مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۳۷-۱۲۵، (یادداشت فنی)

Research Note

برآورد کمینه‌ی فشار جبهه‌کار تونل‌های درون‌شهری با ماشین EPB به روش تحلیلی و عددی مطالعه‌ی موردی: تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی)

حسن بخشنده امنیه * **(دانشیار)**
دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
محمدصابر زمزم (دانشجوی دکتری)
سید احسان موسوی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

برآورد فشار بهینه برای نگهداری جبهه‌کار تونل‌های شهری از مهم‌ترین عوامل در راندمان ماشین حفاری فشار تعادلی زمین (EPB)[1] است. اعمال فشار کمتر از حد تعادلی باعث نشست و بیشتر از آن باعث بالازدگی جبهه‌کار و سطح زمین می‌شود. جهت برآورد فشار بهینه از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک، ارتفاع روباره، سطح آب زیرزمینی، پارامترهای هندسی تونل و بارهای ترافیکی و سازه‌یی به کمک روش‌های تحلیلی و عددی استفاده می‌شود. با روش‌تحلیلی جانسکز و عددی، فشار لازم برای نگهداری جبهه‌کار تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی) محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS3D با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌تحلیلی، حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال اختلاف دارند. این اختلاف به دلیل نوسانات فشار آب است، که در روش عددی منظور نشده است. بدین ترتیب نتایج حاصل از روش عددی تطابق خوبی با روش تحلیلی استفاده‌شده دارد.

واژگان کلیدی: فشار بهینه‌ی جبهه‌کار، روش‌های تحلیلی و عددی، PLAXIS3D، ماشین حفاری فشار تعادلی زمین (EPB)، تونل خط ۷ متروی تهران.

hbakhshandeh@ut.ac.ir
mohammad_saber_zamzam@yahoo.com
mousavi.miningeng@yahoo.com

۱. مقدمه

برآورد فشار لازم جهت نگهداری جبهه‌کار در مرحله‌ی طراحی و اجرا یکی از پارامترهای مهم در تونل‌سازی با ماشین‌های حفاری سپری است. در عمل، فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار در تونل‌سازی با سپر فشار تعادلی زمین معمولاً اولین پارامتر کنترل‌کننده‌ی حین حفاری و یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقدار نشست در سطح زمین است. هنگامی که فشار نگهدارنده‌ی بالا به جبهه‌کار اعمال شود، جابه‌جایی‌های عمودی کمتری در سطح زمین مشاهده می‌شود؛ ولی در فشارهای نگهدارنده‌ی خیلی بالا، بالازدگی در سطح زمین مشاهده می‌شود و می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شود.[1]

در ماشین فشار تعادلی زمین (EPB)، فشار جبهه‌کار با ایجاد توازن بین حجم حفاری و حجم تخلیه‌ی مصالح از اتاقک فشار[2] کنترل می‌شود. شرایط تعادل در جبهه‌کار هنگامی برقرار می‌شود که چگالی مصالح داخل چمبر به بیشترین مقدار ممکن برای اعمال فشار مؤثر به جبهه‌کار برسد و در این شرایط معادل حجم تئوری مصالح حفاری‌شده، تخلیه‌ی مصالح انجام شود. بدیهی است که حجم افزودنی‌ها نیز باید برای محاسبه‌ی حجم مصالحی که به‌وسیله‌ی نوار نقاله‌ی مارپیچ تخلیه می‌شوند، در نظر گرفته شود.[1]

اساساً دو پارامتر کنترلی فشار داخل چمبر و نسبت حجم مصالح تخلیه‌شده به حجم مصالح حفاری‌شده (R) برای پیشروی بهینه‌ی ماشین وجود دارد. در صورتی‌که $R = 1$ باشد، حالت تعادل ایجاد می‌شود. در صورتی‌که $R < 1$ باشد، به این معنی که حجم مصالح تخلیه‌شده کمتر از حجم مصالح حفاری باشد، منطقه خمیری در جلوی جبهه‌کار توسعه می‌یابد و فشار داخل چمبر نیز افزایش می‌یابد. برعکس در صورتی‌که $R > 1$ باشد، فشار در چمبر کاهش می‌یابد و تغییرشکل در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۱۸، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲.

جبهه‌کار رخ خواهد داد. در این حالت اگر چه ممکن است مقدار فشار جبهه‌کار تثبیت شود، ولی به دلیل تخلیه‌ی مصالح بیش از مقدار حفاری‌شده، این شرایط خطرناک و نامطلوب خواهد بود. بنابراین فشار جبهه‌کار به تنهایی برای کنترل پیشروی و تعیین حالت مطمئن حفاری کافی نیست و حالت بهینه‌ی پیشروی باید با درنظرگرفتن دو شرط تعادل بین مصالح حفاری‌شده و مصالح تخلیه‌شده و تثبیت فشار در داخل چمبر باشد.[۲]

روش‌های مختلفی جهت برآورد فشار جبهه‌کار وجود دارد که با توجه به شرایط خاک به روش‌های آنالیز حدی و تعادل حدی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های آنالیز حدی شامل: روش برومز[۳] و بنمارک[۴] (خاک چسبنده و زهکشی‌نشده)، اتکینسون[۵] و پاتز[۶] (خاک غیرچسبنده برای تونل بدون پوشش)، دیویس[۷] (خاک چسبنده) و لکا[۸] و دورمیو[۹] (خاک غیرچسبنده) هستند. روش‌های تعادل حدی شامل روش میوریما (خاک چسبنده و غیرچسبنده)، کروس (خاک چسبنده و غیرچسبنده)، موحکم[۱۰] (خاک چسبنده و غیرچسبنده)، جانسکز[۱۱] و استاینر[۱۲] (خاک غیرچسبنده و کمی چسبنده)، کواری[۱۳] و آنگونستا[۱۴] (خاک غیرچسبنده) و روش برویر[۱۵] (خاک غیرچسبنده) هستند. در مطالعه‌یی در سال ۱۹۸۹ یک مدل سه بعدی بر مبنای نظریه‌ی تعادل حدی برای تحلیل پایداری تونل و ارزیابی نشست، پیش از نصب نگهداری صلب ارائه شده است.[۳] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۱۹۹۴ فشار جبهه‌کار برای تونل‌های حفرشده در خاک‌های دانه‌یی و غیرچسبنده محاسبه شده است.[۴] در سال ۱۹۹۸ نیز در مطالعه‌ی دیگری براساس مدل پایداری گوه که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده است، روشی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار ارائه شده است.[۵] در مجموع روش‌های مختلف تجربی،[۶-۸] مدل‌سازی فیزیکی،[۹] و عددی برای ارزیابی تغییرشکل محیط اطراف تونل و بررسی تأثیر عوامل گوناگون از جمله فشار جبهه‌کار در جابه‌جایی و نشست سطح زمین در تونل‌سازی در زمین نرم به کار گرفته شده است.

