مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
آبان ۱۳۸۷، شماره‌ی چهل و چهارم، ص. ۳۹-۴۴

مطالعه‌ی نحوه‌ی تعیین و تأثیر فشار جبهه‌کار ماشین‌های حفر تونل بر تغییر شکل‌های سطح زمین

محمد آزادی (استادیار)
دانشگاه آزاد اسلامی ـ واحد قزوین
سید مجدالدین میرمحمدحسینی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

قبل از حفر یک سازه‌ی زیرزمینی اطلاعات مناسبی برای تعیین روش اجرا و سیستم نگه‌داری در دست است، اما معمولاً این اطلاعات کافی نیست و احتمال وقوع خرابی‌های پیش‌بینی نشده وجود دارد. خرابی‌های ایجاد شده علاوه بر اختلال در عملکرد سیستم‌های بهره‌برداری ممکن است موجب بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به تأسیسات، مناطق مسکونی و غیره شود. ازاین‌رو بازرسی بخش‌های مختلف آنها، خصوصاً کنترل وضعیت تنش‌ها و تغییر شکل‌ها، کمک شایانی به جلوگیری از وقوع حوادث ناگوار می‌کند. در این نوشتار با بررسی روش‌های مختلف تعیین فشار جبهه کار در حفاری تونل‌ها و به‌کارگیری نرم‌افزار PLAXIS سه‌بعدی به ارزیابی میزان فشار جبهه‌کار و نشست یا تورم ناشی از این فشار پرداخته شده است. برای این منظور از اطلاعات متروی اصفهان به‌عنوان یک نمونه‌ی موردی استفاده شده است.

azadi@aut.ac.ir
mirh53@yahoo.com

واژگان کلیدی: فشار جبهه کار، EPB ، نشست، تورم، حفاری تونل.

مقدمه

یکی از مسائل حائز اهمیت در حفر تونل‌ها، بررسی اثرات حفاری و پیش‌بینی این اثرات در آینده است. برای ارزیابی چنین اثراتی، داشتن اطلاعات کافی از زمین‌شناسی منطقه ــ از نظر لایه‌بندی و پارامترهای ژئوتکنیکی و نیز از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک ــ ضروری است. از این‌رو انجام مطالعات صحیح و هدف‌دار می‌تواند ما را به سمت بهبود طراحی و ایمنی بیشتر سوق دهد.

عموماً بیشترین بررسی‌ها برای کسب اطلاعات درمورد اثرات حفاری بر آنچه که بر سطح زمین احداث شده، مربوط به نشست و تورم سطح زمین است که در هنگام کاربرد ماشین‌های حفار بر اثر عوامل زیر به وجود می‌آیند:

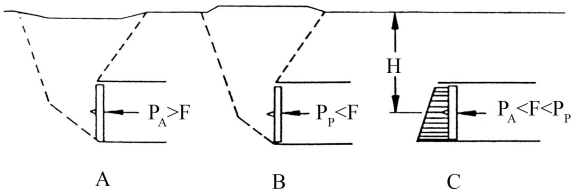
الف) نشست ناشی از فشار حفاری در جبهه کار؛

ب) نشست در پشت دستگاه حفار.

در حالت اول که عموماً مشکل اساسی حفاری با استفاده از ماشین‌های حفار است، در صورتی که فشار وارده به جبهه کار از فشار موجود بیشتر شود خاک جلوی جبهه کار در سطح زمین متورم می‌شود و در صورتی که این فشار از فشار خاک موجود کم‌تر باشد، سطح زمین نشست می‌کند. شکل ۱ نمایش شماتیک این تورم و نشست را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل چنانچه میزان فشار وارده بر جبهه کار به سمت فشار حالت محرک سوق یابد، در سطح زمین نشست مشاهده می‌شود و هرچه به مقدار فشار خاک در حالت مقاوم نزدیک‌تر می‌شویم این نشست به تورم تبدیل می‌شود.

در دستگاه‌های حفاری TBM با سپر EPB [1]، به‌دلیل قابلیت کنترل فشار متعادل‌کننده‌ی خاک عموماً پایداری در جبهه تونل تأمین، و از نشست خاک جلوگیری می‌شود. از این رو میزان تغییرات سطح زمین ناشی از حرکت دستگاه حفار، به‌طور کامل به اپراتور TBM و مهارت وی در راهبری آن بستگی دارد. تحقیقات فراوانی که در این زمینه انجام شده حاکی از آن است که در حفاری با استفاده از دستگاه‌حفار TBM با سپر EPB نه‌تنها هیچ‌گونه ریزش یا لغزندگی خاک به وقوع نمی‌پیوندد، بلکه نشست خاک در سطح نیز براساس اندازه‌گیری‌های در محل، حتی در مقطع‌های کم‌پوشش از ۳ میلی‌متر تجاوز نکرده است.[1]

