



برآورد فشار سینه کار تونل‌های شهری با روش حالت حدی سرویس (مطالعه موردی: پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران)

ابراهیم فرخ

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

خلاصه: تونل‌سازی در زمین‌های شهری عموماً به دلیل وجود سازه‌های حساس سطحی همراه با ملاحظات اجرائی خاص است که از آن جمله می‌توان به کنترل دقیق نشست‌های سطحی و فشار سینه کار اشاره نمود. فشار سینه کار بر اساس دو روش کلی حالت حدی نهایی و حالت حدی سرویس برآورد می‌شود. در این میان، فشار به دست آمده از روش حالت حدی سرویس، رابطه تنگاتنگی با مقادیر اُفت حجمی زمین و نشست حداکثر سطحی دارد. روش‌های موجود برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی سرویس عموماً بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی (آزمایش گریز از مرکز تونل) یا داده‌های تجربی نسبتاً قدیمی توسعه یافته‌اند. در این مقاله ضمن بررسی اصول برآورد فشار سینه کار، بر پایه اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران که در حال حاضر در حال اجراست، به بررسی و مقایسه فشار واقعی و برآورد شده سینه کار در دو حالت حدی نهایی و سرویس در حالت خاک‌های با رفتار زهکش نشده پرداخته شده است. نتایج مقایسه‌ها نشان می‌دهد که اختلاف نسبتاً زیادی بین فشار واقعی سینه کار و فشار مورد انتظار طراحی به دست آمده از روش حالت حدی سرویس وجود دارد. برای بهبود عملکرد روش‌های حالت حدی سرویس، بر پایه اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، یک فرمول جدید برای برآورد عدد پایداری ارائه شده است. این فرمول دارای ضریب همبستگی نسبتاً بالایی است (۰/۸۴). که بیانگر تطابق نسبتاً بالای اعداد پیش‌بینی شده و واقعی است. کاربرد اصلی نتایج این مقاله، استفاده از فرمول جدید برای تدقیق فشار طراحی سینه کار در زمان اجرای پروژه و همچنین برآورد مناسب فشار سینه کار برای مناطق حساس شهری بر اساس حد مجاز اُفت حجمی و نشست سطحی برای جلوگیری از به وجود آمدن خسارت‌های سازه‌ای است.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

تونل‌سازی

فشار سینه کار

نشست سطحی

حالت حدی سرویس

عدد پایداری

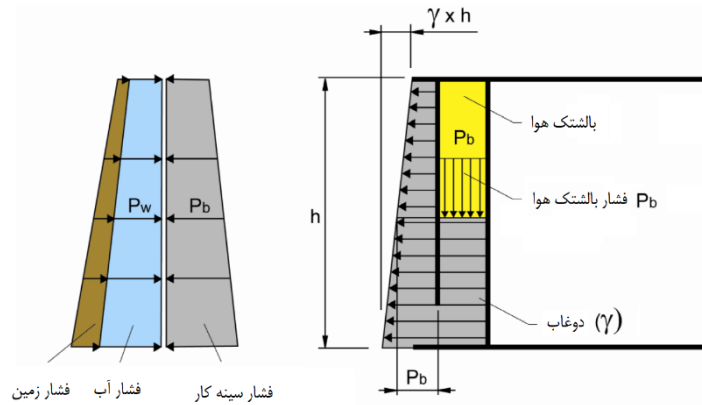
۱- مقدمه

این‌گونه مخاطرات، بایستی فشار سینه کار به صورت دقیق تخمین زده شود. در دهه‌های گذشته روش‌های مختلفی برای بررسی پایداری سینه کار تونل و تعیین فشار نگهداری مورد نیاز توسعه یافته‌اند و تعدادی آزمایش‌های آزمایشگاهی نیز برای اعتبارسنجی بعضی از این روش‌ها بکار گرفته شدند. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به چهار گروه اساسی تقسیم کرد که شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی است. روش‌های تحلیلی عموماً بر پایه روش‌های حالت حدی طراحی شده‌اند و با در نظر گرفتن یک مکانیسم شکست (به عنوان مثال گوه و سیلو) برای سینه کار تونل در هنگام ریزش، به تعیین فشار سینه کار می‌پردازند. در این زمینه، بسته به نوع خاک، خاک ممکن است رفتار زهکش شده

در TBM‌های زمین‌های شهری (EPB و Slurry)، کنترل فشار سینه کار اهمیت زیادی دارد. این موضوع به دلیل وجود خطرات ناشی از عملیات حفر تونل در زمین‌های شهری با تأسیسات حساس سطحی یا زیر سطحی و ارتباط تنگاتنگ فشار سینه کار با مقادیر نشست سطحی است. مطالعات تونل‌های شهری حفر شده در نقاط مختلف دنیا بیانگر وجود ریزش‌ها یا نشست‌های سطحی قابل ملاحظه متعدد در پروژه‌های مختلف با اعمال فشار سینه کار ناکافی است. بروز چنین مواردی علاوه بر تحمیل خسارات مالی گسترده، باعث ایجاد مشکلات اجتماعی گسترده در محیط شهری می‌گردد. برای جلوگیری از

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.farrokhi@aut.ac.ir





شکل ۱. نحوه تعادل فشار سینه کار با فشار آب و فشار زمین [۶]

Fig. 1. Balance working face pressure with water pressure and ground pressure

۲- اصول برآورد فشار سینه کار

هدف از ارزیابی پایداری سینه کار تونل، بررسی فشار آب زیرزمینی و فشار زمین در سطح تونل و تحلیل ظرفیت تحمل باربری سینه کار تونل است. در صورتی که ظرفیت تحمل باربری سینه کار تونل کافی نباشد، باید فشار سینه کار اعمال شود. در این حالت، محیط نگهداری باید با فشارهای زمین و آب زیرزمینی مقابله کند تا سینه کار تونل پایدار بماند (شکل ۱).

عدم کنترل مناسب فشار سینه کار ممکن است منجر به ریزش سینه کار، ایجاد حفره در سطح زمین، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، نشست سطحی بیش از اندازه، و جابه‌جایی‌های جانبی زمین و سازه‌های زیرزمینی شود.

در برآورد فشار سینه کار، دو دیدگاه اساسی برای طراحی نگهداری سینه کار تونل وجود دارد که بر اساس دو معیار حالت حدی در نظر گرفته می‌شود:

- حالت حدی نهایی
- حالت حدی سرویس

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

یا زهکش نشده را هنگام حفاری نشان دهد. بنابراین، برای هر کدام از این حالات می‌بایست روش‌های خاص محاسبه را در نظر گرفت. در این روش‌ها عموماً از دو حالت تنش مؤثر و تنش کل استفاده می‌شود. علاوه بر این موارد، دو حالت حدی نهایی و حالت حدی سرویس نیز در محاسبات فشار سینه کار در نظر قرار می‌گیرد. حالت حدی نهایی عموماً با ناپایداری سینه کار و بالازدگی روباره تونل مرتبط است. حالت حدی سرویس نیز به کنترل افت حجمی زمین و جابه‌جایی سطح زمین می‌پردازد و معمولاً نتایج فشار سینه کار به دست آمده از روش‌های حالت حدی سرویس، بیشتر از مقادیر به دست آمده از روش‌های حالت حدی نهایی است. عموماً در محاسبات فشار سینه کار از روش‌های حالت حدی نهایی استفاده می‌شود، اما بکارگیری نتایج این روش‌ها، نشست سطحی را لزوماً در حد مورد انتظار مجریان (که بر اساس حساسیت سازه‌های شهری موجود در محدوده تأثیر تونل نسبت به نشست سطحی تعیین می‌شود) کنترل نمی‌کند. روش‌های حالت حدی سرویس بر پایه نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس‌گریز از مرکز تونل یا اطلاعات تونل‌های نسبتاً قدیمی که در آنها عموماً سینه کار تونل در حین اجرا تحت فشار نبوده است، توسعه یافته‌اند. از این رو، این روش‌ها ملزومات اجرای تونل‌های شهری را که با سینه کار تحت فشار اجرا می‌شوند، نمی‌توانند در نظر بگیرند. در این مقاله ضمن بررسی روش‌های حالت حدی سرویس برای برآورد فشار سینه کار، یک روش جدید حالت حدی سرویس برای کنترل فشار سینه کار بر پایه نتایج نشست‌سنجی واقعی در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران توسعه داده شده است که نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نفوذپذیری خاک کمتر از $10^{-6} - 10^{-7}$ m/s انتظار می رود، خاک رفتار زهکش نشده از خود نشان دهد.

روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی پایداری سینه کار تونل معمولاً براساس آزمایشات آزمایشگاهی همانند آزمایشات سانتریفیوژ توسعه می یابند.

در روش‌های تجربی، یکسری روابط تقریبی بر اساس تجربیات موجود در پروژه‌های مختلف دنیا ارائه شده است که در آنها بین یک و یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه کار، رابطه‌ای به دست آمده است. روش‌های عددی با در نظر گرفتن تجزیه و تحلیل گام به گام سه بعدی پیشروی ماشین سپری در عمل برای تجزیه و تحلیل فعل و انفعالات ماشین و زمین استفاده می‌شود و مطلوب‌ترین روش برای تعیین رابطه بین فشار سینه کار و نشست سطحی است.

حالت حدی سرویس به حدود مجاز جابه‌جایی سطح زمین به منظور جلوگیری از به وجود آمدن آسیب‌های ساختاری به ساختمان‌های سطحی یا قطع خدمات شهری، بالادگی سطح زمین، و جابه‌جایی جانبی سازه‌های سطحی یا زیرسطحی مرتبط می‌شود. بنابراین در این روش، فشار نگهداری (و به تبع آن فشار تزریق پشت حلقه پوشش بتنی) بر اساس حد لازم برای تغییرشکل زمین تعریف می‌شود.

شکل ۲ نمونه‌هایی از حالات حدی مختلف مرتبط با محاسبه فشار سینه کار تونل را نشان می‌دهد.

شکل ۳ نمایی کلی از روش‌های برآورد فشار سینه کار را بر اساس دو روش تعادل حدی توضیح داده شده، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بر اساس اینکه خصوصیات خاک و شرایط حفاری، منجر به حالات زهکش شده یا زهکش نشده شوند، می‌توان به ترتیب از روش‌های محاسبه تنش مؤثر یا تنش کل استفاده کرد. مدل‌های مختلفی برای بررسی هر کدام از این حالات ارائه شده است که برخی از مهم‌ترین آنها توسط [۸-۱۱] توصیف شده‌اند. در خاک‌های رسی و در شرایط زهکش نشده، عدد پایداری فاکتور اصلی مورد استفاده در ارزیابی فشار سینه کار تونل در دو حالت یاد شده است (به عنوان مثال روش‌های توضیح داده شده توسط [۱۵-۱۲]).

عدد پایداری به طور کلی از تقسیم تفریق تنش قائم در محور تونل و فشار نگهداری بر مقاومت برشی زهکش نشده خاک محاسبه می‌شود (رابطه (۱)).

عموماً مبتنی بر روش‌های حالت تعادل حدی نهایی است. در این روش‌ها، با در نظر گرفتن یک مکانیسم شکست سینه کار تونل در هنگام ریزش سینه کار، به تعیین فشار سینه کار پرداخته می‌شود. اولین مکانیسم شکست تعادل حدی، توسط هورن (۱۹۶۱) پیشنهاد شد [۱]. بر اساس این مکانیسم، یک گوه لغزان در مقابل سینه کار تونل فرض می‌شود که توسط یک منشور مستطیلی شکل کشیده شده تا سطح زمین (سیلو) بارگذاری می‌شود. آناگنوستو و کواری [۲] ایده مطرح شده توسط هورن را برای بررسی پایداری سینه کار تونل در تونل‌های مکانیزه بکار گرفتند و شرایط تعادل نیروهای پایدارکننده و ناپایدارکننده را برای گوه لغزان بررسی کردند. البته لازم به ذکر است که مرزهای گوه شکست لزوماً نباید صفحه‌ای باشد. در این زمینه محکم [۳] گوه شکست را با سطح لغزان شیب‌دار با شکل مارپیچ لگاریتمی پیشنهاد کرده است. مولن و همکاران [۴] سطح شکست مخروطی شکل را برای خاک‌های اصطکاکی و خاک‌های اصطکاکی - چسبنده بررسی کردند. در کشورهای آلمانی زبان، بعضاً از روش تعادل حدی مبتنی بر استاندارد DIN ۴۰۸۵ [۵] برای محاسبه مؤلفه نیروی نگهداری فشار زمین استفاده می‌شود. این روش یک بدنه شکست سه بعدی را پیشنهاد می‌کند. فشار فعال سه بعدی زمین که بر روی سینه کار تونل عمل می‌کند با کمک این بدنه شکست، محاسبه می‌شود. در حالت حفاری در خاک‌های دانه درشت (ماسه و شن)، حالت تنش مؤثر غالب است. برای ماشین‌های EPB که عمدتاً در خاک‌های ریزدانه، حفاری انجام می‌شود، حالت تنش کل غالب است. در حالتی که خاک متشکل از لایه‌های ریزدانه با میان لایه‌های درشت‌دانه باشد، می‌بایست از هر دو روش برای محاسبه فشار سینه کار استفاده کرد.

در روش تنش کل و حالت حدی نهایی، رویکرد نسبت پایداری استفاده می‌شود و پارامترهای کل خاک (و نه پارامترهای مؤثر آن) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در این روش، فشار ناشی از فشار زمین و فشار آب زیرزمینی از هم جدا نمی‌شوند. با این حال، فشار نگهداری محاسبه شده باید حداقل برابر با فشار آب زیرزمینی باشد. این روش محاسبه، مناسب خاک‌های چسبنده در شرایط زهکش نشده است. بنابراین، خاک می‌بایست نفوذپذیری کمی داشته باشد. آناگنوستو و کواری [۲] اظهار داشته‌اند که در شرایط سرعت پیشروی بیشتر از ۰/۱ تا ۱ متر در ساعت ($1/7 - 16/7$ میلی‌متر در دقیقه) و

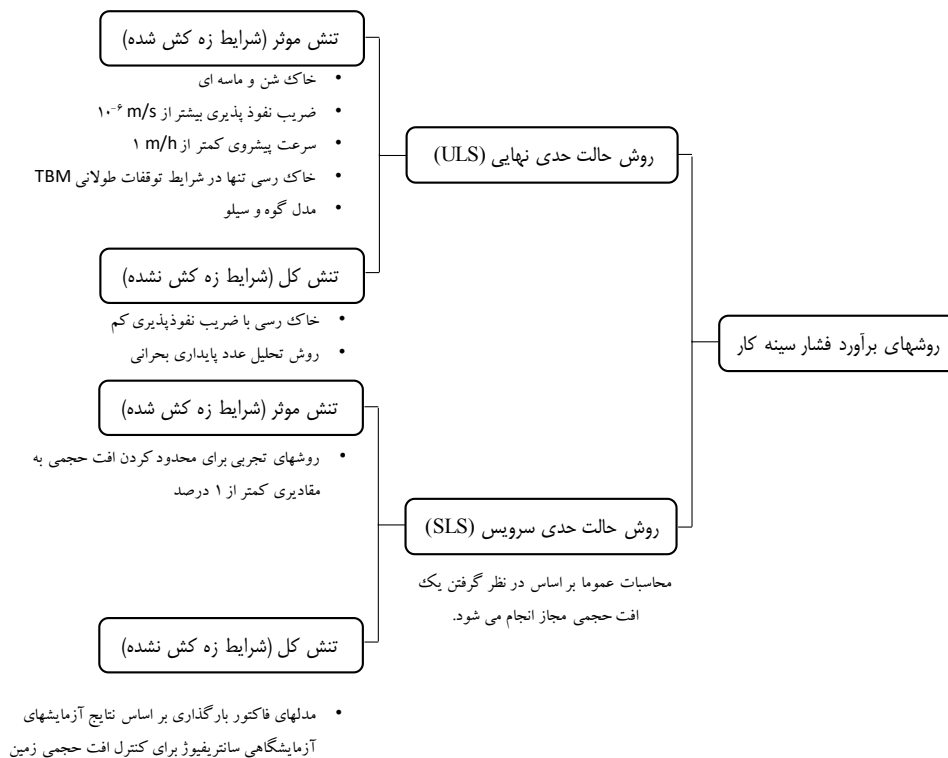


حالت حدی سرویس: نشست سطحی بیش از حد که ممکن است منجر به آسیب به سازه‌های سطحی و اختلال در ترافیک شود.