در پروژه‌های مهندسی، مسائلی از قبیل اندرکنش تونل در حال ساخت با سازه‌های سطحی (ساختمان‌ها)، سازه‌های زیرسطحی (تونل‌ها و شمع‌ها) یا سازه‌های پیچیده‌ی زیرزمینی همچون تونل‌های دوقلو یا ایستگاه‌های زیرزمینی وجود دارد. واضح است که روش‌های تحلیلی کارایی محدودی دارند و از لحاظ نظری، نتیجه‌ی قابل اعتماد و کاملی را از اثرات حفاری و به تبع آن فشار نگهدارنده‌ی مورد نیاز ارائه نمی‌دهند. در مقابل، روش‌های عددی ابزارهای پیچیده‌تری برای مدل‌سازی، بررسی شرایط پایداری جبهه‌کار و نشست‌ها هستند. امروزه روش‌های عددی متعددی به منظور تحلیل تونل‌های شهری به‌صورت استاتیکی و دینامیکی توسعه یافته‌اند و بیشتر این روش‌ها محیط خاک را به‌صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته‌اند.[۲] تحلیل عددی روش‌های ساخت، رفتار سه‌بعدی جبهه‌کار و همچنین برهم‌کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازد. با وجود این صحت نتایج این روش‌ها کاملاً به داده‌های اولیه‌ی مسئله بستگی دارد. در پژوهشی در سال ۲۰۰۳، با استفاده از روش اجزاء محدود، تأثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در نشست سطح زمین بررسی شده است.[۱۰] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D، حساسیت مدل‌های رفتاری گوناگون خاک تحلیل و تأثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در نشست سطح زمین برای پروژه‌ی مترو مادرید مورد مطالعه قرارگرفته است.[۱۱] در مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۲ نیز با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرآیند تونل‌سازی با EPB، روابطی برای فشار جبهه‌کار ارائه شده است.[۱۲] یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای روش عددی اجزاء محدود نرم‌افزار PLAXIS3D است. این نرم‌افزار یک برنامه‌ی المان محدود برای تحلیل سه‌بعدی تغییرشکل و پایداری تونل است و ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل و مدل‌سازی شرایط تونل‌سازی با ماشین حفاری فشار تعادلی زمین (EPB) محسوب می‌شود، که در این مطالعه از آن استفاده شده است.

۲. ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷ مترو تهران

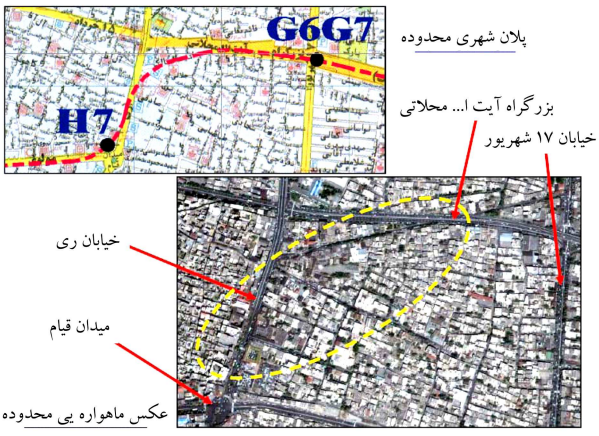
خط ۷ مترو تهران از شهرک امیرالمؤمنین (ع) واقع در منطقه‌ی جنوب شرقی تهران در امتداد شرقی ـ غربی شروع و پس از عبور از تقاطع بزرگراه محلاتی ـ خیابان ۱۷ شهریور و میدان محمدیه، در تقاطع بزرگراه نواب ـ پل قزوین تغییر جهت داده و در امتداد جنوبی ـ شمالی (در راستای بزرگراه نواب صفوی) مسیر آن ادامه و ضمن گذر از کنار تونل توحید و عبور از کنار برج میلاد و میدان صنعت، در منطقه‌ی سعادت آباد (میدان بوستان) واقع در شمال غربی تهران پایان یافته است.[۱۳] شکل ۱، گویای بخشی از مسیر خط ۷ مترو تهران است.

مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط ۷ مترو تهران از دو بخش شمالی ـ جنوبی و شرقی ـ غربی، در سه فاز مرحله‌ی مفهومی، مقدماتی و تکمیلی انجام پذیرفته است. کاوش‌ها و برداشت‌های صحرایی بر پایه‌ی دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی با حفاری ۲۹ حلقه‌ی گمانه‌ی متعیی[۱۶] و ۱۱ حلقه چاه دستی[۱۷] در نقاط مناسب در طول مسیر طرح، در مرحله‌ی مقدماتی ژئوتکنیک انجام شده است.[۱۳]

به‌طور کلی رسوبات محدوده‌ی تهران از لحاظ چینه‌شناسی به ۴ گروه: A، B، C و D تقسیم‌بندی شده است که در بین آن‌ها رسوبات و نهشته‌های سری A قدیمی‌ترین و نهشته‌های سری D جدیدترین سری محسوب می‌شوند. رسوبات آبرفتی تهران در مسیر خط ۷ مترو تهران، بیشتر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه‌سنگ است و به شکل روکشی، رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است؛ که به طورکلی رسوبات از شرق به غرب ریزدانه‌تر می‌شوند، به‌طوری‌که در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌های ریزدانه‌ی رسی توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند.[۱۴]

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و هم‌چنین با درنظرگرفتن مقیاس نقشه ۱:۵۰۰۰، لایه‌های خاکی دربرگیرنده‌ی مسیر تونل به ۶ گونه‌ی زمین‌شناسی مهندسی (ET) تفکیک و در ارائه جدول ۱ شده‌اند.

براساس مقاطع زمین‌شناسی مهندسی تونل، واحدهای ET-۲، ET-۳، ET-۵ و ET-۱ به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارند و واحد ET-۴ بیشتر به



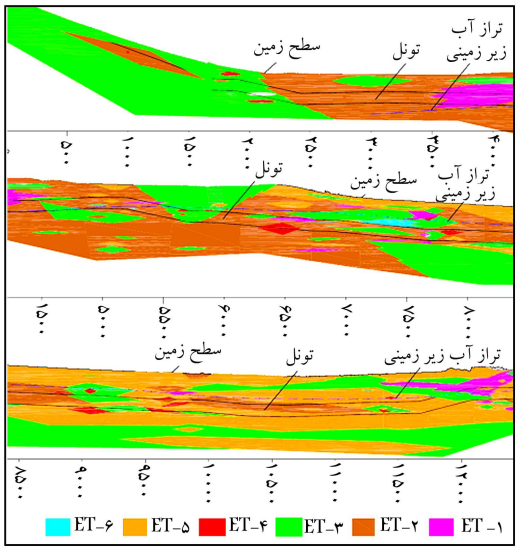
شکل ۱. پلان شهری و عکس ماهواره‌یی تقاطع محلاتی ـ ۱۷ شهریور تا میدان قیام (مسیر خط ۷ مترو تهران).

