادیر پارامترهای ورودی با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* مقدار فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* بدست آمد. جدول ۶، بخشی از خروجی‌های بدست آمده به ازای هر مقدار پارامتر ورودی توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل ۱۳، مشخص است در این حالت با وجود کم بودن فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* نسبت به مدل قبلی به دلیل بالا بودن مقادیر پارامترهای خاک، حداکثر جابه‌جایی برابر با ۰/۱ سانتی‌متر به دست آمده است که در این حالت سینه‌کار پایدار بوده و منجر به عبور ماشین *TBM-EPB* می‌شود. شکل ۱۴، جابه‌جایی‌های سطح زمین ناشی از حفاری تونل و همچنین بارهای ترافیک و ساختمان در روی سطح زمین را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- نشست سطح زمین ناشی از حفاری و بارهای سطحی

بدیهی است در صورتی که بار ترافیک و ساختمان

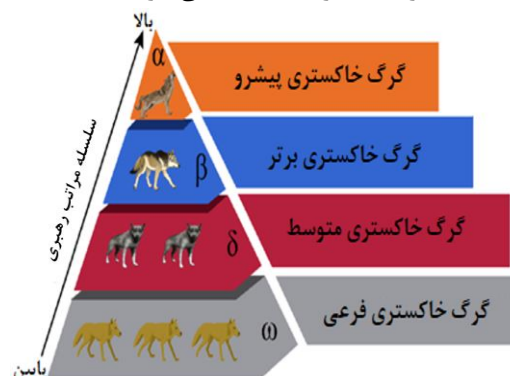
جدول ۶- بخش از نتایج و پارامترهای ورودی در این مطالعه

شماره داده	پارامترهای ورودی				مقادیر پارامترهای خروجی توسط نرم‌افزار <i>PLAXIS^{3D}2020</i>
	C (KPa)	ϕ (درجه)	ν	E (MPa)	P (KPa)
۱	۲۳/۳۳	۱۸/۹۸	۰/۵۷۷	۴۳/۳۴	۵۰/۵۹
۲	۷/۷۳	۶۵	۰/۲۹۵	۳۸/۷۶	۶۶/۵۶
۳	۴۲/۸۲	۲۲/۲۹	۰/۵۲۳	۲۷/۱۲	۴۸/۱۸
۴	۱/۰۲	۴/۵۱	۰/۹	۲۷/۷	۱۱۱/۵۴
۵	۳۲/۱۴	۱۱/۴۱	۰/۱۵۴۴	۱۳/۳۱	۸۷/۵۴
۶	۵۵/۲	۳۹/۴۳	۰/۳۲۱	۵۶/۱۲	۲۸/۹۲
۷	۵۰/۰۳	۴۵/۳۳	۰/۰۸۹	۴۹/۸۹	۳۲/۴۶
۸	۳۸/۸۱	۲۹/۶۲	۰/۱۲۷	۶/۰۶	۸۲/۱۷
۹	۱۱/۹۸	۲۵/۰۵	۰/۳۶۱	۳۰/۹۱	۷۴/۹۴
۱۰	۲۵/۱۲	۹/۹۵	۰/۱۱۲	۵۳/۵۳	۵۳/۳۹

۶- پیش‌بینی فشار سینه کار ماشین TBM-EPB توسط الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری

۶-۱- الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم GWO، یک الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که رفتار گرگ‌های خاکستری و سلسله مراتب رهبری و روش شکار آنها را تقلید می‌کند. این الگوریتم ابتدا توسط میرجلیلی و همکاران ایشان در سال ۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته جمعی آنها ارائه شده است (Mirjalili, et al., 2014). گرگ خاکستری از خانواده گرگ‌های کشور کانادا بوده و به خانواده سگ‌سانان تعلق دارد. گرگ‌های خاکستری در رأس شکارچیان قرار دارند؛ بدین معنی که آن‌ها در بالای زنجیره غذایی هستند و ترجیح می‌دهند به صورت گروهی زندگی کنند و بطور میانگین بین ۵ تا ۱۲ نفر هستند. مطابق ساختار هرمی مانند شکل ۱۵، گرگ‌های خاکستری یک سلسله مراتب بسیار سخت اجتماعی دارند.



شکل ۱۵- ساختار سلسله مراتب گرگ خاکستری (Mirjalili & Lewis, 2016)

رهبران گروه یک جنس نر و ماده هستند که آلفا (α) نامیده می‌شود. آلفا عمدتاً مسئول تصمیم‌گیری در مورد شکار، محل خواب، زمان بیداری، زمان حرکت و ... هستند. تصمیمات آلفا به گروه دیکته شده و نوعی رفتار دموکراتیک نیز مشاهده می‌شود که در آن آلفا از دیگر گرگ‌های گروه از گرگ آلفا پیروی می‌کند. با توجه به اینکه دستورات آلفا باید توسط گروه پیروی شود گرگ‌های آلفا تنها مجاز به انتخاب همسر در گروه هستند. نکته جالب توجه این است که آلفا لزوماً قوی‌ترین عضو گروه نیستند، اما بهترین عضو از نظر