حالت حدی نهایی: ریزش زمین به داخل تونل و ایجاد یک حفره یا نشست سطحی بسیار بزرگ.

شکل ۲. نمونه‌هایی از حالت‌های حدی سرویس و نهایی برای تونل‌زنی تحت فشار با TBM [۷]

Fig. 2. Examples of service limit state and ultimate limit state for face pressure calculation



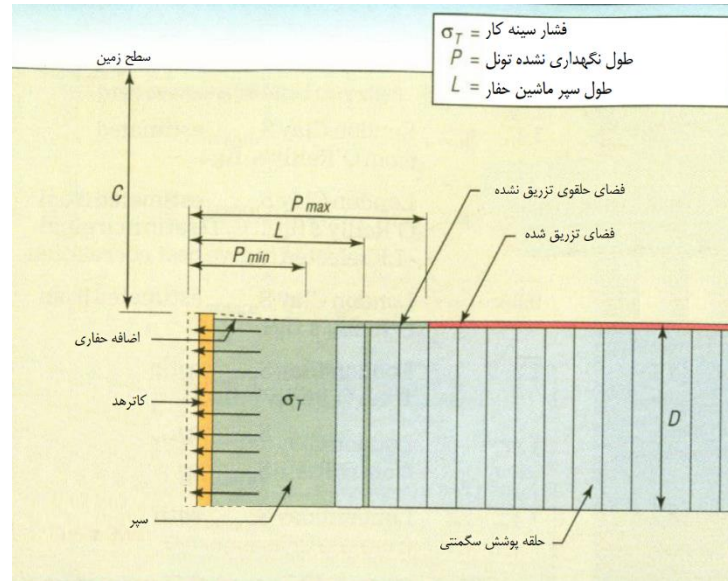
شکل ۳. نمایی کلی از روش‌های برآورد فشار سینه کار بر اساس دو روش تعادل حدی نهایی و سرویس

Fig. 3. Overview of the methods of estimating face pressure based on the two methods of service limit state and ultimate limit state

بر اساس نتایج مطالعات زیرکا و توس [۱۰]، وقتی که عدد پایداری کمتر از ۳ است، عموماً سینه کار پایدار است، این در حالی است که عدد پایداری بیشتر از ۶ غالباً به ناپایداری سینه کار منجر می‌شود. اتخاذ عدد پایداری مناسب می‌تواند در برآورد فشار سینه کار کمک مؤثری بکند.

$$N = (\gamma Z_0 + q - P_E) / c_u \quad (1)$$

P_E : فشار اندازه‌گیری شده در مرکز تونل، γ : چگالی کل خاک،
 Z_0 : عمق محور تونل، q : سربار، c_u : مقاومت برشی زهکش نشده،
 N : عدد پایداری سینه کار.



شکل ۴. شماتیک تونل حفاری شده با ماشین حفار که در آن D معرف قطر تونل، C معرف عمق روباره و P معرف طول نگهداری نشده تونل است
 Fig. 4. Schematic of a tunnel excavated by a TBM in which D represents the diameter of the tunnel, C represents the depth, and P represents the length of unsupported tunnel.

فاکتور ایمنی (می توان ۱/۵ فرض کرد).

۴- حالت حدی سرویس و عدد پایداری بحرانی

این حالت به بررسی و کنترل اُفت حجمی ناشی از اثر سینه کار و فضای اطراف سپر می پردازد (V_L). اُفت حجمی برابر با درصد نسبت تغییر حجم تونل حفاری شده به حجم برجای حفاری تونل است. کیمورا و میر [۱۴] به بررسی نتایج مدل آزمایشات تونل (از طریق دستگاه گریز از مرکز) پرداخته اند و نتایج خود را در قالب یک نمودار که در آن اُفت حجمی به فاکتور بارگذاری (LF) مرتبط می شود، نشان داده اند (شکل ۶ و رابطه (۳)). فاکتور بارگذاری بیانگر نسبت عدد پایداری سینه کار (N) به عدد پایداری بحرانی (N_{cr}) است:

$$LF = N / N_{cr} \quad (3)$$

بر اساس نتایج شکل ۶، مقدار اُفت حجمی متوسط زمین برای $LF > 1/2$ از طریق رابطه (۴) به دست می آید:

$$VL = 0.23 e^{4.4 LF} \quad (4)$$

LF : فاکتور بارگذاری، VL : اُفت حجمی زمین بر حسب درصد.

مقدار عدد پایداری وابسته به دو نسبت C/D و P/D است (در شکل ۴، این پارامترها نشان داده شده اند). در این نسبت ها، P بیانگر طول نگهداری نشده تونل در مجاورت سینه کار است. برای حالت حدی نهایی، P را می توان برابر صفر در نظر گرفت.

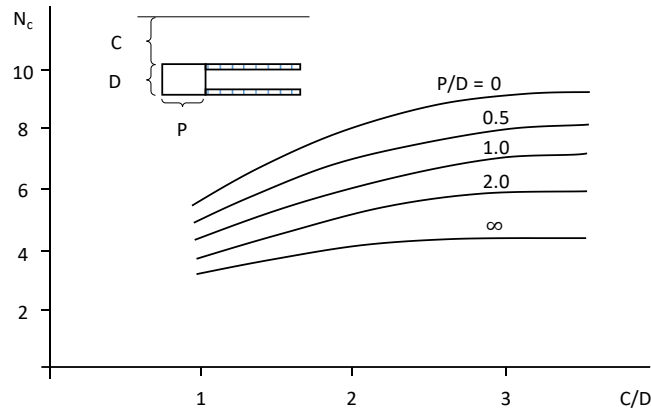
۳- حالت حدی نهایی و عدد پایداری بحرانی

عدد پایداری بحرانی بیانگر مقداری از عدد پایداری است که در آن سینه کار دچار ریزش می شود. در زمینه برآورد عدد پایداری بحرانی، محققین مختلفی اقدام به انجام آزمایش های گریز از مرکز تونل برای برآورد این پارامتر کرده اند. بر اساس نتایج این تحقیقات عدد پایداری بحرانی با ارتفاع روباره و قطر سپر در ارتباط است (شکل ۵).

برای برآورد فشار سینه کار در حالت حدی نهایی، از آنجا که عدد پایداری بحرانی، فشار نگهداری را در هنگام ریزش سینه کار به دست می دهد، لازم است یک فاکتور ایمنی در محاسبه فشار سینه کار در نظر گرفته شود. بر اساس این فاکتور ایمنی فرض شده و عدد پایداری بحرانی، عدد پایداری مورد نیاز و فشار سینه کار، تعیین می شود (رابطه (۲)) [۱۰].

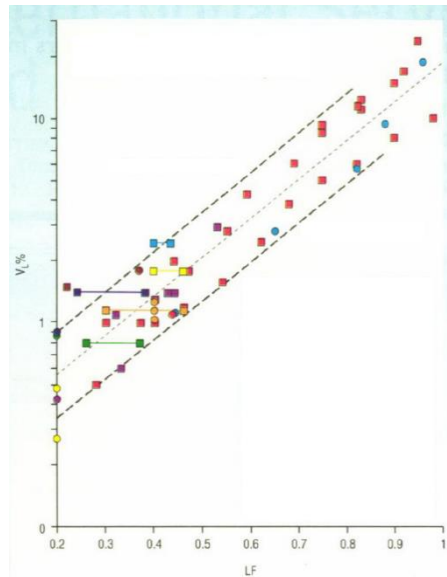
$$N = N_{cr} / \eta \quad (2)$$

N : نسبت پایداری واقعی (-)، N_{cr} : نسبت پایداری بحرانی (-)، η :



شکل ۵. عدد پایداری بحرانی در شرایط هندسی مختلف تونل و طول نگهداری نشده تونل (L معرف طول سپر است) [۱۴]

Fig. 5. Critical stability number in different tunnel geometry conditions and unsupported tunnel length (L represents shield length)



شکل ۶. نسبت فاکتور بارگذاری در برابر افت حجمی زمین [۱۰]

Fig. 6. Load factor versus volume loss

در این حالت، فشار هدف برای مرکز سینه کار از رابطه (۶) به دست می‌آید.

