

بررسی امکان رخداد گیر کردن ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع (TBM) مطالعه موردی پروژه مترو قم

فهیمه موحدی^۱؛ فضل اله سلطانی^{۲*}؛ حسین جلالی فر^۳؛ حمید محمدی^۴

۱- کارشناس ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، ژئوتکنیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، ژئوتکنیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان

۳- استاد؛ گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.4022.1258

چکیده

واژگان کلیدی

فشار نگهداری سینه کار

مدل سازی عددی

TBM

آنالیز حساسیت

تونل

حفاری تونل به وسیله ماشین *TBM* (Tunnel Boring Machine) در مقایسه با سایر روش های حفر و انفجار یک روش سریع و پر قدرت و همراه با نگهداری است. هر زمان که همگرایی (*Convergence*) تونل به اندازه قابل توجهی نسبت به سینه کار برسد باعث بروز مشکلاتی می شود و در مدت زمان کوتاهی باعث ایجاد فشار و تراکم (*Jamming*) روی *TBM* می شود. برآورد (*Estimation*) فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه کار حفاری (*Front Excavation*) یکی از مهم ترین عوامل بر راندمان ماشین حفاری در زمین های خاکی است. در این پژوهش فشار (*Pressure*) مورد نیاز برای پایداری سینه کار با استفاده از روش های تحلیلی (*Analytical*) و تجربی (*Empirical*) و عددی (*Numerical*) بررسی شده است و همچنین نتایج این روش ها با هم مقایسه شد. به منظور مدل سازی عددی از نرم افزار اجزاء محدود سه بعدی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل ها نشان داد که فشار لازم برای پایداری جبهه کار تونل در روش لکا و دورمیکس (*Leca and Dormiux*) تا حدی به مدل سازی عددی (*Numerical Modeling*) نزدیک تر است. با استفاده از این روش ها به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی فشار سینه کار، آنالیز حساسیت (*Sensitivity Analysis*) روی این پارامترها صورت گرفته است و مشخص شد که چسبندگی بیشترین تأثیر را در فشار نگهداری جبهه کار دارد و پارامترهای نسبت روباره به قطر (*C/D*)، تأثیر کمتری روی فشار نگهداری جبهه کار تونل دارد.

۱- پیشگفتار

ماشین حفاری است. مسئله قابل توجه در استفاده از ماشین های سپری (*Shielded Machines*)، اطمینان از عدم گیر افتادن سپر در حین پیشروی و در توقف های طولانی مدت است. حفاری تونل موجب آزادسازی تنش های برجای خاک شده و تغییر شکل های زمین از نتایج غیر قابل اجتناب ساخت تونل است.

در واقع هیچ گاه این امکان وجود ندارد که دقیقاً هم زمان با حفاری، یک پوشش با سختی بی نهایت در آن قرار

در طراحی تونل ها در اعماق کم و در زمین هایی با شرایط نامناسب، پایدار نگه داشتن جبهه تونل در اولویت است، زیرا ناپایداری جبهه تونل باعث سست شدن سطح زمین می شود و حتی ممکن است به ریزش کامل تونل منجر شود. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه کار و همچنین طول مسیر حفاری یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در راندمان

* نویسنده مسئول - کرمان؛ انتهای اتوبان هفت باغ علوی؛ دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته؛ دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، ژئوتکنیک؛ کد پستی: ۷۶۳۱۱۳۳۱۳۱؛ شماره ی تلفن: ۰۳۴-۳۳۷۷۶۶۱۱؛ رایانامه: soltani.fazlollah@yahoo.com

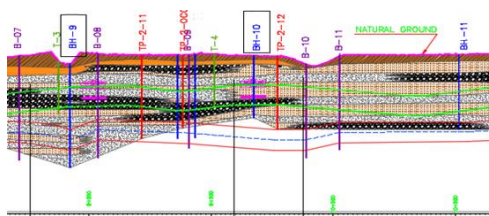
است.

۲- مشخصات طرح

خط A قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر و تعداد ایستگاه از مسجد جمکران شروع شده و با طی مسیرهای مختلف به قلعه کامکار ختم می‌شود. تونل با یک دستگاه ماشین حفار متعادل‌کننده‌ی فشار زمین با قطر ۹٫۴ متر حفاری می‌شود. عمق برخورد به آب زیرزمینی در مسیر مترو بین ۳۰ تا ۳۵ متر از سطح زمین اندازه‌گیری شده است. مسیر خط A متروی قم در میان نهشته‌های دشت آبرفتی جانمایی شده است. در مطالعات ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته در دو مرحله از مطالعات این پروژه، لایه‌های خاکی مسیر مترو به چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی (دو واحد خاکی ریزدانه و دو واحد خاکی درشت‌دانه) تفکیک شده‌اند. دو واحد خاکی درشت‌دانه Qc-1 و Qc-2 گسترش نسبتاً زیادی داشته و به صورت لایه‌هایی نسبتاً ضخیم و بعضاً به صورت لانه‌های نسبتاً گسترده و ضخیم در میان واحدهای خاکی ریزدانه Qf-1 و Qf-2 قابل مشاهده هستند. در جدول ۱، مشخصات ژئوتکنیکی واحدهای خاکی مسیر مترو آورده شده است (Sahel Institute., 2012).