جدول ۱. مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی (ET) تفکیک‌شده در لایه‌های خاکی در برگیرنده‌ی مسیر تونل.[۱۴]

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی	ET – ۱	ET – ۲	ET – ۳	ET – ۴	ET – ۵	ET – ۶
توصیف خاک	گراول ماسه‌یی و ماسه گراولی	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه گراولی به همراه سیلت و رس	ماسه رسی به همراه گراول	خاک درشت‌دانه از جنس ماسه رسی به به همراه گراول	سیلت رسی و رس سیلتی به همراه اندکی ماسه	سیلت ماسه‌یی
درصد عبوری از الک ۲۰۰ (سیلت و رس)	٪۳-۱۲	٪۱۲-۳۰	٪۳۰-۶۰	٪۲۲-۳۴	بزرگ‌تر از ٪۶۰	بزرگ‌تر از ٪۶۰
نوع خاک (USCS)	GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP	SC, SC-SM & GC	SC, SM &CL	SC, SM	CL, ML & CL-ML	ML

جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل.[۱۴]

واحدهای زمین‌شناسی مهندسی	چسبندگی مؤثر (KPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر	مدول تغییرشکل (MPa)	نسبت پواسون	وزن خشک مخصوص (KN/m^3)
ET-۱	۱۴	۳۴	۸۰	۰٫۳	۱۸٫۶
ET-۲	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳	۱۸٫۴
ET-۳	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲	۱۹٫۰
ET-۴	۲۲	۳۲	۵۰	۰٫۳	۱۸٫۲
ET-۵	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵	۱۷٫۰
ET-۶	۰	۲۷	۱۰	۰٫۳۵	۱۷٫۰



شکل ۲. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران.[۱۴]

صورت لنزها و عدسی‌های ماسه‌یی گسترش یافته است. در این میان واحد ET-۶ در مسیر تونل گسترش کمی داشته و موقعیت آن فقط درکیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ در محدوده‌ی بالای سقف تونل است.[۱۴]

پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و در جدول ۲ ارائه شده است. هم‌چنین در شکل ۲ پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران نشان داده شده است.[۱۴]

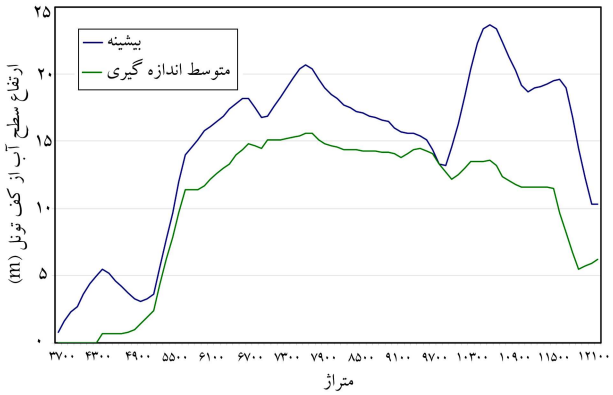
۳. هیدروژئولوژی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

مطالعات هیدروژئولوژی صورت‌گرفته از مسیر تونل نشان می‌دهد که تراز محور تونل در نواحی شرقی محدوده‌ی پروژه، بالاتر از تراز آب‌های زیرزمینی و در نواحی مرکزی و غربی پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی است. بنابراین به جز نواحی شرقی مسیر تونل (متراژ ۰ تا ۴۳۰۰)، حفاری تونل با ورود آب همراه خواهد بود. تراز آب زیرزمینی در مسیر تونل از حدود ۱۱۳۰ متر در بالاتر از میدان قیام (تقاطع ری و آهنگ) تا حدود ۱۱۰۲ متر در انتهای مسیر پروژه (محله‌ی بریانک) کاهش می‌یابد. مسیر تونل خط ۷ متروی تهران را با توجه به میانگین سطح ایستایی اندازه‌گیری‌شده می‌توان به چند منطقه تقسیم‌بندی کرد که در جدول ۳ ارائه شده است.[۱۴]

بنابراین منطقه‌ی شماره‌ی ۴ که طولانی‌ترین منطقه است، بیشترین مشکلات را به لحاظ ورود آب به تونل خواهد داشت. مسیر خط ۷ متروی تهران در ناحیه‌یی قرار

جدول ۳. تقسیم‌بندی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران از لحاظ سطح ایستایی اندازه‌گیری‌شده.

شماره‌ی منطقه	محدوده‌ی متراژ (متر)	محدوده‌ی بار آبی (متر)	طول منطقه (متر)
۱	۰ الی ۴۳۰۰	۰	۴۳۰۰
۲	۴۳۰۰ الی ۵۱۰۰	۰ الی ۲	۸۰۰
۳	۵۱۰۰ الی ۵۶۰۰	۲ الی ۱۰	۵۰۰
۴	۵۶۰۰ الی ۱۱۵۰۰	۱۰ الی ۱۵	۵۹۰۰
۵	۱۱۵۰۰ الی ۱۲۲۰۰	۵ الی ۱۰	۷۰۰



شکل ۳. وضعیت کلی ارتفاع سطح آب در وضعیت متوسط و بیشینه در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران.[۱۳]

دارد که عوامل بسیاری همچون چاه‌های بهره‌برداری و پساب‌های شهری، تأثیرات بسیاری را در آب‌های زیرزمینی می‌گذارند. در شکل ۳، وضعیت ارتفاع سطح آب از کف تونل در دوحالت میانگین و بیشینه نمایش داده شده است.[۱۳]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از متراژ ۱۰۵۰۰ تا انتهای مسیر پروژه، اختلاف زیادی بین اندازه‌گیری بیشینه و متوسط ارتفاع سطح آب وجود دارد. تأثیرات پمپاژ چاه‌ها را می‌توان از مهم‌ترین عوامل تغییرات سریع سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه عنوان کرد. باید به این نکته توجه داشت که سطح آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه حالت دینامیک دارد و عوامل شهری منجر به تغییرات زیادی در آن می‌شود.

۴. تعیین فشار جبهه‌کار به روش تحلیلی

جهت جلوگیری از تخریب سینه‌کار و هجوم خاک به درون تونل به ویژه در زمین‌های سُست که منجر به نشست قابل توجه زمین می‌شوند، مواد حفاری‌شده در کله‌ی حفار باید متناسب با مقدار پیشروی دستگاه خارج شوند، که این امر منجر به ایجاد فشاری در چمبر می‌شود، که به آن فشار سینه‌کار گویند.[۱۵] یکی از روش‌های بررسی پایداری ساختار خاک استفاده از روش‌های تحلیلی است. به کمک این روش‌ها می‌توان حدود ناپایداری را در ساختار خاک تعیین کرد. در این نوشتار با توجه به شرایط خاک خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی)، فقط از روش جانکسز برای تحلیل فشار جبهه‌کار استفاده شده است (رابطه‌های ۱ الی ۸):[۴]

$$P_f = \eta_e \times P_e + \eta_w + ۲۰ \ \ \text{KPa} \qquad (۱)$$

$$P_f = \eta_e \times K_a \times \sigma'_v + \gamma_w \times H_w + ۲۰ \ \ \text{KPa} \qquad (۲)$$

$$P_f = \eta_e \times K_a \times \sigma_v + \eta_w \times \gamma_w \times H_w + ۲۰ \ \ \text{KPa}$$