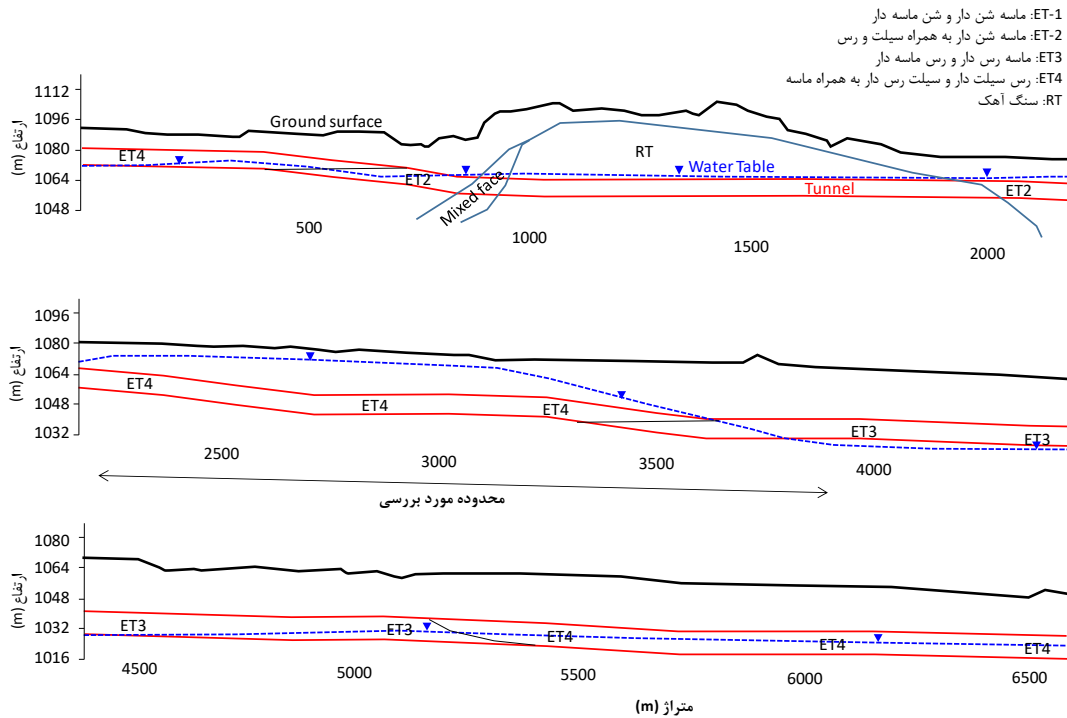
$$P_{Et} = P_E + \nu \quad (۶)$$

P_E : فشار اندازه‌گیری شده در مرکز تونل، P_{Et} : فشار هدف در مرکز تونل، ν : حداکثر تیرانس فشار سینه کار.

در ارتباط با رابطه بین LF و افت حجمی، روابط زیادی توسعه یافته است که البته عمده آنها قدیمی هستند و به نظر می‌رسد که

برای محاسبه فاکتور بارگذاری، نیاز است که مقدار افت حجمی مجاز معلوم باشد. سپس افت حجمی ناشی از تزریق سپر دنباله یا تزریق پشت سگمنت از این مقدار کم می‌شود و افت حجمی باقیمانده برای محاسبه فاکتور بارگذاری بر اساس نمودار کیمورا و میر [۱۴] یا فرمول ارائه شده توسط دیماک و میر [۱۵] محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۵)، فشار حداقل سینه کار در مرکز تونل در حالت حدی سرویس به دست می‌آید.

$$P_E = (\gamma Z_0 + q) - (c_u N_{cr} LF) \quad (۵)$$



شکل ۷. مقطع زمین‌شناسی پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران و محدوده مورد بررسی
 Fig. 7. Geological section of Tehran Metro Line 6-South Extension

همچنین در این محدوده، تونل کاملاً زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد و حداکثر ارتفاع ستون آب بالای تاج تونل برابر با ۱۵ متر می‌باشد. ارتفاع روباره تونل نیز مابین ۱۵ تا ۲۰ متر می‌باشد.

از آنجا که نوع خاک این محدوده، خاک رسی است و امکان استفاده از پارامترهای زهکش نشده برای برآورد فشار سینه کار وجود دارد، می‌توان از عدد پایداری (که مبتنی بر پارامتر مقاومت برشی زهکش نشده است) و عدد پایداری بحرانی و دو حالت حدی نهایی و سرویس (که در قسمت قبل به تفصیل ذکر شد) برای برآورد فشار سینه کار استفاده کرد. جدول ۱ خلاصه فرمول‌های بکار گرفته شده برای دو حالت حدی سرویس و نهایی را نشان می‌دهد. این فرمول‌ها از فرمول‌های تشریح شده در بخش قبل نتیجه‌گیری شده است.

برای محاسبه اُفت حجمی زمین، ابتدا لازم است مشخصات منحنی نشست سطحی در سطح زمین در یک مقطع عرضی در پشت سینه کار تونل (جایی که حداکثر جابه‌جایی به دلیل تونل زنی حاصل می‌شود) برای یک تونل منفرد به دست آورده شود (شکل ۸ و رابطه (۷)) [۱۶].

$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2t^2}\right) \quad (7)$$

برای استفاده ماشین‌های سپری تحت فشار مناسب نباشند. در قسمت بعد به بررسی نتایج برآورد فشار سینه کار با استفاده از عدد پایداری و عدد پایداری بحرانی و روش‌های حالت حدی نهایی و سرویس تشریح شده برای پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران پرداخته شده است.

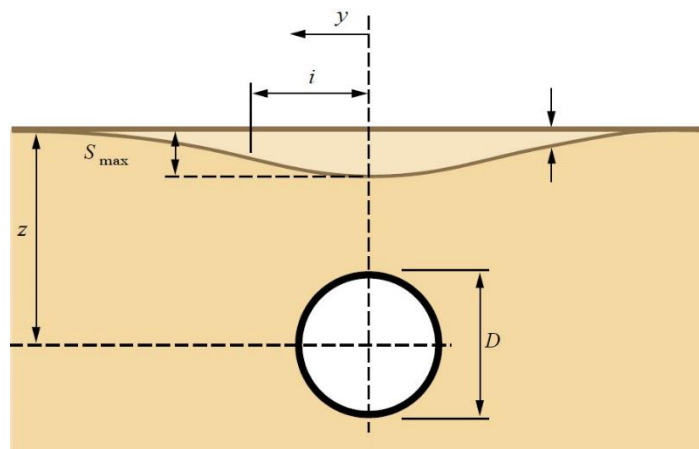
۵- برآورد فشار سینه کار در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران

پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران از منطقه دولت‌آباد شروع شده و به طول حدود ۶/۲ کیلومتر تا خیابان شهید احمد قمی امتداد می‌یابد. در حال حاضر این تونل در مترهای میانی این قطعه با روش حفاری مکانیزه با یک دستگاه EPB TBM با قطر حفاری ۹/۱۹ متر در حال اجرا می‌باشد. محدوده مورد بررسی این مقاله شامل قطعه میانی این پروژه بین ایستگاه‌های A۶-۱ و A۶-۲ و مابین کیلومترهای ۲۲۰۰ و ۳۸۰۰ می‌باشد (شکل ۷). خاک‌های تشکیل‌دهنده این قطعه از تونل عمدتاً از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد همواره بیشتر از ۵۰ درصد می‌باشد.

