

تحلیل سه‌بعدی پایداری سینه‌ی کار دستگاہ TBM-EPB در جبهه‌ی حفاری ناهمگن (مطالعه‌ی موردی: خط ۲، متروی مشهد)

بهنام اسلامی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی اکبر گلشانی* (استادیار)

دانشکده‌ی هندیسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۱۳۹۶)
دوره ۲-۱۳۳، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۸-۱۲۱، (پادداشت فنی)

از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در نشست توده‌های خاکی ناهمگن، محاسبه‌ی فشار نگه‌دارنده‌ی جبهه‌ی کار تونل است. در نوشتار حاضر، ابتدا فشار سینه‌ی کار ماشین حفاری TBM با روش تجربی و تحلیلی محاسبه و سپس با نرم‌افزار تفاضل محدود Flac^{3D}، مدل‌سازی سه‌بعدی تونل انجام شده است. در ادامه، با معرفی پارامتر فشار مجاز، مقدار فشار بهینه‌ی جبهه‌ی کار تونل به روش عددی محاسبه و در نهایت، نتایج روش‌های مذکور با مقادیر واقعی پارامترهای حفاری پروژه‌ی خط ۲ مترو مشهد مقایسه شده‌اند. بر این اساس، نتایج روش تجربی با خطای زیادی همراه بوده است، اما روش تحلیلی مقدار فشار را با دقت بیشتری محاسبه کرده است. روش عددی، قابلیت بیشتری جهت تخمین فشار پایداری سینه‌ی کار نسبت به ۲ روش قبلی داشته است، که در صورت استفاده از مدل‌های رفتاری غیرخطی کسشن‌خمیری، امکان محاسبه‌ی دقیق‌تر فشار جبهه‌ی کار ممکن است.

واژگان کلیدی: فشار سینه‌ی کار، Flac^{3D}، نشست سطحی، TBM-EPB،

فشار مجاز.

behnameslami1388@gmail.com
golshani@modares.ac.ir

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده از ماشین‌های سپردار TBM^۱ در زمین‌های نرم زیر سطح ایستایی بسیار رایج شده است، که پایداری جبهه‌ی کار تونل در این ماشین‌ها به روش‌های غیرمستقیم از جمله استفاده از هوای فشرده^۲، دوغاب بتونیت^۳، و نیز استفاده از خود خاک حفاری شده (EPB)^۴ تأمین می‌شود.^[۱]

حفاری به روش TBM-EPB در محیط‌هایی که خاک رفتاری ناپایدار دارد و یا ویژگی‌های ضعیف دارد، که باعث تشدید اثرات نشست می‌شود و همچنین در حفاری پایین‌تر از آب زیرزمینی توصیه می‌شود.^[۲] رفتار زمین یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تونل‌سازی در محیط‌های شهری به شمار می‌رود، زیرا ناپایداری و تغییرشکل‌های بیشتر از حد مجاز ممکن است باعث مشکلاتی برای سازه‌های مجاور تونل شود.

به منظور تحلیل پایداری کلی تونل، ابتدا باید چگونگی تغییرات تنش‌ها و جابجایی‌ها را در اثر حفاری تعیین کرد، بدین منظور می‌توان روش‌هایی مانند: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی، و مدل‌سازی فیزیکی را به کار برد. در این میان، روش‌های عددی به سبب قابلیت‌هایی چون سرعت محاسبات، انعطاف‌پذیری نسبت به دستورات کاربر، تنوع نتایج، و هزینه‌ی اندک به سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود.^[۳] حفار تونل در اعماق کم و زمین‌های خاکی، در سطح زمین نشست ایجاد می‌کند، که موجب آسیب‌رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین می‌شود. یکی

از مسائلی که همواره تونل‌سازی در فضاهای شهری را با چالش مواجه می‌سازد، امکان ایجاد نشست‌های قابل توجه در سطح زمین حین حفاری تونل است.^[۴]

در زمین‌های متخلخل اگر تونل زیر تراز آب زیرزمینی حفر شود، نگرانی سینه‌ی کار به همراه اقدامات تکمیلی برای جلوگیری از ورود آب موردنیاز است. در این حالت سیستم‌های دوغابی و فشار تعادلی زمین جزء راه‌حلی‌هایی هست که همواره توصیه می‌شود.^[۶،۵] میدان جابه‌جایی‌های القاشده به‌وسیله‌ی حفاری تونل در زمین‌های نرم، نتیجه‌ی این مؤلفه‌هاست (شکل ۱).

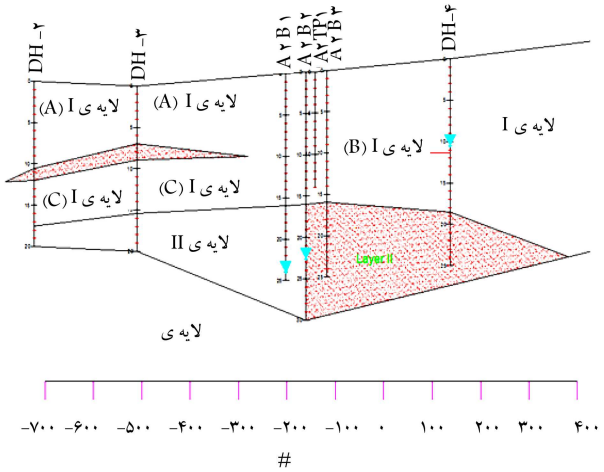
الف) تغییرشکل سینه‌ی کار به‌خاطر رهایی تنش: این پارامتر در مورد ماشین‌های با قابلیت اعمال فشار به سینه‌ی کار مانند ماشین‌های EPB تا حدودی قابل کنترل است.

ب) جابه‌جایی‌های القایی در پشت سپر: این جابه‌جایی‌ها که حاصل اضافه‌ی حفاری است (اختلاف قطر سر مته‌ی حفاری با قطر سپر)، برای کاهش اصطکاک بین سپر و زمین و همچنین سهولت زاویه‌گیری و چرخش ماشین در قوس‌ها در نظر گرفته می‌شود.

ج) جابه‌جایی‌های حاصل از تفاوت قطر پوشش تونل (سگمنت بتنی) با دنباله‌ی سپر: این جابه‌جایی‌ها را می‌توان با تزریق گروت انتهایی کنترل کرد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۳۰، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۳.