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی واحدهای خاکی مسیر مترو (Sahel Institute., 2012)

پارامتر	نماد	واحد	Qc-2	Qc-1	Qf-2	Qf-1
وزن مخصوص	γ	KN/m^3	۱۷/۲	۱۷/۶	۱۷/۲	۱۶/۸
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	Deg	۳۳	۳۳/۸	۳۰/۹	۳۱/۱
چسبندگی	c	KPa	۳۱	۲۸	۴۳	۳۹
مدول الاستیسیته	E	KPa	۲۹۷۰۰	۲۹۷۰۰	۲۴۶۰۰	۲۴۶۰۰
ضریب پواسون	ν	-	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳



شکل ۱- پروفیل طولی مسیر مقاطع مورد بررسی

داد و بنابراین همواره مقداری تغییر مکان در محل حفاری تونل وجود دارد و به دلیل بروز همگرایی سریع در تونلی که قرار است توسط ماشین حفاری حفر شود، امکان به دام افتادن ماشین خواهد بود که بررسی امکان رخدادهای گریز کردن ماشین حفاری در پروژه‌های تونل‌سازی شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

هدف از تحلیل پایداری این است که میزان ایمنی در برابر فروریزش خاک از جبهه حفاری ارزیابی شود. بدین منظور در حفاری مکانیزه باید بتوان حداقل فشار مورد نیاز در جبهه تونل را تخمین زد. محدوده واقعی این فشار برای پروژه تونل‌سازی به شرایط خاک و آب زیرزمینی، روش حفاری، ابعاد تونل و اندازه روباره بستگی دارد. در این پژوهش پایداری تونل و برآورد فشار نگهداری لازم در جبهه کار و مسیر تونل با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی همانند COB (Centre Underground Bowen)، جانکسز و استاینر (Jancsez and Stainer)، لکا و دورمیکس، آناگنستو و کواری (Anagnostou and Kovari) بررسی شد؛ و این فشارها با نتایج حاصل از روش عددی مقایسه شد؛ که به منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار اجزاء محدود سه بعدی استفاده شد و آنالیز حساسیت روی پارامترهای اساسی و تأثیرگذار در فشار نگهداری جبهه کار انجام شده

در این پژوهش با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی به محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در ۷ مقطع مختلف پرداخته می‌شود که در شکل ۱، پروفیل طولی مسیر و مقاطع مورد بررسی، مشخص شده است و در جدول ۲، کیلومترهای مقاطع مورد بررسی آورده شده است.

است. در این پروژه فشار نوسان 20 kPa در نظر گرفته شده است؛ بنابراین به مقادیر فشار سینه‌کار محاسبه‌شده باید 20 kPa اضافه کرد (Terzaghi, K., 1934).

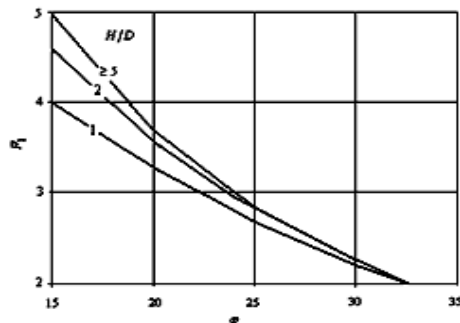
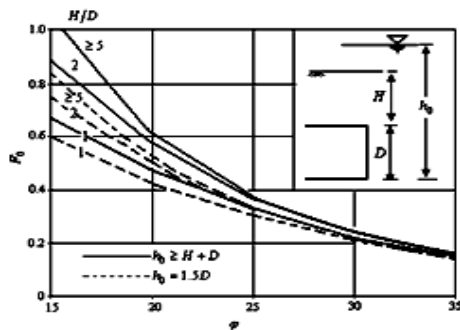
۳-۲- محاسبه فشار سینه کار تونل با روش‌های تحلیلی

روابط تحلیلی متعددی برای محاسبه فشار نگهداری سینه کار وجود دارد که عمدتاً بر پایه تعادل حدی و آنالیز محدود استوار می‌باشند. در این پژوهش با استفاده از سه روش آناگنستو و کواری، لکا و دورمیکس، جانکسز و استاینر فشار نگهداری جبهه کار محاسبه شده است.

۳-۲-۱- روش آناگنستو و کواری

در روش آناگنستو و کواری F_1 ، F_2 ، F_3 و F_0 ضرایب بدون بعد هستند که به وسیله مدل‌سازی عددی به دست آمده‌اند و در شکل ۲ و ۳، نشان داده شده‌اند. کمترین فشار نگهداری از نظر تئوری در خاک‌های خشک، از رابطه (۴) قابل محاسبه است (Toan, D.N., 2006).

$$\sigma_T = \left(F_0 \gamma D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \right) + \sigma_w \quad (4)$$



شکل ۲- نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد F_0 ، F_1 (Anagnostou, G., 1997)

(Sahel Institute., 2012)
جدول ۲- کیلومترهای مقاطع مورد بررسی
(Sahel Institute, 2012)

مقطع	کیلومترهای (m)
BH-1	۳۲۵/۷۱
BH-2	۱۰۱۴/۸
BH-4	۲۷۴۵/۲۷
BH-6	۴۳۵۷/۳۸
BH-9	۸۹۲۱/۹۶
BH-10	۹۶۷۲/۵

۳- تئوری پژوهش

۳-۱- محاسبه فشار سینه کار تونل با روابط تجربی

در این پژوهش با استفاده از دو روش تجربی، COB و ترزاقی فشار نگهداری سینه کار در هفت مقطع از تونل محاسبه شد.

۳-۱-۱- روش COB

برای محاسبات فشار نگهداری در بیشتر خطوط مترو هلند رابطه (۱) پیشنهاد شده است که مقدار آن کمی بزرگ‌تر از فشار فعال زمین است (Vittorio et al., 2007).

$$\sigma_T = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20\text{ kPa} \quad (1)$$

$$K_a = 1 - \sin \phi / 1 + \sin \phi \quad (2)$$

در این رابطه، σ'_v تنش مؤثر، σ_w فشار آب، σ_T فشار نگهداری، K_a ضریب فشار جانبی در حالت فعال خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی است.

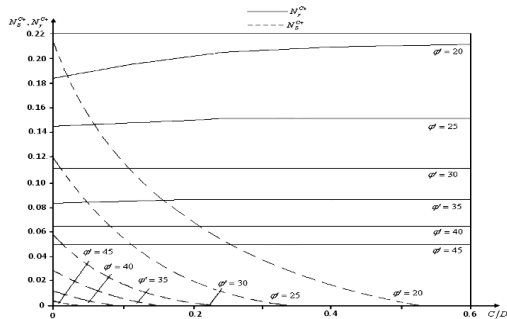
۳-۱-۲- نظریه ترزاقی

نظریه ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده ارائه شده است. فشار نگهداری سینه کار از رابطه (۳) به دست می‌آید که در آن K_a ضریب فشار جانبی خاک در حالت فعال است.

$$\sigma_T = K_a \cdot H_p \cdot \gamma' + \sigma_w \quad (3)$$

به منظور اطمینان از پایداری جبهه کار فشار نوسان (*Fluctuation pressure*) در نظر گرفته می‌شود. این مقدار وابسته به شرایط پروژه، ماشین و نوع خاک متغیر

مخصوص خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی و σ_s بار سطحی است (Leca, E and Dormiux, L., 1990).



