

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

حسن بخشنده امنیه* (دانشیار)

دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

محمدصابر زهزم (دانشجوی دکتری)

سید احسان موسوی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۳، ص. ۱۳۷-۱۴۵، (پادداشت شی)

برآورد فشار بهینه برای نگهداری جبهه‌کار تونل‌های شهری از مهم‌ترین عوامل در راندمان ماشین حفاری فشار تعادلی زمین (EPB) است. اعمال فشار کمتر از حد تعادلی باعث نشست و بیشتر از آن باعث بالادگی 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 روش تحلیلی جانسکن و عددی، فشار لازم برای نگهداری جبهه‌کار تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی - غربی) محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS3D با مقادیر به دست آمده از روش تحلیلی، 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 استفاده شده دارد.

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

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 سیر 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، بالادگی در سطح زمین مشاهده می‌شود و می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شود.^[۱]

در ماشین فشار تعادلی زمین (EPB)، فشار جبهه‌کار با ایجاد توازن بین حجم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۲۵، اصلاحیه ۱۸/۱۰/۱۳۹۲، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲۰.

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

حفاری و حجم تخلیه‌ی مصالح از اتافک فشار 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 توری مصالح حفاری شده، تخلیه‌ی مصالح انجام شود. بدیهی است که حجم افزودنی‌ها نیز باید برای محاسبه‌ی حجم مصالحی که به وسیله‌ی نوار نقاله‌ی ماریپیج تخلیه می‌شوند، در نظر گرفته شود.^[۱]

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

جبهه‌کار رخ خواهد داد. در این حالت اگر چه ممکن است مقدار فشار جبهه‌کار تثبیت شود، ولی به دلیل تخلیه‌ی مصالح بیش از مقدار حفاری شده، 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 در نظر گرفتن دو شرط تعادل بین مصالح حفاری شده 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 بنرمارک^۴ (خاک چسبنده و زهکشی نشده)، 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 مطالعه‌ی 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 دانه‌ی 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 به صورت استاتیکی و دینامیکی توسعه یافته‌اند و بیشتر این روش‌ها محیط خاک را به صورت 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 متروی مادرید مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۱۱] در مطالعه‌ی 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 متروی تهران

خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمؤمنین (ع) واقع در منطقه‌ی جنوب شرقی تهران در امتداد شرقی - غربی شروع و پس از عبور از تقاطع بزرگراه محلاتی - خیابان ۱۷ شهریور و میدان محمدیه، در تقاطع بزرگراه نواب - پل قزوین تغییر جهت داده و در امتداد جنوبی - 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 متروی تهران است.

مطالعات ژئوتکنیک مسیر خط ۷ متروی تهران از دو بخش شمالی - جنوبی و شرقی - غربی، در سه فاز مرحله‌ی مفهومی، مقدماتی و تکمیلی انجام پذیرفته است. کارش‌ها و برداشت‌های صحرایی بر پایه‌ی دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی با حفاری ۲۹ حلقه‌ی گمانه‌ی مته‌ی 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 متروی تهران، بیشتر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه‌سنگ است و به شکل روکشی، رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است؛ که به‌طور کلی رسوبات از شرق به غرب ریزدانه‌تر می‌شوند، به‌طوری‌که در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌های ریزدانه‌ی رسی توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند.^[۱۴] با توجه به نتایج به‌دست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه ۱:۵۰۰۰، لایه‌های حاکی دربرگیرنده‌ی مسیر تونل به ۶ گونه‌ی زمین‌شناسی مهندسی (ET) تفکیک و در ارائه جدول ۱ شده‌اند.

براساس مقاطع زمین‌شناسی مهندسی تونل، واحدهای ET-۱، ET-۲، ET-۳، ET-۴، ET-۵ و ET-۶ به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارند و واحد ET-۴ بیشتر به



شکل ۱. پلان شهری و عکس ماهواره‌ی تقاطع محلاتی - ۱۷ شهریور تا میدان قیام (مسیر خط ۷ متروی تهران).