شکل ۲. پروفیل طولی مسیر محدوده‌ی شفت ورودی و ایستگاه A2. [۹]

انجام خواهد شد. این خط شامل ۱۲ ایستگاه زیرزمینی است، که عمق آنها بین ۱۰ تا ۲۳ متر متغیر است و برای اجرای آنها از دو روش پوشش و حفار، و برای حفاری مکانیزه نیز از دستگاه تمام‌مقطع استفاده خواهد شد. [۸]

مقاطع مورد بررسی در این نوشتار براساس گزارش ژئوتکنیک انجام شده در مسیر (گمانه‌ی A2B1) توسط شرکت مهندسان مشاور ایمن‌سازان بوده است (مشخصات لایه‌های خاک در گمانه‌ی مذکور مطابق جدول ۱ است). پروفیل طولی مسیر نیز در موقعیت مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. حفاری تونل در پروژه‌ی مورد نظر با ۲ دستگاه TBM از نوع متعادل‌کننده‌ی فشار زمین EPB انجام می‌شود. سیستم لاینینگ تونل از نوع سگمنت بتن مسلح است، که شامل ۷ قطعه‌ی بتنی و یک قطعه کلید است. قطر بیرونی تونل ۹٫۱۰ متر و قطر داخلی آن ۸٫۴ متر است، که ضخامت لاینینگ بتنی ۰٫۳۵ متر و وزن واحد طول آن ۸٫۴ تن است. [۹]

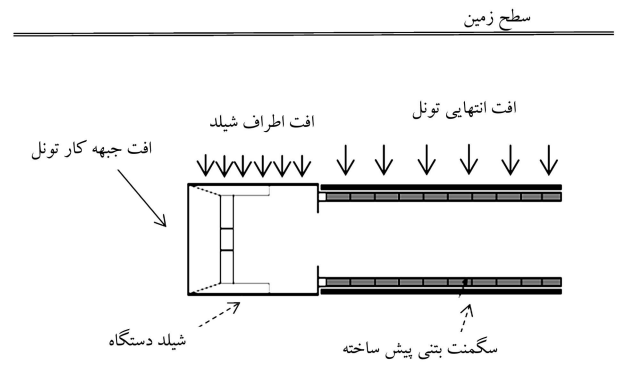
۳. محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی کار به روش تجربی

یکی از رایج‌ترین روابط تجربی مورد استفاده در محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی حفاری رابطه‌ی بین فشار سینی‌های کار و مقاومت برشی زهکشی‌نشده در رس خمیری همگن است، که برای تونل‌های دایره‌ی استفاده می‌شود. این رابطه را پک^۵ پیشنهاد کرده است، که طبق آن پارامتر عدد پایداری (فاکتور سربار) طبق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$T_C = \frac{q + \gamma Z - \sigma_i}{C_U} \quad (1)$$

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی مسیر (گمانه‌ی A2B1 - ۵ km).

مدول پانگ (Mpa)	ضریب تخلخل	ضریب باربرداری	ضریب بارگذاری	زاویه‌ی اصطکاک زهکشی‌نشده (deg)	چسبندگی زهکشی‌نشده (kpa)	زاویه‌ی اصطکاک زهکشی‌شده (deg)	چسبندگی زهکشی‌شده (kpa)	وزن مخصوص خشک (KN/m ³)	تیپ خاک	لایه (واحد)
۲۵	۰٫۶۷	۰٫۰۳	۰٫۱۳	۲۰	۷۰	۲۵	۳۵	۱۶	CL-ML	I (A)
۳۹	۰٫۶۷	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۲۰	۶۵	۲۵	۳۰	۲۲	CL-ML	I (C)



شکل ۱. عوامل مؤثر در نشست سطحی در حفاری با سپر.

د تغییرات حجم خاک در بلندمدت: که به علت فرایند تحکیم در خاک‌های رسی و تغییر شکل پوشش تونل به دلیل پدیده‌ی خزش ایجاد می‌شود.

یکی از مشکلات حفاری با ماشین‌های EPB، حفاری در جبهه‌ی ناهمگن است، که در این وضعیت تخمین پارامترهای ماشین حفاری مانند: نیروی پیشران، فشار سینی‌های کار، گشتاور سر مته‌ی حفاری، تزریق انتهایی، و نرخ نفوذ براساس لایه‌های خاک با مشخصات متفاوت نیاز به تجربه و تخصص خاص خود را دارد. [۷]

۲. معرفی مشخصات مسیر خط ۲ مترو مشهد

مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد از انتهای بولوار طبرسی شمالی پایین‌دست روستای کشف شروع می‌شود و به بسیاری از کانون‌های جمعیتی آن منطقه، سرویس‌دهی مستقیم دارد و بعضی از مراکز جمعیتی مجاور، که عمدتاً طبقات محروم در آنجا ساکن هستند، با طی کمترین فاصله به یکی از ایستگاه‌های خط ۲ دسترسی خواهند داشت. در ادامه، خط مذکور پس از قطع کمربندی ۱۰۰ متری (بزرگراه بسیج) از منطقه‌ی طلاب و سپس با فاصله‌ی اندکی از چهارراه مقدم طبرسی عبور خواهد کرد. سپس به میدان راه‌آهن و میدان شهدا طی مسیر خواهد کرد. در ادامه، نیز با عبور از میدان سعدی و میدان تقی‌آباد ضمن عبور از ایستگاه تقاطعی با خط ۱، دسترسی ویژه‌ی به زیست‌خاور خواهد داشت و در نهایت، ایستگاه آخر خط مذکور با عبور از پارک کوهسنگی در میدان فضل بن شاذان (جام غسل) خاتمه می‌یابد. همان‌طور که اشاره شده است، بخش اعظم مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد در منطقه‌ی کمتر توسعه‌یافته‌ی شهر مشهد قرار گرفته است.

طول مسیر ۱۴٫۳ کیلومتر است، که ۰٫۳ کیلومتر آن به صورت روباز و هم‌سطح و ۱۴ کیلومتر آن به صورت زیرزمینی اجرا می‌شود. ظرفیت پیش‌بینی‌شده ۱۶۰۰۰ مسافر در ساعت در هر جهت است، که توسط ۲۰ دستگاه به همراه ۱۰۰ واگن

به عمل آید. ضمن اینکه مقادیر بزرگی برای افت حجم در زمانی که T_C بزرگ‌تر یا مساوی ۵ باشد، می‌توان انتظار داشت.

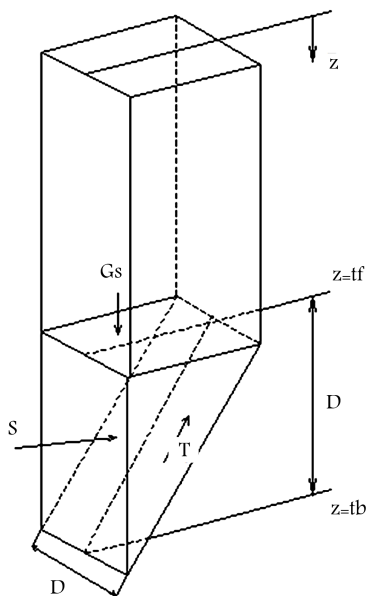
-- زمانی که T_C بزرگ‌تر از ۶ باشد، به‌طور کلی سینه‌ی کار ناپایدار است.