جدول ۱. خلاصه فرمول‌های محاسبه فشار سینه کار در دو حالت حدی سرویس و نهایی

Table 1. Summary of face pressure calculation formulas in two modes of service limit state and ultimate limit state

فشار سینه کار (bar)	حالت حدی
$P_E = \gamma Z_0 + q - \frac{N_{cr}}{1.5} c_u$	حد پایینی (مرتبط با ریزش سینه کار)
۰/۹ فشار روباره	حد بالایی (برای جلوگیری از بالازدگی روباره)
$P_E = \gamma Z_0 + q - \frac{c_u N_{cr} \ln(\frac{0.5}{0.23})}{4.4}$	برای آفت حجمی ۰/۵ درصد
	حالت حدی سرویس
$P_E = \gamma Z_0 + q - \frac{c_u N_{cr} \ln(\frac{1}{0.23})}{4.4}$	برای آفت حجمی ۱ درصد



شکل ۸. منحنی نشست سطحی عرضی برای یک تونل منفرد

Fig. 8. Transverse surface subsidence curve for a single tunnel

پین‌ها در امتداد محور تونل بر روی سطح زمین با حداقل فاصله ۱۰-۱۵ متر برای نقاط منفرد و ۳۰-۶۰ متر برای آرایه‌های ۳ یا ۵ نقطه‌ای (عمود بر محور تونل) قرار گرفته‌اند (شکل ۹).

این پین‌ها قبل از رسیدن TBM به نقطه مورد بررسی (به عنوان مثال ۵۰-۱۰۰ متر جلوی سینه کار) نصب شده و قرائت آنها آغاز می‌شود و کار قرائت نشست‌سنجی تا فاصله طولانی پس از عبور TBM (به عنوان مثال ۲۰۰ متر پشت سینه کار) تا زمانی که مقادیر قرائت شده به یک ثبات نسبی برسد، ادامه پیدا می‌کند. دقت اندازه‌گیری با ابزار نقشه برداری، ۰/۰۱ میلی‌متر است.

شکل ۱۰ نمونه‌ای از این برازش نمودار را بر روی داده‌های واقعی نشست سطحی در مقطع متراتژ ۳۵۶۰ تونل نشان می‌دهد. در این فرآیند، هدف، به حداقل رساندن خطاهای مربعی تفاوت بین نقاط منحنی و داده‌های واقعی با تغییر مقدار پارامتر عرض منحنی است. بر

S: نشست یک نقطه در فاصله عرضی z از محور تونل است،
 S_{max} : حداکثر نشست سطحی در بالای محور تونل است،
 z : فاصله عرضی از محور تونل،

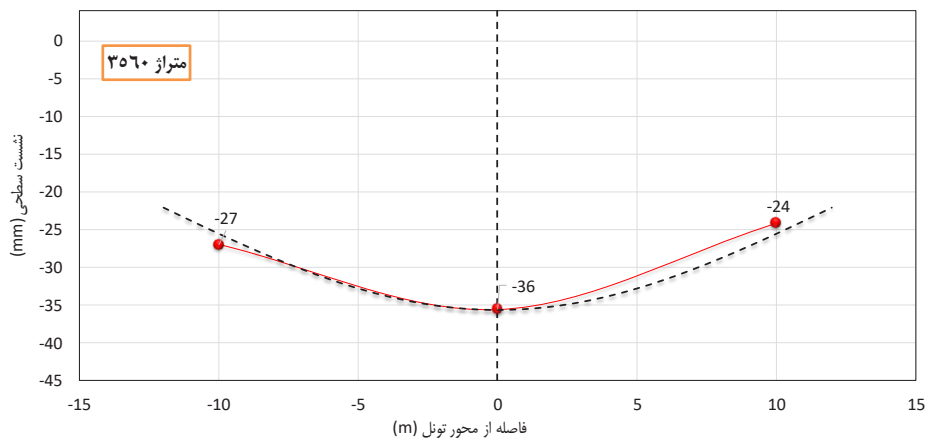
i : پارامتر عرض منحنی نشست که به صورت $i = k z$ بیان می‌شود. k در این فرمول، یک ثابت بی بعد است که به نوع خاک وابسته است و z عمق روباره محور تونل است.

i موقعیت نقطه تغییر شیب منحنی نشست سطحی را نشان می‌دهد، جایی که منحنی نشست دارای شیب حداکثر خود است و دو محدوده محدب و مقعر منحنی را از هم جدا می‌کند. این پارامتر با استفاده از برازش منحنی رابطه (۷) بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده نشست سطحی، محاسبه می‌شود.

در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، نشست سطح زمین با استفاده از پین‌های نقشه‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. این



شکل ۹. نقاط نشست‌سنجی سطحی زمین در امتداد محور تونل
 Fig. 9. Surface settlement monitoring points along the tunnel axis



شکل ۱۰. نمونه‌ای از نتایج برازش منحنی نشست (منحنی خط‌چین) بر داده‌های واقعی نشست سطحی
 Fig. 10. Example of the results of fitting the settlement curve (line curve) on the actual surface settlement data

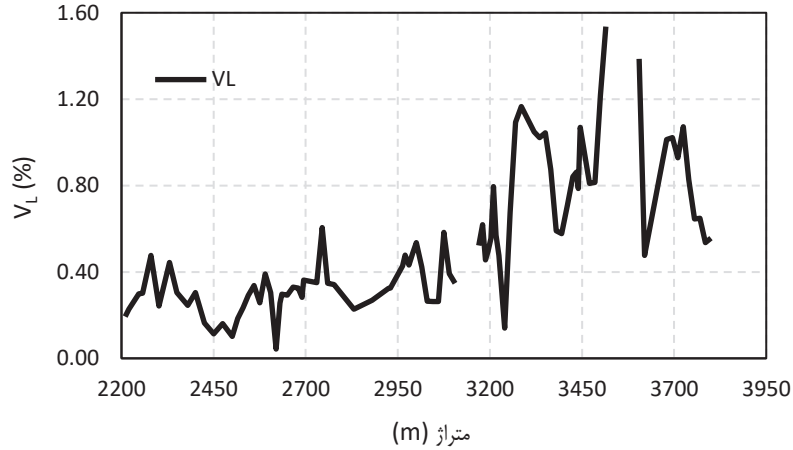
درصد است و برای محدوده مترژهای ۳۲۵۰ تا ۳۸۰۰، اُفت حجمی واقعی رخ داده غالباً بین ۰/۵ تا ۱ درصد است. شکل ۱۲ نتایج برآورد فشار سینه کار را برای حالت حدی نهایی در مقایسه با فشار سینه کار واقعی اعمال شده نشان می‌دهد. فشار سینه کار واقعی در این محاسبات برگرفته از قرائت سلول فشار بالایی محفظه حفاری است (یعنی سلول فشار EP۱ نشان داده شده در شکل ۱۳). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در بیشتر مقاطع، مقادیر واقعی نزدیک به حد پایینی فشار سینه کار اعمال شده بوده است و تنها در محدوده مترژ ۳۳۵۰ تا ۳۷۰۰ به دلیل وجود سینه کار کاملاً پایدار حاوی لایه‌های خاکی درشت‌دانه، فشار نسبتاً پایین تری بر سینه کار اعمال شده است که البته منجر به ریزش سینه کار نشد؛ اما این کاهش فشار سینه کار، اثر خود را در قالب افزایش اُفت حجمی (اُفت حجمی بالاتر از ۰/۵

این اساس مقدار بهینه پارامتر عرض منحنی نشست به دست می‌آید (برای مثال شکل ۱۰، $i=12/4$ m). پس از به دست آمدن مقدار A ، مقدار اُفت حجمی تونل ($V_L V_S$) با استفاده از رابطه (۸)، محاسبه می‌شود [۱۷] [۱۸].