شکل ۴- مقادیر N_s^{c+} و N_γ^{c+} برای مکانیزم نشست (Leca, E and Dormiux, L., 1990)

۳-۲-۳- روش جانسکز و استاینر

با استفاده از رابطه (۶) فشار کل وارده بر جبهه کار به دست می‌آید (Broere, W., 2001).

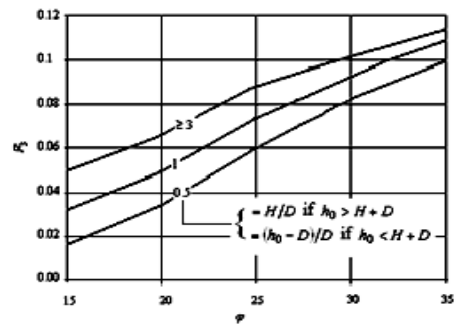
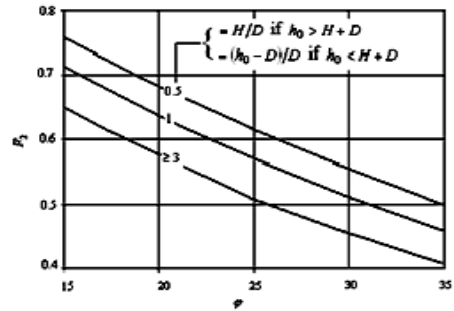
$$\sigma_T = \left(-\frac{(\cos \beta \cdot \tan \phi - \sin \beta) \sum(G_s + G_w) + \sum(2T + K)}{\sin \beta \cdot \tan \phi + \cos \beta} \cdot \frac{4}{\pi D^2} \right) + \sigma_w \quad (6)$$

در این رابطه G_s وزن سیلو، B عرض گوه برابر $(B = \pi \cdot D / 4)$ ، D قطر تونل، θ زاویه شکست، G_w وزن گوه، K نیروی چسبندگی، T نیروی برشی خاک، E نیروی مؤثر جانبی خاک، W نیروی آب، σ_T تنش کل است (Jancsecz, S and Steiner, W., 1994).

در جدول ۳. مقادیر محاسبه شده فشار نگهداری در روش‌های تجربی و تحلیلی آورده شده است.

جدول ۳- فشار نگهداری در روش‌های تجربی و تحلیلی

فشار سینه کار (KPa)							روش
BH-17	BH-10	BH-9	BH-6	BH-4	BH-2	BH-1	شماره مقطع
۴۴/۹۸	۴۷/۲۳	۴۳/۱۹	۴۶/۸۹	۵۸/۷۷	۴۸/۴۸	۴۴/۹۴	ترزاقی
۵۴/۴۴	۶۱/۳۷	۵۰/۶۹	۵۹/۵۵	۷۶/۲۴	۶۲/۲۸	۵۳/۵	COB
۴۵/۴۲	۴۶/۸۵	۴۸/۴۳	۵۱/۸۸	۵۱/۵	۵۷/۳	۵۸/۲۴	آناگنستو و کواری
۳۹/۶۳	۴۱/۱۷	۳۹/۲۶	۴۳/۵۸	۴۰/۵	۴۶/۶	۴۷/۹	لکا و دورمیکس+
۱۲۵/۲	۱۳۷	۱۱۷/۷	۱۳۴	۱۶۴/۵	۱۳۷/۶	۱۲۲	لکا و دورمیکس-
۵۹/۹۳	۶۲/۳	۵۹/۰۴	۶۵/۶۸	۶۲/۲	۶۹/۵۶	۷۰/۸۲	جانسکز و استاینر



شکل ۳- نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد (Anagnostou, G., 1997) F_3, F_2

۳-۲-۳- روش لکا و دورمیکس

روش لکا و دورمیکس برای جلوگیری از گسیختگی و بالا زدگی برای خاک‌های اصطکاکی غیر چسبیده طراحی شده است. با استفاده از رابطه (۵) می‌توان فشار نگهداری سینه کار تونل را محاسبه نمود.

$$\sigma_T = (\gamma \cdot D \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + \sigma_s \cdot N_s) + \sigma_w \quad (5)$$

ضرایب ثابت N_s^{c+} و N_γ^{c+} از نمودارهای شکل ۴، به دست می‌آیند. D قطر تونل، C مقدار چسبندگی، γ وزن

۳-۳- محاسبه فشار سینه کار با روش عددی

به منظور مدل‌سازی مقاطع مذکور قسمت‌هایی از مسیر تونل به صورت ۷ بلوک در نظر گرفته شد و این بلوک‌ها با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS 3D TUNNEL* مدل‌سازی شد که در شکل ۵، مراحل مدل‌سازی با این نرم‌افزار آورده شده است. ابتدا مدلی به طول ۵۰ متر و عرض ۵۰ متر ساخته شد. اولین مرحله در ساخت مدل ایجاد یک مدل دوبعدی اولیه است که تمام اجزاء مورد نیاز در ساخت مدل نهایی در آن پیاده شده باشند.