مدیریت و سازمان‌دهی گروه هستند. سطح دوم در سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری، بتا (β) است. گرگ‌های بتا تحت امر گرگ‌های آلفا هستند و دستورات آلفا را در سراسر گروه اجرا کرده و بازخورد آن را به آلفا ارجاع می‌دهد. گرگ‌های بتا، احتمالاً بهترین کاندیدا برای آلفا شدن است و نقش یک معاون را برای آلفا و ناظم را برای گروه بازی می‌کند. در ساختار هرمی پس از گرگ‌های آلفا و بتا گرگ‌های دلتا هستند که تحت فرمان آلفا و بتا بوده؛ ولی نسبت به امگا برتری دارند. گرگ‌های امگا (ω) پایین‌ترین رتبه را در بین گرگ‌های خاکستری نیز دارد. این گروه از گرگ‌ها، نقش پیش مرگ را در گروه بازی می‌کنند. آنها باید مطیع تمام گرگ‌های دیگر گروه باشند و جز آخرین گرگ‌هایی هستند که غذا می‌خورند (Mech, 1999; Mirjalili, et al., 2014).

علاوه بر سلسله مراتب اجتماعی، شکار گرگ‌های خاکستری دارای سه مرحله ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه است. برای مدل‌سازی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها بهترین پاسخ را آلفا و از بین بهترین راه‌حل‌ها، دومین و سومین را بتا و دلتا را در نظر می‌گیریم. بقیه راه‌حل‌های کاندیدا را امگا در نظر می‌گیریم. بهینه‌سازی توسط آلفا، بتا و دلتا هدایت می‌شود و گروه چهارم از این سه گروه پیروی می‌کند (Mosavi, et al., 2016; Muro et al., 2011). مدل‌سازی رفتار محاصره گرگ‌ها از روابط ۴ و ۵ استفاده می‌شود (Mech, 1999):

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (4)$$

$$\vec{X}_{(t+1)} = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5)$$

در روابط، t تعداد تکرار فعلی، A و C بردارهای ضریب، \vec{X}_p بردار موقعیت شکار و X بردار موقعیت یک گرگ است. برای محاسبه بردارهای A و C از روابط ۶ و ۷ استفاده می‌شود.

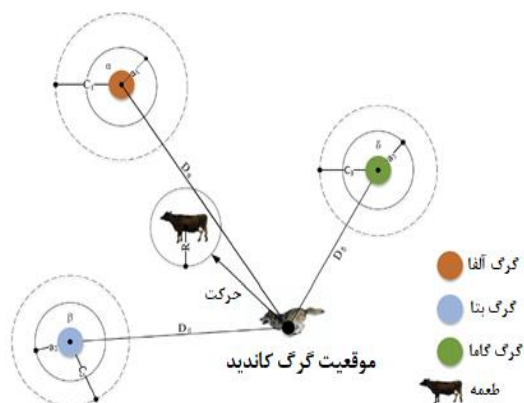
$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (6)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{D}_\alpha &= |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}| \\ \bar{D}_\beta &= |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}| \\ \bar{D}_\delta &= |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}| \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\alpha) \\ \bar{X}_2 &= \bar{X}_\beta - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\beta) \\ \bar{X}_3 &= \bar{X}_\delta - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\delta) \end{aligned} \quad (9)$$

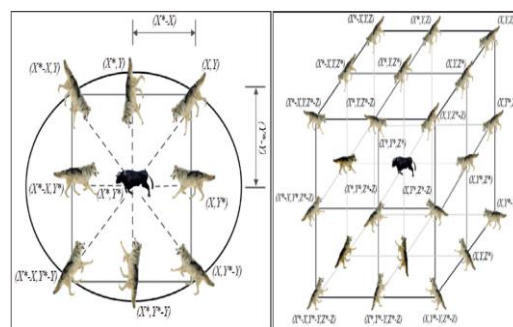
$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (10)$$



شکل ۱۷- به روز رسانی موقعیت در الگوریتم گرگ خاکستری (Medjahed, et al., 2016)

به طور خلاصه در الگوریتم *GWO* فرآیند جستجو با ایجاد یک جمعیت تصادفی از گرگ‌های خاکستری شروع می‌شود. در طول دوره تکرار، گرگ‌های آلفا و بتا و دلتا موقعیت احتمالی شکار را برآورد می‌کند. هر راه‌حل کاندید فاصله خود را با طعمه بروز رسانی می‌کند. پارامتر α از مقدار ۲ تا ۰ کاهش پیدا می‌کند تا فرآیند شناسایی و حمله به طعمه تقویت نمایند. زمانیکه $|A| > 1$ باشد، راه‌حل‌های کاندید واگرا می‌شوند و زمانیکه $|A| < 1$ باشد راه‌حل‌های کاندید همگرا می‌شود شکل ۱۸، نیز این مورد را به روشنی نمایش می‌دهند.

