



(مقاله پژوهشی)

برآورد عدد پایداری و فشار سینه کار تونل در حالت حدی سرویس بر اساس نتایج مدل سازی عددی

مصطفی طرف روا^۱، ابراهیم فرخ^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۱، پذیرش: شهریور ۱۴۰۱)

چکیده

فشار سینه کار به طور کلی به دو روش اصلی حالت حدی نهایی و حالت حدی سرویس محاسبه می شود. در این میان، حالت حدی نهایی، حالت بحرانی جابجایی زمین در موقعیت سینه کار است که منجر به ناپایداری سینه کار و ریزش آن می شود. در این روش، در محاسبات فشار نگهداری سینه کار تونل، تغییر شکل های زمین در نظر گرفته نمی شود. روش حالت حدی سرویس، بیشتر مرتبط با مقدار افت حجمی و نشست سطحی حداکثر زمین است. روش های موجود برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی سرویس عموماً بر اساس نتایج آزمایش های آزمایشگاهی (آزمایش گریز از مرکز تونل) یا داده های تجربی نسبتاً قدیمی توسعه یافته اند. در این مقاله برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی سرویس از مدل سازی عددی با نرم افزار V 20 PLAXIS 3D استفاده شده است. با توجه به گستردگی حالت های مدل سازی، شرایط هندسی (قطر حفاری ۹ متر) و ژئوتکنیکی خطوط متروی تهران برای مدل سازی در نظر گرفته شد. برای صحت سنجی نتایج مدل سازی ها از نتایج نشست سنجی پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران استفاده شده است. بر این اساس، مدل های مربوط به مقاطعی که مقادیر نشست آن ها بیشتر از ۸ و کمتر از ۸ میلی متر است به ترتیب در حالت زه کش شده و زه کش نشده تطبیق نتایج بهتری با نتایج واقعی نشست سطحی دارند. همچنین نتایج تحلیل حساسیت انجام شده بر روی پارامترهای مختلف ورودی مدل ها در هر دو حالت زه کش شده و زه کش نشده نشان می دهد که تغییر مقدار مدول الاستیسیته، بیشترین تأثیر را بر میزان تغییر نشست سطح زمین دارد. هدف اصلی در این مطالعه برآورد عدد پایداری و به دست آوردن روابطی تجربی بین عدد پایداری و سایر پارامترها است. بر این اساس با استفاده از نتایج مدل سازی های عددی و روش تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه، سه رابطه جدید برای برآورد عدد پایداری در حالت زه کش شده و یک رابطه تجربی جدید برای عدد پایداری متناظر در حالت زه کش شده ارائه شده است. در این روابط از پارامترهای مدول یانگ، ارتفاع سطح آب زیرزمینی و افت حجمی استفاده شده است. ضریب تعیین (R^2) فرمول تجربی حالت زه کش شده برابر با ۶۸ درصد و ضریب تعیین (R^2) سه فرمول حالت زه کش نشده برابر با ۶۶ درصد، ۴۸ درصد و ۶۶ درصد است.

کلمات کلیدی

تونل سازی، فشار سینه کار، مدل سازی عددی، حالت حدی سرویس، عدد پایداری

*عهده دار مکاتبات: e.farrokhi@aut.ac.ir

DOI: [10.22034/ANM.2022.2781](https://doi.org/10.22034/ANM.2022.2781)

۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین شرایط تونل‌سازی در محیط شهری، کنترل همگرایی دیواره‌های تونل و نشست‌های سطحی است. یکی از تکنیک‌هایی که تا حد زیادی از همگرایی تونل و در نتیجه از تغییر شکل‌های غیرمجاز در سطح زمین جلوگیری می‌کند، روش تونل‌سازی سپری (Shield Tunneling) است. برای کنترل نشست سطحی و به‌طور کلی حفظ شرایط قبل از آغاز حفاری در سازه‌های موجود و حفظ وضعیت تعادل آب زیرزمینی در طراحی فشار نگهداری باید از تحلیل مرحله‌ای استفاده کرد. ابتدا باید از شرایط پایداری سینه‌کار اطمینان حاصل نمود، سپس پارامترهای پایداری برای کنترل کامل گسترش تغییر شکل و جریان آب به سمت سینه‌کار را تعیین کرد [۱]. یکی از نکات مورد توجه در تونل‌سازی سپری، موضوع پایداری سینه‌کار تونل در حین انجام عملیات حفاری در زمین‌های نرم است. در این راستا، در TBM‌های زمین‌های شهری، کنترل فشار سینه‌کار اهمیت بسیار زیادی دارد. به دلیل وجود خطرات ناشی از عملیات حفر تونل در زمین‌های شهری با تأسیسات حساس سطحی و زیرسطحی و همچنین ارتباط تنگاتنگ فشار سینه‌کار با مقادیر نشست سطحی، بحث پایداری سینه‌کار تونل، یکی از بحث‌های مهم در تونل‌سازی است. تا امروزه تحقیقات زیادی برای پیشنهاد میزان فشار مورد نیاز به منظور نگهداری جبهه‌کار تونل در زمین‌های سست و کم‌عمق صورت گرفته است و این تحقیقات منجر به به‌وجود آمدن روش‌های تحلیلی، تجربی، آزمایشگاهی و عددی مختلفی برای برآورد فشار لازم شده‌اند. روش‌های تحلیلی عموماً بر پایه روش‌های حالت حدی طراحی شده‌اند. در روش‌های حالت حدی به‌منظور محاسبه فشار جبهه‌کار تونل، ابتدا یک مدل شکست فرضی و احتمالی در نظر گرفته شده و نیروهای وارد بر آن مشخص می‌شود. سپس با استفاده از معادلات تعادل، فشار وارد شده از طرف زمین به جبهه‌کار تونل محاسبه می‌شود. این روش‌ها تنها جواب‌های تقریبی و اغلب مقادیر بزرگ‌تر از مقادیر واقعی را ارائه می‌دهند [۲]. اولین مکانیسم شکست تعادل حدی، توسط هورن (۱۹۶۱) پیشنهاد شد [۳]. بر اساس این مکانیسم، یک گوه لغزان در مقابل سینه‌کار تونل فرض می‌شود که توسط یک منشور مستطیلی شکل کشیده شده تا سطح زمین (سیلو)

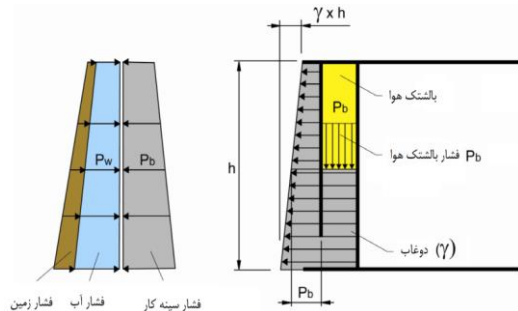
بارگذاری می‌شود. در کشورهای آلمانی‌زبان، بعضاً از روش تعادل حدی مبتنی بر استاندارد DIN 4085 [۴] برای محاسبه مؤلفه نیروی نگهداری فشار زمین استفاده می‌شود. این روش یک بدنه شکست سه‌بعدی را پیشنهاد می‌کند. فشار فعال سه‌بعدی زمین که بر روی سینه‌کار تونل عمل می‌کند با کمک این بدنه شکست، محاسبه می‌شود. روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی پایداری سینه‌کار تونل معمولاً بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی همانند آزمایش‌های سانتریفیوژ توسعه می‌یابند.

در روش‌های تجربی، یکسری روابط تقریبی بر اساس تجربیات موجود در پروژه‌های مختلف دنیا ارائه شده است که در آن‌ها بین یک و یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه‌کار، رابطه‌ای تجربی به دست آمده است. در بین روش‌های تجربی می‌توان به روابط معروف تجربی که بر اساس در نظر گرفتن تنش جانبی فعال یا تنش جانبی در حالت سکون زمین و فشار آب تعیین می‌شود، اشاره کرد [۵].