$$H \succ ۲D \quad \text{اگر} \qquad (۳)$$

$$\sigma'_v = \frac{a.\gamma' - c'}{K_\circ \times \tan\phi'} \left(۱ - e^{-K_\circ \times \tan\phi' \times \frac{H_W}{a}}\right) + \frac{a.\gamma_d - c'}{K_\circ \times \tan\phi'} \left(e^{-K_\circ \times \tan\phi' \times \frac{H_W}{a}} - e^{-K_\circ \times \tan\phi' \times \frac{H}{a}}\right) + q_\circ \times e^{-K_\circ \times \tan\phi' \times \frac{H}{a}} \qquad (۴)$$

$$\sigma_v = \gamma_n \times H \quad H \leq ۲D \quad \text{اگر} \qquad (۵)$$

$$a = \frac{\circ/۵ \times D}{۱ + \tan\theta} \qquad (۶)$$

$$K_a = \frac{۱ - \sin\phi'}{۱ + \sin\phi'} \qquad (۷)$$

$$K_\circ = ۱ - \sin\phi' \qquad (۸)$$

که در آن‌ها، η_e ضریب اطمینان در تخمین فشار خاک در حالت تخریب؛ η_w ضریب اطمینان در تخمین فشار آب؛ σ'_v فشار مؤثر زمین (KPa)؛ σ_v فشار کل زمین (KPa)؛ K_a ضریب فشار فعال خاک؛ $K_\circ$ ضریب فشار خاک در حالت سکون؛ K نسبت تنش افقی به عمودی زمین؛ c' چسبندگی مؤثر خاک (KPa)؛ ϕ' زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر خاک (deg)؛ H ارتفاع روباره (m)؛ H_W ارتفاع آب (m)؛ $q_\circ$ بار سطحی ($KN/m^۲$)؛ γ' چگالی مؤثر خاک ($KN/m^۳$)؛ γ_n چگالی طبیعی خاک ($KN/m^۳$)؛ γ_d :چگالی خشک خاک ($KN/m^۳$)؛ D قطر تونل (m)؛ θ زاویه‌ی لغزش گوه (deg).

ضرایب ایمنی در راستای تخمین فشار تخریب زمین (η_e) برابر ۱/۷۵ و فشار آب (η_w) برابر ۱/۰۵ در نظرگرفته شده است،[۵و۲] و قطر حفاری تونل برابر ۹/۱۶۴ متر است. در این نوشتار بار سطحی به دو صورت بررسی شده است:

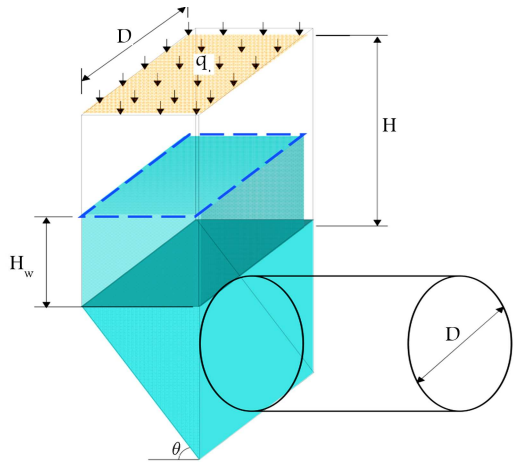
۱. **مناطقی که تونل از زیر خیابان‌ها عبور می‌کند:** در این مناطق بار سطحی برابر ۲۰ کیلوپاسکال در نظرگرفته شده است.

۲. **مناطقی که تونل از زیر خانه‌ها عبور می‌کند:** در این مناطق با فرض بیشینه‌ی ساختمان ۵ طبقه، فشار سطحی برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظرگرفته شده است.

پارامترهای دیگر در قسمت‌های مختلف تونل با توجه به روباره، ارتفاع آب و خصوصیات خاک در هر مقطع تعیین و در محاسبات وارد شده‌اند. برخی از پارامترهای ذکرشده به‌صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

مقادیر فشار جبهه‌کار در راستای تونل مطابق با روابط ارائه‌شده در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین در محاسبات، فشار جبهه‌کار در تاج تونل، دست‌کم برابر ۲۰ کیلوپاسکال در نظرگرفته شده است.

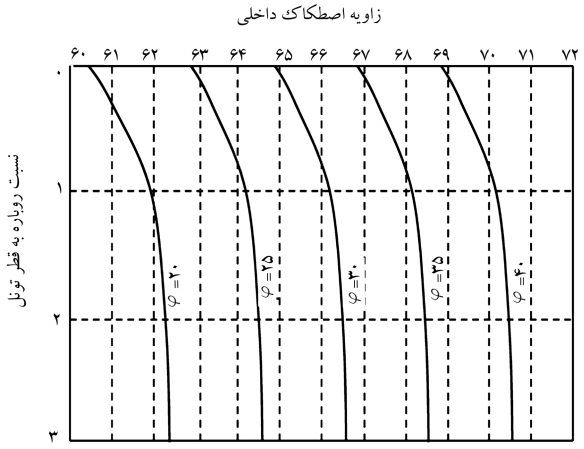
زاویه‌ی لغزش گوه با استفاده از گراف ارائه‌شده توسط جانکسز و استینر برای مقاطع مختلف محاسبه شده است (شکل ۵). در این گراف زاویه‌ی لغزش به‌صورت تابعی از نسبت روباره به قطر تونل و زاویه‌ی اصطکاک داخلی برای مقاطع مختلف تخمین زده شده است.[۴]



شکل ۴. برخی از پارامترهای مورد استفاده در بحث پایداری جبهه‌کار تونل خط ۷ متروی تهران.[۴]

جدول ۴. فشار جبهه‌کار محاسبه‌شده به روش تحلیلی برای مقاطع انتخابی در راستای تونل.

شماره‌ی مقطع	کیلومتراژ (m)	ارتفاع روباره (m)	ارتفاع سطح آب (m)	چگالی خاک (KN/m^3)	چسبندگی خاک (KN/m^3)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	فشار زمین در سقف تونل (Kpa)	فشار آب در سقف تونل (Kpa)	فشار جبهه کار (Kpa)
۱	۱۵۰۰	۹٫۴	۰	۱۹	۳۰	۳۳	۰	۰	۲۰
۲	۲۶۰۰	۱۴٫۵	۰	۱۸٫۴	۱۵	۳۳	۹	۰	۳۶
۳	۲۷۰۰	۱۴٫۲	۰	۱۸٫۴۳	۱۵٫۷۴	۳۳	۹	۰	۳۵
۴	۴۰۰۰	۱۵٫۸	۰	۱۸٫۶۸	۱۹٫۰۸	۳۳٫۴۷	۵	۰	۲۹
۵	۵۰۰۰	۱۰	۰	۱۷٫۷۸	۲۲٫۰۴	۳۰٫۸	۳	۰	۲۵
۶	۵۷۰۰	۱۸٫۸	۲٫۱	۱۹	۳۰	۳۳	۰	۲۱	۴۲
۷	۹۴۰۰	۱۹٫۴	۵٫۴	۱۷٫۱	۳۰٫۹۵	۲۸٫۲۶	۰	۵۴	۷۷
۸	۹۵۰۰	۱۹٫۶	۲٫۲	۱۷	۳۱	۲۸	۰	۵۲	۷۵



شکل ۵. گراف مورد استفاده برای تخمین زاویه‌ی لغزش در تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی).[۴]

۵. تعیین فشار جبهه‌کار به روش عددی

روش‌های تحلیلی تخمین فشار مورد نیاز جهت نگهداری جبهه‌کار، مبتنی بر مکانیزم شکست جبهه‌کار هستند. بنابراین با درنظرگرفتن شرایط منطقه، پارامترهای خاک و مشخصات هندسی مسئله، فشار مورد نیاز برآورد می‌شود. در این روش‌ها اصولاً اثر حضور سازه‌های سطحی یا اثر مربوط به چگونگی انجام عملیات حفاری در نظر گرفته نمی‌شود.