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

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

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 ^۳)
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

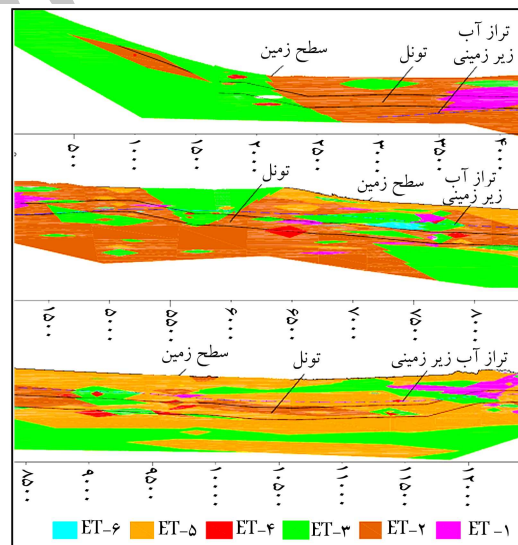
۳. هیدروژئولوژی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

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 (متر از 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 آهنک) 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 متر از ۰ الی	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 ۲. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران. [۱۴]

صورت لنتزا و عدسی‌های ماسه‌یی گسترش یافته است. در این میان واحد ET-۶ در مسیر تونل گسترش کمی داشته و موقعیت آن فقط در کیلومتر 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]

$$a = \frac{\sigma_v \times D}{\gamma + \tan \theta} \quad (6)$$

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (7)$$

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (8)$$

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_o 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_o بار سطحی (KN/m²)؛ γ' چگالی مؤثر خاک (KN/m³)؛ γ_n چگالی طبیعی خاک (KN/m³)؛ γ_d چگالی خشک خاک (KN/m³)؛ 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 نظر گرفته شده است.^[۵] و قطر حفاری تونل برابر ۹٫۱۶۴ متر است. در این نوشتار بار سطحی به دو صورت بررسی شده است:

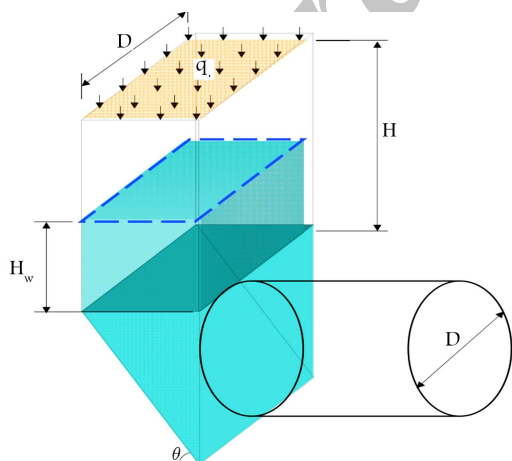
۱. مناطقی که تونل از زیر خیابان‌ها عبور می‌کند: در این مناطق بار سطحی برابر ۲۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

۲. مناطقی که تونل از زیر خانه‌ها عبور می‌کند: در این مناطق با فرض بیشینه‌ی ساختمان ۵ طبقه، فشار سطحی برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

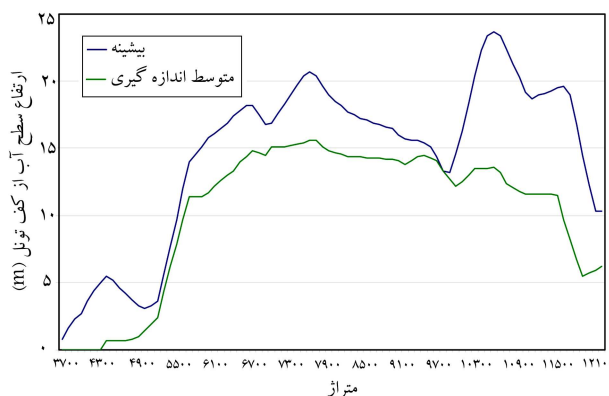
پارامترهای دیگر در قسمت‌های مختلف تونل با توجه به روباره، ارتفاع آب و خصوصیات خاک در هر مقطع تعیین و در محاسبات وارد شده‌اند. برخی از پارامترهای ذکر شده به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