روش‌های عددی مبتنی بر رویکرد اجزاء محدود، در عمل برای تجزیه و تحلیل فعل و انفعالات ماشین و زمین استفاده می‌شود. مطلوب‌ترین روش مورد استفاده برای تعیین رابطه بین فشار سینه‌کار اعمال شده و تنظیم نشست سطحی به دست آمده، تجزیه و تحلیل گام‌به‌گام سه‌بعدی کامل با توجه به پیشروی ماشین سپری است. با این وجود صحت نتایج این روش کاملاً وابسته به داده‌های اولیه مسئله است. لازم به ذکر است که موارد یاد شده عموماً به حالت حدی نهایی مرتبط می‌شود. از مشخصات اصلی این حالت، ناپایداری سینه‌کار و بالا زدگی روباره تونل است. از این رو فشاری که بر اساس حالت حدی نهایی به دست می‌آید، برای جلوگیری از ناپایداری سینه‌کار و بالا زدگی روباره تونل طراحی می‌شود. حالت دیگر طراحی برای تعیین فشار سینه‌کار، حالت حدی سرویس است. از معیارهای اصلی طراحی در این حالت حدی، کنترل افت حجمی زمین و جابجایی‌های سطح زمین است. با توجه به اهمیت کنترل نشست سطحی برای جلوگیری از آسیب‌های ساختاری به ساختمان‌های مجاور تونل، برآورد فشار سینه‌کار در حالت حدی سرویس بسیار مهم است. همان‌گونه که یاد شد، تاکنون مدل‌های متعددی برای برآورد فشار سینه‌کار در حالت حدی نهایی ارائه شده است اما تحقیقات کمی در مورد برآورد فشار سینه‌کار در حالت

روش‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی اشاره کرد.

حالت حدی سرویس به حدود مجاز جابجایی سطح زمین به منظور جلوگیری از به وجود آمدن آسیب‌های ساختاری به ساختمان‌های سطحی یا قطع خدمات شهری، بالا زدگی سطح زمین و جابجایی جانبی سازه‌های سطحی یا زیرسطحی مرتبط می‌شود، بنابراین در این روش، فشار نگهداری و به تبع آن فشار تزریق پشت حلقه پوشش بتنی بر اساس حد لازم برای تغییر شکل زمین تعریف می‌شود. شکل ۲ نمونه‌هایی از حالات حدی مختلف مرتبط با محاسبه فشار سینه کار تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نحوه تعادل فشار سینه کار با فشار آب و فشار زمین

[۹]



حالت حدی نهایی: ریزش زمین به داخل تونل و ایجاد یک حفره بسیار بزرگ



حالت حدی سرویس: نشست سطحی بیش از حد که ممکن است منجر به آسیب به سازه‌های سطحی شود

شکل ۲: نمونه‌های از حالت‌های حدی سرویس و نهایی [۱۰]

همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد، فشار سینه کار بر اساس دو حالت حدی به دست می‌آید. بر اساس اینکه خصوصیات خاک و شرایط حفاری، منجر به حالات زه‌کش

حدی سرویس انجام شده است. از این میان می‌توان به تحقیقاتی نظیر کیمورا و میر [۷] و دیماک و میر [۸] اشاره کرد. عدم وجود مدلی مناسب برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی سرویس باعث شد که تحقیقی جامع در این زمینه برای تونل‌های مترو تهران انجام شود. در این زمینه با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Plaxis 3D V20 و همچنین با انجام آنالیزهای اعتبار سنجی و حساسیت و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر نشست سطحی در محدوده‌ی خاک‌های تهران، یک روش جدید برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی سرویس ارائه شده است. این روش مبتنی بر تحلیل آماری نتایج ۸۰ مدل عددی است که محدوده تغییر مقادیر پارامترهای آن‌ها متناسب با محدوده مقادیر پارامترهای خاک تهران تنظیم شده است.

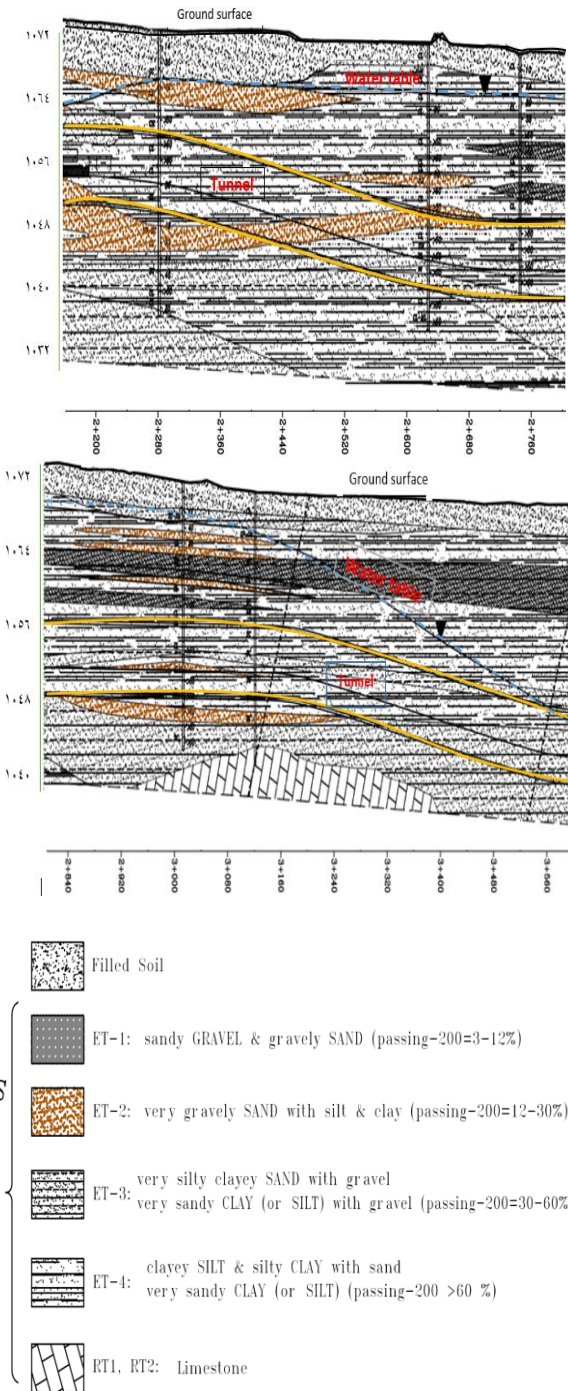
۲- اصول برآورد فشار سینه کار

هدف از ارزیابی پایداری سینه کار تونل، بررسی فشار آب زیرزمینی و فشار زمین در سطح تونل و تحلیل ظرفیت تحمل باربری سینه کار تونل است. در صورتی که ظرفیت تحمل باربری سینه کار تونل کافی نباشد، باید فشار سینه کار اعمال شود. در این حالت، محیط نگهداری باید با فشارهای زمین و آب زیرزمینی مقابله کند تا سینه کار تونل پایدار بماند (شکل ۱). عدم کنترل مناسب فشار سینه کار ممکن است منجر به ریزش سینه کار، ایجاد حفره در سطح زمین، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، نشست سطحی بیش از اندازه و جابجایی‌های جانبی زمین و سازه‌های زیرزمینی شود. در برآورد فشار سینه کار، دو دیدگاه اساسی برای طراحی نگهداری سینه کار وجود دارد که بر اساس دو معیار حالت حدی در نظر گرفته می‌شود:

- حالت حدی سرویس
- حالت حدی نهایی

حالت حدی نهایی، حالت بحرانی جابجایی زمین در موقعیت سینه کار است که منجر به ناپایداری سینه کار و ریزش آن می‌شود. در این روش، در محاسبات فشار نگهداری سینه کار تونل، تغییر شکل‌های زمین در نظر گرفته نمی‌شود و فقط یک فشار حداقلی برای جلوگیری از ریزش سینه کار تونل تعیین می‌شود. روش‌های محاسباتی تحلیلی مختلفی را می‌توان هنگام اتخاذ حالت حدی نهایی استفاده کرد که از جمله می‌توان به روش‌های تحلیلی،

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل، به چهار واحد زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند. موقعیت و گسترش واحدهای خاکی مذکور در مسیر تونل بر روی برش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل نشان داده شده است (شکل ۴).