اما دومین نوع نشست، نشست در پشت دستگاه حفار است. این حالت از یک طرف به‌دلیل کم‌بودن فاصله‌ی زمانی بین حفاری، نصب و تزریق قطعات (سگمنت‌ها)، و از سوی دیگر تثبیت خاک در جلوی TBM که بعداً در عقب آن قرار می‌گیرد، عموماً رخ نمی‌دهد. اما چنانچه در حالات خاص، دستگاه حفار برای مدت طولانی از کار بیفتد یا خاک محل به‌شدت ریزشی باشد، در پشت بخش‌های مختلف دستگاه حفار یک فضای خالی ایجاد می‌شود که نمی‌توان آن را به‌طور کامل



شکل ۱. نمایش شماتیک نشست و تورم سطح زمین بر اثر فشار جبهه کار.[2]

با تزریق پرکرد و همین باعث ایجاد نشست در پشت دستگاه حفار می‌شود. ازاین رو در این مطالعه برای در نظرگرفتن این اثر، یک تغییرمکان ۱/۵ سانتی‌متری به‌اندازه‌ی فاصله‌ی بین سپر[۲] و خاک اطراف در نظرگرفته شده است.

تاریخچه‌ی مطالعات

تعیین فشار جبهه کار

در روش درست حفاری باید مقدار فشار وارد به جبهه‌کار به اندازه‌یی باشد که علاوه بر پایدار ماندن جبهه‌کار، در سطح زمین نشست یا برآمدگی رخ ندهد. برای محاسبه‌ی این فشارروش‌های مختلفی وجود دارد که در آنها عوامل گوناگونی چون فشار آب و پارامترهای خاک (ضریب پواسون، وزن مخصوص و ...) در نظرگرفته شده است. به‌همین دلیل انتخاب روش مناسب به‌منظور تعیین میزان فشار وارده بستگی به شرایط و اطلاعات موجود دارد. در این ارتباط مطالعات فراوانی صورت گرفته است، که به معرفی تعدادی از آنها می‌پردازیم.

یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای تخمین این فشار، در نظرگرفتن میزان سطح آب نسبت به موقعیت قرارگیری تونل است. این روش که در زمین‌های اشباع و زیر فشار هیدروستاتیک به کار می‌رود، عموماً بین ژاپنی‌ها رواج دارد و فرض برآن است که فشاری معادل ۳۰ kpa، اضافه بر فشار آب برای تعادل فشار خاک، کفایت می‌کند (فرمول ۱).

$$P = P_w + ۳۰(kPa) \qquad (۱)$$

روش ساده‌ی دیگر استفاده از فشار افقی خاک با احتساب فشار عمودی است که به‌صورت یکی از دو رابطه‌ی ۲ و ۳ تعریف می‌شود. با استفاده از این روابط می‌توان میزان فشار وارده‌ی خاک در حالت سکون و محرک را تعیین کرد. بدیهی است هرچه مقدار فشار جبهه کار به سمت میزان فشار در حالت سکون سوق داده شود، میزان جابه‌جایی خاک و درنتیجه مقدار نشست و تورم سطح زمین کاهش می‌یابد.

$$P_o = K_o \gamma h \qquad (۲)$$

$$P_a = K_a \gamma h - ۲C\sqrt{K_a} + P_w \qquad (۳)$$

در این روابط k_o ضریب فشار خاک در حالت سکون، k_a ضریب فشار خاک در حالت متحرک، C چسبندگی و γ وزن مخصوص خاک هستند. برای تعیین فشار جبهه‌کار در خاک‌های ماسه‌یی در بالای سطح آب رابطه‌ی ۴ پیشنهاد شده است.[۳]

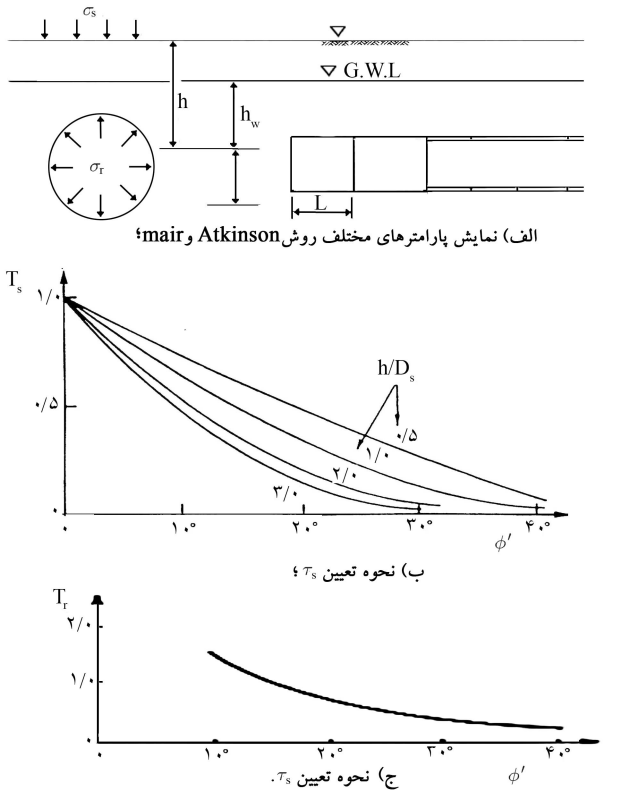
$$\sigma_T = \sigma_s T_s + \gamma_b D_s T_\gamma \qquad (۴)$$