مقادیر فشار جبهه‌کار در راستای تونل مطابق با روابط ارائه شده در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین در محاسبات، فشار جبهه‌کار در تاج تونل، دست‌کم برابر ۲۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

زاویه‌ی لغزش گوه با استفاده از گراف ارائه شده توسط جانکسز و استینر برای مقاطع مختلف محاسبه شده است (شکل ۵). در این گراف زاویه‌ی لغزش به صورت 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]



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 دو حالت میانگین و بیشینه نمایش داده شده است.^[۱۳]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از متر ۱۰۵۰ 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 سست که منجر به نشست قابل توجه زمین می‌شوند، مواد حفاری شده 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 - غربی)، فقط از روش جانکسز برای تحلیل فشار جبهه‌کار استفاده شده است (رابطه‌های ۱ الی ۸).^[۴]

$$P_f = \eta_e \times P_e + \eta_w + 20 \text{ KPa} \quad (1)$$

$$P_f = \eta_e \times K_a \times \sigma'_v + \gamma_w \times H_w + 20 \text{ KPa} \quad (2)$$

$$P_f = \eta_e \times K_a \times \sigma_v + \eta_w \times \gamma_w \times H_w + 20 \text{ KPa} \quad (3)$$

$$H > 2D \text{ اگر} \quad (3)$$

$$\sigma'_v = \frac{a \cdot \gamma' - c'}{K_o \times \tan \phi'} \left(1 - e^{-K_o \times \tan \phi' \times \frac{H_w}{a}} \right) + \frac{a \cdot \gamma_d - c'}{K_o \times \tan \phi'} \left(e^{-K_o \times \tan \phi' \times \frac{H_w}{a}} - e^{-K_o \times \tan \phi' \times \frac{H}{a}} \right) + q_o \times e^{-K_o \times \tan \phi' \times \frac{H}{a}} \quad (4)$$

$$\sigma_v = \gamma_n \times H \quad H \leq 2D \text{ اگر} \quad (5)$$

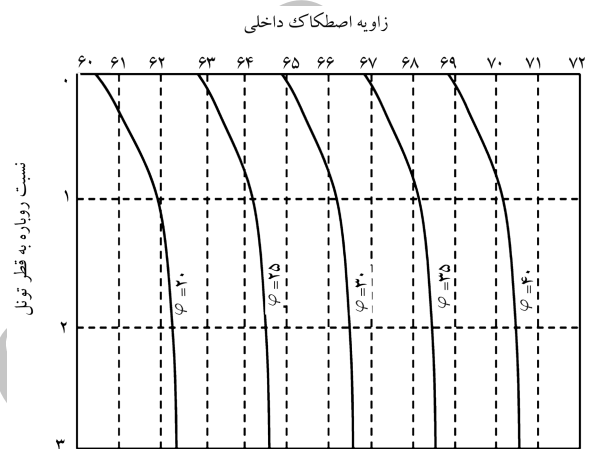
جدول ۴. فشار جبهه‌کار محاسبه شده به روش تحلیلی برای مقاطع انتخابی در راستای تونل.

شماره مقطع	ارتفاع روبراه (m)	ارتفاع سطح آب (m)	چگالی خاک (KN/m ³)	چسبندگی خاک (KN/m ²)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	فشار زمین در سقف تونل (Kpa)	فشار آب در سقف تونل (Kpa)	فشار جبهه کار (Kpa)
۱	۱۵۰۰	۹٫۴	۱۹	۳۰	۳۳	۰	۰	۲۰
۲	۲۶۰۰	۱۴٫۵	۱۸٫۴	۱۵	۳۳	۹	۰	۳۶
۳	۲۷۰۰	۱۴٫۲	۱۸٫۴۳	۱۵٫۷۴	۳۳	۹	۰	۳۵
۴	۴۰۰۰	۱۵٫۸	۱۸٫۶۸	۱۹٫۰۸	۳۳٫۴۷	۵	۰	۲۹
۵	۵۰۰۰	۱۰	۱۷٫۷۸	۲۲٫۰۴	۳۰٫۸	۳	۰	۲۵
۶	۵۷۰۰	۱۸٫۸	۱۹	۳۰	۳۳	۰	۲۱	۴۲
۷	۹۴۰۰	۱۹٫۴	۱۷٫۱	۳۰٫۹۵	۲۸٫۲۶	۰	۵۴	۷۷
۸	۹۵۰۰	۱۹٫۶	۱۷	۳۱	۲۸	۰	۵۲	۷۵

روش‌های تحلیلی است. برای زمین‌های چسبیده، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی برای کمیته‌ی 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. در نهایت، 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 PLAXIS 3D 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.