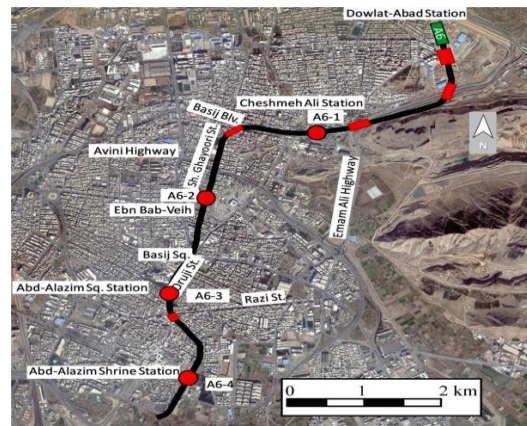
شکل ۴: پروفیل طولی زمین‌شناسی مهندسی توسعه جنوبی

خط ۶ مترو تهران [۱۵]

شده یا زه‌کش نشده شوند، می‌توان به ترتیب از روش‌های محاسبه تنش مؤثر یا تنش کل استفاده کرد. مدل‌های مختلفی برای بررسی هرکدام از این حالات ارائه شده است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها توسط بروئر، پراکتور - وایت و زیزکا توصیف شده‌اند [۱۱-۱۳]. در خاک‌های رسی و در شرایط زه‌کش نشده، عدد پایداری فاکتور اصلی مورد استفاده در ارزیابی فشار سینه‌کار تونل در دو حالت یاد شده است.

۳- معرفی پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران

پروژه تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران یکی از پروژه‌های تونلی مهم به‌واسطه شرایط زمین‌شناسی، موقعیت، طول و ابعاد هندسی آن در شهر تهران است که حفاری آن توسط یک دستگاه تعادلی فشار زمین صورت می‌گیرد. با توجه به عبور مسیر تونل از یک بافت شهری پرجمعیت و قدیمی و ساختمان‌های کوتاه و بلند با کاربردهای تجاری، مسکونی و اداری می‌بایست در زمان حفاری و ساخت به آن توجه بیشتری داشت. تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران به طول تقریبی ۶ کیلومتر از منطقه دولت‌آباد در جنوب تهران شروع شده و پس از عبور از اتوبان امام علی (ع) در طول بلوار بسیج ادامه یافته و پس‌از آن در امتداد خیابان غیوری (جاده سوم شهر ری) امتداد می‌یابد. شروع حفاری تونل به‌صورت مکانیزه (TBM) از محدوده ایستگاه A6 بوده و در طول مسیر از ۴ ایستگاه (A6-1-A6-4) و همچنین از زیر اتوبان امام علی (ع) (دومرتبه) عبور می‌نماید. موقعیت مسیر تونل بر روی تصویر ماهواره‌ای و نقشه کاداستر تهران در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۳: موقعیت مسیر تونل بر روی تصویر ماهواره‌ای کاداستر

تهران [۱۴]

است. خلاصه‌ای از پارامترهای آماری برای نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های مذکور (به تفکیک هر واحد) در جدول (۱) ارائه شده است.

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (لوگ گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (برای واحدهای خاکی) [۱۴]

γ (g/cm ³)		ν	E (Mpa)	ϕ (degree)		C (kg/cm ²)		واحد زمین‌شناسی مهندسی
Dry	Nat			اشباع	رطوبت طبیعی	اشباع	رطوبت طبیعی	
۱٫۹۵	۲٫۰۵	۰٫۳	۵۰-۶۰	۳۷-۴۰	۳۸-۴۲	۱۲-۱۷	۱۹-۲۴	ET-۱
۱٫۹۰	۱٫۹۵	۰٫۳۲	۵۰-۶۰	۳۱-۳۷	۳۵-۴۰	۲۰-۲۷	۳۰-۳۵	ET-۲
۱٫۹۰	۱٫۹۵	۰٫۳۲	۴۵-۵۵	۲۵-۳۰	۲۲-۲۵	۲۸-۳۵	۳۵-۴۰	ET-۳
۱٫۷۵	۱٫۸۰	۰٫۳۵	۴۰-۵۰	۱۵-۲۰	۱۸-۲۲	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	ET-۴

C: چسبندگی (kg/cm²)، E: مدول الاستیسیته (Mpa)، ϕ : زاویه اصطکاک (Degree)، ν : ضریب پواسون، γ : وزن مخصوص خاک (g/cm³)

افزایش سرعت مدل‌سازی، تنها نیمی از مدل موردنظر، شبیه‌سازی شد. ابعاد مدل به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده تا ضمن جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج به‌دست‌آمده و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات گردد. ابعاد مدل در راستای محور X، 5D (D قطر تونل) و در راستای محور Y (راستای حفاری تونل) بزرگ‌تر از 5D و در راستای محور Z با توجه به میزان روباره در نظر گرفته شده است. از این‌رو این مدل دارای ابعاد طولی (در جهت Y) ۱۰۰ متر، ارتفاع مدل (در جهت Z) ۴۰ متر و امتداد عرضی (در جهت X) ۵۰ متر است؛ که حداقل ۱۰ برابر شعاع تونل است. (شکل ۵)

وضعیت لایه‌بندی، جنس لایه‌ها، ابعاد هندسی مدل سه‌بعدی اجزا محدود مقطع نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. در مقطع موردنظر تونل در عمق ۳۲٫۴ متری از سطح زمین با روباره ۲۳٫۳ متر قرار دارد. قطر تونل در زمان حفاری نیز در حدود ۹٫۱۹ متر در نظر گرفته شده است.

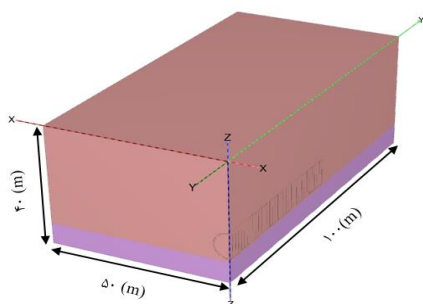
جهت ایجاد شرایط مرزی، گره‌ها در هر طرف مدل به‌صورت افقی ثابت شدند جهت (x و y) در صفحات x-z و y-z و یعنی (y = 0, y = 100, x = 0, x = 50)، گره‌هایی که در پایه مدل قرار دارند (z = -40) در جهت عمودی (z) ثابت شدند. علاوه بر این، هیچ جابجایی افقی در صفحه x-z و y-z در مرزهای مش مجاز نیست. بار سطحی در این مقطع صفر در نظر گرفته شده است. همچنین تنش‌های برجای قائم در مدل به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حال سکون ($k = 1 - \sin\phi$) در نظر گرفته شده است.

۴- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش از نرم‌افزار Plaxis 3D V20 برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است. در مراحل مدل‌سازی به‌منظور نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به واقعیت، فرآیند ساخت گام‌به‌گام حفاری تونل رعایت شده است. پیشروی تونل و جابجا شدن دستگاه TBM در مدل وارد شده است. در زمان نصب سگمنت‌ها، دستگاه TBM ثابت باقی می‌ماند. بعد از اینکه مرحله نصب سگمنت به پایان رسید، مرحله حفاری دوباره آغاز می‌شود.