در معادلات ۶ و ۷ مقدار \bar{a} بصورت خطی از ۲ تا ۰ کاهش می‌یابد. \bar{T}_1 و \bar{T}_2 مبین بردارهای تصادفی در بازه ۰ و ۱ هستند. برای دیدن نتایج معادلات، معادلات ۴ و ۵ به همراه یک بردار مکان دوبعدی و تعدادی همسایگی احتمالی در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود یک گرگ خاکستری که در مکان (X, Y) قرار دارد، می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت طعمه (X^*, Y^*) عوض کند. مکان‌های مختلف موجود در اطراف بهترین عامل را می‌توان با توجه به موقعیت فعلی آن و تنظیم و تغییر مقدار بردارهای \bar{A} و \bar{C} به دست آورد. به عنوان مثال مکان $(X^* - Y, Y^*)$ را می‌توان با مقداردهی به صورت $\bar{C} = (1, 1)$ و $\bar{A} = (1, 0)$ محاسبه نمود. مکان‌های احتمالی به روز شده مربوط به یک گرگ خاکستری در فضای سه‌بعدی در شکل ۱۶، نشان داده شده است.

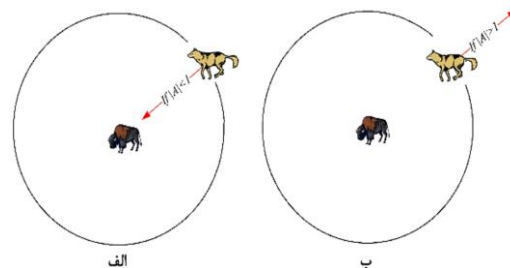


شکل ۱۶- بردارهای مکان دوبعدی و سه‌بعدی و موقعیت احتمالی بعدی آنها (Mech, 1999)

برای شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری فرض می‌کنیم که آلفا (بهترین حل کاندیدا)، بتا و دلتا آگاهی کافی درباره موقعیت بالقوه شکار دارند. بنابراین، به منظور مدل نمودن این رفتار سه مورد از بهترین راه‌حل‌های به دست آمده را ذخیره کرده و عامل‌های دیگر جستجو (امگا) را مجبور ساخته تا موقعیت خودشان را مطابق موقعیت بهترین عامل‌های جستجو بروز کنند. این عملیات مطابق روابط ۸ تا ۱۰ انجام می‌شود (Mirjalili, et al., 2014):

شکل ۱۷، چگونگی به‌روزرسانی موقعیت یک عامل جستجو را در یک فضای جستجو دوبعدی، با توجه به موقعیت آلفا، بتا و دلتا نشان می‌دهد.

روش‌های رگرسیونی، قابل تعمیم و بسط نبودن روش‌های تجربی در مناطق دیگر و همچنین به دلیل ناهمگونی شرایط زمین و ساده‌سازی در روش‌های تحلیلی، از روش‌های هوشمند برای نگاشت یک رابطه ریاضی با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای خاک به صورت دقیق به طوری که بتوان در حالت‌های مشابه دیگر نیز فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB را پیش‌بینی کرد، استفاده شده است. بنابراین به دلایل بیان شده، در این مقاله، از روش الگوریتم گرگ خاکستری برای پیش‌بینی فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB استفاده شده است. در این مدل‌سازی از مقادیر چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، ضریب پواسون (U) و مدول الاستیسیته (E) به دلیل تغییرپذیری زیاد به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده است. این داده‌ها به صورت تصادفی به دو گروه آموزش و آزمون تقسیم شدند. بدین منظور از مجموع ۵۰ داده، ۸۰ درصد مجموعه داده‌ها (۴۰ داده) به عنوان داده‌های آموزش مدل پیشنهادی و ۲۰ درصد مجموعه داده‌ها (۱۰ داده) به عنوان داده‌های آزمون برای ارزیابی صحت و دقت مدل استفاده شد. همچنین مشخصات آماری داده‌های ورودی و خروجی برای مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون مدل شامل بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار به صورت جداگانه مطابق جدول ۷، ارائه شده است.



شکل ۱۸- مکانیزم حمله به طعمه در برابر جستجوی طعمه (Medjahed, et al., 2016)

۶-۲- مدل‌سازی با الگوریتم GWO برای نگاشت یک رابطه پیش‌بینی

تخمین دقیق فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB به دلیل حساسیت بالای حفر تونل در محیط‌های شهری و همچنین خسارت‌های جانی و مالی بسیار حائز اهمیت بوده و با توجه به پیچیدگی رفتار خاک و عدم قطعیت در پارامترهای خاک بایستی تحلیل‌ها از حالت متعین به سمت روش‌های احتمالاتی و هوشمند سوق داده شود. به همین منظور همانطور که قبلاً گفته شد در این مقاله ابتدا با استفاده از روش‌های عددی (متعین) فشار سینه‌کار بهینه (کمترین هزینه، کمترین خسارت، کمترین سختی و پایان به موقع پروژه) به منظور عبور ماشین TBM-EPB در هر مرحله حفاری به دست آمد. در این بخش به دلیل دقت پایین