با توجه به برهم‌کنش پیچیده بین حفاری و خاک و توانایی بالای شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی فقط این روش‌ها قادر به ارائه‌ی یک نتیجه‌ی کامل و قابل اطمینان در مورد اثرات حفاری و فشار پایدارسازی مورد نیاز هستند. هر چند در عمل، به‌خصوص در فاز طراحی اولیه و در طول فاز ساخت به‌منظور شبیه‌سازی سریع شرایط حفاری از شبیه‌سازی‌های نسبتاً ساده استفاده می‌شود. معمولاً روش بهینه، ترکیبی از روش‌های مختلف خواهد بود.[۲]

طبق مطالعات انجام‌شده در زمین‌های غیرچسبنده هنگامی که عمق تونل با قطر آن تقریباً برابر است، نتایج حاصل از آنالیزهای عددی تا حدودی معادل مقادیر محاسبه‌شده از روش‌های تحلیلی هستند. هنگامی که نسبت عمق تونل به قطر آن از ۱ بیشتر می‌شود، مقادیر پیشنهادشده توسط روش‌های عددی بزرگ‌تر از مقادیر روش‌های تحلیلی است. برای زمین‌های چسبنده، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی برای کمینه‌ی فشار نگهدارنده‌ی مورد نیاز جهت نگهداری جبهه‌کار، همواره برابر یا بزرگ‌تر از نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی است.[۱]

واضح است که ساخت مدل و انجام محاسبات در روش‌های عددی سه‌بعدی نیاز به تلاش و زمان زیادی دارد. از سوی دیگر، عدم قطعیت‌هایی در ارتباط با توانایی نرم‌افزار و انتخاب‌هایی از قبیل: ابعاد مدل، اندازه‌ی مش‌ها، و شرایط مرزی وجود دارد. درنهایت، نتایج حاصل از روش‌های عددی سه‌بعدی، عدم قطعیت‌ها و تغییرپذیری پارامترهای ورودی را نیز شامل می‌شود. به همین دلیل به‌منظور استفاده‌ی مطلوب از روش‌های عددی سه‌بعدی، انجام یک آنالیز حساسیت جهت تأثیر تغییر پارامترهای ورودی در خروجی‌ها ضروری است.

نرم‌افزار PLAXIS3D یکی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای اجزاء محدود است، که برای تحلیل سه‌بعدی تغییرشکل و پایداری تونل می‌تواند استفاده شود. در این نوشتار جهت مدل‌سازی از این نرم‌افزار استفاده شده است.

۱.۵. بررسی و انتخاب مقاطع بحرانی در طول مسیر

به منظور تحلیل عددی فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار قطعه‌ی شرقی ـ غربی تونل خط ۷ متروی تهران، ۶ مقطع مهم از لحاظ کمترین و بیشترین میزان روباره، بیشترین تراز آب زیرزمینی، خاک‌هایی با ضعیف‌ترین پارامترهای مقاومتی در بالای تونل، وجود عوارض سطحی و زیرسطحی و جبهه‌کار ناهمگن در طول مسیر تونل انتخاب شده است. در جدول ۵، موقعیت این مقاطع و ارتفاع روباره در هر مقطع ارائه شده است.

جدول ۵. مقاطع انتخابی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار تونل به روش عددی.

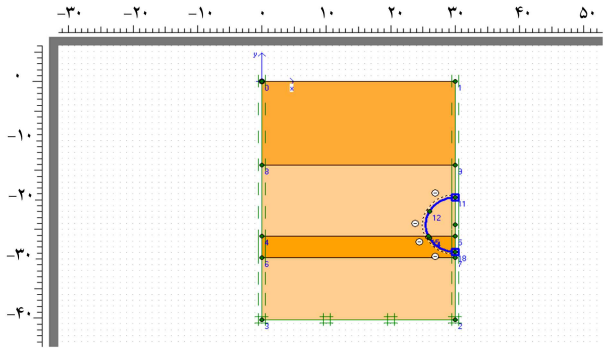
شماره‌ی مقطع	کیلومتراژ	ارتفاع روباره (m)	نسبت $\frac{C}{D}$
۱	۱ + ۵۰۰	۱۰	۱٫۱
۲	۲ + ۶۵۰	۱۵	۱٫۶
۳	۴ + ۰۰۰	۱۶	۱٫۸
۴	۵ + ۰۰۰	۱۱	۱٫۲
۵	۵ + ۷۰۰	۱۹	۲٫۱
۶	۹ + ۴۶۰	۲۰	۲٫۲

جدول ۶. پارامترهای مقاومتی انواع خاک‌های موجود در مسیر تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی).[۱۴]

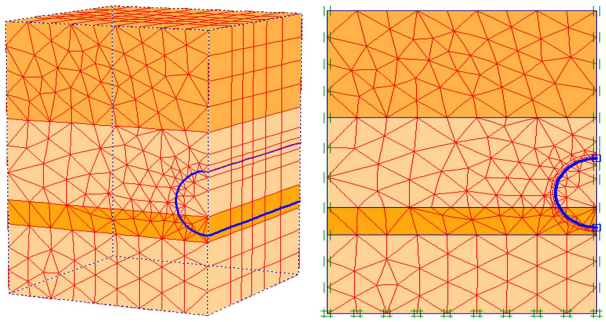
طبقه‌بندی خاک	پارامترهای فیزیکی خاک		پارامترهای مکانیکی خاک		مدول کشسان	ضریب پواسون
	γ_{sat} (KN/m^3)	γ_d (KN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	E_t (MPa)	υ
ET-۱	۲۱٫۸۵	۱۸٫۶	۱۴	۳۴	۸۰	۰٫۳
ET-۲	۲۱٫۶۵	۱۸٫۴	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳
ET-۳	۲۳	۱۹	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲
ET-۴	۲۱٫۴۵	۱۸٫۲	۲۲	۳۲	۵۰	۰٫۳
ET-۵	۲۱٫۵	۱۷	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵
ET-۶	۲۱٫۲۵	۱۷	۰	۲۷	۱۰	۰٫۳۵