به‌منظور بررسی نشست زمین در زمان عملیات حفاری تونل، بر اساس پروفیل زمین‌شناسی مهندسی توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران و نیز مشخصات ژئوتکنیکی خاک در مسیر تونل، کیلومتر ۳۳۲۰ به‌عنوان یکی از مقاطع در مسیر تونل انتخاب شد. از مهم‌ترین دلایل انتخاب این مقطع جهت تحلیل و بررسی نشست سطح زمین، می‌توان به وجود ضعیف‌ترین لایه زمین‌شناسی مسیر (ET-4)، قرار گرفتن تونل در زیر تراز آب زیرزمینی، عمق تونل (روباره نسبتاً زیاد) و غیره اشاره کرد. از این‌رو در مدل‌سازی عددی، محیط خاکی به‌صورت دو لایه خاکی (ET-3 و ET-4)، همسانگرد با رفتار الاستو پلاستیک و معیار خاک سخت شونده در نظر گرفته شد. آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نسبت به سطح زمین در تراز ۱۴٫۲۴ متری قرار دارد که در مدل‌سازی به‌صورت فشار آب حفره‌ای در نظر گرفته شده است. به جهت شرایط تقارن محوری محیط و سازه دایره‌ای شکل تونل و به‌منظور کاهش محاسبات و

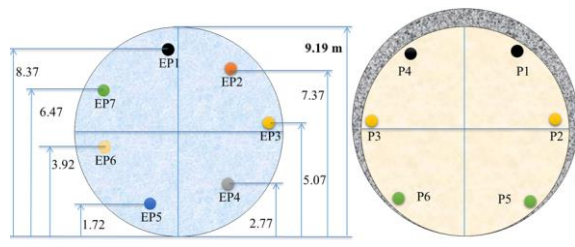
در فاز اول، قبل از تعریف فازهای حفاری، مدل به تعادل استاتیکی می‌رسد. سپس المان صفحه اطراف تونل (سپر دستگاه حفاری) فعال می‌شود. به منظور پایداری سینه‌کار تونل، فشار EPB نیز در صفحه جلوی قسمت حفاری شده، به صورت یک فشار گرادینانی در جهت منفی محور Z وارد می‌شود. در فاز دوم حفاری تونل، دوباره المان صفحه که بیانگر سپر فشار EPB است را فعال می‌کنیم. این بار هم فشار EPB به صفحه جلویی وارد شده و فشار سینه‌کار هم همانند فاز اول وارد می‌شود. در این مرحله ۶ قسمت اول سپر دستگاه ماشین حفاری TBM مدل‌سازی می‌گردد (هر قسمت شامل ۱/۵ متر که طول سپر ۹ متر است). بدین ترتیب پس از حفاری ۹ متر از مسیر تمام دستگاه حفاری داخل تونل قرار می‌گیرد. از این مرحله به بعد، عملیات سگمنت گذاری و تزریق گروت انجام می‌شود. در فاز سوم همانند فازهای قبلی، ۱/۵ متر حفاری می‌شود و فشار EPB به سینه‌کار جلوی سپر اعمال می‌شود. در فاصله بین سگمنت‌ها و سپر، یک قطعه خالی به ابعاد یک رینگ سگمنتی به عرض ۱/۵ متر باقی گذاشته می‌شود که برای مدل‌سازی فشار تزریق و نیروی جک‌ها از آن استفاده می‌شود. در نرم‌افزار PLAXIS 3D V20 این فشار به صورت Surface Load بر پیرامون تونل و به صورت یک فشار متغیر افزایشی از تاج تا کف تونل اعمال می‌شود. در فاز چهارم حفاری، خصوصیات تمام صفحات، همگی به اندازه یک برش (۱/۵ متر) به سمت جلو منتقل می‌شوند. در این قسمت المان‌های سگمنتی فعال می‌شود و خصوصیات مواد سگمنتی اختصاص داده می‌شود. در این مرحله فشار جک‌ها نیز مدل می‌شوند. این فشار به آخرین ردیف سگمنت گذاری شده وارد می‌شود. این نیرو به صورت افقی و در جهت مثبت Z اعمال می‌شود و حکم نیروی پیشران را دارد. مراحل مدل‌سازی و حفاری تونل برای ۵۰ متر حفاری در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: ابعاد مدل و لایه‌بندی مقطع ۳۳۲۰

طول المان‌های مدل در امتداد حفاری تونل برابر با عرض یک رینگ (حلقه) نگهداری به میزان ۱/۵ متر لحاظ شده است.

در مدل‌سازی، طول سپر برابر ۹ متر و معادل ۶ رینگ در نظر گرفته شده است. نحوه توزیع فشار در سینه‌کار تونل از بالا به پایین به صورت بار گسترده خطی (توزیع مثلی) با وزن مخصوص ۱۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب، افزایش می‌یابد که کمترین مقدار فشار در تاج تونل اعمال می‌شود و بیشترین مقدار آن در کف تونل اعمال می‌شود. فشار گروت نیز همانند فشار سینه‌کار بر اساس وزن مخصوص گروت (۱۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب) از تاج به کف تونل به صورت بار گسترده خطی افزایش می‌یابد. نحوه محاسبه فشار سینه‌کار و فشار تزریق مربوط به مقطع ۳۳۲۰ در رابطه‌های (۱) و (۲) آورده شده است.



شکل ۵: محل سنسورهای مربوط به فشار سینه‌کار و فشار تزریق

$$\begin{aligned} EP_{tunnel\ crown} &= EP1 - h \times \gamma \\ &= 115 - (9.19 - 8.37) \\ &\quad * 16 = 101.9 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\gamma = 16 \frac{kN}{m^3}$$

EP1: فشار سینه‌کار در نقطه ۱ (kPa)، h: اختلاف بین ارتفاع تاج تونل و سنسور فشار سینه‌کار در نقطه ۱ (m)، γ : وزن مخصوص خاک (kg/m^3)، ($EP_{tunnel\ crown}$): فشار سینه‌کار در تاج تونل (kPa).

$$\begin{aligned} P_{tunnel\ crown} &= P1 - h \times \gamma \\ &= 230 - (9.19 - 8.37) \\ &\quad \times 12 = 220.2 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (2)$$

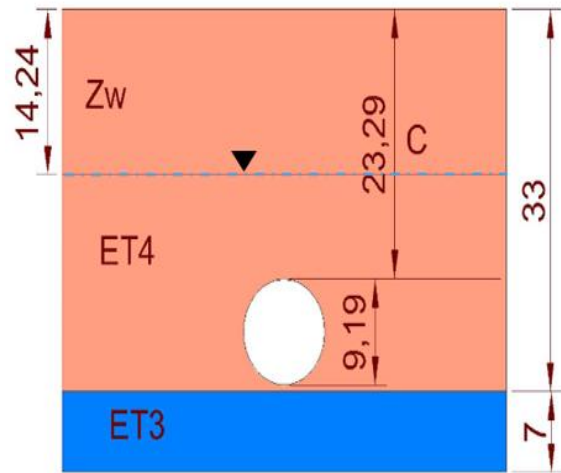
$$\gamma = 12 \frac{kN}{m^3}$$

P1: فشار تزریق در نقطه ۱ (kPa)، h: اختلاف بین ارتفاع تاج تونل و سنسور فشار تزریق در نقطه ۱ (m)، γ : وزن مخصوص خاک (kg/m^3)، $P_{tunnel\ crown}$: فشار تزریق در تاج تونل (kPa).



شکل ۸: نقاط نشست سطحی زمین در امتداد محور تونل [۱۶]

این پین‌ها قبل از رسیدن TBM به نقطه مورد بررسی (به‌عنوان مثال ۵۰-۱۰۰ متر جلوی سینه‌کار) نصب شده و قرائت آن‌ها آغاز می‌شود و کار قرائت نشست سطحی تا فاصله طولانی پس از عبور TBM تا زمانی که مقادیر قرائت‌شده به یک ثبات نسبی برسد، ادامه پیدا می‌کند. دقت اندازه‌گیری با ابزار نقشه‌برداری، ۰/۰۱ میلی‌متر است. پروفیل نشست‌های قرائت‌شده در ایستگاه‌های نشست سطحی (ابزار دقیق) به همراه پروفیل‌های نشست به‌دست‌آمده در مدل‌سازی عددی به‌صورت نمودار گروهی در شکل ۹ و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و ابزاربندی و اطلاعات توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران برای ۸ مقطع برای مقایسه در جدول ۲ آورده شده است. همچنین مقادیر نشست واقعی و پیش‌بینی‌شده در دو حالت زه‌کش شده و زه‌کش نشده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. در این تحقیق، مقاطعی که مقادیر نشست بالای ۸ میلی‌متر دارند را در حالت زه‌کش شده و مقاطعی که مقادیر نشست آن‌ها کمتر از ۸ میلی‌متر می‌باشند در حالت زه‌کش نشده مدل‌سازی شده‌اند.