هنگامی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی قرار می‌گیرد، رابطه‌ی ۴ به رابطه‌ی ۵ تبدیل می‌شود:[۲]

$$\sigma_T = \sigma_s T_s + [\gamma_b (h - h_w) + \gamma' h_w] T_\gamma + \gamma_w h_w \qquad (۵)$$

که در آن σ_s سربار سطحی، Ts عدد پایداری تونل برای سربار سطحی (اشکال ۲الف و ۲ب)، γ_b وزن واحد حجم طبیعی خاک، γ' وزن واحد حجم غوطه‌ور خاک، Ds قطر سپر و T_γ عدد پایداری تونل برای بار خاک (شکل ۲ج) است. برای خاک‌های ریزدانه نیز می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۶ پایداری جبهه کار را کنترل کرد:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_T}{C_u} \qquad (۶)$$



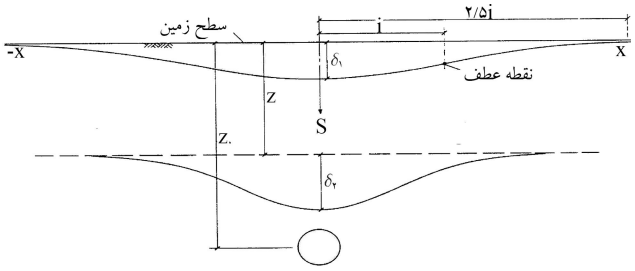
شکل ۲. نمایش شماتیک پارامترهای مختلف روش **Atkinson** و **Mair**.[۲]

که در آن N عدد پایداری است که با چسبندگی زهکشی‌نشده‌ی خاک (Cu)، فاصله‌ی سطح زمین تا محور تونل، و سربار ناشی از سازه‌های سطحی و فشار جبهه‌کار رابطه دارد.[۲] در این رابطه میزان فشار جبهه‌کار باید به‌طریقی حاصل شود که مقدار عدد پایداری (N) کم‌تر از ۵ شود.

هرکدام از ۵ رابطه‌ی یادشده با توجه به اطلاعات موجود و دقت مورد انتظار می‌تواند به‌منظور تعیین فشار وارده به جبهه‌کار مورد استفاده قرار گیرد.

تعیین تغییرات سطحی

تحقیقات وسیعی در زمینه‌ی تعیین تغییرات سطحی و توزیع نشست در عمق انجام شده است. در یکی از معروف‌ترین این تحقیقات (Mair, Bracegirdle,۱۹۹۳)، طی بررسی‌های انجام‌شده نحوه‌ی توزیع نشست سطحی و عمقی ناشی از حفر تونل مطابق شکل ۳ در نظرگرفته شد. در این شکل i فاصله‌ی افقی بین نقطه‌ی عطف منحنی نشست و محل بیشینه نشست سطحی (واقع در بالای تاج تونل) است که از رابطه‌ی $i = kz$ حاصل می‌شود. برای مطالعات صحرایی به‌عمل آمده



شکل ۳. نمایش پروفیل نشست در سطح زمین و اعماق.[۴]

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک.[۵]

نوع خاک	وزن واحد	ضریب تراوایی (m/s)		عوامل مقاومت برشی Mohr-Coulomb		عوامل دگرشکلی‌پذیری	
	حجم کل γ_t (gr/cm^3)	قائم، k_v	افقی، k_h	چسبندگی c' (kg/cm^2)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی، ϕ' $(deg.)$	مدول دگرشکلی کل، Et (kg/cm^2)	ضریب دگرشکلی جانبی نسبی، μr
خاک دستی	۱٫۸	۲×۱۰^{-۶}	۱×۱۰^{-۵}	۰٫۱۵	۲۳	۱۵۰	۰٫۳۵
ریزدانه	۱٫۹	$۲٫۵ \times ۱۰^{-۹}$	$۱٫۲ \times ۱۰^{-۸}$	۰٫۳	۲۵	۲۶۰	۰٫۳۵
درشت دانه	۲٫۰	$۲٫۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۲٫۵ \times ۱۰^{-۳}$	۰	۳۵	۶۰۰	۰٫۳