یکی از محدودیت‌های این روش در نظرنگرفتن مشخصات لایه‌بندی خاک در مواردی است که خاک قرارگرفته در مقطع حفاری به‌صورت لایه‌یی است، در حالی که رابطه‌ی ۱ در خاک‌های تک‌لایه قابل استفاده است.

۴. محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی کار به روش تحلیلی

روش‌های محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار به روش تحلیلی شامل: روش‌های تعادل حدی^۶ و روش تحلیل تنش حدی^۷ می‌شوند، که به دلیل سهولت به‌کارگیری و پارامترهای به‌کار برده‌شده، در این نوشتار از روش تعادل حدی برای محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار استفاده شده است. فرضیات استفاده‌شده برای روش تعادل حدی بر مبنای نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۸^[۱۱] عبارت است از تعریف سطوح شکست به‌صورت متوالی و پی در پی، توزیع یکنواخت تنش در امتداد سطح شکست، و در نظرگرفتن گوه‌ی گسیختگی به صورت یک جسم صلب. متداول‌ترین روش تحلیلی برای محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار، استفاده از مدل گوه و سیلوی است، که اساس آن روش تعادل حدی است و به‌صورت سه‌بُعدی انجام می‌شود، که این روش اولین بار توسط هورن^۸ پیشنهاد شده است. یکی از محدودیت‌های روش ذکرشده، عدم در نظرگرفتن اثر قوس‌زدگی روی تاج تونل است و این درحالی است که یکی از مهم‌ترین مواردی که در محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار به روش تعادل حدی باید در نظر گرفته شود، اثر قوسی‌شدن^۹ سربار خاک در محدوده‌ی خاک فوقانی تونل است. در یافته‌های اخیر بروئر^{۱۰} روشی ارائه شده است که در خاک‌های با شکل ناهمگن نیز کاربرد دارد و کمک شایانی به افزایش دقت محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار کرده است، زیرا در روش مذکور برخلاف روش‌های قبل، اثر قوس‌زدگی خاک در قسمت فوقانی تونل نیز در نظر گرفته شده است (شکل ۵).

در محاسبات مربوط به روش بروئر در نوشتار حاضر، اثر قوس‌زدگی خاک در



شکل ۵. مدل سه‌بُعدی گوه و سیلوی بروئر.^[۱۳]

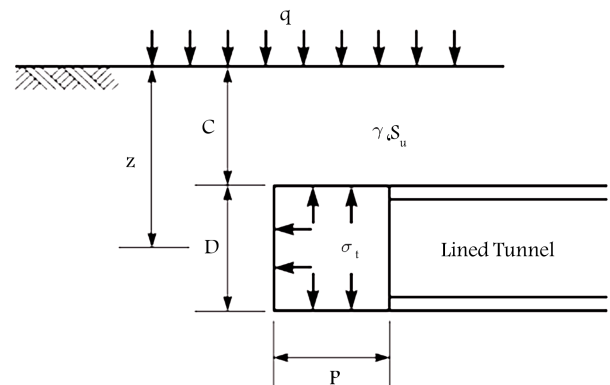
که در آن، γ چگالی خاک (KN/m^3)، Z عمق محور تونل (m)، q فشار روباره‌ی سطحی (kpa)، σ_t فشار ننگ‌دارنده‌ی سینه‌ی کار (kpa)، T_c عدد پایداری، و C_u مقاومت برشی زهکشی‌نشده‌ی رس (kpa) است (شکل ۳).^[۱۰]

به‌طورکلی رابطه‌ی ۱ از جنس عکس ضریب اطمینان است و با کاهش پارامتر مذکور، مقدار پایداری جبهه‌ی کار افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۴، مقدار عدد پایداری با نسبت عمق قرارگیری سپر به قطر آن رابطه‌ی مستقیم دارد، به‌طوری که با افزایش این نسبت مقدار عدد پایداری افزایش می‌یابد و جبهه‌ی حفاری ناپایدارتر می‌شود، که با استفاده از نمودار مذکور و رابطه‌ی ۱، می‌توان فشار پایداری سینه‌ی کار را به طور تقریبی تخمین زد. از طرفی، مقدار نشست در سطح با افت حجمی، رابطه‌ی مستقیم دارد، که این پارامتر تحت تأثیر فشار سینه‌ی کار قرار دارد. مقدار معمول افت حجمی برای دستگاه TBM-EPB حدود ۰٫۳ تا ۰٫۶٪ تا بیشینه‌ی مقدار ۱٪، در زمانی که پارامترهای دستگاه به خوبی عمل نکنند و شرایط پیش‌بینی‌نشده به‌وجود آید، قابل پیش‌بینی است. این درحالی است که حدود ۰٫۶٪ از نشست کل در اثر آزادسازی تنش در مقطع حفاری و ۲۰٪ آن نیز در اثر نشست‌های بلندمدت (بعد از تزریق انتهایی) به وقوع می‌پیوندد.^[۱۱]

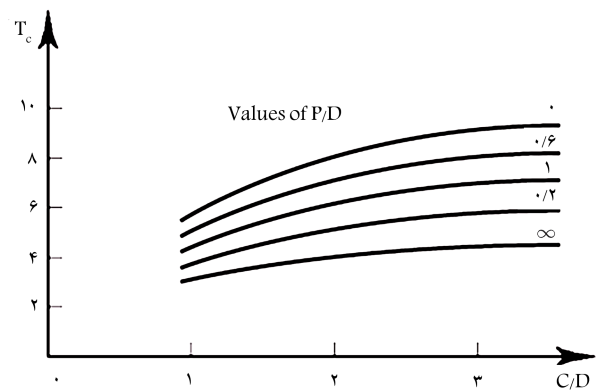
براساس آزمایش‌های سائتریفیوژ انجام‌شده توسط انجمن بین‌المللی تونل، حدود عدد پایداری که می‌توان با آن به‌صورت کیفی پایداری را تعیین کرد، در اینجا ارائه شده است (ITA/AITES):

-- به ازاء T_C کوچک‌تر یا مساوی ۳، سینه‌ی کار به‌صورت کلی پایدار است.

-- به ازاء T_C بین ۳ و ۶، باید ملاحظات خاصی در مورد ارزیابی ریسک نشست



شکل ۳. پارامترهای مرتبط با عدد پایداری تونل.^[۱۰]



شکل ۴. رابطه‌ی نسبت سربار با فشار سینه‌ی کار.^[۱۰]

قسمت فوقانی سپر لحاظ نشده است، زیرا نسبت سر باره در تونل مترویی مشهد کمتر از ۲ برابر قطر است و این کاهش سر باره در جهت ضریب اطمینان در نظر گرفته نشده است.

اساس مدل پایداری گوهی، تحلیل تعادل حدی نیروهای واقع بر گوه است. برای بررسی مسئله‌ی چندلایه‌یی بودن و غیرهمگن بودن خاک در جبهه‌ی کار تونل، گوه‌ی خاک به قطعات افقی تقسیم و نیروهای اعمال شده روی هر قطعه جداگانه در تحلیل در نظر گرفته می‌شوند.