شکل ۷: لایه‌بندی و شرایط زمین‌شناسی کیلومتر ۳۳۲۰

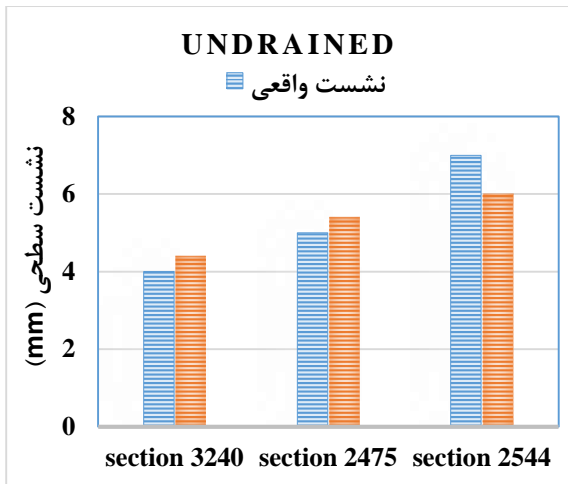
۵- اعتبار سطحی

به‌منظور اعتبار‌سنجی و بررسی صحت روند مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اجزا محدود، از اطلاعات توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران و همچنین از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است.

برای انجام اعتبار‌سنجی، ۸ مقطع از خط ۶ توسعه جنوبی مترو تهران به‌عنوان مقطع‌های مهم برای اعتبار سطحی انتخاب شده است. این مقاطع بر اساس موارد زیر انتخاب شده‌اند:

- روبراه حداکثر و حداقل
- ارتفاع آب زیرزمینی حداقل و حداکثر
- شرایط سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود در محدوده تونل

مقادیر کمینه و بیشینه بارهای وارده به پوشش تونل در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، نشست سطح زمین با استفاده از پین‌های نقشه‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. این پین‌ها در امتداد محور تونل بر روی سطح زمین با حداقل فاصله ۱۵-۱۰ متر برای نقاط منفرد و ۳۰-۶۰ متر برای آرایه‌های ۳ یا ۵ نقطه‌ای (عمود بر محور تونل) قرار گرفته‌اند (شکل ۸).



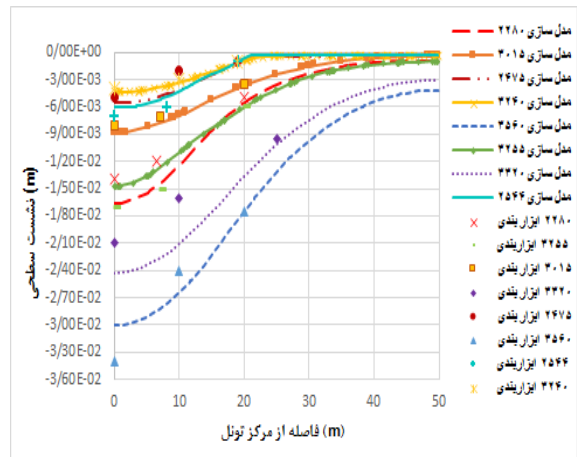
شکل ۱۱: چارت مربوط به مقادیر نشست پیش‌بینی شده و نشست واقعی در حالت خاک زه‌کش نشده

۶- تحلیل حساسیت

در این پژوهش، برای به دست آوردن پارامترهای مهمی که بر نشست سطحی تأثیر می‌گذارند، آنالیز حساسیت صورت گرفته است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر خاک‌های تهران و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر نشست سطحی، در این پروژه پارامترهای تأثیرگذار بر نشست سطحی به سه دسته زیر تقسیم شده است:

- پارامترهای مکانیکی خاک
 - مدول الاستیسیته خاک (E)
 - چسبندگی (C)
 - زاویه اصطکاک (φ)
- پارامترهای دستگاه حفاری مکانیزه (TBM)
 - فشار سینه‌کار
 - فشار تزریق
- پارامترهای هندسی
 - ارتفاع سطح آب زیرزمینی
 - ارتفاع روباره

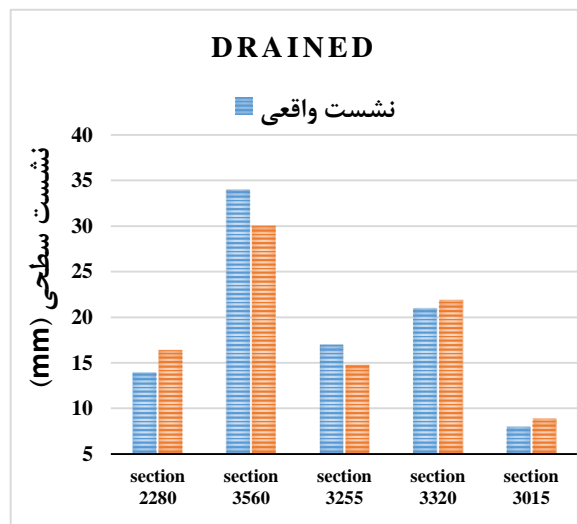
همچنین آنالیز حساسیت در دو حالت خاک زه‌کش شده و زه‌کش نشده صورت گرفته است. تحلیل حساسیت صورت گرفته در این پروژه به این صورت بوده است که یک مدل، به‌عنوان مدل پایه برای دو حالت زه‌کش شده و زه‌کش نشده در نظر گرفته و مدل‌سازی شده است و سایر مدل‌های ساخته‌شده برای تحلیل حساسیت و تغییر پارامترها نسبت به مدل پایه صورت گرفته است.



شکل ۹: پروفیل نشست‌های قرائت‌شده در ایستگاه‌های نشست سنجی (ابزار دقیق) به همراه پروفیل‌های عرضی نشست به‌دست آمده در مدل‌سازی عددی برای مقاطع اعتبارسنجی

جدول ۲: نتایج مقاطع اعتبار سنجی توسعه جنوبی خط ۶ مترو

مقطع	نشست سطحی (mm)		مقدار خطا (mm)
	مدل‌سازی	واقعی	
۲۲۸۰	۱۶٫۵	۱۴	۲٫۵
۲۴۷۵	۵٫۴	۵	۰٫۴
۲۵۴۴	۶	۷	۱
۳۰۱۵	۸٫۹	۸	۰٫۹
۳۲۴۰	۴٫۳۵	۴	۰٫۳۵
۳۲۵۵	۱۵	۱۷	۲
۳۳۲۰	۲۴	۲۱	۳
۳۵۶۰	۳۰	۳۴	۴



شکل ۱۰: چارت مربوط به مقادیر نشست پیش‌بینی شده و نشست واقعی در حالت خاک زه‌کش شده

۶-۱- حالت زهکش شده

در حالت زهکش شده، مدل به‌عنوان تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده و ساخته شده است. در جدول ۳ مدل پایه مربوط به حالت زهکش شده آورده شده است.