جدول ۷- مشخصات آماری مجموعه داده‌های ورودی و خروجی مدل

مجموعه داده‌های آزمون				مجموعه داده‌های آموزش				پارامترها
انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	
۱۴/۰۴۶	۲۲/۳۸۵	۲/۱۱	۴۵/۳۴	۱۵/۲۱۹	۲۳/۵۷۴	۱/۰۲	۵۵/۲	C (KPa)
۱۲/۸۹۳	۳۴/۶۸۱	۸/۴۳	۴۴/۵۶	۱۷/۰۳۸	۲۹/۹۰۴	۱/۹۸	۶۵	ϕ (درجه)
۰/۱۱۷۳	۰/۳۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۵۷۷	۰/۱۸۹	۰/۲۸۸	۰/۰۱۲	۰/۷۱	v
۱۴/۱۸۸	۲۹/۷۰۴	۱۰/۵۴	۴۸/۸۱	۶۹/۹۵۵	۳۴/۴۵۶	۴/۰۱	۷۰	E (Mpa)

در این رابطه، X_n مقدار نرمال شده، X_{mea} مقدار واقعی، X_{max} حداکثر مقدار و X_{min} حداقل مقدار می‌باشد. برای رسیدن به یک رابطه دقیق و نزدیک به واقعیت مسئله (پیش‌بینی با کمترین خطا) بایستی پارامترهای تنظیم الگوریتم گرگ خاکستری با استفاده از روش آزمون و خطا توسط کاربر مشخص شود. به همین منظور بهترین مدل

به منظور جلوگیری از داده‌های پرت و دستیابی به نتایج قابل قبول، بایستی قبل از مدل‌سازی، داده‌ها نرمال‌سازی شوند. به همین منظور می‌توان با استفاده از رابطه ۱۱ مقادیر داده‌های ورودی و خروجی را بین ۰ و ۱ نرمال کرد.

$$X_n = [(X_{mea} - X_{min})] / [(X_{max} - X_{min})] \quad (11)$$

آمده (فشار سینه‌کار حفاری) توسط الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری از چندین شاخص آماری نظیر ضریب همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (VAF)، میانگین درصد خطای مطلق ($MAPE$)، جذر میانگین خطای مربع ($RMSE$) و میانگین خطای مربع (MSE) استفاده شده است که بر طبق روابط زیر محاسبه شدند (Fattahi, 2017a, 2017b; Fattahi & Moradi, 2018).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2}{\sum_{k=1}^n Y_{mea}^2 - \frac{\sum_{i=1}^n Y_{pre}^2}{n}} \quad (14)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(Y_{mea} - Y_{pre})}{\text{var}(Y_{mea})} \right] \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m |Y_{mea} - Y_{pre}| \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2} \quad (17)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{mea} - Y_{pre})^2 \quad (18)$$

در این روابط، n تعداد نمونه‌ها، Y_{mea} مقادیر اندازه‌گیری شده و Y_{pre} مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. مطابق با روابط فوق، در صورتی که مقادیر ضریب همبستگی مربع و شمول واریانس به عدد یک و مقادیر میانگین درصد خطای مطلق، مجذور میانگین خطای مربع و میانگین خطای مربع به عدد صفر نزدیک شوند بیان‌کننده این است که رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم‌های گرگ خاکستری از دقت بالایی برخوردار است و در صورتی که این موضوع صدق نکند رابطه پیش‌بینی از دقت پایینی برخوردار می‌باشد. مقادیر شاخص‌های آماری برای مدل پیش‌بینی بدست آمده از الگوریتم گرگ خاکستری در دو حالت آموزش و آزمون به صورت جدول ۹، به دست آمده است.

ایجاد شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری با استفاده از پارامترهای تنظیم به صورت جدول ۸، ارائه شده است.

جدول ۸- پارامترهای تنظیم برای الگوریتم گرگ خاکستری

پارامترها	مقدار
حداکثر تعداد تکرار	۸۰۰
تعداد گرگ‌ها	۲۰

پس از نرمال‌سازی داده‌های ورودی و خروجی و همچنین تنظیم پارامترهای الگوریتم، تخمین فشار سینه‌کار ماشین $TBM-EPB$ با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری در محیط $MATLAB$ بصورت رابطه غیرخطی ۱۲ با کمترین خطا به دست آمد.

$$P = (W_1 \times \exp(C)^{W_2}) + (W_3 \times \sin(\varphi)^{W_4}) + (W_5 \times E^{W_6}) + (W_7 \times \exp(\nu)^{W_8}) + W_9 \quad (12)$$

در رابطه بالا، w_i مقادیر وزن‌دهی متناظر با پارامترهای ورودی هستند. مقادیر این ضرایب توسط الگوریتم به صورت زیر بدست آمد.