نیروهای وارده بر گوه‌ی قطعه‌بندی شده مطابق شکل ۶ عبارت‌اند از: نیروهای بین قطعه‌یی $F_u^{(i)}$ ، $F_d^{(i)}$ وزن قطعه‌ی $w^{(i)}$ ، نیروی برشی بسیج شده در سطح لغزش $(T_m^{(i)})$ ، نیروهای برشی مقاوم در جبهه کناری قطعه‌ی $T_s^{(i)}$ ، نیروی ناشی از سر بار (سیلوی خاک) روی گوه (F_v) ، نیروی مؤثر زمین $(E(i))$ ، و نیروی آب $(w_F^{(i)})$. با لحاظ کردن شرایط مرزی برای گوه، رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$F_v + \sum_{i=1}^n W^{(i)} + 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_s}{\alpha} \right)^{(i)} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{C}{\alpha} \right)^{(i)} + \sum_{i=1}^n E^{(i)} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{(i)} = 0 \quad (2)$$

که در آن، مقادیر α و β مطابق روابط ۳ و ۴ است:

$$\alpha = \tan \phi \cdot \cos \theta - \sin \theta \quad (3)$$

$$\beta = \tan \phi \cdot \sin \theta + \cos \theta \quad (4)$$

که در آن‌ها، θ زاویه‌ی گوه با افق و ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است. نیروهای موجود در رابطه‌ی ۲ نیز مطابق روابط ۵ الی ۸ محاسبه می‌شوند:

$$F_v = \frac{B \cdot D \cdot \sigma'_V(z_t)}{\tan \theta} \quad (5)$$

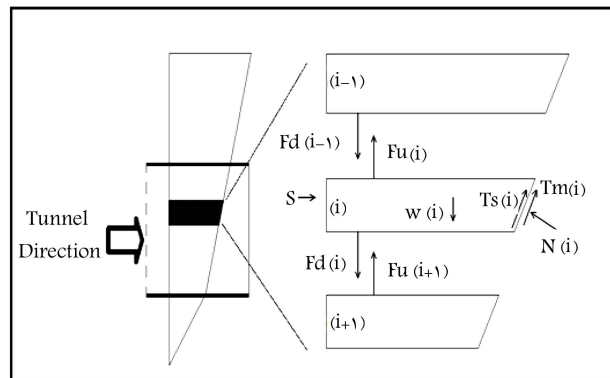
$$C = \frac{B h^{(i)}}{\sin \theta} \cdot c^{(i)} \quad (6)$$

$$T_s = A^{(i)} \cdot (c^{(i)} + N_s \cdot \tan \phi^{(i)}) \quad (7)$$

$$N_s = K_y \cdot \sigma_v^{(i)} \quad (8)$$

که در آن‌ها، B عرض گوه، $h^{(i)}$ ضخامت قطعه‌ی i ام، $A^{(i)}$ سطح قطعه‌ی i ام، σ'_V تنش قائم حاصل از سر بار روی گوه است.

به طور کلی برای پایداری گوه‌ی خاکی باید مطابق رابطه‌ی ۹، فشار جبهه‌ی



شکل ۶. مدل سه‌بعدی بروتر در خاک‌های لایه‌یی ناهمگن. [۱۴]

کاری (فشار EPB) با مجموع فشار خاک و فشار هیدرواستاتیک معادل باشد:

$$S = S' + F_W \quad (9)$$

که در آن، S نیروی پایداری جبهه‌ی حفاری، F_W نیروی هیدرواستاتیک، و S' نیروی مؤثر خاک است. با این حال روش تحلیلی نمی‌تواند جهت ارزیابی کامل رفتار تنش کرنش در یک بازه‌ی زمانی طولانی جهت محاسبه‌ی نشست زمین و فشار سینه‌ی کار استفاده شود. در ادامه، مقادیر فشار سینه‌ی کار به صورت عددی نیز محاسبه و مقادیر آن با مقادیر فشار به روش تحلیلی و تجربی مقایسه شده است. [۱۵، ۱۴]

۵. محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی کار به روش عددی

به‌طور کلی پایداری سینه‌ی کار در حفاری با TBM تحت تأثیر نوع سیستم حفاری، نوع خاک، مقدار نیروی پیشران ماشین، مشخصات لاینینگ، و مقدار فشار تزریق انتهایی^[۱۶] در ناحیه‌ی سپر دستگاه است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC3D، که یک برنامه‌ی تفاضل محدود^[۱۷] از مجموعه نرم‌افزارهای شرکت ITASCA است و برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود، انجام شده است. در این نوشتار بخش‌های اصلی فرایند حفاری، که نقش مهمی در نتایج تحلیل فشار سینه‌ی کار دارند، شامل: اندرکنش خاک با سپر حفاری، فشار سینه‌ی کار، فشار تزریق انتهایی سپر، و اضافه‌ی حفاری اطراف سپر در نظر گرفته شده است. [۱۷] فشار سینه‌ی کار با اعمال فشار خطی دوزنقه‌یی به ناحیه‌ی پشت صفحه‌ی حفار مدل‌سازی شده است، که به دلیل اختلاف فشار بین بالا و پایین سر مته‌ی حفاری است. همچنین فشار تزریق انتهایی نیز با استفاده از فشار یکنواخت به سمت بیرون در محدوده‌ی انتهایی سپر مدل شده است. مشخصات المان‌های سازه‌یی به کاررفته در مدل‌سازی شامل سپر حفاری و سگمنت بتنی در جدول ۲ ارائه شده است.

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و سپر، سختی نرمال سپر فولادی TBM که در تماس با خاک است، از رابطه‌ی ۱۰ قابل محاسبه است (Ramoni):

$$E_S = \frac{E d}{R^2} \quad (10)$$

که در آن، E_S سختی نرمال سپر فولادی، E مدول کشسانی فولاد، d ضخامت سپر فولادی، و R شعاع سپر است. [۱۸] جهت مدل‌سازی سپر از المان Shell استفاده شده است. شبیه‌سازی سپر با استفاده از مدل رفتاری کشسان مطابق جدول ۳ و المان‌های سه‌گه‌ریی مدل شده است (شکل ۷). به دلیل تقارن هندسه‌ی مدل، بارگذاری، فرایند حفاری، و نیز صرفه‌جویی در زمان تحلیل مدل به صورت نیمه تونل مدل شده است. مدل ساخته شده ۲۲۰۰۰ زون و ۲۴۰۷۳ گره دارد، که زون‌بندی مدل ساخته شده در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مدل‌سازی جهت صحت‌سنجی نتایج از ۴ مقطع (کیلومترهای ۱۰۰-، ۱۲۵-، ۱۵۰- و ۲۰۰-) در مسیر حفاری تونل در بازه‌ی شفت شمالی ورودی دستگاه و ایستگاه A۲ استفاده شده است.