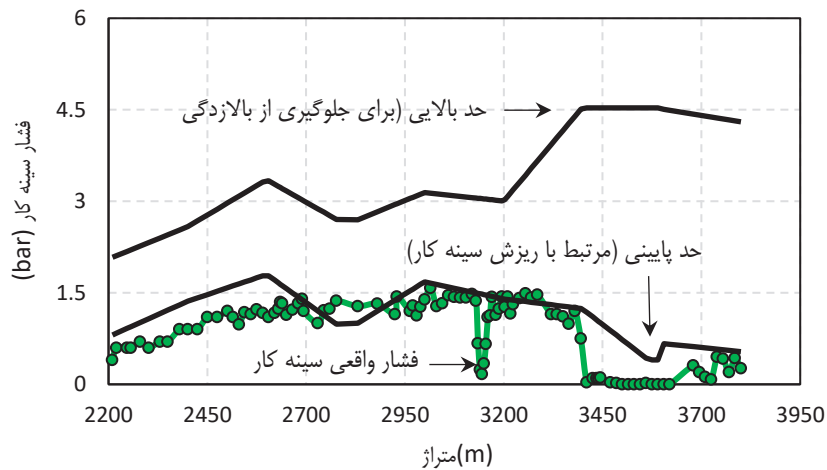
$$V_L = \frac{i S_{max}}{0.313 D^2} \times 100 \quad (8)$$

V_L : اُفت حجمی تونل بر حسب درصد،
 D : قطر تونل (m)،

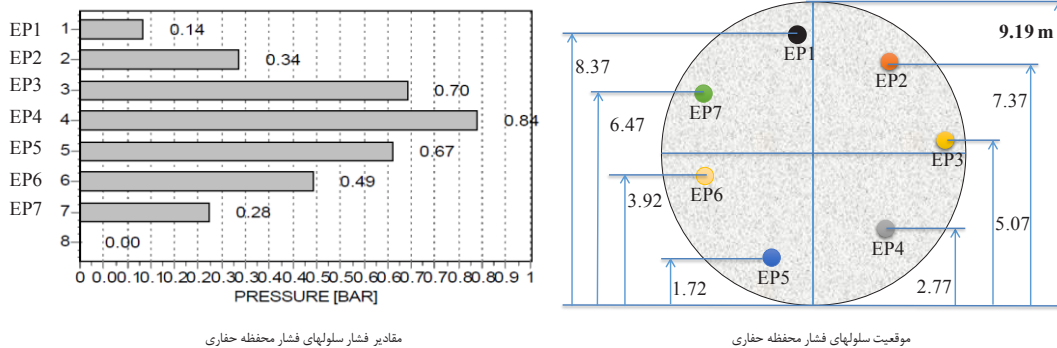
شکل ۱۱ نتایج اُفت حجمی واقعی اتفاق افتاده در پروژه را نشان می‌دهد. نکته قابل ملاحظه این است که بر اساس نمودار شکل ۱۱، اُفت حجمی واقعی رخ داده در پروژه تا مترژ ۳۲۵۰، کمتر از ۰/۵



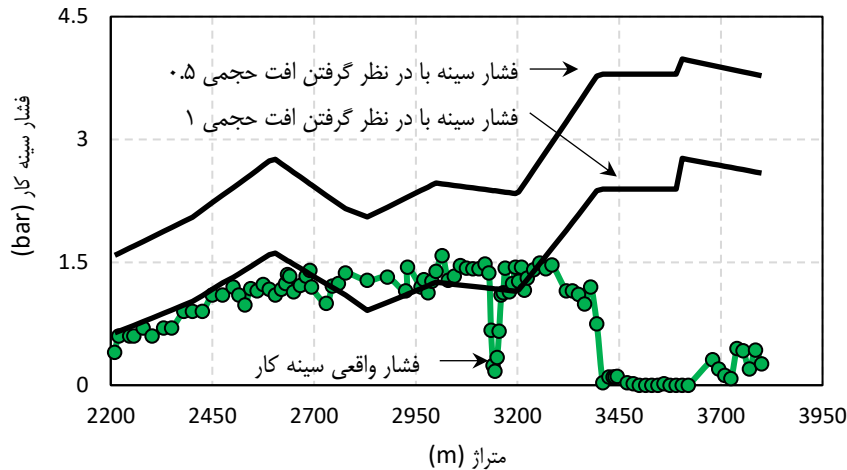
شکل ۱۱. اُفت حجمی واقعی زمین در طول تونل
Fig. 11. Actual volume loss across the tunnel



شکل ۱۲. نتایج برآورد فشار سینه کار را برای حالت حدی نهایی در مقایسه با فشار سینه کار واقعی در طول تونل
Fig. 12. Comparison between the results of estimated face pressure for the ultimate limit state and actual face pressure along the tunnel



شکل ۱۳. مقادیر واقعی فشار سینه کار ثبت شده در فایل دیتالاگر TBM برای حلقه سگمنتی شماره ۲۰۴۷ (متناظر با متر از سینه کار ۳۴۹۳)
Fig. 13. Actual values of face pressure recorded in the TBM data logger file for ring number 2047 (corresponding to the face pressure of 3493 m)



شکل ۱۴. نتایج برآورد فشار سینه کار را برای حالت‌های حدی سرویس متداول در مقایسه با فشار سینه کار واقعی در طول تونل

Fig. 14. The results of estimating the face pressure using the common limit states as compared to the actual face pressure along the tunnel

استفاده شده توسط کیمورا و میر [۱۴] یا محققین دیگر (همانند [۱۳]) برای برآورد عدد پایداری سینه کار و اُفت حجمی، تطابق مناسبی با شرایط کاربرد TBM با سینه کار تحت فشار را ندارد و این فرمول‌ها نیاز به بروزرسانی دارند. این موضوع خصوصاً برای شرایطی که مقدار اُفت حجمی (یا مقدار حداکثر نشست سطحی) می‌بایست بر اساس حساسیت ساختمان‌های سطحی در طراحی و اجرا در نظر گرفته شود از اهمیت بیشتری برخوردار است. در قسمت بعد سعی شده است تا با تکیه بر داده‌های واقعی پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران اقدام به توسعه یک روش جدید محاسبه فشار سینه کار بر پایه حالت حدی سرویس شود.

۶- توسعه روش جدید حالت حدی سرویس برای برآورد فشار سینه کار

هدف اصلی از این مطالعه، ایجاد یک مدل جدید تجربی پیش‌بینی فشار سینه کار بر اساس حالت حدی سرویس است. به این منظور یک بانک اطلاعاتی از داده‌های زمین‌شناسی (شامل داده‌های مرتبط با دانه‌بندی خاک، مدول یانگ زمین، مقاومت برشی زهکش نشده خاک، چسبندگی، زاویه اصطکاک)، داده‌های هندسی (شامل ارتفاع روباره در مقاطع مختلف، ارتفاع سطح آب زیرزمینی)، پارامترهای عملیاتی TBM (شامل فشار سینه کار، پارامترهای تزریق فوم، فشار تزریق دوغاب سیمان در سپر دنباله، نیروی پیشران، نرخ نفوذ، گشتاور

درصد) در مقایسه با مقاطع قبلی (اُفت حجمی کمتر از ۰/۵ درصد) نشان داده است.

شکل ۱۴ نتایج برآورد فشار سینه کار را برای حالت‌های حدی سرویس متداول در مقایسه با فشار سینه کار واقعی اعمال شده نشان می‌دهد. نکات مهم این نمودار در مقایسه با نمودار شکل ۱۱ به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- از مترای ۲۲۰۰ تا مترای ۳۲۵۰، اُفت حجمی واقعی رخ داده در پروژه کمتر از ۰/۵ درصد است، از این رو انتظار این است که فشار واقعی سینه کار نزدیک به مقادیر فشار سینه کار برآورد شده برای حالت اُفت حجمی ۰/۵ درصد باشد. اما فشارهای واقعی سینه کار با مقادیر برآورد شده برای حالت اُفت حجمی ۰/۵ درصد اختلاف زیادی دارد.

- از مترای ۳۲۵۰ تا مترای ۳۸۰۰، اُفت حجمی واقعی رخ داده در پروژه بین ۰/۵ تا ۱ درصد است، از این رو انتظار این است که فشار واقعی سینه کار نزدیک به مقادیر فشار سینه کار برآورد شده برای حالت اُفت حجمی ۱ درصد باشد. اما فشارهای واقعی سینه کار با مقادیر برآورد شده برای حالت اُفت حجمی ۱ درصد اختلاف زیادی خصوصاً برای مترای پایانی نزدیک به مترای ۳۸۰۰ دارد.