$$P = (1.3287 \times \exp(C)^{-0.5462}) + (-12.4138 \times \sin(\varphi)^{1.0118}) + (-0.8899 \times E^{1.0480}) + (0.1636 \times \exp(\nu)^{-14.9852}) + 0.0574 \quad (13)$$

رابطه مذکور را می‌توان برای تخمین فشار سینه‌کار ماشین $TBM-EPB$ با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای زمین‌شناسی بر خلاف روابط تجربی و تحلیلی برای هر منطقه استفاده کرد به این صورت که با قرار دادن پارامترهای ژئوتکنیکی در این رابطه، فشار سینه‌کار ماشین $TBM-EPB$ در هر کیلومتر از مختلف پیش‌بینی می‌شود و از توقفات پی‌درپی ناشی از تعویض دیسک‌ها و ریپرها، عملیات سخت و طاقت‌فرسای هایپرباریک، نشست‌های زیاد ناشی از حفاری و اعواج سازه‌های سطحی، هزینه‌های ناشی از ایمن‌سازی سینه‌کار، از بین رفتن سیستم‌های نگهداری منطقه گذار، گیرکردن سپر ماشین به دلیل همگرایی تونل، ریزش تونل و به خطر افتادن جان افراد و همچنین هزینه‌های دیرکرد پروژه را می‌توان تا حدود زیادی جلوگیری کرد.

۷- ارزیابی مدل

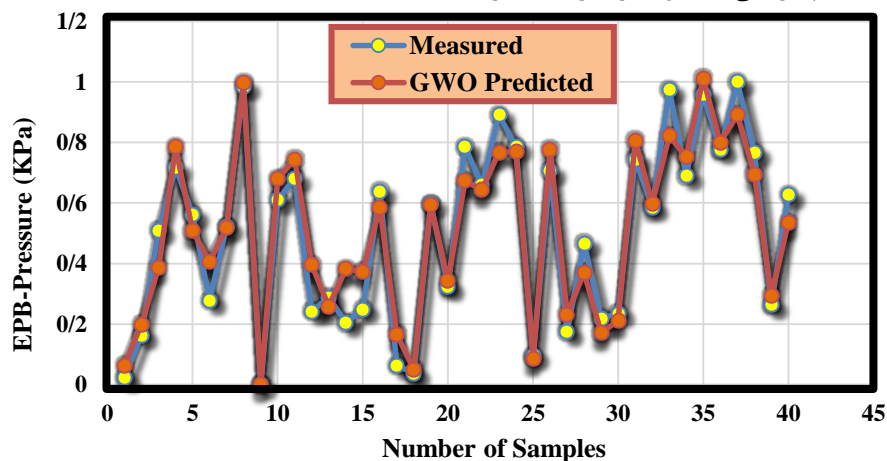
به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی رابطه پیش‌بینی بدست

جدول ۹- اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری

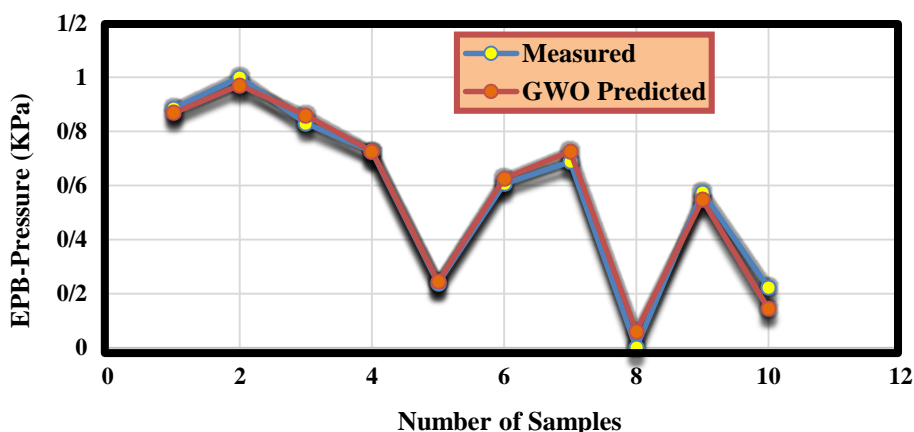
شرح	R^2	MAPE	RMSE	MSE
آموزش	۰/۹۳۱۵	۰/۰۰۶۲۵۵	۰/۰۳۹۵۶۱	۰/۰۰۱۵۶۵
آزمون	۰/۹۹۳	۰/۰۰۰۳۸۰۴	۰/۰۰۱۲۰۳۱	۰/۰۰۰۰۰۱۴

در دو مرحله آموزش و آزمون برای ۵۰ داده نشان می‌دهد. مطابق با نتایج بدست آمده از این شکل‌ها می‌توان دریافت که مقادیر پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که این موضوع بیان‌گر دقت بالای مدل بوده و از انطباق بسیار بالایی برخوردار می‌باشند.