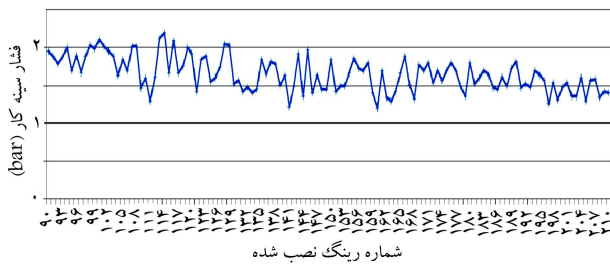
مدل رفتاری استفاده شده در این تحلیل، مدل کشسان - خمیری کامل مورکولمب (MC) است، که یکی از رایج‌ترین مدل‌ها در بحث مدل‌سازی خاک است. عامل

جدول ۲. مشخصات هندسی و مکانیکی لاینینگ.

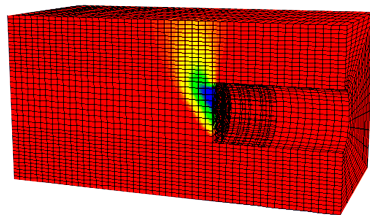
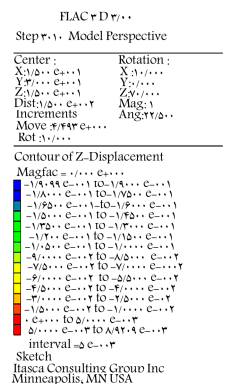
المان	ضخامت (m)	پواسون	مدول یانگ (Mpa)	وزن (KN/m/m)
سگمنت	۰٫۳۵	۰٫۱۵	۳۵	۸٫۴
سپر	۰٫۰۶	۰٫۲۰	۲۴۰	۲۲٫۵۶

جدول ۳. فشار سینه‌ی کار در مقاطع حفاری (کلیه‌ی مقادیر فشار بر حسب bar است).

شماره مقطع	کیلومتر از	سربار (m)	فشار سینه‌ی کار تجربی با فرض عدد پایداری ایده‌آل	فشار سینه‌ی کار روش تحلیلی (LEM)	فشار مجاز P_{all} (مطابق با نشست مجاز)	نشست سطحی مجاز S_{all} Rankin (mm)	فشار سینه‌ی کار واقعی	نشست بیشینه واقعی (mm)
۱	-۲۰۰	۹٫۳۵	۰٫۸۹	۱٫۱۰	۱٫۲۲	۴٫۸۹	۱٫۳۱	۲
۲	-۱۵۰	۹٫۳۰	۰٫۸۸	۱٫۰۹	۱٫۲۲	۴٫۸۹	۱٫۴۵	۱
۳	-۱۲۵	۹٫۴۴	۰٫۸۷	۱٫۱۵	۱٫۲۲	۴٫۸۹	۱٫۵۵	۰٫۸۶
۴	-۱۰۰	۹٫۴۸	۰٫۸۸	۱٫۱۵	۱٫۲۲	۴٫۸۹	۱٫۴۸	۰



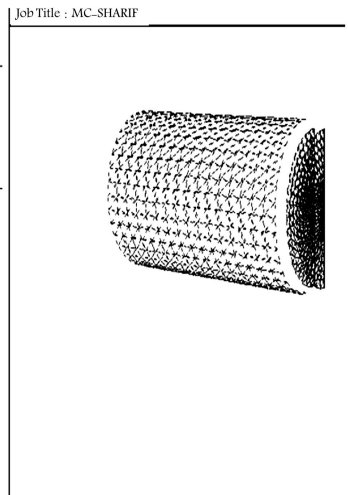
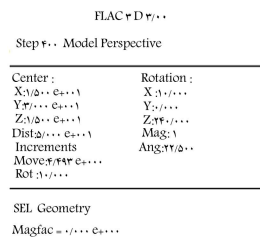
شکل ۹. فشار سینه‌ی کار بر حسب گام‌های حفاری تونل (خروجی اتاق کنترل دستگاه).



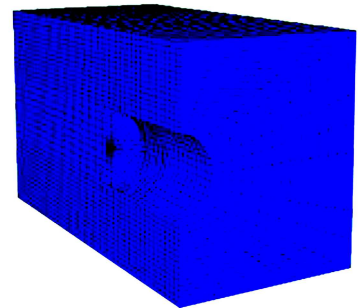
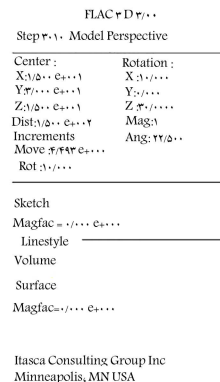
شکل ۱۰. تغییر شکل قائم خاک در اثر حفاری TBM.

مرحله‌ی اول محیط تحت اثر وزن خود به تعادل رسیده، در مرحله‌ی دوم حفاری به صورت گام‌های ۱٫۵ متری در داخل خاک انجام شده، و در مرحله‌ی سوم سپر در موقعیت حفاری قرار گرفته و فشار سینه‌ی کار به پشت سرته اعمال شده، و هم‌زمان تزریق در پشت سگمنت انجام شده است، که در نهایت مجموعه‌ی خاک و المان‌های داخل خاک به تعادل می‌رسند.

شکل ۹، مقادیر فشار سینه‌ی کار متوسط را که براساس شماره‌ی مقطع حفاری^{۱۳} از طریق ۸ عدد از حس‌گرهای فشار پشت کاترهد قرائت شده است، نشان می‌دهد. نوسان‌های فشار سینه‌ی کار براساس پیش‌روی دستگاه در محدوده‌ی مورد بررسی نشان داده شده است. نوسان فشار ایجاد شده بیشتر در ارتباط با ابزارهای کنترل ماشین توسط اپراتور است. لازم به ذکر است که در ماشین‌های حفاری EPB، کنترل فشار جبهه‌ی حفاری دستگاه از طریق سرعت چرخش نوار نقاله‌ی حلزونی پشت کله‌ی حفار و سرعت چرخش سر مته‌ی حفاری صورت می‌گیرد و هماهنگی این دو پارامتر با یکدیگر تاحدودی دشوار است. در نتیجه، خروجی حس‌گرهای فشار با اندکی نوسان همراه است. نتایج تغییر شکل‌های قائم ناشی از حفاری با دستگاه TBM در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۷. شبیه‌سازی سپر حفاری با المان‌های ۳ گره‌یی.