در یک جمع‌بندی می‌توان به این نتیجه رسید که تطابق مقادیر فشار سینه کار برآورد شده در حالت حدی سرویس با مقادیر واقعی بسیار کم است. به نظر می‌رسد مشکل اساسی این است که داده‌های

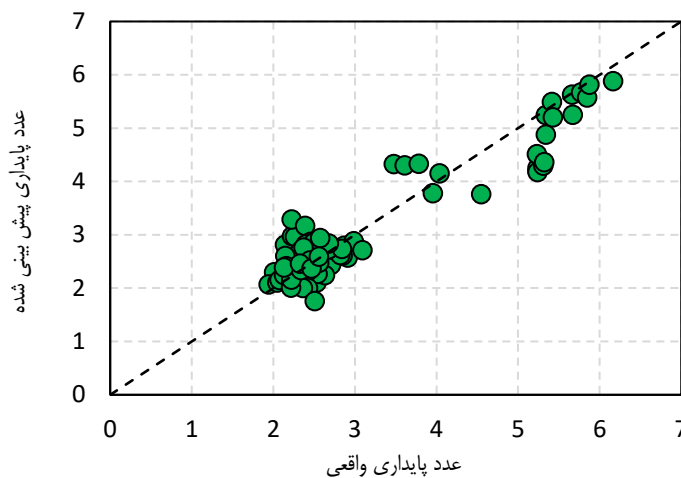
ترکیب‌های چند جمله‌ای استفاده شده است. برای اصلاح نرمال بودن توزیع مقادیر خطاهای برآورد، از لگاریتم طبیعی پارامترها در تحلیل‌ها استفاده شده است. با این کار، تابع به دست آمده غیرخطی می‌شود. نتایج نهایی بهترین تحلیل‌های رگرسیون چند جمله‌ای در روابط (۹) و (۱۰)، جدول ۲، و شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است. شکل ۱۵، رابطه ۱:۱ بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده عدد پایداری را از رابطه (۱۰) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روند کلی نقاط از خط ۱:۱ تبعیت می‌کند. همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد (رابطه (۱))، عدد پایداری تابعی از فشار سینه کار است. به منظور تحقق حالت حدی سرویس، می‌توان در این معادله اُفت حجمی معینی یا نشست سطحی معینی را برای ارزیابی عدد پایداری و فشار سینه کار مورد نیاز در نظر گرفت. برای این پروژه، مقدار محدود کننده نشست سطحی ۱۰ میلی‌متر به عنوان حداکثر مجاز نشست سطحی زمین (S_{max}) در نظر گرفته شده است. با استفاده از این مقدار، می‌توان اُفت حجمی را محاسبه کرد. سپس عدد پایداری

و غیره)، و پارامترهای نشست‌سنجی (شامل نشست حداکثر و اُفت حجمی) برای مقاطع مختلف تونل با فاصله ۱۰-۱۵ متر در محدوده متر از ۲۲۰۰ تا ۳۸۰۰ از تونل ایجاد شد. در ادامه با استفاده از آنالیز رگرسیون ساده، روابط رگرسیون بین عدد پایداری محاسبه شده و پارامترهای بانک اطلاعاتی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این آنالیز رگرسیون ساده، شناسایی پارامترهای مهم تأثیرگذار بر روی عدد پایداری است. بر این اساس، مدول یانگ، اُفت حجمی و ارتفاع سطح آب زیرزمینی از مرکز تونل به عنوان پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شد. در مرحله آخر از آنالیز رگرسیون چندگانه برای بررسی اثر ترکیبی پارامترهای مؤثر بر روی پارامتر مورد ارزیابی (عدد پایداری) استفاده شد. در این مطالعه از نرم‌افزار تحلیل آماری Minitab استفاده شده است. با توجه به نتایج تحلیل رگرسیون ساده، ۳ پارامتر اُفت حجمی، مدول یانگ و نسبت ارتفاع سطح آب زیرزمینی از مرکز تونل به قطر تونل به عنوان متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار گرفتند. در تحلیل‌های انجام شده، از گزینه‌های آنالیز مرحله‌ای و آنالیز بهترین

جدول ۲. ضرایب رگرسیون به دست آمده از Minitab

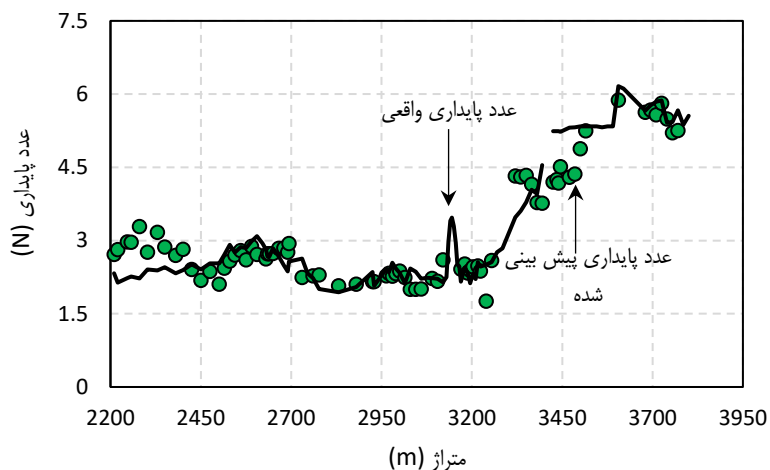
Table 2. Regression coefficients obtained from Minitab

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-2.86	1.31	-8.06	0.000	
$\ln(h_w/D)$	-0.1531	0.0330	-4.64	0.000	1.55
$\ln(E)$	1.118	0.123	9.11	0.000	1.30
$\ln(V_L)$	0.2455	0.0311	7.89	0.000	1.36

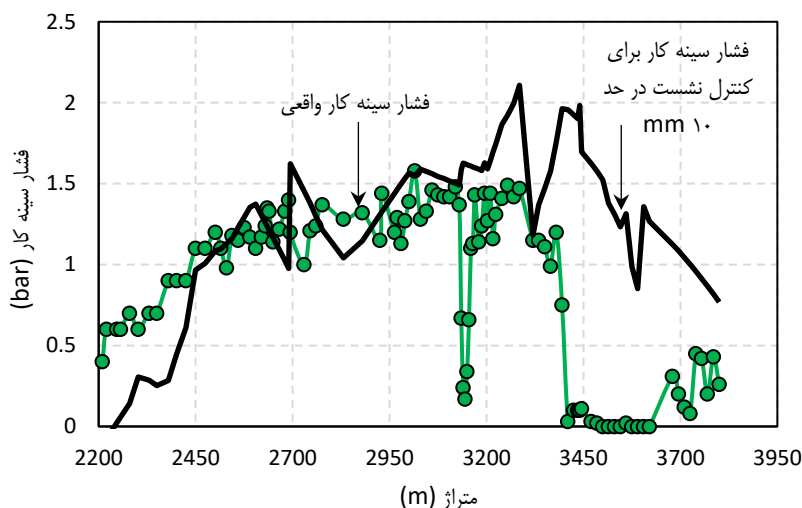


شکل ۱۵. مقایسه عدد پایداری واقعی و پیش‌بینی شده

Fig. 15. Comparison of actual and predicted stability numbers



شکل ۱۶. مقایسه عدد پایداری واقعی و پیش‌بینی شده در طول تونل
Fig. 16. Comparison of actual and predicted stability numbers along the tunnel



شکل ۱۷. مقایسه‌ای بین فشار سینه کار محاسبه شده از روش حالت حدی سرویس برای کنترل نشست در حد ۱۰ میلی‌متر و مقادیر واقعی فشار سینه کار
Fig. 17. Comparison between face pressure calculated by the service limit state method to control the settlement below 10 mm and the actual values of the face pressure

و متعاقباً فشار سینه کار، از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از رابطه (۱۰) به شرح زیر است:

- با افزایش اُفت حجمی مجاز، عدد پایداری افزایش می‌یابد؛ به این معنی که امکان کاهش تنش در سینه کار بیشتر است.
- در زمین‌های با مقادیر مدول یانگ بالاتر، سطح فشار سینه کار را می‌توان نسبت به تنش برجای زمین، پایین تر در نظر گرفت که این خود منجر به یک عدد پایداری بالاتر می‌شود.