شکل ۵. گراف مورد استفاده برای تخمین زاویه‌ی لغزش در تونل خط ۷ متروی تهران (قطعه‌ی شرقی - غربی).^[۲]

۱.۵. بررسی و انتخاب مقاطع بحرانی در طول مسیر

به منظور تحلیل عددی فشار نگهدارنده‌ی جبهه‌کار قطعه‌ی شرقی - غربی تونل خط ۷ متروی تهران، ۶ مقطع مهم از لحاظ کمترین و بیشترین میزان روبراه، 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 روبراه در هر مقطع ارائه شده است.

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

شماره مقطع	ارتفاع روبراه (m)	نسبت $\frac{C}{D}$
۱	۱ + ۵۰۰	۱٫۱
۲	۲ + ۶۵۰	۱٫۶
۳	۴ + ۰۰۰	۱٫۸
۴	۵ + ۰۰۰	۱٫۲
۵	۵ + ۷۰۰	۲٫۱
۶	۹ + ۴۶۰	۲٫۲

۵. تعیین فشار جبهه‌کار به روش عددی

روش‌های تحلیلی تخمین فشار مورد نیاز جهت نگهداری جبهه‌کار، مبتنی بر مکانیزم شکست جبهه‌کار هستند. بنابراین با در نظر گرفتن 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 پایداری 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]

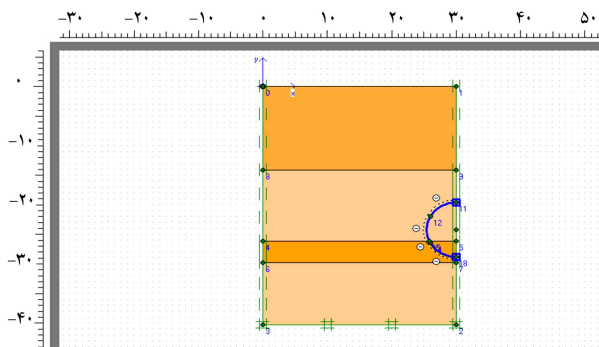
طبق مطالعات انجام شده در زمین‌های غیرچسبیده هنگامی که عمق تونل با قطر آن تقریباً برابر است، نتایج حاصل از آنالیزهای عددی تا حدودی معادل مقادیر محاسبه شده از روش‌های تحلیلی هستند. هنگامی که نسبت عمق تونل به قطر آن از ۱ بیشتر می‌شود، مقادیر پیشنهاد شده توسط روش‌های عددی بزرگ‌تر از مقادیر

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

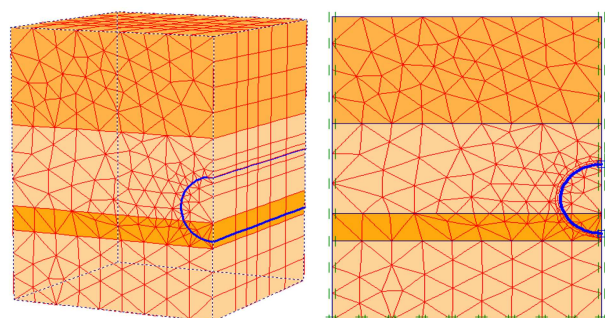
طبقه بندی خاک	پارامترهای فیزیکی خاک		پارامترهای مکانیکی خاک		مدول کشسان E_t (MPa)	ضریب پواسون ν
	γ_d (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (deg)		
ET-۱	۱۸٫۶	۲۱٫۸۵	۱۴	۳۴	۸۰	۰٫۳
ET-۲	۱۸٫۴	۲۱٫۶۵	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳
ET-۳	۱۹	۲۳	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲
ET-۴	۱۸٫۲	۲۱٫۴۵	۲۲	۳۲	۵۰	۰٫۳
ET-۵	۱۷	۲۱٫۵	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵
ET-۶	۱۷	۲۱٫۲۵	۰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