مقدار $k = ۰٫۵$ برآورد شده است. با توجه به این که عمق تونل مورد مطالعه در بخش‌های بعدی از ۱۰ تا ۱۵ متر در تغییر است مقدار i بین ۵ تا ۷٫۵ است. از این رو مقدار $i = ۶$ می‌تواند مقداری مناسب برای طول مسیر باشد. با داشتن نقطه‌ی تقعر و نقاط عطف منحنی نشست می‌توان شکل منحنی تغییر شکل خاک را به دست آورد. برای این منظور، ضمن بررسی روابط مختلف ریاضی رابطه‌ی ۷ برای توزیع نشست سطحی زمین در خاک‌های رسی ارائه شد.[۴]

$$S = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) \qquad (۷)$$

در این رابطه $S_{\max}$ بیشینه نشست سطحی و x فاصله‌ی افقی نقطه‌ی مورد نظر از محل نشست بیشینه است.

مقایسه‌ی روش‌های مختلف تحلیل‌های دستی

اصول و مبانی تحلیل

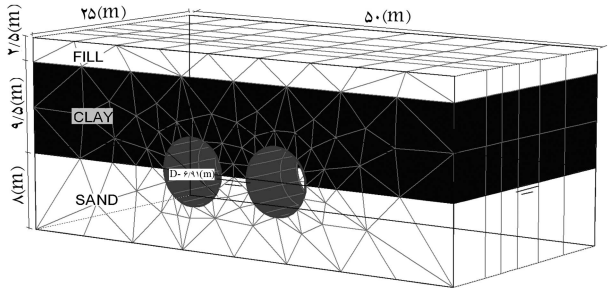
به‌منظور ارزیابی فشار جبهه‌کار یک مطالعه‌ی موردی از متروی اصفهان که با استفاده از دستگاه حفار TBM با سپر EPB حفاری می‌شود، در نظر گرفته شده است. تونل‌های قطعه‌ی میانی متروی اصفهان متشکل از دو تونل دایره‌یی به‌قطر داخلی ۶٫۰ متر هستند که مرکز آن‌ها در عمقی حدود ۱۰ تا ۱۵ متر از سطح زمین قرار دارند و در بیشتر مسیر از زیر خیابان عبور می‌کنند.

ارزیابی ساخت‌گاه تونل

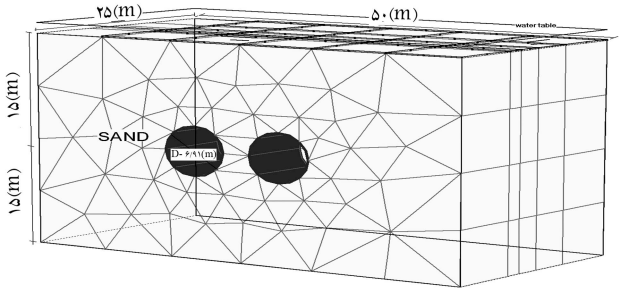
با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی منطقه‌ی مورد مطالعه، سه لایه خاک در این ناحیه مشاهده می‌شود. مشخصات این لایه‌ها مطابق جدول ۱ است. برای تحلیل دو حالت مختلف به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

حالت اول. در این حالت فاصله‌ی قائم مرکز تونل‌ها از سطح زمین ۱۲ متر است و سطح آب زیرزمینی نیز در این عمق قرار گرفته است. در شکل ۴ نحوه‌ی لایه‌بندی خاک در این حالت نشان داده شده است. با توجه به این شکل ۲٫۵ متر خاک دستی، ۹٫۵ متر خاک‌رسی و ۸ متر خاک ماسه‌یی که بیان‌گر بخشی از مسیر حفاری تونل است در نظر گرفته می‌شود. مشخصات لایه‌های مختلف مطابق جدول ۱ است.[۵]

حالت دوم. در این حالت به‌دلیل وجود رودخانه‌ی زاینده‌رود سطح آب ۱٫۵ متر بالاتر از سطح زمین قرار دارد و فاصله‌ی مرکز تونل‌ها از سطح زمین ۱۵ متر است.



شکل ۴. نحوه‌ی لایه‌بندی خاک در حالت اول.



شکل ۵. نحوه‌ی لایه‌بندی خاک در حالت دوم.

نحوه‌ی لایه‌بندی خاک مطابق شکل ۵ در نظرگرفته شده است. با توجه به این شکل تنها یک لایه‌ی درشت‌دانه (ماسه‌یی) در منطقه مشاهده می‌شود (جدول ۱).[۵]

بررسی نتایج تحلیل‌های دستی

با توجه به ساخت‌گاه‌های انتخابی دو حالت مختلف برای ارزیابی فشار حفاری در خاک ریزدانه و درشت‌دانه در نظرگرفته شده است. درصورتی که از روابط تجربی ۱، ۲ و ۳ به‌منظور محاسبه‌ی فشار وارده به جبهه‌کار استفاده شود مقادیر این فشار در تاج تونل برای حالات مختلف مطابق جدول ۲ خواهد بود.