همانطور که از جدول ۹، مشخص است، رابطه غیرخطی بدست آمده (رابطه ۱۳) توسط الگوریتم گرگ خاکستری از دقت بالایی برخوردار است و از آن می‌توان برای تخمین فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB استفاده کرد. به همین منظور، شکل ۱۹، مقایسه بین فشار سینه‌کار ماشین TBM-EPB پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را



(الف)



(ب)

شکل ۱۹-مقایسه بین فشار سینه‌کاری ماشین TBM-EPB اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری: (الف) داده‌های آموزش، (ب) داده‌های آزمون

۸- نتیجه‌گیری

در حفاری تونل‌ها به دلیل برهم خوردن وضعیت تنش‌ها، تغییر شکل‌هایی ایجاد می‌شود که ممکن است سبب ناپایداری تونل و خسارت‌های جانی و مالی زیادی شوند. یکی از مهمترین عوامل جهت جلوگیری از ناپایداری تونل‌ها، ایمن نگه داشتن سینه‌کار تونل توسط فشار کله حفاری ماشین‌های *TBM-EPB* می‌باشند که این فشار به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای ژئوتکنیکی در هر نقطه از زمین در طی حفاری متفاوت می‌باشد. به همین منظور در این مقاله، به دلیل جلوگیری از نشست‌های زیاد سطح زمین، اعوجاج و خرابی سازه‌های سطحی، همگرایی تونل، قفل شدن ماشین *TBM-EPB*، خرابی سیستم‌های نگهداری منطقه گذار، تعویض پی‌درپی ابزارهای برشی، توقفات زیاد ماشین *TBM-EPB*، عملیات سخت و طاقت‌فرسای هایپرباریک بایستی فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* در هر مرحله توسط اپراتور به صورت بهینه تعیین شود. برای این کار با توجه به تغییرپذیری در خواص مکانیکی خاک و متعین بودن روش‌های عددی، ابتدا با استفاده از روش احتمالاتی مونت‌کارلو به صورت تصادفی ۵۰ عدد از پارامترهای زمین‌شناسی (چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته) به عنوان ورودی تولید و فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* خط ۲ مترو تبریز توسط نرم‌افزار *PLAXIS^{3D}2020* در هر نقطه بدست آمد.

سپس به منظور تخمین فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* به دلیل دقت بالای روش‌های هوشمند از الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری در محیط *MATLAB* استفاده شد. در مرحله مدل‌سازی به طور تصادفی ۸۰ درصد از داده‌ها (۵۰ داده) در مرحله آموزش به عنوان ساخت مدل و ۲۰ درصد باقیمانده در مرحله آزمون مدل برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از ایجاد مدل (رابطه پیش‌بینی) به منظور صحت‌سنجی و درستی رابطه از یکسری شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی مربع (R^2)، شمول واریانس (*VAF*)، میانگین درصد خطای مطلق (*MAPE*)، جذر میانگین خطای مربع (*RMSE*) و میانگین خطای مربع (*MSE*) برای هر یک از داده‌های آموزش و آزمون مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که رابطه ایجاد شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری با مقادیر به دست آمده از مدل‌سازی عددی (مقادیر واقعی) بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و از دقت بالایی برخوردار است. به همین دلیل رابطه ساخته شده را می‌توان برای هر منطقه دیگر استفاده کرده و با داشتن پارامترهای ژئوتکنیکی هر منطقه و جایگزین کردن پارامترها در رابطه ساخته شده فشار سینه‌کار ماشین *TBM-EPB* را در هر نقطه از زمین به دست آورد و فشار بهینه را در اختیار اپراتور ماشین *TBM-EPB* قرار داده تا بتوان از مشکلات عنوان شده تا حد زیادی جلوگیری کرد.

۹- منابع

- Anagnostou, G., & Kovári, K. (1996). Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 165-173 .
- Berthoz, N., Branque, D., Subrin, D., Wong, H., & Humbert, E. (2012). Face failure in homogeneous and stratified soft ground: Theoretical and experimental approaches on 1g EPBS reduced scale model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 25-37 .
- Bilgin, N., & Acun, S. (2021). The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(4), 3041-3052 .
- Broere, W. (2001). Tunnel face stability and new CPT application [Ph. D. thesis]. *Delft University of Technology, Delft University Press, Delft, The Netherlands* .
- Carranza-Torres, C., Reich, T., & Saftner, D. (2013). Stability of shallow circular tunnels in soils using