جدول ۳: اطلاعات مربوط به مدل پایه در حالت خاک زهکش شده

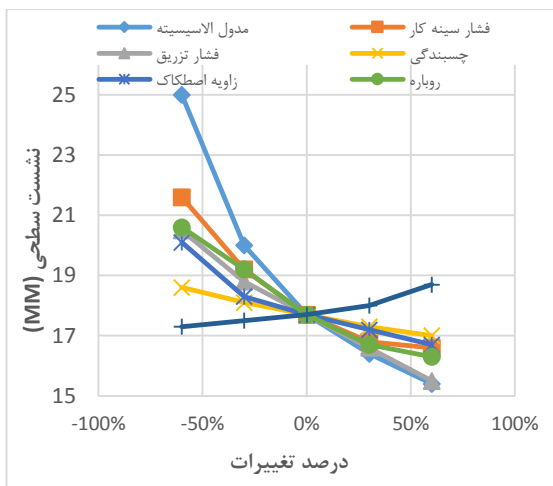
پارامتر	مقدار
EP (kPa)	۱۵۰
P (kPa)	۲۲۵
E (MPa)	۳۵
C (kPa)	۳۰
ϕ	۲۵
C (m)	۲۰
Hw (m)	۱۴
S (mm)	۱۷٫۷

پارامتر	مقدار
EP (kPa)	۱۰۰
P (kPa)	۱۵۰
E (MPa)	۴۲
C (kPa)	۴۰
ϕ	۲۰
C (m)	۱۹
Hw (m)	۱۰
S (mm)	۵٫۱

که در آن C: چسبندگی (kPa)، E: مدول الاستیسیته (MPa)، ϕ : زاویه اصطکاک (Degree)، EP: فشار سینه کار (kPa)، P: فشار تزریق (kPa)، C: ارتفاع روباره (m)، Hw: سطح ارتفاع آب زیرزمینی (m)، S: نشست سطحی (mm). نمودارهای مربوط به تأثیر تمام پارامترهای آنالیز حساسیت در دو حالت زهکش شده و زهکش نشده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

که در آن C: چسبندگی (kPa)، E: مدول الاستیسیته (MPa)، ϕ : زاویه اصطکاک (Degree)، EP: فشار سینه کار (kPa)، P: فشار تزریق (kPa)، C: ارتفاع روباره (m)، Hw: سطح ارتفاع آب زیرزمینی (m)، S: نشست سطحی (mm) است.

تمامی پارامترها به‌صورت یک‌به‌یک با نشست سطحی آنالیز شده‌اند، نحوه تغییرات به این صورت است که با ثابت گرفتن سایر پارامترهای تحلیل حساسیت، مقدار هر یک از پارامترهای مورد بررسی نسبت به مقدار مدل پایه، ۳۰ و ۶۰ درصد بیشتر و ۳۰ و ۶۰ درصد کمتر در نظر گرفته شده است و رابطه‌ی هر یک از آن‌ها با نشست سطحی زمین بررسی شده است.



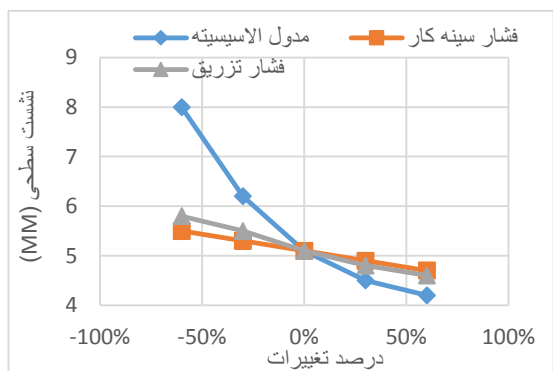
شکل ۱۲: تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات پارامترهای تحلیل حساسیت (حالت زهکش شده)

۶-۲- حالت زهکش نشده

با توجه به بررسی پارامترهای مهم در تحلیل حساسیت در حالت زهکش شده، در این بخش فقط ۳ پارامتر مدول الاستیسیته، فشار تزریق، فشار سینه کار که تأثیر زیادی بر نشست سطح زمین داشته‌اند به‌عنوان پارامترهای اساسی برای تحلیل حساسیت در حالت زهکش نشده انتخاب شده‌اند. در حالت زهکش نشده، مدل برای تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده و ساخته شده است.

در جدول ۴ مدل پایه مربوط به حالت زهکش نشده آورده شده است.

جدول ۴: اطلاعات مربوط به مدل پایه در حالت خاک زهکش نشده



شکل ۱۳: تغییرات نشست سطح زمین در اثر تغییرات پارامترهای تحلیل حساسیت (حالت زهکش نشده)

نقاط مربوط به مقادیر پارامترهای مختلف به صورت توزیع یکنواخت تری باشد. در ادامه با استفاده از آنالیز رگرسیون ساده، روابط رگرسیون بین عدد پایداری محاسبه در حالت زهکش شده و زهکش نشده و پارامترهای ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. هدف از آنالیز رگرسیون ساده، شناسایی پارامترهای مهم تأثیرگذار بر روی عدد پایداری است. بر این اساس، در حالت زهکش شده، پارامترهای مدول یانگ، ارتفاع سطح آب زیرزمینی، افت حجمی، به عنوان پارامترهای تأثیرگذار انتخاب شده‌اند. در حالت زهکش نشده، مدول یانگ، فشار تزریق، افت حجمی، به عنوان پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شد. در حالت زهکش شده، برای بررسی اثر ترکیبی پارامترهای مؤثر بر روی پارامتر هدف (عدد پایداری) از آنالیز رگرسیون چندگانه استفاده شده است. در حالت زهکش نشده، برای اصلاح مقادیر خطاهای برآورد شده، از لگاریتم پارامترها در تحلیل‌ها استفاده شده است. با این روش یک رابطه غیرخطی به دست می‌آید. در این مطالعه از نرم‌افزار تحلیل آماری Minitab استفاده شد.

در حالت زهکش شده، از پارامترهایی تحلیل حساسیت به عنوان پارامترهای شاخص برای تحلیل آماری استفاده شده است. در این مطالعه پارامتر هندسی (ارتفاع سطح آب زیرزمینی)، پارامتر مکانیکی خاک (مدول الاستیسیته) و پارامتر عملیاتی ماشین TBM (فشار تزریق) و پارامتر نشست سنجی (افت حجمی) در چارت‌های مختلف به صورت یک‌به‌یک نسبت به عدد پایداری متناظر (N') بررسی شده است و در مرحله آخر از آنالیز رگرسیون چندگانه برای بررسی پارامترهای مؤثر بر پارامتر هدف (N') استفاده شد.

نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه در رابطه (۳) و جدول ۵ ارائه شده است.

$$N' = -1.18 + 0.417 h_w + 7.26 V_L - 0.0751 E + 0.00285 P \quad R^2 = 65.5\% \quad (3)$$

جدول ۵: ضرایب رگرسیون به دست آمده از Minitab

پارامتر	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت مدل	-۱٫۱۸	۳٫۴۵	-۰٫۳۴	۰٫۷۳۴	-
V_L	۷٫۲۶	۲٫۶۵	۲٫۷۴	۰٫۰۰۹	۳٫۱۷
h_w	۰٫۴۱۷	۰٫۱۸۶	۲٫۲۴	۰٫۰۳	۲٫۰۴
E	-۰٫۰۷۵۱	۰٫۰۴۵۸	-۱٫۶۴	۰٫۱۰۷	۴٫۳۱
P	۰٫۰۰۲۸۵	۰٫۰۰۶۵	۰٫۴۴	۰٫۶۶۲	۳٫۰۹

در شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات به صورت درصد و به صورت مثبت و منفی در پارامترها اعمال شده است و نقطه صفر درصد مربوط به مدل پایه است. تفسیر نمودارها بر اساس تغییرات مثبت و منفی صورت می‌گیرد.

تغییرات مثبت: در شکل ۱۲ در سمت راست نمودار (تغییرات مثبت)، حساس‌ترین پارامتر و بیشترین شیب به ترتیب مربوط به مدول الاستیسیته، سطح آب زیرزمینی و فشار تزریق و فشار سینه‌کار است و همچنین کمترین شیب (حساسیت) مربوط به چسبندگی و فشار سینه‌کار است.