با توجه به جدول ۲ مقادیر فشار جبهه‌کار برای حالت اول (در خاک رسی) بین ۰٫۲۷ bar تا ۰٫۹۳ و برای حالت دوم (در خاک ماسه‌یی) بین ۱٫۶ bar تا ۱٫۸۴ است. همچنین مقایسه‌ی روش‌های فشار حالت سکون و محرک نشان می‌دهد که با تغییر حالت محرک به حالت سکون ــ به‌علت آن که حرکت خاک به سمت سپر

جدول ۲. مقادیر فشار جبهه کار براساس روش‌های مختلف.

روش	حالت اول (bar)	حالت دوم (bar)
$P = P_w + ۳۰$	۰/۳	۱/۶
فشار حالت سکون	۰/۹۳	۱/۸۴
فشار حالت محرک	۰/۲۷	۱/۶۴
Atkinson و Mair	—	۱/۶۶

کاهش می‌یابد ــ بر میزان فشار جبهه‌کار افزوده می‌شود. مشاهده‌ی مقادیر به دست آمده از روش اول نشان می‌دهد که مقدار فشار جبهه‌کار تابع فشار آب موجود است. بنابراین برای حالتی که سطح آب زیرزمینی پایین است، از این روش نمی‌توان مقادیر مناسبی را تخمین زد.

در حالت دوم (با وجود خاک رسی) عدد پایداری در حدود ۲/۶۹ می‌شود که نشان از پایداری جبهه‌کار در حین حفاری دارد. در این حالت چنانچه فشار جبهه‌کار را با توجه به مقادیر محاسبه‌شده برابر مقدار فشار کمینه‌ی محاسبه شده (۰/۲۷ bar) قرار دهیم، اگرچه پایداری جبهه‌کار فراهم می‌شود، با حرکت خاک به سمت جبهه‌کار و درنتیجه نشست سطحی همراه خواهیم بود. از این‌رو بهتر است در این حالت فشار جبهه‌کار به سمت مقادیر بیشتر سوق یابد. اما افزایش میزان این فشار با کاهش سرعت حفاری و احتمال تورم در لایه‌های ضعیف‌تر همراه است. ازاین رو توصیه می‌شود که میزان فشارکار در حد فاصل مقادیر به دست آمده از روش‌های مختلف باشد. این موضوع برای حالت اول نیز صادق است؛ از این‌رو مقدار فشار جبهه‌کار برای حالت اول در حدود ۰/۵ bar تا ۰/۸ و برای حالت دوم بین ۱/۶ bar تا ۱/۷ مناسب به نظر می‌رسد.

تحلیل‌های PLAXIS

اصول و مبانی تحلیل

چنان که بیان شد، برای ارزیابی فشار جبهه‌کار و نشست سطح زمین یک مطالعه‌ی موردی از متروی اصفهان، متشکل از دو تونل دایره‌یی به‌قطر خارجی ۶/۹۱ متر انتخاب شده است. بیشتر مسیر مترو از زیر خیابان عبور می‌کند و به‌همین دلیل نشست‌های ناشی از اجرای تونل در سطح خیابان و سازه‌های مهم نزدیک مسیر تونل، هم در زمان ساخت و هم در زمان بهره‌برداری، باید کنترل شود. برای این منظور از نرم‌افزار PLAXIS سه‌بعدی برای تحلیل استفاده شده است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان میزان فشار جبهه کار و نشست‌های سطحی را به دست آورد و با نتایج حالت قبل مقایسه کرد. همچنین می‌توان علاوه بر در نظرگرفتن تغییرات وضعیت ایجادشده در محیط، اثرات حفر دو تونل مجاور هم را نیز در نظر گرفت.

ارزیابی ساخت‌گاه تونل

برای انجام تحلیل‌های PLAXIS، ۳ حالت مختلف مطابق جدول ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این جدول، حالات اول و سوم معادل حالات اول و دوم تحلیل‌های دستی هستند که قبلاً مورد ارزیابی قرار گرفتند.

جدول ۳. حالات مختلف تحلیل سه‌بعدی.

حالت	فاصله مرکز تونل‌ها از سطح زمین (m)	سطح آب (m)
اول	۱۲	-۱۲
دوم	۱۱	-۱۰
سوم	۱۵	۱/۵

جدول ۴. مشخصات قطعه‌های پوشش تونل.