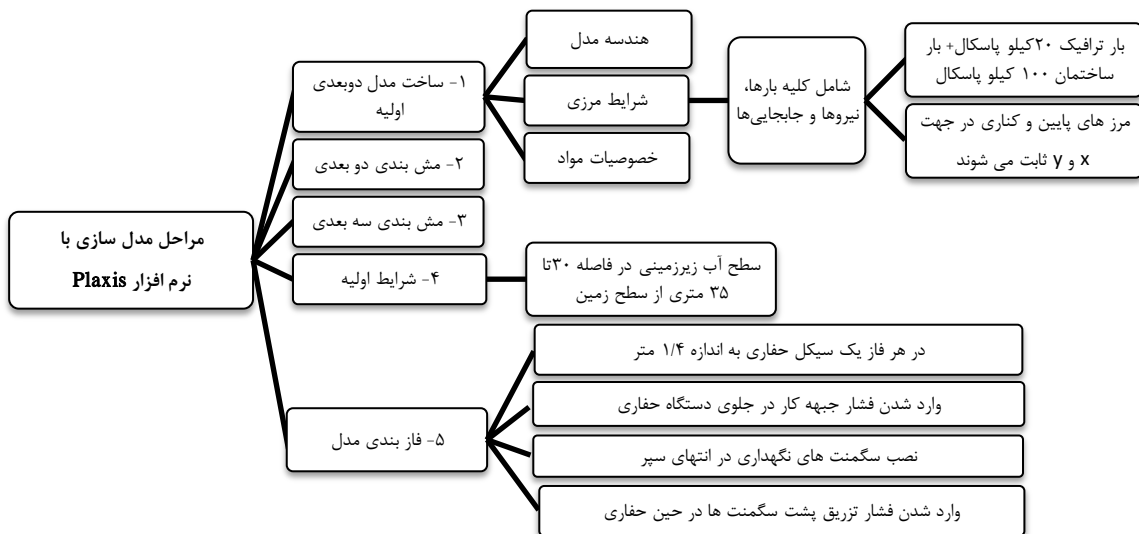
در مرحله بعد شرایط مرزی به مدل اعمال می‌شود که شامل کلیه بارها، نیروها و جابجایی‌هایی است که باید در مدل‌سازی به آن اعمال گردد، در اینجا بار سطحی ترافیک و ساختمان‌ها به ترتیب ۲۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده‌اند. با اعمال این شرایط مرزهای پایین در همه جهات ثابت شده، مرزهای بالایی آزاد گذاشته می‌شود و مرزهای کناری در جهت X ثابت می‌باشند. سپس باید خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده مدل که شامل خاک و سپر ماشین حفاری است را به مدل اعمال کرد. در این مرحله باید از مدل رفتاری که متناسب با نوع خاک است استفاده کرد.

در مراحل مدل‌سازی این پژوهش تلاش شده است برای نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به واقعیت، فرایند ساخت گام‌به‌گام حفاری تونل رعایت شود. به این‌گونه که در هر فاز یک سیکل حفاری که شامل پیشروی تونل به اندازه ۱/۴ متر

(طول تقریبی یک رینگ نگهداری)، وارد شدن فشار جبهه کار در جلوی دستگاه حفاری و همچنین نصب سگمنت‌های نگهداری در انتهای سپر و عملیات تزریق پشت سگمنت‌ها در حین حفاری است، مدل شده و سپس در فاز بعد، مراحل انجام شده در فاز قبل با انتقال بخش‌های مدل شده در فاز قبل به اندازه‌ی یک سیکل حفاری تکرار شده است. بنابراین می‌توان فرآیند ساخت تونل را به مراحل ساخت با طول رینگ ۱/۴ متر تقسیم نمود. خاک اطراف تونل توسط المان‌های حجمی ۱۵ گره‌ای و سپر دستگاه حفاری توسط المان‌های ۸ گره‌ای صفحه مدل شده است.

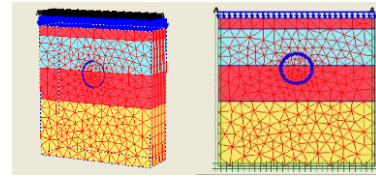
طول سپر تقریباً برابر با طول ۷ رینگ نگهداری است. برای حفظ پایداری جبهه کار تونل، فشار افقی ناشی از فشار تعادلی زمین مدل شده است. همچنین فشار دوغاب تزریق‌شده در پشت سگمنت‌ها به وسیله‌ی فشار آب منفذی محلی متغیر مدل شده است. به منظور مدل کردن اضافه فشار حفاری دستگاه و همچنین باریک شوندگی سپر، فاکتور انقباض برابر با ۰/۵ درصد به سپر دستگاه اختصاص داده شده است (Al-Khoury, et al., 2004).

در شکل ۶، نمونه‌ای از شبکه المان‌بندی شده دو بعدی و سه بعدی در اطراف فضای حفاری شده در مقطع *BH-1* و همچنین در شکل ۷، نمونه‌ای از فشار سینه‌کار محاسبه‌شده به وسیله مدل‌سازی عددی در تاج تونل در مقطع *BH-6* آورده شده است.

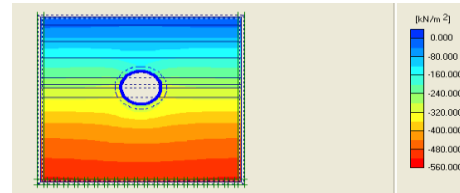


شکل ۵- مراحل مدل سازی با نرم‌افزار *Plaxis*

روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی در مقاطع مورد بحث به وضوح دیده می‌شود. مقادیر محاسبه شده به عنوان فشار لازم برای نگهداری جبهه کار در روش‌های مختلف با هم همخوانی ندارد که به دلیل فرضیاتی است که در هر یک از این روش‌ها به منظور ساده‌سازی در نظر گرفته شده است، به طوری که در روش‌های جانسکز-استاینر و آناگنستو-کواری که بر پایه تعادل حدی استوار هستند، از مدل شکست سه‌بعدی گوه و سیلو هورن استفاده می‌شود، در حالی که در روش لکا-دورمیکس، بار شکست به وسیله بلوک‌هایی به شکل مخروط محاسبه می‌شود. در مدل‌سازی عددی میدان تنش به وجود آمده در اطراف تونل دارای شکل هندسی مشخص و منظمی نیست. هر چقدر میدان تنش فرضی در روش‌های تحلیلی مذکور به میدان تنش حاصله در مدل‌سازی عددی شبیه‌تر باشد، مقادیر به دست آمده به عنوان فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل نیز به هم نزدیک‌تر خواهند بود. با توجه به اینکه نتایج ایزاربندی شرایط فیلد در دسترس نبوده است لذا مدل‌سازی‌ها و نتایج تحلیل‌های تجربی و تحلیلی با شرایط کلی پایداری و ناپایداری تونل سنجیده و کالیبره شده‌اند.