جدول ۷. خصوصیات ماشین EPB قطعه‌ی شرقی ـ غربی تونل خط ۷ متروی تهران.[۱۳]

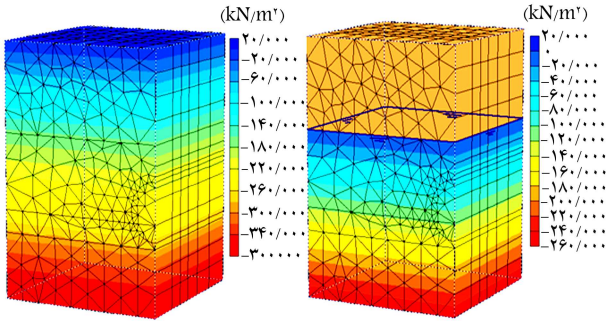
پارامترهای ماشین EPB	واحد	مقدار
صلبیت محوری (EA)	KN/m	۸٫۲ × ۱۰^6
صلبیت خمشی (EI)	KN.m^2/m	۸٫۳۸ × ۱۰^4
وزن (W)	KN/m^2	۳۸٫۱۵
نسبت پواسون (ν)	ـ	۰



شکل ۶. هندسه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران در موقعیت ۹+۴۶۰ با نرم‌افزار PLAXIS۳D.



شکل ۷. المان‌بندی مدل تونل خط ۷ متروی، قطعه‌ی شرقی ـ غربی در مقطع ۹+۴۶۰.



الف) فشار منفذی آب (اولیه)؛ ب) تنش موثر خاک (اولیه).

شکل ۸. اعمال فشار آب منفذی و تنش مؤثر در مدل تونل خط ۷ متروی، قطعه شرقی ـ غربی در مقطع ۹+۴۶۰.

۲.۵. هندسه‌ی مدل

ماشین حفاری قطعه‌ی شرقی ـ غربی خط ۷ متروی تهران از نوع فشار تعادلی زمین (EPB)، به طول ۱۰٫۵ متر و قطر ۹٫۱۶۴ متر است. در این نوشتار، مراحل مدل‌سازی برای مقطع درکیلومتراژ ۹+۴۶۰، که تونل در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد، ارائه شده است. هندسه‌ی مدل برای این پهنه با طول ۴۰ و عرض ۳۰ متر و امتداد ۴۵ در جهت محور Z در نظرگرفته شده است. مدل‌سازی مقاطع با توجه به متقارن‌بودن مقطع تونل به‌صورت نیمه متقارن انجام شده است.

۳.۵. خصوصیات مواد

خصوصیات مواد شامل گروه‌های خاکی و همچنین ماشین حفاری است. پارامترهای طراحی خاک در خط ۷ متروی تهران در جدول ۶ و خصوصیات ماشین فشار تعادلی زمین (EPB) مورد نظر در جدول ۷ ارائه شده‌اند. شکل ۶، هندسه‌ی مدل را در موقعیت ۹+۴۶۰ نشان می‌دهد.

با رسم کامل مدل هندسی و اختصاص مشخصات مصالح به توده‌ها و اجزاء سازه‌یی، هندسه‌ی مدل به‌منظور انجام محاسبات به المان‌های محدود تقسیم شده است. مطابق شکل ۷، مدل به المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌یی با ابعاد ۴۵ × ۴۰ × ۳۰ تقسیم شده است.

۴.۵. شرایط اولیه

با رسم هندسه‌ی مدل و المان‌بندی، شرایط اولیه شامل فشار آب مبنی بر سطح آب زیرزمینی و تنش مؤثر مبنی بر ضریب فشار جانبی خاک ایجاد شده است. سطح آب زیرزمینی در پهنه‌ی مورد مطالعه در عمق ۱۵ متری از کف تونل قرار دارد. شکل ۸، فشار آب منفذی و تنش مؤثر را در مدل مذکور نشان می‌دهد. در شکل ۸الف، فشار آب درکف مدل ۲۵۶ کیلوپاسکال و در شکل ۸ب، تنش مؤثر

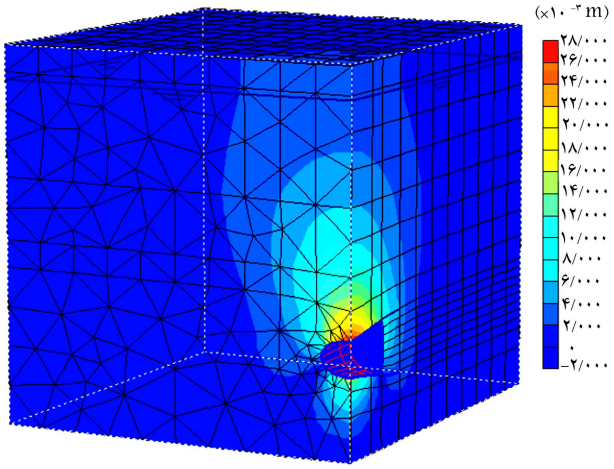
خاک در کف مدل ۳۷۹ کیلوپاسکال است، که با توجه به شرایط آب زیرزمینی و خاک، با نرم‌افزار PLAXIS3D محاسبه شده است.

۵.۵. نتایج حاصل از تحلیل عددی

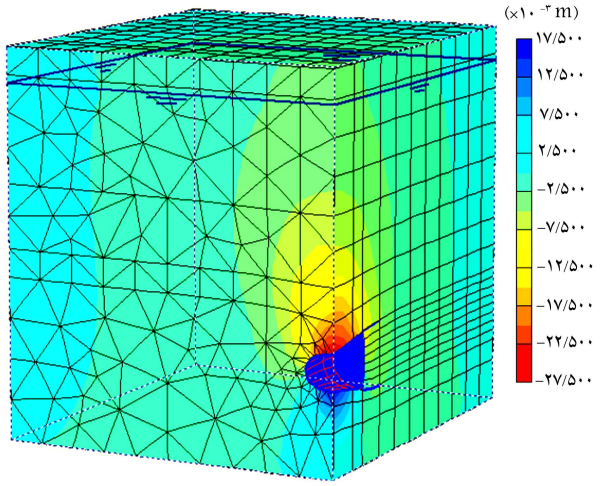
در عملیات مهندسی، یک پروژه به چند فاز تقسیم می‌شود. به‌طور مشابه، عملیات محاسبه در PLAXIS3D نیز به چند فاز تقسیم شده است. فاز ساختاری اول، شامل حفاری خاک و نصب ماشین حفاری است. با استقرار ماشین در قطعه‌ی اول، اصطکاک و چسبندگی کم می‌شود، بنابراین، همان خصوصیات خاک با ضریب کاهش مقاومت ۰٫۹ در محدوده‌ی ماشین به مدل اعمال می‌شود.[۱۶] فشار جبهه‌کار در تاج تونل براساس مقادیر اولیه (عمق ۱۹٫۶۷ متری) به میزان ۴۰ کیلوپاسکال اعمال شده و شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک حفاری ۱۵ کیلوپاسکال بر متر است. انقباض ناشی از اضافه حفاری و مخروطی‌بودن در انتهای ماشین ۰٫۴۸٪ در نظر گرفته شده است.[۱۷]

شکل‌های ۹ و ۱۰، جابه‌جایی کل و عمودی در فاز اول را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود فشار جبهه‌کار به اندازه‌ی کافی برای پایداری جبهه‌کار بزرگ است. بیشترین تغییرشکل در انتهای ماشین اتفاق می‌افتد که دلیل آن انقباض سپر و اتلاف حجم خاک است. فاز دوم و سوم بیانگر نشست در جبهه‌کار هستند. شکل ۱۱، جابه‌جایی کل مربوط به فاز دوم را با توجه به کاهش فشار جبهه‌کار نشان می‌دهد، که کمتر از ۰٫۵ سانتی‌متر است.