$EI(kN.m^۲/m)$	$EA(kN/m)$	ضخامت قطعه (m)
$۵/۰۳۱ \times ۱۰^{۴۷}$	$۶/۷۰۸ \times ۱۰^{۶}$	۰/۳

مشخصات مدل

چنان که پیش‌تر شرح داده شد، دو حالت مطابق شکل‌های ۴ و ۵ در تحلیل‌های عددی مورد توجه قرارگرفته است. در این شکل‌ها ابعاد مدل و محل قرارگیری تونل‌ها در هر حالت نمایش داده شده است. با توجه به بیشتر بودن عمق قرارگیری تونل در حالت دوم، ارتفاع مدل بیشتر در نظرگرفته شده است.

در تحلیل‌های انجام‌شده مدل رفتاری خاک مطابق مدل موهر- کولمب و با مشخصات جدول ۱ در نظرگرفته شده است. مرزهای مدل نیز چنان در نظرگرفته می‌شود که اثرات مرزها به کم‌ترین حد ممکن برسد. این مرزها شامل مرزهای غلتکی در اطراف مدل و مرزهای مفصلی در پایین مدل هستند.

ارزیابی مشخصات پوشش تونل

تونل مورد مطالعه بخشی از متروی اصفهان است که قطر حفاری آن ۶/۹۱ متر است. پوشش تونل به‌صورت قطعه‌یی (سگمنتی) و ضخامت آن ۳۰ سانتی‌متر است. مشخصات پوشش تونل مطابق جدول ۴ در نظرگرفته شده است.

مراحل حفاری

با در نظرگرفتن مراحل حفاری می‌توان محاسبات را به واقعیت نزدیک‌تر کرد. یکی از قابلیت‌های برنامه‌ی PLAXIS در نظرگرفتن این مراحل حفاری است. ازاین رو در تحلیل‌های انجام‌شده، ۴ مرحله‌ی حفاری در نظرگرفته شده است:

۱. بارگذاری ترافیک ناشی از عبور ماشین‌ها از سطح خیابان؛

۲. حفاری تونل اول و اعمال فشار جبهه‌کار؛

۳. ادامه‌ی حفاری تونل اول؛

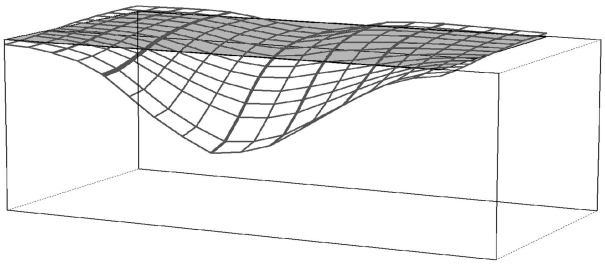
۴. حفاری تونل دوم.

ارزیابی نتایج

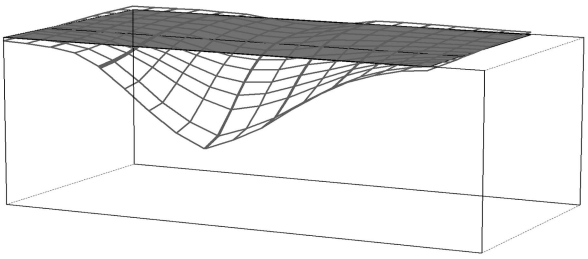
تحلیل‌های PLAXIS برای ۳ حالت مختلف مطابق جدول ۳ انجام شده است. شکل‌های ۶ تا ۸ نحوه‌ی توزیع تغییر مکان در سطح زمین را برای این سه حالت نشان می‌دهند. این شکل‌ها با روابط و شکل‌هایی که در تحقیقات گذشته مورد توجه قرارگرفته است، تطابق مناسبی دارد.

جدول ۵. بیشینه‌ی نشست سطح زمین و نشست سطحی در فواصل ۱۰ و ۱۵ متری از نشست بیشینه.

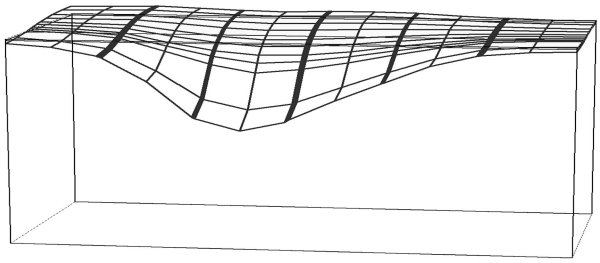
حالت	بیشینه‌ی نشست سطح زمین در زمان حفر تونل اول (mm)	نشست سطح زمین در زمان حفر تونل دوم (mm)		
		بیشینه نشست	نشست در فاصله‌ی ۱۰ متری	نشست در فاصله‌ی ۱۵ متری
اول	۵٫۶	۱۶	۸٫۲	۳٫۱
دوم	۵٫۹	۱۸	۷٫۲	۲٫۵
سوم	۲٫۸	۸٫۸	$\frac{3}{4}$	۲٫۲



شکل ۶. توزیع نشست سطحی برای حالت اول (میزان نشست بیشینه ۱۶ میلی‌متر).