شکل ۶- شبکه المان بندی شده دوبعدی و سه‌بعدی در اطراف فضای حفاری شده در مقطع BH-1



شکل ۷- فشار سینه کار محاسبه شده به وسیله مدل‌سازی عددی در تاج تونل در مقطع BH-6

۴- مقایسه نتایج روش‌های تجربی، تحلیلی و مدل‌سازی عددی

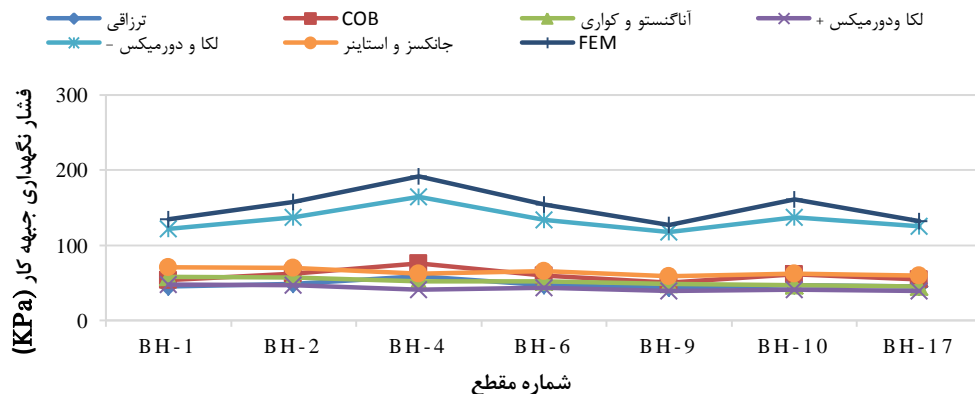
نتایج حاصل از روش‌های تجربی، تحلیلی و مدل‌سازی عددی در ۷ مقطع مورد نظر در جدول ۴ و شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، پراکندگی نتایج

جدول ۴- مقادیر فشار سینه کار با روش‌های مختلف در تاج تونل

فشار سینه کار (KPa)							روش
BH-17	BH-10	BH-9	BH-6	BH-4	BH-2	BH-1	شماره مقطع
۴۵	۴۷	۴۳	۴۷	۵۹	۴۸/۵	۴۴/۹	ترزاقی
۵۴/۴۴	۶۱/۳۷	۵۰/۶۹	۵۹/۶	۷۶/۲	۶۲/۲۸	۵۳/۵	COB
۴۵/۴۲	۴۶/۸۵	۴۸/۴۳	۵۱/۹	۵۱/۶	۵۷/۳۵	۵۸	آناگنستو کواری
۳۹/۶۳	۴۱/۲	۳۹/۲۶	۴۳/۶	۴۰/۵	۴۶/۵۷	۴۷/۹	لکا و دورمیکس+
۱۲۵/۲	۱۳۷	۱۱۷/۷	۱۳۴	۱۶۴	۱۳۷/۶	۱۲۲	لکا و دورمیکس -
۵۹/۹۳	۶۲/۳	۵۹/۰۴	۶۵/۷	۶۲/۲	۶۹/۵۶	۷۰/۸	جانسکز و استاینر
۱۳۲/۰۳	۱۶۱	۱۲۶/۸	۱۵۴	۱۹۱	۱۵۷/۷	۱۳۴	FEM

افزایش ضخامت روباره، فشار نگهداری جبهه کار نیز زیاد می‌شود. مقادیر ارائه شده با استفاده از روش‌های جانسکز با آناگنستو به هم نزدیک است که به دلیل در نظر گرفتن شکل شکست خاک به صورت سیلو و گوه در هر دو روش است.

از جدول ۴ و شکل ۸ مشخص است که روش‌های تحلیلی و تجربی فشار کمتری نسبت به مدل‌سازی عددی برآورد می‌کنند که به دلیل فرضیات اولیه در نظر گرفته شده در هر روش است؛ اما مقادیر ارائه شده توسط روش COB و ترزاقی، تفاوت زیادی با مدل‌سازی عددی دارد. در روش COB، به دلیل در نظر گرفتن فشار لایه‌های خاک، با



شکل ۸- نتایج حاصل از روش‌های مختلف جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل

۵- آنالیز حساسیت

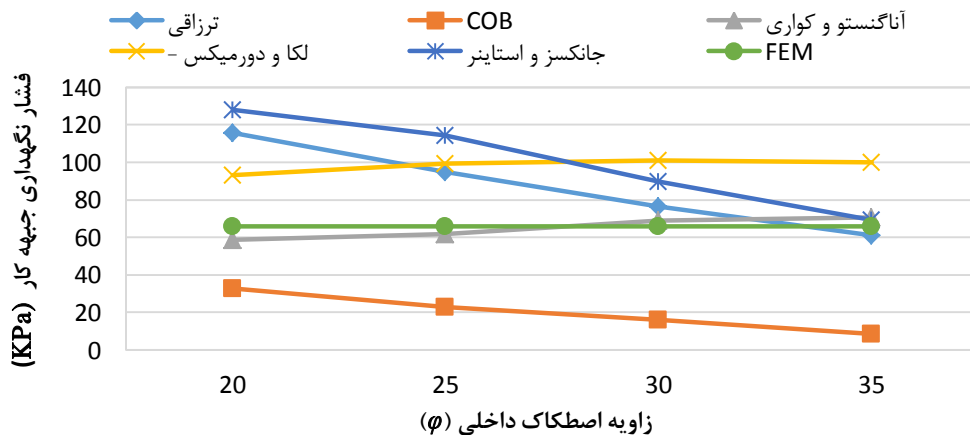
به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر روی فشار نگهداری جبهه کار تونل اقدام به انجام آنالیز حساسیت شد. از این‌رو در مدل عددی تونلی به قطر ۹/۴ متر، ضخامت روباره ۹/۴ متر مدول حجمی 80 MPa و مدول برشی 40 MPa و وزن مخصوص خاک 2 g/cm^3 در نظر گرفته شده است.