بخش‌هایی از تونل با ارتفاع آب بیشتر، نیاز به اعمال فشار بیشتری در سینه کار دارند و این منجر به یک عدد پایداری کمتری می‌شود.

$$\begin{aligned} \ln(N) = & -2.86 + 0.2455 \ln(V_L) - \\ & 0.1531 \ln\left(\frac{h_w}{D}\right) + 1.118 \ln(E) \end{aligned} \quad (9)$$

$R^2 = 84.18\%$

شده در حالت حدی نهایی در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران نشان می‌دهد که اعمال این فشار می‌تواند اُفت حجمی سینه کار را بین ۰/۵ تا ۱ درصد محدود کند و از ریزش سینه کار جلوگیری کند.

- نتایج مقایسه اعداد فشار واقعی سینه کار با فشار برآورد شده در حالت حدی سرویس در این پروژه نشان می‌دهد که دقت برآورد این روش برای کنترل اُفت حجمی زمین بسیار کم است و عموماً نتایج این روش بسیار بالاتر از مقادیر مورد نیاز است.

- بر اساس اطلاعات پروژه یاد شده، یک فرمول جدید برای برآورد عدد پایداری سینه کار با استفاده از روش تحلیلی رگرسیون خطی به دست آورده شده است. ضریب همبستگی این فرمول ۸۴٪ است و این فرمول شامل پارامترهای عدد پایداری، اُفت حجمی، ارتفاع ستون آب و مدول یانگ خاک است.

- نتایج بررسی نشست و فشار سینه کار در محدوده مترژهای ۳۱۰۰ تا ۳۸۰۰ نشان می‌دهد که فشار واقعی سینه کار تا اعداد نزدیک به صفر پایین آورده شده است. این امر باعث افزایش نشست حداکثر سطحی تا مقادیری بالای ۲۰ میلی‌متر شده است. بر اساس نتایج فرمول جدید، برای کنترل نشست سطحی در حد ۱۰ میلی‌متر در شرایط مشابه این محدوده، فشار سینه کار می‌بایست در حدود ۰/۵ تا ۱ بار باشد.

تقدیر و تشکر

در پایان بر خود لازم می‌دانم از شرکت مهندسی مشاور بهرو و شرکت سابیر بین‌الملل برای در اختیار قرار دادن اطلاعات پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، کمال تقدیر و تشکر را بنمایم.

مراجع

- [1] Horn, N., 1961. "Horizontal earth pressure on vertical end faces of tunnel tubes". In the National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry, pp. 7-16.
- [2] Anagnostou, G., Kovari, K. 1996. "Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields". Tunneling and Underground Space Technology, No. 2, pp. 165-173.
- [3] Mohkam, M., Wong, Y.W. 1989. "Three dimensional

$$N = 0.0573 \frac{V_L^{0.2455} \cdot E^{1.118}}{(h_w/D)^{0.1531}} \quad (10)$$

$$N = 0.0573 \frac{V_L^{0.2455} \cdot E^{1.118}}{(h_w/D)^{0.1531}}$$

$$N = 0.0573 \frac{V_L^{0.2455} \cdot E^{1.118}}{(h_w/D)^{0.1531}}$$

$$N = 0.0573 \frac{V_L^{0.2455} \cdot E^{1.118}}{(h_w/D)^{0.1531}}$$

N : عدد پایداری، E : مدول یانگ (MPa)، V_L : اُفت حجمی زمین، h_w : ارتفاع سطح آب زیرزمینی از مرکز تونل (m)، D : قطر تونل (m).

شکل ۱۷ نتایج مقایسه بین فشار واقعی سینه کار و فشار برآورد شده برای نشست حداکثر ۱۰ میلی‌متر (حالت حدی سرویس مورد استفاده در این پروژه) را با استفاده از رابطه جدید نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به جز محدوده مترژهای آخر، فشارهای اعمال شده واقعی و فشار مورد انتظار به هم نزدیک هستند. این امر باعث شده است که در محدوده مترژ ۲۲۰۰ تا ۳۱۰۰، مقادیر حداکثر نشست سطحی واقعی بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر قرار گیرد. در محدوده مترژهای ۳۱۰۰ تا ۳۸۰۰، اختلاف معنادار بین فشار واقعی سینه کار و فشار مورد انتظار برای کنترل نشست‌ها باعث شده است که نشست‌های حداکثر سطحی فراتر از ۱۰ میلی‌متر برود (بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر).

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با تکیه بر پارامترهای عملیاتی و زمین‌شناسی پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، به بررسی روش‌های برآورد فشار سینه کار در شرایط خاک‌های رسی زهکش نشده (شرایط غالب موجود در خاک‌های تونل‌های شهری تهران) در حالت‌های حدی نهایی و سرویس، پرداخته شده است. هدف اصلی از این بررسی، ارائه یک روش جدید برای برآورد دقیق‌تر فشار سینه کار بر اساس روش حالت حدی سرویس برای کنترل اُفت حجمی یا نشست‌های سطحی در یک حد مجاز است. خلاصه نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج مقایسه اعداد فشار واقعی سینه کار با فشار برآورد

- Paper number 274.
- [12] Broms, B.B, Bennermark, H. 1967. "Stability of Clay in Vertical Openings". J Soil Mech Fdns Div, ASCE, 193, SM1, pp. 71-94.
- [13] Macklin, S. 1999. "The prediction of volume loss due to tunneling in over consolidated clay based on heading geometry and stability number". Ground engineering, 32(4), pp. 30-33.
- [14] Kimura, T., Mair, R.J. 1981. "Centrifugal testing of model tunnels in soft clay". In. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 15 -19 June 1981. Rotterdam. Balkema, pp. 319-22.
- [15] Dimmock, P.S., Mair, R.J. 2007. "Estimating volume loss for open-face tunnels in London clay". Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, UK, vol. 160, Issue GE1, pp. 13-22.
- [16] Peck, R. B., 1969. "Deep excavations and tunneling in soft ground". In: Proc. 7th Int. Conf. on SMFE. pp. 225-290.
- [17] Loganathan, N., 2011. An innovative method for assessing tunneling-induced risks to adjacent structures. New York: Parsons Brinckerhoff Inc. One Penn Plaza New York.
- [18] Mair, R.J., 1993. "Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations". Unwin Memorial Lecture 1992, Proceedings Institution of Civil Engineers. Civil Engineering, Vol. 93, pp.27-41.
- stability analysis of the tunnel face under fluid pressure". In G. Swoboda, editor, Numerical Methods in Geomechanics, PP. 2271-2278, Rotterdam, 1989. Balkema.
- [4] Mollon, G., Dias, D., Soubra, A.H. 2010. "Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136, pp. 215-29.
- [5] DIN 4085.2007-10. 2007. Soil - calculation of earth pressure Subsoil - calculation of earth pressure.
- [6] Herrenknecht, M., Thewes, M., Budach, Ch. 2011. "The development of earth pressure shields. From the beginning to the present". Geomechanics and Tunneling, No. 1, pp. 11-35.
- [7] Shirlaw, J.N., 2012. "Setting operating pressures for TBM tunneling". Geotechnical Aspects of Tunneling for Infrastructure Development, Hong Kong, pp. 7-28.
- [8] Broere, W. 2001. "Tunnel face stability and new CPT applications". PhD Thesis, Delft University.
- [9] Proctor, R.V., White, T.L. 1977. Earth Tunneling with Steel Supports. Commercial Shearing and Stamping Co, Youngstown, 247 p.
- [10] Zizka, Z., Thewes, M. 2016. Recommendations for face support pressure calculations for shield tunneling in soft ground, German Tunneling Committee, ITA-AITES.
- [11] Sun, S., Pei, H., Zhang, S. 2006. "Analysis of face stability and ground settlement in EPB Shield tunneling for the Nanjing metro". The Geological Society of London, IAEG,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Farrokh, Face Pressure Evaluation in Serviceability Limit State, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3577-3592.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18036.6745](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18036.6745)