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

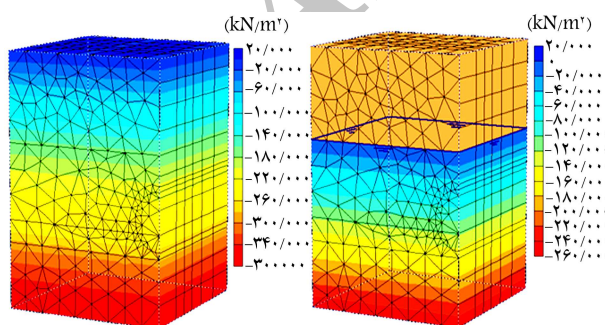
پارامترهای ماشین EPB	واحد	مقدار
صلبیت محوری (EA)	KN/m	$۸٫۲ \times ۱۰^۶$
صلبیت خمشی (EI)	KN.m ^۲ /m	$۸٫۳۸ \times ۱۰^۴$
وزن (W)	KN/m ^۲	۳۸٫۱۵
نسبت پواسون (ν)	—	۰



شکل ۶. هندسه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران در موقعیت ۹+۴۶۰ با نرم‌افزار PLAXIS^{3D}.



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



(ب) تنش موثر خاک (اولیه).

(الف) فشار منفذی آب (اولیه)؛

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

۲.۵. هندسه‌ی مدل

ماشین حفاری قطعه‌ی شرقی - 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 در کیلومتر 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 نظر گرفته شده است. مدل‌سازی مقاطع با توجه به متقارن بودن مقطع تونل به صورت 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 به منظور انجام محاسبات به المان‌های محدود تقسیم شده است. مطابق شکل ۷، مدل به المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌یی با ابعاد $۴۵ \times ۴۰ \times ۳۰$ 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 ۸ الف، فشار آب در کف مدل ۲۵۶ کیلوپاسکال و در شکل ۸ ب، تنش مؤثر

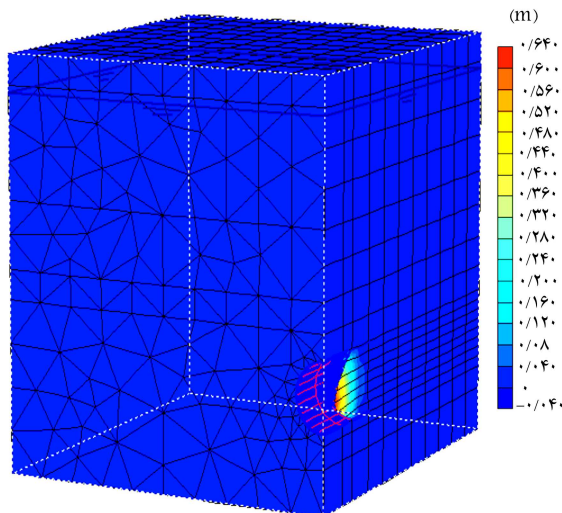
بزرگ است. بیشترین تغییرشکل در انتهای ماشین اتفاق می افتد که دلیل آن انقباض سپر و اتلاف حجم خاک است. فاز دوم و سوم بیانگر نشست در جبهه کار هستند. شکل ۱۱، جابه جایی کل مربوط به فاز دوم را با توجه به کاهش فشار جبهه کار نشان می دهد، که کمتر از ۰/۵ سانتی متر است.