آنالیز حساسیت با استفاده از روش تجربی COB و روش‌های تحلیلی جانکسز-استاینر، لکا-دورمیکس، آنانگستو - کواری و مدل‌سازی عددی انجام می‌شود. پارامترهای مورد بحث در این آنالیز عبارت‌اند از: زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، نسبت روباره به قطر (C/D) است. به منظور بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی فشار جبهه کار، کلیه پارامترهای ورودی دیگر ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۵-۱- زاویه اصطکاک داخلی

شکل ۹، نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را برحسب زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد که در آن زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه و چسبندگی مقدار ثابت 40 KPa در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود این نمودارها سیر نزولی مقدار فشار نگهداری جبهه کار حاصل از روش‌های COB ، جانکسز - استاینر، ترزاقی و سیر صعودی روش‌های آنانگستو - کواری، لکا - دورمیکس و مدل‌سازی عددی را با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهند. با افزایش زاویه اصطکاک، مقادیر برآورد شده توسط روش‌های ترزاقی، جانکسز - استاینر، آنانگستو - کواری و مدل‌سازی به هم نزدیک می‌شود.



شکل ۹- تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب زاویه اصطکاک داخلی

۵-۲- چسبندگی

شکل ۱۰، نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب چسبندگی نشان می‌دهد که در آن چسبندگی به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی مقدار ثابت ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود این نمودارها سیر نزولی فشار جبهه کار با شیب متوسط با افزایش چسبندگی را نشان می‌دهند که به دلیل افزایش مقاومت برشی است و شیب تمامی نمودارهای روش‌های تحلیلی تقریباً به یک اندازه است که نشان‌دهنده تأثیر یکنواخت چسبندگی در کلیه روش‌های تحلیلی به کار گرفته شده دارد. در کلیه روش‌ها، با تغییر چسبندگی، دامنه تغییرات فشار جبهه کار زیاد است که نشان‌دهنده اهمیت این پارامتر در برآورد فشار جبهه کار است.

۵-۳- نسبت روباره به قطر (C/D)

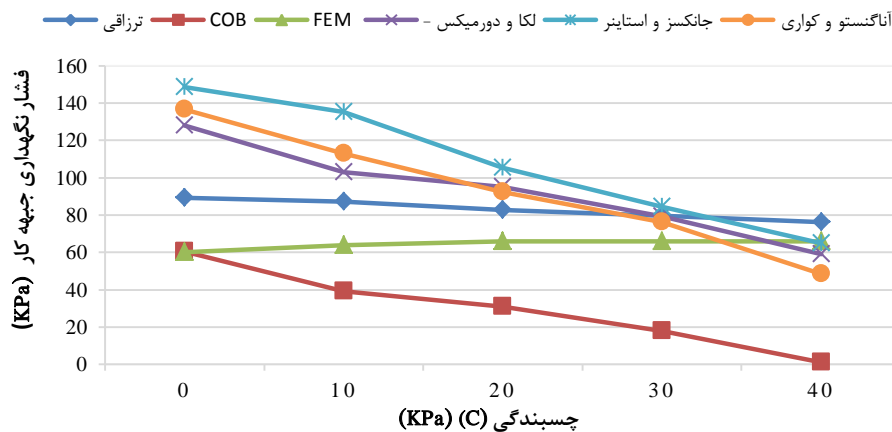
شکل ۱۱، نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب نسبت روباره به قطر (C/D) نشان می‌دهد که نسبت عمق به قطر به ترتیب ۱، ۲، ۳ و ۴ و زاویه اصطکاک داخلی مقدار ثابت ۳۰ درجه و چسبندگی مقدار ثابت ۴۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل ۱۱ در روش COB با افزایش عمق، فشار نگهداری جبهه کار افزایش پیدا می‌کند اما در روش‌های لکا و

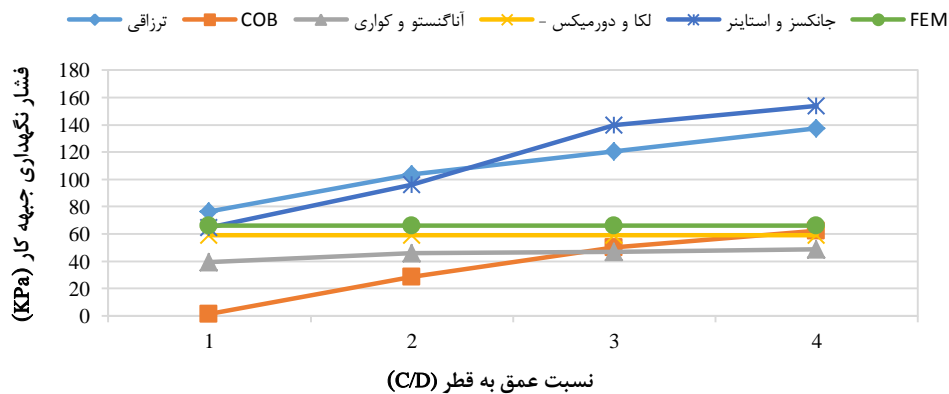
دورمبو و مدل‌سازی عددی، افزایش عمق تأثیر ناچیزی روی فشار نگهداری جبهه کار دارد و نتایج حاصل از این روش‌ها به هم نزدیک است.

در روش آنگونستا- کواری تغییرات فشار نگهداری جبهه کار تا $(C=4D)$ است که ناشی از تشکیل قوس فشار در بالای تونل است و در روباره‌های بیشتر نتایج حاصل از این روش‌ها به روش عددی نزدیک است. به طور کلی تغییرات ضخامت روباره تأثیر زیادی روی فشار نگهداری جبهه کار دارد اما در این مقطع به دلیل نبود آب زیرزمینی و چسبندگی بالای خاک، تغییرات روباره تأثیر ناچیزی روی فشار نگهداری جبهه کار تونل دارد. روش ترزاقی به دلیل پیش‌بینی مقدار بالای فشار، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. قوس فشار ترزاقی مبنای روش‌های جانسکز و استاینر، کواری و آنگونستا است.