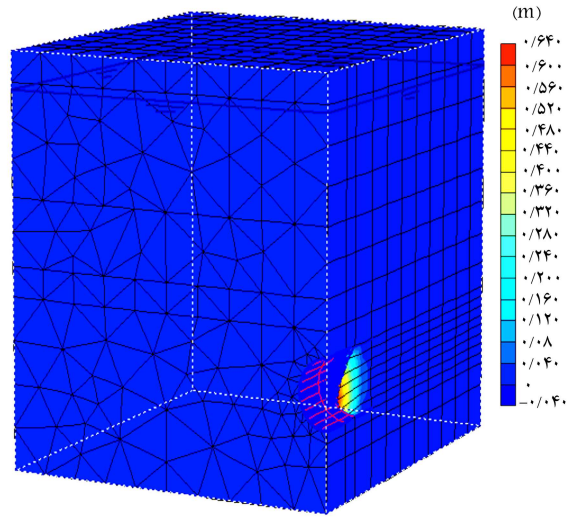
در شکل ۱۲، نتایج تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D برای ۶ مقطع انتخاب‌شده نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳، مقایسه‌یی بین مقادیر محاسبه‌شده‌ی فشار جبهه‌کار با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران ارائه شده است. روش عددی با درنظرگرفتن پارامترهای بیشتری از خاک مانند: مدول کشسان، ضریب پواسون، همگنی یا ناهمگنی خاک، خصوصیات ماشین حفاری و مواد بهسازی، بررسی نشست جبهه‌کار، زمین و نشت آب، تحلیل صحیح‌تر و منطقی‌تری از پایداری جبهه‌کار نسبت به روش‌های تحلیلی دارد. مطابق شکل ۱۳، تفاوت روش تحلیلی و عددی حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال است، که به دلیل وجود نوسانات فشار آب در محدوده‌ی مورد مطالعه است. در روش‌تحلیلی این مقدار در محاسبه‌ی کمینه‌ی فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار در نظر گرفته شده است، اما در روش عددی منظور نشده است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، در جدول ۸و ۹ فشار تدقیق‌شده‌ی اتاقک حفاری اعلام‌شده توسط شرکت پیمانکار (شرکت مهندسی سپاسد) در کیلومتراژهای ۵۶۰۰ تا ۵۸۰۰ و ۹۳۰۰ تا ۹۶۰۰ ارائه



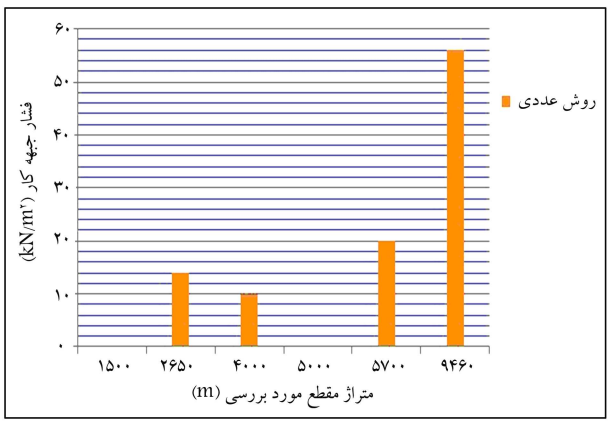
شکل ۹. جابه‌جایی کل در پایان فاز اول.



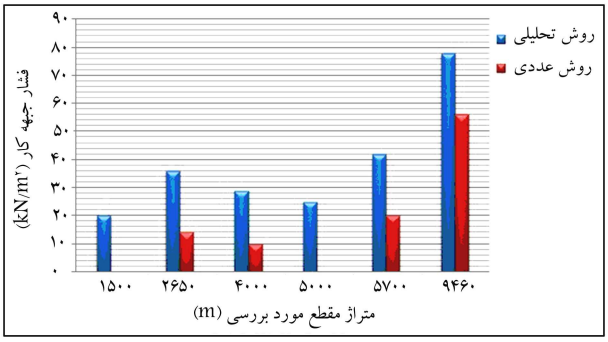
شکل ۱۰. جابه‌جایی عمودی در پایان فاز اول.



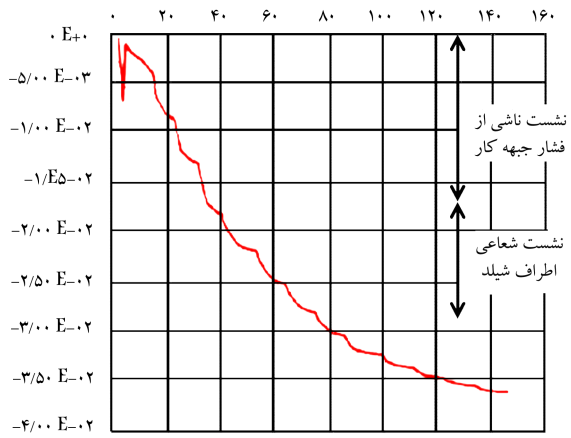
شکل ۱۱. جابه‌جایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار جبهه‌کار).



شکل ۱۲. نتایج مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار PLAXSIS3D برای ۶ مقطع انتخاب‌شده در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر محاسبه‌شده‌ی فشار جبهه‌کار با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران.



شکل ۱۴. نمودار نشست قائم در امتداد محور تونل در کیلومتراژ ۹+۴۶۰.

جدول ۸. مقادیر فشار تدقیق‌شده‌ی اتاقک حفاری ـ شرکت مهندسی سپاسد (کیلومتراژ ۵۶۰۰ تا ۵۸۰۰).

ردیف	متراژ		فشار چمبر (bar)	
	شروع	پایان	کمینه	بیشینه
۱	۵۶۰۰	۵۷۰۰	۰/۴	۰/۶
۲	۵۷۰۰	۵۸۰۰	۰/۵	۰/۷

جدول ۹. مقادیر فشار تدقیق‌شده‌ی اتاقک حفاری ـ شرکت مهندسی سپاسد (کیلومتراژ ۹۳۰۰ تا ۹۶۰۰).