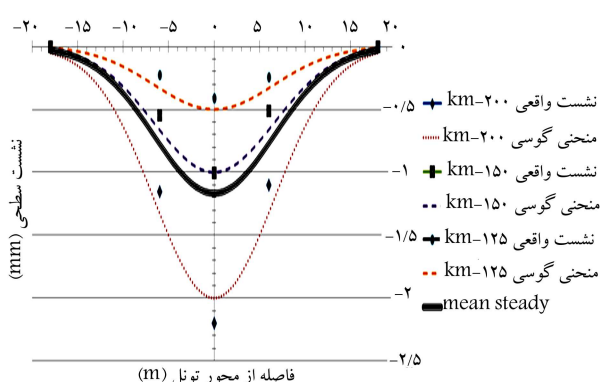


شکل ۸. زون‌بندی توده‌ی خاک در نرم‌افزار FLAC3D.

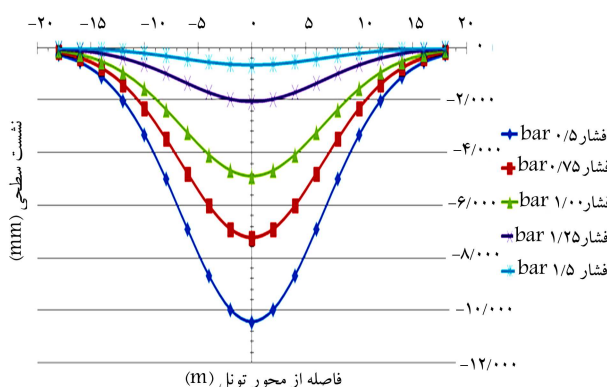
اصلی در پیش‌بینی دقیق عکس‌العمل ساختارهای ژئوتکنیکی انطباق مدل رفتاری موردنظر با مشخصات خاک است. مدل مورکولمب، یک مدل ساده‌ی منطبق با شرایط فیزیکی و ملموس خاک است، که شامل ۵ پارامتر اصلی مربوط به خاک است، که در آن رفتار تنش کرنش به صورت خطی با صلبیت ثابت تا حد مشخصی از تنش شکست مدل می‌شود. در واقع زمانی که تنش شکست به وجود می‌آید، تغییر شکل‌های خمیری با گسترش کرنش‌های غیرقابل بازگشت رخ می‌دهند. در مدل مورکولمب از ۲ پارامتر کشسان (E, ν) و ۳ پارامتر خمیری خاک (C, ϕ, ψ) استفاده می‌شود. مدل‌سازی حفاری به صورت مرحله‌یی انجام شده است. به عبارت دیگر، در

جدول ۴. انتخاب نشست مجاز براساس طبقه‌بندی ریسک حفاری مطابق معیار رانکین. [۱۲]

شدت خطر	شرح	پارامترهای کنترلی		
		دوران بیشینه	نشست بیشینه	نشست مجاز
		β_{max}	S_{max}	S_{all} (mm)
آسیب کم و سطحی به				
کم	ساختمان‌های	۱/۲۰۰ تا ۱/۵۰۰	۱۰-۵۰	۵
	اطراف، که زیاد			
	قابل توجه نیستند.			



شکل ۱۱. تحلیل بازگشتی توزیع نشست مقاطع حفاری به منظور محاسبه‌ی پارامترهای واقعی خاک.



شکل ۱۲. محاسبه‌ی فشار مجاز P_{all} مطابق طبقه‌بندی رانکین (شدت خطر کم).

افت حجمی v_1 محاسبه شده است. در این محدوده، مقدار i معادل $6/6$ متر و v_1 معادل 0.1% به دست آمده است. لذا در ادامه، مدل‌سازی‌های عددی صورت‌گرفته با پارامترهای تدقیق‌شده‌ی خاک انجام شده است. در ادامه، با استفاده از مدل کالیبره‌شده، فشار مجاز سینه‌ی کار (P_{all}) محاسبه شده است (شکل ۱۲).

در این نوشتار فشار مجاز عبارت از فشاری است که به ازاء آن مقدار نشست سطحی به‌عنوان معیار تعیین‌کننده‌ی حفاری در محیط‌های شهری (تأمین حالت بهره‌برداری) در محدوده‌ی مجاز قرار بگیرد. به منظور محاسبه‌ی نشست بیشینه در نواحی شهری از نتایج طبقه‌بندی انجام‌شده‌ی رانکین^{۱۴} استفاده شده است (جدول ۴).^{۱۲} که مطابق آن و با توجه به بافت شهری فرسوده واقع در مسیر خط ۲ متروی مشهد، نشست بیشینه براساس شدت خطر کم تعیین شده است، که به این منظور از 0.5% نشست بیشینه‌ی تعیین‌شده در طبقه‌بندی مذکور برای تعیین فشار مجاز دستگاه استفاده شده است. لذا مطابق شکل ۱۲، فشار 1.22 bar که به ازاء آن نشست بیشینه در حدود ۵ میلی‌متر است، به‌عنوان فشار مجاز در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۳، مقادیر نشست سطحی واقعی (حدود ۱ میلی‌متر) به ازاء فشار اعمالی (متوسط 0.9 bar) کمتر از حد مجاز است و این بدان معنی است که در اعمال فشار، اضافه فشاری اعمال شده است که به دلیل در نظر گرفتن ضرایب اطمینان است و براساس داده‌های اتاق کنترل ماشین، معمولاً فشار اعمالی در هر مقطع حدود 0.3 تا 0.4 bar بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده است.

مطابق شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، که فشار سینه‌ی کار در ۴ مقطع از مسیر به

طبق خروجی نرم‌افزار، محدوده‌ی تأثیر جلوی کله‌ی حفار، بیشترین تغییر شکل را داشته است، که این مسئله نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسب فرض‌های صورت‌گرفته در مدل تحلیلی گوه - سیلوی خاک با واقعیت است.

بر این اساس مشخص است ناحیه‌ی خاک تحت تأثیر حفاری، شباهت زیادی به مدل گوه و سیلو داشته است، به نحوی که مقادیر جابه‌جایی‌های قائم در جلوی کاترهد ماشین حفاری بیشترین مقدار را دارد و هر چه به سطح نزدیک می‌شویم، این مقدار نشست کاهش می‌یابد. همچنین محدوده‌ی قوس‌زدگی در بالای تاج، به دلیل سربار و عمق کم حفاری کاملاً شکل نگرفته است، که عدم در نظر گرفتن پدیده‌ی ذکرشده در محاسبات فشار به روش تجربی و تحلیلی را تأیید می‌کند. مطابق جدول ۴، مقادیر فشار در روش عددی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر هستند (متوسط فشار وارده از نتایج عددی، 1.22 bar است)، که با مقادیر مانیوتورینگ ماشین (حدود 1.45 bar) تقریباً 15% دارد. از طرف دیگر، مقادیر فشار به دست آمده به روش تحلیلی، فشار بیشتری را نشان می‌دهند که این مسئله نشان می‌دهد که استفاده از روش مذکور، محتاطانه‌تر است و ضریب اطمینان بیشتری دارد. در مقابل، مقادیر فشار تجربی، فشاری کمتر از فشار واقعی سینه‌ی کار را ارائه می‌دهند، که لذا ضریب اطمینان کمتری (نظیر ضعف و سستی در تاج تونل) بر محیط حفاری حاکم دارد.