به طور کلی از بین روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری جبهه کار بیش‌ترین استفاده را روش‌های تحلیلی در برآورد فشار سینه کار دارند؛ اما از بین روش‌های تحلیلی، جانسکز و استاینر، کواری و آنگونستا به دلیل در نظر گرفتن مکانیزم شکست سه‌بعدی و قوس فشار ترزاقی، مقادیر دقیق‌تری از فشار جبهه کار ارائه می‌دهند؛ اما روش جانسکز به دلیل در نظر گرفتن فاکتور ایمنی، برآورد دقیق‌تر و مطمئن‌تری از فشار نگهداری جبهه کار تونل ارائه می‌کند و بنابراین این روش بیش‌ترین استفاده را در برآورد فشار نگهداری جبهه کار ارائه می‌نماید.



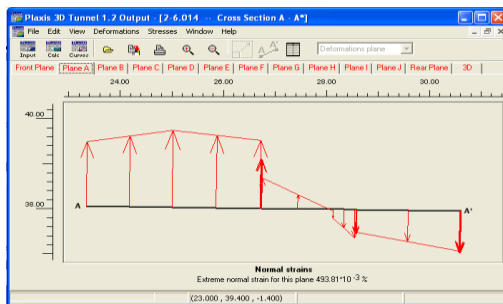
شکل ۱۰- تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب چسبندگی



شکل ۱۱- تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب نسبت روباره به قطر (C/D)

وسیله مدل‌سازی عددی در تاج تونل در جدول ۵ آورده شده است.

به‌عنوان نمونه شکل ۱۲ میزان کرنش محاسبه‌شده به‌وسیله مدل‌سازی عددی در مقطع BH-6 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود با توجه به نتایج به دست آمده، سازه زیرزمینی در مقاطع مختلف ناپایداری‌هایی دارد زیرا کرنش در قسمت‌های مختلف این سازه بیشتر از کرنش بحرانی است.



شکل ۱۲- میزان کرنش محاسبه‌شده Plaxis در مقطع BH-6

۷- نتیجه‌گیری

از بررسی‌های گسترده‌ای که در روش‌های تحلیلی و تجربی و عددی برای محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل انجام شد نتایج زیر استنتاج شد.

۱- در روش‌های تحلیلی از یک مدل شکست فرضی با شکل هندسی مشخص و منظم استفاده می‌شود در صورتی که در مدل‌سازی عددی شکست مطابق با یک شکل هندسی

۶- بررسی پایداری تونل با استفاده از روش

کرنش بحرانی

اگر میزان کرنش در اطراف حفاریات زیرزمینی کمتر یا مساوی مقدار بحرانی باشد، در این صورت می‌توان گفت که سازه پایدار خواهد بود. میزان کرنش بحرانی را می‌توان با استفاده از قضاوت مهندسی و نوع استفاده‌ای که از سازه زیرزمینی می‌شود، به دست آورد. استفاده از روابط ساکورایی نیز برای تخمین میزان کرنش بحرانی مناسب است. این روش برای کنترل همگرایی تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساکورایی رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و کرنش بحرانی برای مواد مختلف ارائه داد. در این حالت می‌توان میزان کرنش‌ها را با استفاده از روش‌های عددی محاسبه و با کرنش بحرانی به دست آمده توسط ساکورایی مقایسه نمود. در صورت تجاوز کرنش از حد مجاز، سازه باید مورد تقویت و نگهداری قرار گیرد. ساکورایی نحوه به دست آوردن کرنش بحرانی را به صورت رابطه (۷) ارائه نمود.

$$\text{Log} \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (7)$$

در این رابطه E مدول یانگ (بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع)، ϵ_c کرنش بحرانی در مقاومت فشاری تک‌محوره است (Sakurai, 1993).

در این تحلیل، مقدار کرنش برشی حاصل از مدل‌سازی عددی با مقدار کرنش برشی مجاز مقایسه شده است. در صورتی که مقدار کرنش برشی از کرنش بحرانی کمتر باشد، سازه پایدار است. مقادیر کرنش محاسبه‌شده به

استفاده شده و پارامترهای ماشین حفاری نیز در محاسبات وارد می‌شود.

۴- مدل‌سازی عددی فشار بیشتری برای نگهداری جبهه کار نسبت به روش‌های تجربی و تحلیلی برآورد می‌کند.

۵- در بررسی میزان تأثیر زاویه اصطکاک داخلی در فشار جبهه کار، نمودارهای حاصل از روش‌های COB جانکسز-استاینر شیب نزولی و روش لکا-دورمیکس، آنالگستو و کواری و مدل‌سازی عددی با شیب صعودی را با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهند.

۸- سیاهه‌ی نمادها

نمادهای مورد استفاده در متن دست‌نوشته، در جدول ۶ آورده شده است.

منظم اتفاق نمی‌افتد. نزدیکی مقادیر محاسبه‌شده از این روش‌ها به میزان تشابه مدل شکست فرضی در روش تحلیلی با محدوده‌ای از زمین اطراف تونل در مدل‌سازی که تحت تأثیر حفاری قرار می‌گیرد، بستگی دارد.

۲- در مناطقی که نسبت روباره به قطر بیشتر از ۲ است، نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی به هم نزدیک است.