ردیف	متراژ		فشار چمبر (bar)	
	شروع	پایان	کمینه	بیشینه
۱	۹۳۰۰	۹۴۰۰	۰/۵	۰/۷
۲	۹۴۰۰	۹۵۰۰	۰/۷	۰/۹
۳	۹۵۰۰	۹۶۰۰	۰/۶	۰/۸

شده است، که با نتایج به‌دست‌آمده در این نوشتار بسیار نزدیک است و آن را تأیید می‌کند.

با اعمال این مقدار فشار جبهه‌کار، میزان نشست در کیلومتراژ ۹+۴۶۰، ۳۲/۴۵ میلی‌متر ارزیابی شده است، که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به استانداردهای موجود،[۱۸و۱۹] این میزان نشست در این محدوده در حد مجاز است.

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام‌شده، روش تحلیلی جانکسز و عددی روش‌های مناسبی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار در خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی ـ غربی) است و تطابق بسیار خوبی با فشار تدقیق‌شده‌ی اتاقک حفاری توسط شرکت پیمانکار (شرکت مهندسی سپاسد) دارد.

- با مقایسه‌ی نتایج حاصل از بررسی‌های تحلیلی و عددی ملاحظه می‌شود که اختلاف مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال است. این اختلاف به دلیل وجود نوسانات فشار آب در محدوده‌ی مورد مطالعه است که در روش تحلیلی این مقدار در محاسبه‌ی کمینه‌ی فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار در نظر گرفته شده است، اما در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته نشده است.
- با توجه به اینکه تراز آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی در تخمین فشار جبهه‌کار تونل دارد، بررسی صحت و درستی اعداد مربوط به آن حائز اهمیت است. در این نوشتار، از تراز آب زیرزمینی متوسط جهت تخمین فشارها استفاده شده است. اما با توجه به نوسانات آب زیرزمینی در فصول مختلف در شهر تهران، بهتر است که تراز آب زیرزمینی به‌صورت روزانه، هفتگی و ماهانه تدقیق و فشار جبهه‌کار براساس آن به روز شود.
- با توجه به مطالب ارائه‌شده، مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی، تفاوتی در حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. این اختلاف به دلیل عدم احتساب نوسانات فشار آب در روش عددی است. به طورکلی، مقادیر عددی همانند روش‌های تحلیلی در ارائه‌ی فشار نگهدارنده، روند مشابهی را نشان می‌دهند.
- برای صحت نتایج به‌دست‌آمده از فشار جبهه‌کار، مقدار نشست در محدوده‌ی کیلومتراژ ۹+۴۶۰، ۳۲/۴۵ میلی‌متر به‌دست آمده است که با توجه به اینکه این میزان نشست در محدوده‌ی مجاز قرار دارد، لذا اعمال این مقدار فشار جبهه‌کار مناسب است.
- می‌توان با اعمال فشار بالاتر، میزان نشست را تا حدودی کاهش داد، اما اگرچه فشارهای بالای نگهدارنده‌ی جبهه‌کار، باعث کنترل نشست در سطح زمین می‌شود و در نهایت کنترل جبهه‌کار خواهد شد، اما اعمال فشارهای خیلی زیاد علاوه‌بر ایجاد بالازدگی‌های سطحی جزئی، می‌تواند باعث تخریب قسمت برش دستگاه حفاری و تحمیل هزینه‌های زیاد به همراه اتلاف زمان جهت تعمیر شود.

پانوشت‌ها

1. earth pressure balance
2. Chamber
3. Broms
4. Bennermark

5. Atkinson
6. Potts
7. Davis
8. Leca
9. Dormieux
10. Mohkam
11. Jancsecz
12. Steiner
13. Kovari
14. Anagnostou
15. Broere
16. borehole
17. tyest pit

منابع (References)

1. Han Kim, S. and Tonon, F. "Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane - Drained case", *Tunnelling and Underground Space Technology,* **25**(5), pp. 526-542 (2010).
2. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, M., Shulin, X.. and Geodata, S.P.A. "Mechanized tunnelling in urban areas", ISBN: 978-0-203-93851-5 , pp.341-357 (2007).
3. Mohkam, M. and Wong, Y.W. "Three dimensional stability analysis of the Tunnel face under fluid pressure", Numerical Methods in Geomechanics, Rotterdam: Balkema, A. A., pp. 2271-2287 (1989).
4. Jancsecz, S. and Steiner, W. "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", Tunnelling '94: Seventh International Symposium Organized by the Institution of Mining and Metallurgy and the British Tunnelling Society, London: Chapman and Hall, ISBN: 9780412598609, pp. 531-541 (1994).
5. Broere, W. "Face stability calculation for a slurry sheild in hetrogeneous soft soils", In Nego & Ferreira (Ed.), *Proceedings of the World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises,* Sao Paolo, Brazil. Taylor & Francis. ISBN: 9789054109365, pp. 215-218 (1998).
6. Atkinson, J.H. and Potts, D.M. "Subsidence above shallow tunnels in soft ground", *Journal of the Geotechnical Engineering Division,* **103**(4), pp. 307-325 (1977).
7. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", *Ground Engineering,* **15**(8), pp. 13-22 (1982).
8. Baligh, M. "Strain path method", *Journal of Geotechnical Engineering,* **111**(9), pp. 1108-1136 (1985).
9. Chambon, P. and Corte, J.F. "Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face", *Journal of Geotechnical Engineering,* **120**(7), pp. 1148-1165 (1994).
10. Greenwood, J.D. "Three dimension analysis of surface settlement in soft ground tunneling", Master of Engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Civil and Environmental Engineering (2003).
11. Lambrughi, A., RodrÍguez, L.M. and Castellanza, R. "Development ىand validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanized excavations", *Computers and Geotechnics Journal,* **40**, pp. 97-113 (2012).
12. Nicolas, B., Branque, D., Subrin, D., Wong, H. and Humbert, E. "Face failure in homogeneous and stratified soft ground: Theoretical and experimental approaches on 1g EPBS reduced Scale Model", *Tunnelling and Underground Space Technology,* **30**, pp. 25-37 (2012).
13. Sepasad Engineering Company, *Execution Method, Machine Choice and TBM Technical Specifications of Tehran Subway Line 7,* Tehran,Iran: Sepasad Engineering Company (2008).
14. Sahel Consulting Engineers, *Engineering Geology Report of the Eastern-Western Part of Tehran Subway Line 7,* Tunne. Tehran: Sepasad Engineering Company (2008).
15. Russo, G. "Evaluating the required face – support pressure in EPBs advance mode", Gallerie e Grandi Opere Sotterranee (2003).
16. Huayong, Y., Hu, S.H., GuoFang, G. and Guoliang, H. "Earth pressure balance control for EPB shield", *Science in China Series E: Technological Sciences,* **52**(9), pp. 2840-2848 (2009).
17. Anagnostou, G. and Kovari, K. "Face stability conditions with earth – pressure – balanced shields", *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology,* **11**(2), pp. 165-173 (1996).
18. Eurocode 7 , Geotechnical Design, in BS EN 1977-1, B. Standard, Editor (2004).
19. Burland, J.B., Standing, J.R. and Jardine, F.M., *Building Response to Tunnelling,* Tomas Telford, 960 p. (2001).