- analytical and numerical models. Proceedings of the 61st Minnesota Annual Geotechnical Engineering Conference ,
- Chen, R.-p., Li, J., Kong, L.-g., & Tang, L.-j. (2013). Experimental study on face instability of shield tunnel in sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 12-21 .
- Chen, R., Tang, L., Ling, D., & Chen, Y. (2011). Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 38(2), 187-195 .
- 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 .
- Do, N.-A., Dias, D., & Oreste, P. (2016). 3D numerical investigation of mechanized twin tunnels in soft ground–Influence of lagging distance between two tunnel faces. *Engineering Structures*, 109 , ۱۲۵-۱۱۷ .
- Fattahi, H. (2017a). Applying soft computing methods to predict the uniaxial compressive strength of rocks from schmidt hammer rebound values. *Computational Geosciences*, 21(4), 665 .
- Fattahi, H. (2017b). Prediction of slope stability using adaptive neuro-fuzzy inference system based on clustering methods. *Journal of Mining and Environment*, 8(2), 163-177 .
- Fattahi, H., & Moradi, A. (2018). A new approach for estimation of the rock mass deformation modulus: a rock engineering systems-based model .*Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(1), 363-374 .
- Greenwood, J. D. (2003). *Three-dimensional analysis of surface settlement in soft ground tunneling* Massachusetts Institute of Technology .[
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A & ,Xu, S. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. Taylor & Francis .
- HEIDARI, S. R., Zare, S., MIRZAEI, N. H., & Foroughi, M. (2013). Numerical study of face pressure effect on surface settlement in soft ground mechanized tunneling-a case study: tehran metro line 7 .
- Hernández, Y. Z., Farfán, A. D., & de Assis, A. P. (2019). Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103062 .
- Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. In: North Vancouver, BC, Canada.
- Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions. In *Tunnelling '94* (pp. 531-550). Springer .
- Kasper, T., & Meschke, G. (۲۰۰۴). A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(14), 1441-1460 .
- Kasper, T., & Meschke, G. (2006a). A numerical study of the effect of soil and grout material properties

- and cover depth in shield tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 33(4-5), 234-247 .
- Kasper, T., & Meschke, G. (2006b). On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 160-171 .
- Kitchah, F., & Benmebarek, S. (2016). Finite difference analysis of an advance core pre-reinforcement system for Toulon's south tube. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 703-713 .
- Lambrugh, A., Rodríguez, L. M., & Castellanza, R. (2012). Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations. *Computers and Geotechnics*, 40, 97-113 .
- Li, Y., Emeriault, F., Kastner, R., & Zhang, Z. (2009). Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 472-481 .
- Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media .
- Mech, L. D. (1999). Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs. *Canadian Journal of Zoology*, 77(8), 1196-1203 .
- Medjahed, S. A., Saadi, T. A., Benyettou, A., & Ouali, M. (2016). Gray wolf optimizer for hyperspectral band selection. *Applied Soft Computing*, 40, 178-186 .
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67 .
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61 .
- Mosavi, M. R., Khishe, M., & Ghamgosar, A. (2016). Classification of sonar data set using neural network trained by Gray Wolf Optimization. *Neural Network World*, 26(4), 393 .
- Muro, C., Escobedo, R., Spector, L., & Coppinger, R. (2011). Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural processes*, 88(3), 192-197 .
- Pan, Q., & Dias, D. (2017). Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 96-102 .
- Rezaei, A. H., & Ahmadi-adli, M. (2020). The volume loss: real estimation and its effect on surface settlements due to excavation of Tabriz Metro tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 26۶۸۴-۶۳
- Shahmoradi, J., Salari Rad, H., & Roghanchi, P. (2020). Face stability analysis for the earth pressure balance method in nonhomogeneous inclined soil layers: case study. *International Journal of Geomechanics*, 20(10), 05020005 .
- Slinchenko, D. (2۰۰۶). Control of ground settlement in EPB Tunneling. *LOVAT Inc*, 1-5 .

- Wang, J., He, C., & Xu, G. (2019). Face stability analysis of EPB shield tunnels in dry granular soils considering dynamic excavation process. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11), 04019092 .
- Wang, Y., Cao, Z., & Au, S.-K. (2010). Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 37(7), 1015-1022. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.08.010>
- Zhang, C., Han, K., & Zhang, D. (2015). Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive–frictional soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 345-357 .

A new methodology for estimation of TBM-EPB machine face pressure: 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- Student; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, hossein.ghaedi74@yahoo.com

3- Student; Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, farshad.malekmahmoodi@gmail.com

Received: 13 Jan 2022; Accepted: 12 Apr 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11569.1444

Keywords

TBM-EPB machine face pressure
Gray Wolf algorithm
PLAXIS^{3D}2020 software
Monte Carlo simulation

Extended Abstract

Summary

With the increasing expansion of urban environments, the creation and development of intra-city transportation systems in order to reduce traffic, pollution and reduce the costs of intra-city traffic is essential. An important part of the construction cost of the metro is related to the excavation and maintenance of tunnels. Therefore, one of the most important decisions in the construction of subway tunnels is the excavation method in alluvial and loose environments. Tunnel excavation by TBM-EPB machine is a fast and powerful method compared to other excavation methods in soft soils and loose areas. One of the most important aspects in preventing the face pressure from falling during excavation in soft and alluvial fields is estimation of the optimal face pressure of the excavation machine in each excavation stage (different distances in the excavation). Because the high or low face pressure of the excavation machine leads to increased costs, loss of life, high hardness, and also, leads to delays in the completion of the project. In this paper, due to the uncertainty in geotechnical parameters and the sensitivity of urban tunnels, the issue has been studied from a probabilistic perspective. For this purpose, first, for 50 different numerical modeling modes of Tabriz Metro Line 2 using PLAXIS^{3D}2020 software, and then, Monte Carlo simulation method has been used to generate random numbers and assign appropriate probabilistic distributions. Then, using the Gray Wolf meta-heuristic algorithm, the face pressure of the TBM-EPB machine has been estimated using the prediction relation. Finally, in order to evaluate and validate the relationship, the statistical indicators of square correlation coefficient (R^2), variance inclusion (VAF), mean absolute error percentage (MAPE), root mean square error (RMSE) and mean square error (MSE) have been used. According to the model validation, the relationship created by the Gray Wolf algorithm is very close to the reality of the problem, and thus, it can be used to continue the route in other similar areas.