۳- فشار لازم برای پایداری جبهه کار تونل در روش لکا و دورمیکس تا حدی به مدل‌سازی عددی نزدیک است. اختلاف در نتایج موجود به علت اختلاف در پارامترها و مدل رفتاری در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی مذکور است. در روش لکا و دورمیکس فرض بر الاستیک بودن محیط اطراف تونل است، در حالی که در مدل‌سازی عددی سه‌بعدی از مدل رفتاری موهر کلمب

جدول ۵- مقادیر کرنش محاسبه‌شده به وسیله مدل‌سازی عددی در تاج تونل

مقطع	عمق	کرنش بحرانی	کرنش در مدل <i>plaxis</i>	وضعیت پایداری
BH-1	۹/۸۵۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵۲۵	پایدار
BH-2	۱۲/۳۴۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶۵	ناپایدار
BH-4	۱۷/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸۴۲	ناپایدار
BH-6	۱۱/۸۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴۹۴	پایدار
BH-9	۹/۲۵۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵۳	پایدار
BH-10	۱۲/۴۷۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۶۹	ناپایدار
BH-17	۱۰/۴۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴۶۵	پایدار

جدول ۶- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نما	شرح	واحد	نما
فشار نگهداری	KPa	σ_T	وزن گوه	KN	G_w
فشار آب	KPa	σ_w	وزن سیلو	KN	G_s
تنش مؤثر	KPa	σ'_v	عرض گوه	m	B
زاویه اصطکاک داخلی	Deg	ϕ	زاویه شکست	Deg	θ
چسبندگی	KPa	C	نیروی چسبندگی	KN	K
وزن مخصوص غوطه‌وری	KN/m ³	γ'	نیروی برشی	KN	T
ارتفاع تونل	m	D	نیروی مؤثر جانبی خاک	KN	E
ارتفاع روباره	m	H	نیروی آب	KN	w
وزن مخصوص خاک	KN/m ³	γ	مدول یانگ	KPa	E
بار سطحی	KPa	σ_s	کرنش بحرانی	-	ϵ_c

۸- مراجع

- Al-Khoury, R., Bakker, K. J., Bonnier, P. G., Vermeer, P. A., & Waterman, D. (2004). *Tutorial Manual of Plaxis 3D Tunnel, Version 2*. Netherlands: Delft University of Technology & Plaxis B.
- Anagnostou, G. & Kovari, K. (1997). *Face stabilization closed shield advance mode*. pp 5-7 tunneling. *Rapid Excavation and Tunnel Construction, Las Vegas*. 555-558
- Broere, W. (2001), *PhD. Thesis. Tunnel Face Stability & New CPT Applications*. Delft University of Technology, the Netherlands. 28-35
- Jancsecz, S & Steiner, W. (1994). *Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions*. *Tunnelling 94, conf. proc., Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunnelling Society, Chapman and Hall, London, UK*. 5-10
- Leca, E., & Dormieux, L. (1990). *Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material*. *Geotechnique*
- Sahel Consulting Engineers Institute. (2012). *Geological and Geotechnical Report of Qom Metro Tunnel*
- Sakurai, S. (1993). *Direct Strain Evaluation Technique in Construction of Underground Openings*. In *Proc. 22 U.S. Symp. Rock Mech. Boston, MA* (Edited by H.H. Einstein), 278-282.
- Terzaghi, K. (1934). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. 70-76. 194-200
- Toan, D.N. (2006). *Master thesis. TBM and Lining Essential Interfaces*. Politecnico di Torino. 22-27. 52-
- Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab & Shulin Xu. (2007). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control* publishing Taylor & Francis e-Library 89-10.364-372.390-40

Investigation of Jamming Possibility of Tunnel Boring Machine (TBM) – A Case Study: Qom Metro Project

F. Movahedi¹; F. Soltani²; H. Jalalifar³; H. Mohammadi⁴

1. M.Sc. Student in Geotechnical Engineering; Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman
2. Associate Professor; Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman
3. Professor; Petroleum Department, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman
4. Assistant Professor; Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Received: 03 March 2016; Accepted: 06 May 2019
DOI: 10.22044/TUSE.2019.4022.1258

Keywords

Face support pressure
Numerical modeling
Tunnel boring machine (TBM)
Sensitivity analysis
Tunnel

Extended Abstract

Summary

The phenomenon of TBM jamming is one of the most hazards in full mechanized tunneling projects that should be considered at design time. This paper investigates the jamming possibility around full face excavation machine in Qom metro project. To achieve this purpose, different solution methods including empirical relations, analytical solutions and numerical modeling have been used. Since the excavation environment is continuous, to analyze the tunnel based on the numerical method, the Plaxis 3D software is used. Based on the results, in some areas, there are face instability and also the possibility of TBM jamming. It should be mentioned that the obtained results are function of the analysis method so that the calculated support pressure in numerical modellings is larger than its value in the other methods.

Introduction

Tunneling in weak and low resistance environments presents significant design challenges. As the resistance parameters of these media are low, the displacement analysis and the assessment of the non-elastic zone characteristics are very important, especially in areas where there are numerous high-rise buildings. Furthermore, the tunneling-induced ground displacement has a great influence on existing urban structures, and the evaluation of displacements (in the design stage) is a difficult subject, which many tunneling engineers have encountered. In these media, tunneling by TBM is an effective method to control the ground displacements. However, when a large time dependent deformation occurs around the tunnel, the ground pressure imposed on TBM shield could cause TBM jamming. Therefore, the jamming prediction in full mechanized tunneling projects is an essential part of tunnel design and machine selection.

Methodology and Approaches

The Qom metro project is one of important urban tunneling projects in Iran. In this project, about 10 kilometers of the entire tunnel are excavated by an earth pressure balance (EPB) shield TBM. The main purpose of this paper is to investigate the jamming possibility surrounding shield of EPB-TBM in the Qom metro project. The pressure required for the face stability was calculated using empirical, analytical and numerical methods. The numerical modeling in this study is carried out using Plaxis 3D software. Moreover, a comparison is made between the results of different methods. Finally, the effect of various parameters on the face stability and jamming possibility is evaluated via sensitivity analysis carried out

in this research work.

Results and Conclusions

According to the results, when the ratio of overburden to tunnel diameter is more than 2, the results of the analytical and numerical methods are similar. The differences in results are due to differences in the parameters and the behavioral model used in the numerical modeling and analytical methods. For example, in some analytical methods, for excavation medium, the elastic behavior is considered, while in three-dimensional (3D) numerical modeling, several non-elastic behaviors could be considered.