در شکل ۱۳ در سمت راست نمودار (تغییرات مثبت)، حساس‌ترین پارامتر مربوط به مدول الاستیسیته و فشار تزریق و کمترین حساسیت را فشار سینه‌کار دارد.

تغییرات منفی: همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، حساس‌ترین پارامتر به ترتیب مربوط به مدول الاستیسیته، فشار تزریق، فشار سینه‌کار، زاویه اصطکاک و روباره است. به این دلیل که این پارامترها شیب بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارند. همچنین سطح آب زیرزمینی و سپس زاویه اصطکاک حساسیت کمتری نسبت به سایر پارامترها دارند.

در حالت زهکش نشده شکل ۱۳، بیشترین حساسیت (شیب نمودار) همان‌طور که در بخش‌های قبلی بررسی شد مربوط به مدول الاستیسیته است. کمترین حساسیت نیز مربوط به پارامتر فشار سینه‌کار است.

۷- توسعه فرمول تجربی جدید برای برآورد فشار سینه‌کار در حالت حدی سرویس

هدف اصلی در این مقاله، ارائه فرمول‌های تجربی برآورد فشار سینه‌کار بر اساس حالت حدی سرویس است. به همین دلیل از یک سری پارامترهای مکانیکی خاک (شامل مدول یانگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک، مقاومت برشی زهکش نشده)، پارامترهای عملیاتی ماشین TBM (شامل فشار سینه‌کار، فشار تزریق و...)، پارامترهای هندسی (شامل ارتفاع سطح آب زیرزمینی، ارتفاع روباره) و همچنین پارامترهای نشست سنجی (شامل نشست حداکثر و افت حجمی) استفاده شده است. علاوه بر استفاده از نتایج مدل‌سازی‌های مربوط به تحلیل حساسیت انجام‌شده، تعداد دیگر مدل خارج از تحلیل حساسیت ساخته شد تا توزیع

که در آن P_C : فشار در تاج تونل (kPa)، γ : چگالی کل خاک ($\frac{kg}{m^3}$)، Z_0 : عمق محور تونل (m)، q : سربار (N' ، (m) عدد پایداری متناظر c' : چسبندگی (kPa)، ϕ' : زاویه اصطکاک، q' : مقاومت فشاری تک‌محوره محاسباتی (kPa) است.

در حالت زه‌کش نشده، مانند حالت زه‌کش شده از پارامترهایی تحلیل حساسیت به‌عنوان پارامترهای شاخص برای تحلیل آماری استفاده شده است. پارامترهای هندسی، مکانیکی خاک و پارامترهای عملیاتی ماشین TBM در چارت‌های مختلف به‌صورت یک‌به‌یک نسبت به عدد پایداری (N) بررسی شده است و در مرحله آخر از آنالیز رگرسیون چندگانه برای بررسی پارامترهای مؤثر بر پارامتر هدف (N) استفاده شده است. نتایج تحلیل رگرسیون ساده مربوط به این حالت در رابطه‌های (۷)، (۸) و (۹) و جدول‌های ۷، ۸ و ۹ آورده شده است. لازم به ذکر است در این حالت مقادیر به‌دست‌آمده P-Value برای رگرسیون چندگانه بیشتر از ۰/۰۵ بوده است. از این‌رو رابطه رگرسیون ساده چندگانه ذکر نشده است و به‌جای آن روابط رگرسیون ساده عدد پایداری و تک‌تک پارامترها ارائه شده است. بدین ترتیب سه فرمول مجزا برای عدد پایداری به دست آورده شده است. همچنین برای پیدا کردن مدل مناسب‌تر و اصلاح مقادیر خطاهای برآورد شده، از Ln پارامتر عدد پایداری استفاده شده است (رابطه‌های ۷، ۸ و ۹).

$$\ln(N) = 0.861 + 6.18 V_L \quad R^2 = 48\% \quad (7)$$

که در آن V_L : افت حجمی، N : عدد پایداری است.

جدول ۷: ضرایب رگرسیون به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Minitab

پارامتر	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت مدل	۰,۸۶۱	۰,۱۳۴	۶,۴۴	۰,۰۰۰	-
V_L	۶,۱۸	۱,۱۵	۵,۳۹	۰,۰۰۰	۱

$$\ln(N) = 2.362 - 0.004282 P \quad R^2 = 66\% \quad (8)$$

که در آن V_L : افت حجمی و P : فشار تزریق (kPa) است.

جدول ۸: ضرایب رگرسیون به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Minitab

پارامتر	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت مدل	۲,۳۶۲	۰,۱۱۱	۲۱,۳۶	۰,۰۰۰	-
P	-۰,۰۰۴۲۸۲	۰,۰۰۰۵۴۶	-۷,۸۴	۰,۰۰۰	۱

که در آن V_L : افت حجمی زمین، h_w : ارتفاع سطح آب زیرزمینی (m)، N' : عدد پایداری متناظر، E : مدول الاستیسیته (MPa)، P : فشار تزریق (kPa)، VIF : عامل تورم واریانس، P-Value: مقدار احتمال، Constant: عدد ثابت است.

هدف اصلی در این مطالعه برآورد عدد پایداری و به دست آوردن رابطه‌ای بین عدد پایداری و سایر پارامترها است؛ اما با توجه به اینکه مقدار ضریب تعیین رابطه (۳) مقدار ۶۵ درصد است و مقدار P-Value برای ضریب ثابت و دو پارامتر دیگر بیشتر از ۰/۰۵ به دست آمده است، برای پیدا کردن مدل مناسب‌تر، از عدد پایداری ($N'^{0.5}$) به‌عنوان پارامتر هدف استفاده شده است.

نتایج نهایی تحلیل‌های رگرسیون چندگانه، برای حالت زه‌کش شده در رابطه (۴) و جدول ۶ ارائه شده است.

$$N'^{0.5} = 1.937 + 0.0583 h_w + 0.833 V_L - 0.01931 E \quad R^2 = 68.4\% \quad (4)$$

که در آن V_L : افت حجمی، N' : عدد پایداری متناظر، h_w : ارتفاع سطح آب زیرزمینی (m)، E : مدول الاستیسیته (MPa) است.

جدول ۶: ضرایب رگرسیون به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Minitab

پارامتر	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت مدل	۱,۹۳۷	۰,۵۵۱	۳,۵۱	۰,۰۰۱	-
h_w	۰,۵۸۳	۰,۰۲۹۷	۱,۹۷	۰,۰۵۵	۲
E	-۰,۰۱۹۳۱	۰,۰۰۵۶۲	-۳,۴۴	۰,۰۰۱	۲,۵
V_L	۰,۸۳۳	۰,۰۴۲۱	۱,۹۸	۰,۰۵۳	۳,۰۹

جدول ۶ نشان می‌دهد که P-Value برای ثابت مدل و اکثر پارامترها، عددی برابر و کمتر از ۰/۰۵ است که مقدار مناسبی است. همچنین مقدار ضریب تعیین (R^2) در رابطه (۸) برابر ۶۸ درصد به دست آمده است که نشان‌دهنده ضریب همبستگی مناسبی است.