استفاده از روش تجربی به تنهایی توصیه نمی‌شود و جهت مباحث طراحی باید از تمامی روش‌های موجود جهت تخمین فشار جبهه‌ی کار استفاده کرد و با پیش نشست در حین حفاری، مقدار فشار بهینه را محاسبه کرد.

۶. محاسبه‌ی فشار مجاز (P_{all})

در این نوشتار با استفاده از شکل پروفیل واقعی نشست در مقطع حفاری، پارامترهای دقیق خاک شامل: پارامتر انحنای نشست i و افت حجمی زمین (v_1) با استفاده از تحلیل برگشتی محاسبه و سپس مدل‌سازی‌های عددی نرم‌افزار FLAC^{3D} با داشتن پارامترهای مذکور انجام شده است.

در شکل ۱۱، میزان نشست‌های واقعی سطح زمین در ۳ مقطع نشان داده شده است. برای به دست آوردن پارامترهای واقعی زمین، منحنی گوسی نشست بر نقاط نشست واقعی برآزش داده شده و براساس میانگین‌گیری بین منحنی‌های گوس ترسیم شده در هر مقطع، ۲ پارامتر عرض منحنی نشست i و پارامتر

روش‌های متفاوت تجربی، تحلیلی، و عددی محاسبه شده است، نشان‌دهنده این واقعیت است که روش‌های تجربی بیشترین اختلاف را با واقعیت نشان می‌دهند و ضریب اطمینان کمی دارند (حدود ۳۲٪ اختلاف با مقدار واقعی) و فقط جهت کنترل اولیه‌ی محاسبات استفاده می‌شوند.

روش تحلیلی، نتایج نزدیک‌تری به مقدار واقعی دارد و نشان‌دهنده آن است که فشار جبهه‌ی حفاری ناهمگن می‌تواند با مدل‌های جدید بهتر تخمین زده شود (اختلاف ۱۳٪). در این میان، روش‌های عددی، نظیر روشی که در نوشتار حاضر استفاده شده است، بیشترین دقت را در پیش‌بینی مقدار فشار وارده بر جبهه‌ی حفاری داشته است، چرا که در حدود ۶٪ از مقدار واقعی فشار کمتر بوده است. اختلاف موجود نیز بیشتر به دلیل نوع مدل رفتاری استفاده‌شده است.

در مدل‌های رفتاری کشسان یا کشسان - خمیری کامل، رفتار تنش کرنش خاک را در محدوده‌ی کرنش‌های کوچک، که عمده‌ی تغییرشکل‌ها در آن محدوده رخ می‌دهد، در نظر نمی‌گیرند. علاوه بر این مسئله، در مدل‌هایی نظیر مدل رفتاری مورکولمب، مقادیر مدول برشی مستقل از کرنش‌های برشی هستند، که در نهایت منجر به ایجاد خطا می‌شود. مدل‌سازی موجود نیز به دلیل عدم دراختیارداشتن اطلاعات آزمایش‌های تحکیم و سه‌محوری، در مقاطع موردنظر ممکن نیست؛ لذا مدل‌سازی با مدل رفتاری ساده‌تر مورکولمب انجام شده است.^[۱۹]

استفاده از روش‌های عددی به دلیل محاسبه در شرایط پیچیده‌تر و همچنین در خروجی تغییرمکان اطراف محیط حفاری، بهترین گزینه برای پیش‌بینی‌های فشار موردنیاز حفاری هستند (این تذکر لازم است که جهت مقایسه‌ی نتایج با مقدار فشار واقعی و با توجه به اینکه در حفاری واقعی جهت بالابردن ضرایب اطمینان، اضافه فشار بین ۱۰ تا ۲۰ کیلوپاسکال بوده است، مقادیر فشار واقعی در عدد ۰٫۹ ضرب شده‌اند).

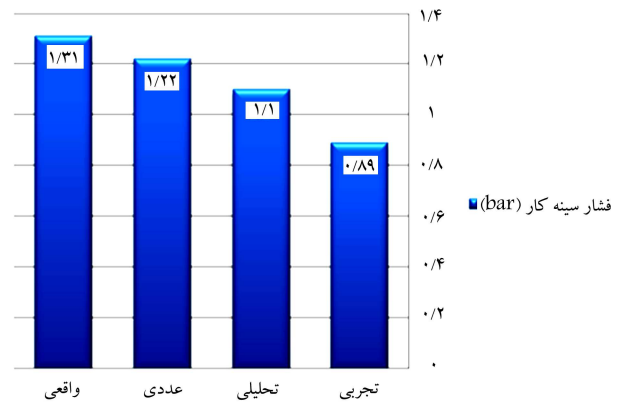
یکی از محدودیت‌های استفاده از روش‌های تجربی، عدم امکان محاسبه‌ی تغییرشکل‌های القایی در سطح زمین است، که باعث می‌شود استفاده از روش مذکور فقط به‌عنوان تقریب اولیه برای فشار سینه‌ی کار دستگاه محدود شود. براساس نتایج به‌دست‌آمده، به دلیل عدم توانایی راه‌حل‌های فرم بسته (روش تحلیلی) در لحاظ‌کردن پیچیدگی روش‌های ساخت و خصوصیات غیرخطی و ناهمگنی خاک در مسائل تونل‌سازی، استفاده از روش‌های ذکرشده به‌تنهایی توصیه نمی‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

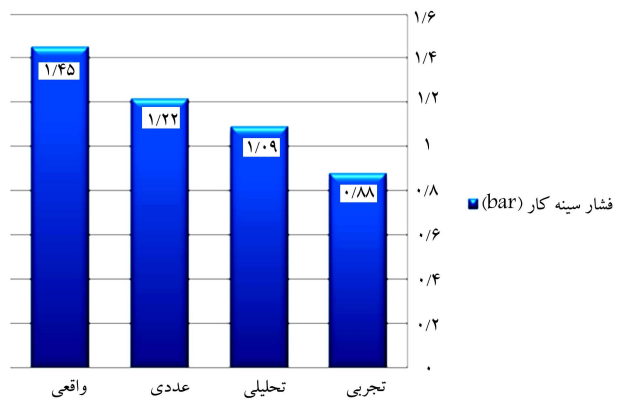
طبق مطالعات انجام‌شده در پژوهش حاضر، می‌توان به این موارد به‌عنوان نتیجه‌گیری اشاره کرد:

۱. نتایج روش تجربی به دلیل عدم تطابق واقعی شرایط محاسبه‌ی فشار سینه‌ی کار، که تابع نوع خاک است و نیز عدم لحاظ‌کردن اثرات غیرهمگن بودن خاک در این پروژه با مقادیر تحلیلی و عددی، تقریباً ۳۲٪ اختلاف دارد، اما مقدار فشار محاسبه‌شده در روش تحلیلی (روش بروئر) که در خاک لایه‌یی (لحاظ‌کردن اثر غیرهمگن بودن خاک) صورت گرفته است، با مقادیر واقعی نسبتاً تطابق مناسبی دارد (اختلاف حدود ۱۳٪).