در شکل ۱۲، نتایج تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS^{3D} برای ۶ مقطع انتخاب شده نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳، مقایسه یی بین مقادیر محاسبه شده ی فشار جبهه کار با استفاده از روش های تحلیلی و عددی در پروژه ی خط ۷ متروی تهران ارائه شده است. روش عددی با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری از خاک مانند: مدول کشسان، ضریب پواسون، همگنی یا ناهمگنی خاک، خصوصیات ماشین حفاری و مواد بهسازی، بررسی نشست جبهه کار، زمین و نشست آب، تحلیل صحیح تر و منطقی تری از پایداری جبهه کار نسبت به روش های تحلیلی دارد. مطابق شکل ۱۳، تفاوت روش تحلیلی و عددی حدود ۲۵-۲۰ کیلو پاسکال است، که به دلیل وجود نوسانات فشار آب در محدوده ی مورد مطالعه است. در روش تحلیلی این مقدار در محاسبه ی کمیته ی فشار نگهدارنده ی جبهه کار در نظر گرفته شده است، اما در روش عددی منظور نشده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، در جدول ۸ و ۹ فشار تدقیق شده ی اتاقک حفاری اعلام شده توسط شرکت پیمانکار (شرکت مهندسی سپاسد) در کیلومترهای ۵۶۰۰ تا ۵۸۰۰ و ۹۳۰۰ تا ۹۶۰۰ ارائه

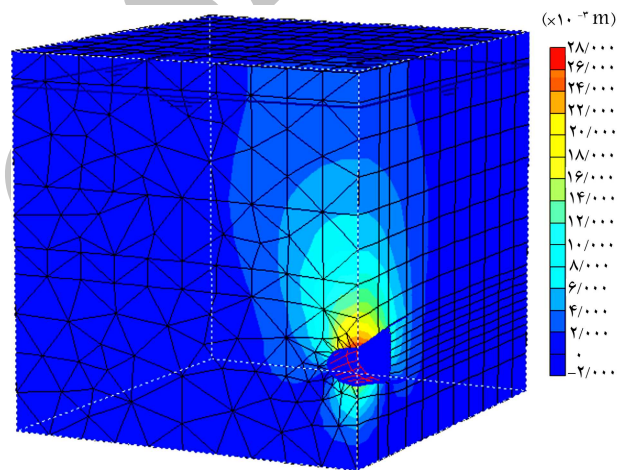
خاک در کف مدل ۳۷۹ کیلو پاسکال است، که با توجه به شرایط آب زیرزمینی و خاک، با نرم افزار PLAXIS^{3D} محاسبه شده است.

۵.۵. نتایج حاصل از تحلیل عددی

در عملیات مهندسی، یک پروژه به چند فاز تقسیم می شود. به طور مشابه، عملیات محاسبه در PLAXIS^{3D} نیز به چند فاز تقسیم شده است. فاز ساختاری اول، شامل حفاری خاک و نصب ماشین حفاری است. با استقرار ماشین در قطعه ی اول، اصطکاک و چسبندگی کم می شود، بنابراین، همان خصوصیات خاک با ضریب کاهش مقاومت ۰/۹ در محدوده ی ماشین به مدل اعمال می شود.^[۱۶] فشار جبهه کار در تاج تونل براساس مقادیر اولیه (عمق ۱۹/۶۷ متری) به میزان ۴۰ کیلو پاسکال اعمال شده و شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک حفاری ۱۵ کیلو پاسکال بر متر است. انقباض ناشی از اضافه حفاری و مخروطی بودن در انتهای ماشین ۰/۴۸٪ در نظر گرفته شده است.^[۱۷] شکل های ۹ و ۱۰، جابه جایی کل و عمودی در فاز اول را نشان می دهند. همان طور که ملاحظه می شود فشار جبهه کار به اندازه ی کافی برای پایداری جبهه کار



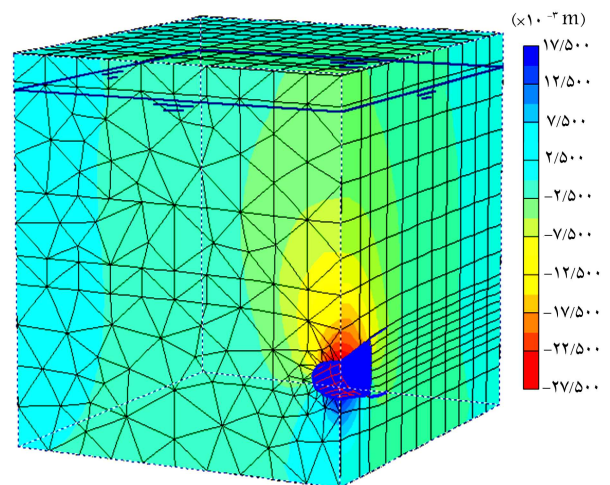
شکل ۱۱. جابه جایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار جبهه کار).