شکل ۷. توزیع نشست سطحی برای حالت دوم (میزان نشست بیشینه ۱۸ میلی‌متر).



شکل ۸. توزیع نشست سطحی برای حالت سوم (میزان نشست بیشینه ۸٫۸ میلی‌متر).

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده برای میزان نشست سطحی در حالات مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد بیشینه‌ی نشست سطح زمین ۱۸ میلی‌متر و مربوط به حالت دوم است. در این حالت فاصله‌ی مرکز تونل از سطح زمین ۱۱ متر است. همچنین نتایج تحلیل‌ها حاکی از آن است که بیشینه‌ی نشست سطح زمین با افزایش عمق تونل‌ها کاهش می‌یابد، که این موضوع در مطالعات گذشته نیز مورد توجه قرار گرفته است. به‌همین دلیل یکی از روش‌های کاهش نشست در مناطقی که از این لحاظ حساس‌اند، افزایش عمق تونل‌ها است.

براساس جدول ۵ بیشینه‌ی تغییر مکان سطحی ناشی از حفاری، زمانی که دو تونل در منطقه حفاری می‌شود، حدود ۳ برابر میزان همان تغییر مکان برای حفر یک تونل است. این امر حاکی از آن است که حفاری دو تونل تأثیر به‌سزایی در نشست سطحی خواهد داشت. لذا افزایش فاصله‌ی دو تونل به‌نحوی که اثرات آنها مستقل از هم باشند می‌تواند باعث کاهش نشست سطحی شود.

برای کنترل نشست‌های ایجادشده در محیط براثر حفاری، از کدهای اجرایی هندوستان استفاده شده است.[۶] براساس این کدها کمینه‌ی نشست‌های کل و نامتقارن برای پی‌های مختلف (با فرض آن که فاصله‌ی ستون‌ها از هم ۵ متر است) چنین حاصل می‌شود:

نشست کل = ۵۰ میلی‌متر؛

نشست نامتقارن $= 0{,}0015L = 0{,}0015 \times 5000 = 7{,}5$ میلی‌متر.

مقادیر نشست کل و نامتقارن ایجادشده براثر حفاری نیز مطابق جدول ۶ است. برای تعیین نشست کل ساختمان‌ها، نشست در فاصله‌ی ۱۰ متری از محل نشست بیشینه و برای محاسبه‌ی نشست نامتقارن، با فرض آن که فاصله‌ی ستون‌های ساختمان‌ها از هم ۵ متر باشد، تفاضل نشست در فاصله‌ی ۱۵ متری و ۱۰ متری در نظرگرفته شده است. با توجه به این جدول، مقادیر تغییر شکل‌های ایجادشده براثر حفاری از کمینه‌های تعیین‌شده‌ی فوق نیزکم‌تر هستند. لازم به ذکر است که با توجه به متفاوت‌بودن بارگذاری ساختمان‌ها بسته به نوع پی و شرایط احداث آن، میزان نهایی نشست نامتقارن و نشست کل سازه می‌بایست به‌صورت مجموع نشست ناشی از حفاری و نشست ناشی از ساخت سازه مد نظر قرار گیرد. لذا اگرچه درصورت هدایت صحیح دستگاه حفار نشست‌های ایجاد شده در حد مجازند، باید مقدار نشست نهایی ساختمان نیز به‌دقت کنترل شود.

نکته‌ی دیگری که با استفاده از برنامه‌ی PLAXIS می‌توان مورد بررسی قرار داد، میزان فشار وارده بر جبهه‌کار است.[۷] با استفاده از این برنامه می‌توان با کاهش فشار جبهه‌کار در فازهای بعدی، حداقل فشار لازم برای پایداری خاک را تخمین زد. از این طریق قادر خواهیم بود که محدوده‌ی دقیق‌تری برای فشار جبهه‌کار تعیین کنیم.

جدول ۶. مقادیر نشست کل و نامتقارن زیر ساختمان‌ها.

حالت	نشست کل (mm)	نشست نامتقارن زیرساختمان (mm)
اول	۸٫۲	۵٫۱
دوم	۷٫۲	۴٫۷
سوم	۴٫۳	۲٫۱

جدول ۷. مقادیر کمینه‌ی فشار جبهه‌کار برای حالت‌های مختلف.