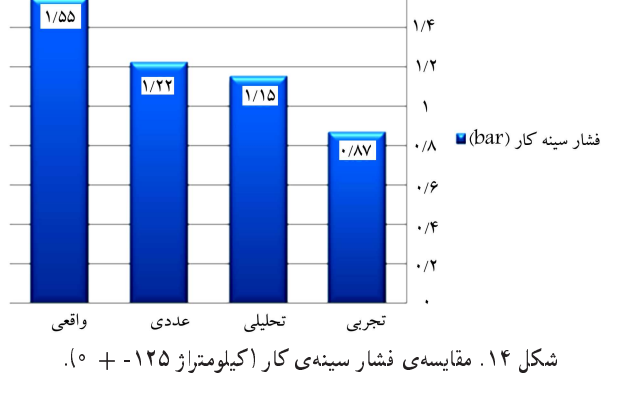
۲. به‌طورکلی جهت محاسبه‌ی فشار پایداری سینه‌ی کار در محیط‌های خاکی،



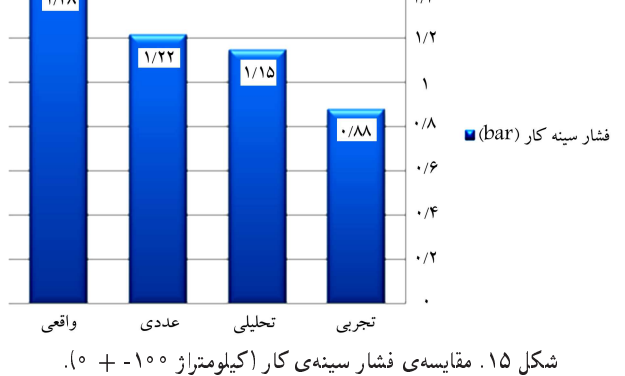
شکل ۱۳. مقایسه‌ی فشار سینه‌ی کار (کیلو متر از ۰ - ۲۰۰ +).



شکل ۱۴. مقایسه‌ی فشار سینه‌ی کار (کیلو متر از ۰ - ۱۲۵ +).



شکل ۱۵. مقایسه‌ی فشار سینه‌ی کار (کیلو متر از ۰ - ۱۰۰ +).



شکل ۱۶. مقایسه‌ی فشار سینه‌ی کار (کیلو متر از ۰ - ۱۰۰ +).

شهری باید متناسب با معیار بیشینه‌ی نشست ایجاد شده در سطح زمین در اثر حفاری و براساس شرایط بهره‌برداری سازه‌های مجاور تونل (نوع بافت سازه‌های مجاور) کنترل شود.

تقدیر و تشکر

در اینجا از مجموعه‌ی مؤسسه‌ی مهندسی رهاب (خط ۲ قطار شهری مشهد) و مهندسان مشاور ایمن‌سازان به خاطر در اختیارگذاشتن اطلاعات مربوط به حفاری تونل خط ۲ متروی مشهد، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

پانوشتها

1. tunnel boring machine
2. compressed air
3. slurry shield
4. earth pressure balance (EPB)
5. Peck
6. LEM
7. LASM
8. Horen
9. arching
10. Breoere
11. tail void grout
12. finite difference
13. chainaige
14. Rankin

منابع (References)

1. Anagnostou, G. and Kovari, K. "Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**(2), pp. 165-173 (1996).
2. Gatti, M. and Cassani, G. "Ground loss control in EPB TBM tunnel excavation", *Underground Space The 4th Dimension of Metropolises* (2007).
3. Fallahzadeh, M. "Numerical modelling of crosstunnels in course alluvial of tehranm", Master Thesis, Faculty of Civil and Enviroment Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran (2013).
4. Mollahsani, A. and Sadaghiani, M. "Effect of line 2 metro of mashhad tunnelling with TBM on vicinity structures", *5th Nationall Congres of Civil Engineering* (2011).
5. Almeraris, G. and Mariucci, B. , *Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, SME (2009).
6. Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*, Springer (2005).
7. Zhao, J., Gong, Q. and Eisensten, Z. "Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**(4), pp. 388-400 (2007).

استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی فقط می‌تواند مقدار تقریبی از فشار سینه‌ی کار را در اختیار طراح تونل و اپراتور ماشین حفار قرار دهد.

۳. یکی از دلایل مغایرت بین روش‌های عددی و مقادیر واقعی نوع مدل رفتاری استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی است، که در نتایج تحلیل بسیار تأثیرگذار است، که در اینجا لزوم استفاده از مدل‌هایی که اثر فشار همه‌جانبه و نیز رفتار تنش - کرنش خاک در فاز غیرخطی را مدل می‌کند، نشان می‌دهد.

۴. محاسبه‌ی فشار جبهه‌ی حفاری ناهمگن به روش‌های عددی در محیط‌های

8. Golshani, A. and Eslami, B. "Comprisson of surface settlements in TBM tunnelling by practical & numerical method", *3th Dam and Tunnel Conference*, Tehran University (2014).
9. *Geotechnics Report of Line 2 Metro of Mashhad*, Sahel Consulting Engineers (2011).
10. Atkinson, J., *The Mechanics of Soils and Foundations*, CRC Press, pp. 112-118 (2007).
11. *Back Analysis of Parameters in Line 2 Metro of Mashhad*, Imensazan Consulting Engineers (in persian) (2010).
12. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S., *Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*, CRC Press, 504 p. (2008).
13. Broere, W. "Face stability calculation for a slurry shield in heterogeneous soft soils", *Tunnels and Metropolises*, **23**, pp. 215-218 (1998).
14. Jancsecz, S. and Steiner, W. "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions", *Tunnelling'94*, Springer, pp. 531-550 (1994).
15. Foroughi, M., Tarigh Azali, S., Gholeichzadeh, J. and Barkhordari, K. "Comprisson of result of numerical-analytical method to real amount of heterogeneous face excavation by TBM machine", *31th of Earth Science Congeress* (2013).
16. Kasper, T. and Meschke, G. "A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling", *Computers and Geotechnics*, **33**(4), pp. 234-247 (2006).
17. Itasca, F.D., *FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 4.0., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, 438 p. (2009).
18. Ramoni, M. and Anagnostou, G. "Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(4), pp. 433-455 (2010).
19. Lamburghi, A., Rodriguez, L.M. and Castellanza, R. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations", *Computers and Geotechnics*, **40**, pp. 97-113 (March 2012).