Introduction

In recent years, due to the need to expand metro networks and communication routes in densely populated and large cities to reduce traffic, travel costs and also pollution caused by vehicles, the use of mechanized tunneling methods in urban areas is inevitable. The use of full-length TBM-EPB machines for granular and loose soil environments is a well-known method of tunnel excavation. It should be noted that most of long tunnels in the world are today drilled in earthen environments. In the discussion of urban tunnels in alluvial and earthen environments, one of the important cases to control the stability of the ground in the face tunnel is the face pressure tunnel of the excavation machine. If the face pressure of the excavation machine is low, it will cause problems such as excessive subsidence of the ground, distortion of surface structures, tunnel convergence, failure of the excavation system, problematic maintenance systems, jamming of the excavation machine bumper and frequent stops. On the other hand, if the pressure of the brace is high, it leads to wear of the cutting tools, pushing back the excavation machine to replace the cutting tools, hard and exhausting hyperbaric operations to hold the brace due to the release of the brace. It should be noted that in both cases, due to the stop of the excavation machine, the end of the project will be delayed and the costs will be very high.

Therefore, the purpose of stability analysis is to evaluate the degree of safety against excavation. For this purpose, in mechanized excavation, it should be possible to estimate the minimum pressure required in the tunnel face. In general, methods of determination of face pressure can be divided into experimental, analytical and numerical methods. In the experimental methods, based on observations made during tunnel excavation, an experimental relationship is established between one or more parameters and the amount of pectoral pressure. In this method, the minimum and maximum maintenance pressure is not provided and only the pressure required to perform excavation in suitable conditions is recommended.

Methodology and Approaches

Over the years, with advances in artificial intelligence in the world, the use of artificial intelligence methods to estimate the compressive strength of the excavation machine has become practical, relatively accurate and usable for similar areas. For this purpose, in this paper, first, by considering the geotechnical values (adhesion, internal friction angle, Poisson coefficient and modulus of elasticity as the input of the problem) in Tabriz Metro Line 2, we created 50 numerical models in different modes using PLAXIS^{3D}2020 software, and TBM-EPB machine face pressure was also obtained for each model. Then, by coding the Gray Wolf algorithm in MATLAB environment, the face pressure of the TBM-EPB machine was estimated that could be evaluated using statistical indicators to determine the efficiency of the proposed method in this study.

Results and Conclusions

In tunnel excavation, due to the disturbance of the stress situation, deformations occur that may cause tunnel instability and many human and financial losses. One of the most important factors to prevent the instability of tunnels is to keep the tunnel face safe by the head face pressure of TBM-EPB machines that varies due to uncertainty in geotechnical parameters anywhere on the ground during excavation. Therefore, in this paper, this issue has been investigated to prevent excessive ground subsidence, distortion and failure of surface structures, tunnel convergence, locking of TBM-EPB machine, failure of transition area maintenance systems, frequent replacement of cutting tools, high TBM-EPB machine stops, difficult operation and hyperbaric exhaust. The face pressure of the TBM-EPB machine must be optimally determined by the operator at each stage. To do this, due to the variability in soil mechanical properties and the determination of numerical methods, first, using the Monte Carlo simulation, 50 geotechnical parameters (adhesion, internal friction angle, Poisson coefficient and modulus of elasticity) are randomly generated as the input and the face pressure of the TBM-EPB machine of Tabriz Metro Line 2 was obtained by PLAXIS^{3D}2020 software at any point. Then, in order to estimate the face pressure of the TBM-EPB machine, due to relatively high accuracy of intelligent methods, the Gray Wolf algorithm was used in MATLAB environment. In the modeling stage, 80% of the data were used randomly in the training stage for model construction and the remaining 20% of the data were used in the model test stage to evaluate the models. After creating a model (prediction relationship), in order to validate the relationship, a number of statistical indicators were used for each of the training and test data. The validation results showed that the relationship created by the Gray Wolf algorithm had the results very close to the values obtained from numerical modeling (real values). For this reason, the constructed relationship can be used for any other region and by having the geotechnical parameters of each region and substituting the parameters in the constructed relationship, the face pressure of the TBM-EPB machine can be obtained anywhere on the ground, and the optimal face pressure can also be obtained. The operator can install a TBM-EPB machine to greatly avoid the above-mentioned problems.