شکل ۹. جابه جایی کل در پایان فاز اول.



شکل ۱۲. نتایج مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS^{3D} برای ۶ مقطع انتخاب شده در پروژه ی خط ۷ متروی تهران.



شکل ۱۰. جابه جایی عمودی در پایان فاز اول.

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 کیلومترهای ۹+۴۶۰، ۳۲/۴۵ میلی‌متر ارزیابی شده است، که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به استانداردهای موجود، [۱۹۳۱۸] 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 - غربی) است و تطابق بسیار خوبی با فشار تدقیق‌شده‌ی اتاقک حفاری توسط شرکت پیمانکار (شرکت مهندسی سپاسد) دارد.

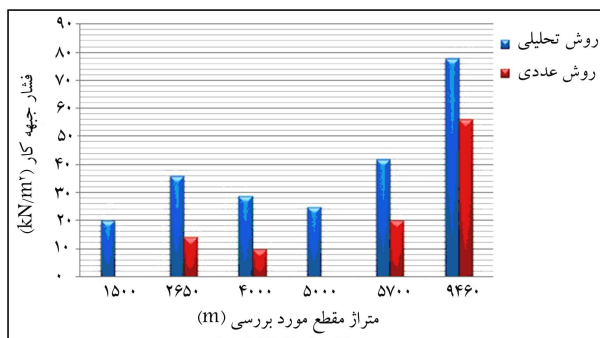
• با مقایسه‌ی نتایج حاصل از بررسی‌های تحلیلی و عددی ملاحظه می‌شود که اختلاف مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال است. این اختلاف به دلیل وجود نوسانات فشار آب در محدوده‌ی مورد مطالعه است که در روش تحلیلی این مقدار در محاسبه‌ی کمیته‌ی فشار 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.

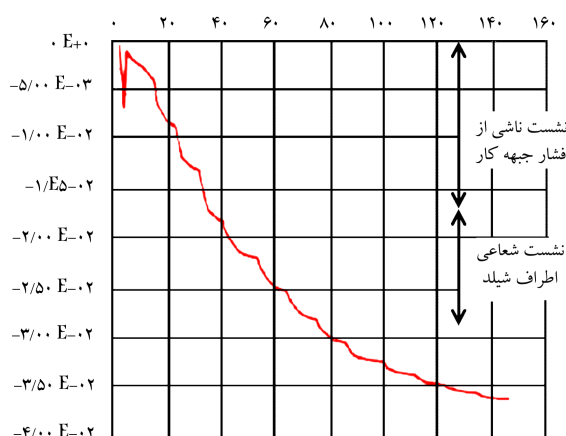
• با توجه به مطالب ارائه‌شده، مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی، تفاوتی در حدود ۲۵-۲۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. این اختلاف به دلیل عدم احتساب نوسانات فشار آب در روش عددی است. به‌طور کلی، مقادیر عددی همانند روش‌های تحلیلی در ارائه‌ی فشار نگهدارنده، روند مشابهی را نشان می‌دهند.

• برای صحت نتایج به‌دست‌آمده از فشار جبهه‌کار، مقدار نشست در محدوده‌ی کیلومترهای ۹+۴۶۰، ۳۲/۴۵ میلی‌متر به‌دست‌آمده 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.



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 کیلومترهای ۹+۴۶۰.

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

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

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

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

پانویس‌ها

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. trest pit

(References) منابع

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 shield in heterogeneous 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 and 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, Tunnels*. Tehran: Sepasad Engineering Company (2008).
15. Russo, G. "Evaluating the required face - support pressure in EPBs advance mode", *Gallerie e Grandi Opere Sotteranee* (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).