N' یانگر عدد پایداری در حالت زه‌کش شده است. فرمول محاسبه عدد پایداری در حالت زه‌کش شده در رابطه (۵) آورده شده است. رابطه (۶) نیز بیانگر مقاومت فشاری تک‌محوره محاسباتی خاک است.

$$N' = \frac{(\gamma Z_0 + q - P_C)}{\frac{q'}{2}} \quad (5)$$

$$q' = \frac{2 \times c' \times \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (6)$$

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق ارائه روابط جدید برای برآورد فشار سینه‌کار در تونل‌سازی شهری با TBM بر اساس حالت حدی سرویس و با استفاده از مدل‌سازی عددی، برای کنترل افت حجمی یا نشست‌های سطحی در یک حد مجاز است. در این پژوهش از اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی کمک گرفته شده است. درنهایت با انجام آنالیز تحلیل حساسیت بر روی مقادیر پارامترهای تأثیرگذار (شامل پارامترهای عملیاتی و زمین‌شناسی) بر نشست سطحی در محدوده خاک‌های تهران و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری (Minitab) در دو حالت خاک زه‌کش شده و خاک زه‌کش نشده، فرمول‌های تجربی جدید برای برآورد فشار سینه‌کار در حالت حدی سرویس ارائه شده است. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱. در اعتبار‌سنجی مدل‌سازی عددی، در مقاطع زمین‌شناسی که نشست آن‌ها کمتر از ۸ میلی‌متر است، مدل‌سازی در حالت زه‌کش نشده، نتایج منطبق‌تر و مناسب‌تری با نشست واقعی به‌دست‌آمده از اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران ارائه می‌دهد.
۲. در مقاطع زمین‌شناسی که نشست آن‌ها بیشتر از ۸ میلی‌متر است، مدل‌سازی در حالت زه‌کش شده، نتایج نزدیک‌تر و منطبق‌تر با نشست واقعی به‌دست‌آمده از اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران ارائه می‌دهد.
۳. در آنالیز حساسیت انجام‌شده در حالت زه‌کش شده، بیشترین حساسیت و تأثیرگذاری بر نشست سطحی مرتبط با پارامترهای مدول الاستیسیته، سطح آب زیرزمینی، فشار تزریق و فشار سینه‌کار است و پارامتر چسبندگی کمترین تأثیرگذاری را بر نشست سطحی دارد.
۴. در رابطه نهایی به‌دست‌آمده در حالت زه‌کش شده، با افزایش مقدار افت حجمی و ارتفاع سطح آب زیرزمینی، مقدار عدد پایداری (N') افزایش می‌یابد ولی عدد پایداری با افزایش مقدار مدول یانگ، کاهش پیدا می‌کند و این دو باهم رابطه معکوس دارند.

$$\ln(N) = 2.0904 - 0.01152 E \quad R^2 = 66\% \quad (9)$$

که در آن V_L : افت حجمی، E : مدول الاستیسیته (Mpa) است.

جدول ۹: ضرایب رگرسیون به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Minitab

پارامتر	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
ثابت مدل	۲,۰۹۰۴	۰,۰۷۸۸	۲۶,۵۳	۰,۰۰۰	-
E	-۰,۰۱۱۵۲	۰,۰۰۱۴۷	-۷,۸۲	۰,۰۰۰	۱

عدد پایداری در حالت زه‌کش نشده به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$N = \frac{(\gamma Z_0 + q - P_c)}{C_u} \quad (10)$$

که در آن P_c : فشار در تاج تونل (kPa)، γ : چگالی کل خاک ($\frac{kg}{m^3}$)، Z_0 : عمق محور تونل (m)، q : سربار (m)، C_u : مقاومت برشی زه‌کش نشده (kPa)، N : اندیس پایداری سینه‌کار است.

در این تحقیق از پارامترهای مقیاس‌بندی شده عدد پایداری و افت حجمی (N و V_L) استفاده شده است. همان‌گونه که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است، عدد پایداری، تابعی از پارامتر فشار سینه‌کار است، به همین دلیل با استفاده از فرمول عدد پایداری و ارتباط بین این پارامتر و سایر پارامترهای یادشده، می‌توان فشار سینه‌کار را به‌صورت تحلیل معکوس برآورد کرد.

به‌منظور تحقق حالت حدی سرویس، می‌توان در این معادلات، افت حجمی معینی یا نشست سطحی معینی را برای ارزیابی عدد پایداری و فشار سینه‌کار موردنیاز در نظر گرفت. به‌عنوان مثال با انتخاب مقدار نشست سطحی ۱۰ میلی‌متر، با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان مقدار افت حجمی را محاسبه کرد. سپس عدد پایداری و به دنبال آن فشار سینه‌کار از رابطه‌های (۴) (در حالت زه‌کش شده) یا (۷)، (۸) و (۹) (در حالت زه‌کش نشده) برآورد می‌شود.

$$V_L = \frac{i S_{max}}{0.313 D^2} \times 100 \quad (11)$$

که در آن V_L : افت حجمی، i : پارامتر عرض منحنی نشست، S_{max} : نشست سطحی حداکثر (mm)، D : قطر تونل (m) است.

- [6] Ebrahim.farrokh, 2019, report on the executive arrangements for starting drilling in residential area in the southern development project of Tehran metro line 6, bahrooi engineering company of Tehran [in Persian]
- [7] Kimura, T., Mair, R.J. 1981. "Centrifugal testing of model tunnels in soft clay". In. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 15 –19 June 1981. Rotterdam. Balkema, pp. 319–22.
- [8] Dimmock, P.S., Mair, R.J. 2007. "Estimating volume loss for open-face tunnels in London clay". Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Geotechnical Engineering*, UK, vol. 160, Issue GE1, pp. 13-22
- [9] Herrenknecht, M., Thewes, M., Budach, Ch. 2011. "The development of earth pressure shields. from the beginning to the present". *Geomechanics and Tunnelling*, No. 1, pp. 11-35.
- [10] Shirlaw, J.N., 2012. "Setting operating pressures for TBM tunneling". *Geotechnical Aspects of Tunnelling for Infrastructure Development*, Hong Kong, pp. 7-28.
- [11] Broere, W. 2001. "Tunnel face stability and new CPT applications". *PhD Thesis*, Delft University.
- [12] Proctor, R.V., White, T.L. 1977. *Earth Tunnelling with Steel Supports*. Commercial Shearing and Stamping Co, Youngstown, 247 p.
- [13] Zizka, Z., Thewes, M. 2016. *Recommendations for face support pressure calculations for shield tunnelling in soft ground*, German Tunnelling Committee, ITA-AITES.
- [14] cyber international company 2016, geological and geological engineering report [in Persian]
- [15] a.bagheri, a.dehqhan., k.ahangari, reporting the effect of operational parameters affecting ground subsidence in drilling with ground pressure balance device, south development tunnel of Tehran metro line 6, 2019 [in Persian]
- [16] cyber international company, geological report on the southern development project of Tehran metro line 6, 2017 [in Persian]
۵. در حالت زه‌کش نشده، در رابطه نهایی از تابع غیرخطی برای برآورد عدد پایداری (N) استفاده شده است. در نهایت از رابطه یک‌به‌یک عدد پایداری با سایر پارامترها استفاده شد و سه فرمول مجزا برای عدد پایداری به دست آمد.
۶. در این تحقیق، یک فرمول تجربی جدید برای برآورد عدد پایداری سینه‌کار با استفاده از روش تحلیلی رگرسیون چندگانه در حالت زه‌کش شده به دست آورده شده است. ضریب تعیین این فرمول تجربی برای حالت زه‌کش شده برابر با ۶۸ درصد است. همچنین سه فرمول برای برآورد عدد پایداری با استفاده از رگرسیون ساده و چارت‌های یک‌به‌یک به دست آمد. ضریب تعیین این سه فرمول برابر با ۶۶ درصد، ۴۸ درصد و ۶۶ درصد است. این فرمول‌ها شامل پارامترهای عدد پایداری، مدول الاستیسیته، ارتفاع سطح آب زیرزمینی و افت حجمی می‌باشند.

مراجع

- [1] Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U. & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling*, 2nd Edition Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Verlag, Berlin, 475 pp.
- [2] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., Xu, Sh., "Mechanized Tunnelling in Urban Areas", Geodata S.P.A., Turin, Italy, 2117
- [3] Horn, N., 1961. "Horizontal earth pressure on vertical end faces of tunnel tubes". In *the National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry*, pp. 7-16.
- [4] DIN 4085.2007-10. 2007. *Soil - calculation of earth pressure Subsoil - calculation of earth pressure*.
- [5] Ebrahim.farrokh, 2019, face pressure estimation report for the southern development project of Tehran metro line 6, bahrooi engineering company of Tehran [in Persian]