تیپ	فاصله‌ی مرکز تونل از سطح زمین (m)	کمینه‌ی فشار لازم برای پایداری (bar)
۱	۱۲	۰٫۱۴
۲	۱۱	۰٫۴۲
۳	۱۵	۱٫۳۸

خلاصه‌ی محاسبات انجام‌شده برای تعیین این فشار در جدول ۷ ارائه شده است. با استفاده از این جدول می‌توان دریافت که مقدار فشار جبهه‌کار با افزایش عمق تونل و سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه در این محاسبات آن است که این فشار، کم‌ترین فشار لازم برای پایداری جبهه‌کار است. بنابراین، این مقادیر از مقادیرِ به‌دست آمده از حل دستی کم‌ترند و چنانچه حفاری با این فشارها انجام گیرد در سطح زمین نشست قابل توجهی خواهیم داشت و در عمل می‌بایست مقادیر فشار جبهه‌کار از این مقادیر بیشتر باشد.

نتیجه‌گیری

در حفاری تونل‌ها به‌دلیل برهم خوردن وضعیت تنش‌های مؤثر، تغییر شکل‌هایی ایجاد می‌شود که ممکن است باعث ایجاد نشست یا تورم در سطح زمین شود. از این رو در این نوشتار سعی شده است با بررسی این موضوع به اثرات فشار جبهه‌کار بر میزان این تورم و نشست پرداخته شود.

روش‌های تجربی نشان می‌دهند که میزان فشار جبهه‌کار برای حالتی که در منطقه لایه‌های خاک رس، خاک دستی و خاک ماسه‌یی وجود دارد نسبت به حالتی که تنها یک لایه خاک ماسه‌یی در منطقه مشاهده می‌شود، بسیارکم‌تر است. علاوه‌بر این در حالت اخیر سطح آب زیرزمینی بالاتر از حالت اول بوده است، و لذا می‌توان دریافت که میزان فشار جبهه‌کار به نوع خاک و سطح آب زیرزمینی وابسته است. در خاک‌های ماسه‌یی عموماً فشار بیشتری برای پایداری سیستم تعادل مورد نیاز خواهد بود. تحلیل‌های عددی انجام‌شده نیز حاکی از این موضوع است. اگرچه در این تحلیل‌ها مقدار فشار جبهه‌کار نسبت به روش‌های تجربی کم‌تر است (به‌دلیل آن که در روش عددی کم‌ترین فشار لازم برای پایداری خاک تخمین زده می‌شود) اما در هر صورت این روند (بیشتربودن فشار مورد نیاز برای پایداری تونل‌ها در ماسه نسبت به رس) همچنان مشاهده می‌شود.

مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که فشار جبهه‌کار را می‌توان به‌طریقی تعیین کرد که میزان جابه‌جایی سطح زمین تقریباً صفر شود، یا در حد مجاز قرار گیرد. همچنین با افزایش فاصله‌ی دو تونل از هم میزان جابه‌جایی سطحی کاهش می‌یابد. چنانچه این فاصله به حدی برسد که اثرات حفاری دو تونل مستقل از هم باشند، میزان جابه‌جایی سطحی تا ۳ برابر کاهش می‌یابد. ازاین رو، در نقاطی که میزان جابه‌جایی سطحی ازاهمیت بالایی برخوردار است می‌توان عمق حفاری تونل یا فاصله‌ی تونل‌ها را تا حد امکان افزایش داد. از این طریق میزان اثرات سطحی حفاری تونل به‌مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که درصورت هدایت صحیح دستگاه حفار، نشست‌های ایجادشده در زیر ساختمان‌ها در حد مجازند ولی می‌بایست مقدار نشست نهایی ساختمان (مجموع نشست ناشی از حفاری تونل‌ها و ساخت سازه) نیز به‌دقت کنترل شود.

پانوشت

1. Earth Pressure Balance
2. shield

منابع

1. M. Mohkam “Balance pressure of tunnel front in saturated weak base soils”, *Proceedings of 1st intn. conference on soil mechanicas and foundation eng.*, Tehran-IRAN, pp.289-381. (1369).
2. Thomson, J.C.; Chairman, C. “*Pipejackingand microtunnelling*”, Blackie Academic & Professional, An imprint of Chapman & Hall, (1995).
3. Leca. E.; Dormieux. L. “Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material”, *Geotechnique*, **40**(4), pp. 581-606, (1990).
4. Mair, R.J.; Taylor. R.N.; Bracegirdle, A. “Subsurface settlement profiles above tunnels in clay”, *Geothechnique*, **43**(2), pp. 315-320, (1993).
5. Zemin Fanavaran Consulting Engrs. “Final report on site investigations from Modarres sq. to Azadi sq. stations-City of Isfahan”, (1383).
6. S.M. Mir Hosseini, Soil Dynamics , Press centre of International Institue of Seismology & Earthquake Engineering, Tehran-Iran (1380).
7. Verruijt, A. Brinkgreve, R.D., Vermeer, P.A., Schanz,T., Boulon,M., Flavigny,E., Burd,H.J., Sture,S., Schiffman,R.L, Nordal,S., Whittle,a.J., Schweiger,H.F., “Plaxis manual”, Brinkgereve and Vermeer (Ed.), (1998).