

M. Taromi*

Young Researchers and Elite
Club, South Tehran Branch,
Islamic Azad University,
Tehran, Iran.

e-mail: majid.taromi@yahoo.com

A. H. Eghbali

Department of Civil
Engineering, Islamic Azad
University Islamshahr Branch,
Tehran, Iran.

e-mail: eghbali@iaau.ac.ir

N. Hadiani

Department of Civil
Engineering, Islamic Azad
University Islamshahr Branch,
Tehran, Iran.

e-mail: na.hadiani@gmail.com

3D Modeling of Stability and Deformation of Reinforced and Unreinforced Face in the Shallow Tunnel

Utilizing of fiberglass nail in the face of tunnel is one of the economical and effective pre-support methods for increasing stability and control of settlement in weak grounds and tunnels with extended level and increase of ground mechanical strength. In this study, by taking advantage of 3D modeling of fiberglass nail which is effective in reduction of deformation, settlement, the direct modeling of nail in the 3D finite element and material with equivalent section. This study has covered effects of nail density, the overburden to depth of tunnel ratio. The method of strength reduction for analyzing the safety factor of tunnel has been considered. The result of 3D numerical analysis with limit equilibrium methods (LEM) for determining safety factor has been compared. The comparison of LEM and finite element method revealed that using of nail fiberglass and increases the range of safety factor between 5% to 75% and 1.25 to 2 in terms of overburden to diameter ratio. This increase of nail is dependent on density and overburden. While, with increase to advance length, the amount of vertical displacement would rise in both method, although these measures have no effects in horizontal displacement. In addition to that, using of nail in the tunnel face has caused the amount of vertical displacement between 20 to 35 percent and in the horizontal displacement between 50 to 60 percent of decrease has happened.

Keywords: Safety factor, Deformation, LEM, Fiberglass nail, 3D modeling.

* Corresponding author

Received 05 November 2019, Revised 04 February 2020, Accepted 08 February 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.4950.1182

مدل‌سازی سه‌بعدی پایداری و تغییر شکل جبهه کار تسلیح‌شده و تسلیح‌نشده در تونل‌های کم‌عمق

اقدامات پیش‌تحکیمی در تونل‌زنی در شرایط کم‌عمق و مشکل‌دار یکی از راهکارهای موفق در عملیات حفاری و تحکیم تونل‌هاست. استفاده از نیل فایبرگلاس در جبهه کار تونل به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر و اقتصادی پیش‌تحکیمی برای افزایش پایداری و کنترل نشست در زمین‌های نرم است. در این مطالعه، مدل‌سازی سه‌بعدی اثرات نیل فایبرگلاس در جبهه کار در کاهش پدیده شکم‌دادگی، نشست قائم و ضریب ایمنی با دو روش مدل‌سازی مستقیم نیل در مدل سه‌بعدی اجزای محدود و مصالح با مقطع معادل، بررسی شده است. مطالعه حاضر، اثرات دانسیته نیل، نسبت عمق به قطر تونل (C/D) و گام پیشروی را بررسی می‌کند. از روش کاهش مقاومت برای محاسبه ضریب ایمنی تونل استفاده شده است. نتایج تحلیل عددی با روش‌های تعادل حدی برای تعیین ضریب ایمنی مقایسه گردیده است. مقایسه روش تعادل حدی با روش اجزای محدود نشان می‌دهد که استفاده از نیل فایبرگلاس، ضریب ایمنی تونل را بین ۵۰ تا ۷۵ درصد (به ازای ۲۰ نیل فایبرگلاس) و ۱۲۵ تا ۲۰۰ درصد (به ازای ۵۰ نیل فایبرگلاس) با توجه به نسبت عمق به قطرهای مختلف افزایش می‌دهد. این در حالی است که با افزایش گام پیشروی، مقدار جابه‌جایی قائم در هر دو روش، افزایش می‌یابد ولی تأثیری در مقدار جابه‌جایی افقی تونل در هر دو روش ندارد. همچنین استفاده از نیل در جبهه کار تونل، مقدار جابه‌جایی قائم را بین ۲۰ تا ۳۵ درصد و جابه‌جایی افقی را بین ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: ضریب ایمنی، تغییر شکل، روش تعادل حدی، نیل فایبرگلاس، مدل‌سازی سه‌بعدی.

مجید طارمی*

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب، تهران.
پست الکترونیک:
majid.taromi@yahoo.com

امیرحسین اقبالی

گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر، اسلامشهر.
پست الکترونیک:
eghbali@iiu.ac.ir

نوید هادیانی

گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اسلامشهر، اسلامشهر.
پست الکترونیک:
Na.hadiani@gmail.com

۱- مقدمه

کم‌عمق، این اثر می‌تواند به سرعت پیشرفت کرده و منجر به نشست زمین یا حتی ریزش شود [۱-۴].

تحلیل پایداری تونل‌ها به‌منظور کنترل نشست سطحی یا اطمینان از ایمنی در مقابل ریزش در جبهه کار تونل‌هاست [۵]. پایداری را می‌توان براساس دو اصل به‌دست آورد:

(الف) توسط متعادل کردن فشار توده زمین که

گسیختگی با آزادسازی تنش همراه است [۶].

(ب) بهبود شرایط زمین در تونل، با افزایش مقاومت

مکانیکی توده زمین [۷].

زمین نرم به‌علت خواص مکانیکی ضعیف و نگهداری زیاد آب، اغلب به شرایط دشوار در تونل‌زنی منجر می‌شود. آزادی تنش ناشی از حفاری، موجب ضعف و گسیختگی موضعی در تاج و جبهه‌کار حفاری می‌شود. در تونل‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴، بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹.
DOI: 10.22091/cer.2020.4950.1182 شناسه دیجیتال

کارایی و ایمنی بیشتر استفاده از نیل‌های فایبرگلاس در پایداری‌سازی جبهه کار در حفاری تمام مقطع در زمین‌های نرم، باعث لزوم توسعه استفاده از این فناوری در پروژه‌های تونل‌زنی شهری شده است [۱۳ و ۱۵].

طراحی سیستم تسلیح جبهه کار با نیل‌های فایبرگلاس با در نظر گرفتن تعداد، طول، آرایش، مشخصات نیل و روش اجراست. از اینرو، ارزیابی رفتار تغییر شکل تونل تقویت‌شده، یک تحلیل سه‌بعدی به منظور مدل‌سازی مستقیم عناصر تقویت‌کننده و روش حفاری است [۱۶ و ۱۷]. این در حالی است که روش‌های جایگزین نیز برای بررسی اثرات مسلح‌کننده‌ها در یک مدل سه‌بعدی را می‌توان با اعمال فشار سینه‌کار [۱۸] یا مصالح با مقطع معادل [۱۹] برای هسته-جبهه کار، مدل‌سازی کرد.

در این مطالعه، مدل‌سازی سه‌بعدی اثرات نیل فایبرگلاس در سینه‌کار با

(۱) مدل‌سازی مستقیم نیل در مدل سه‌بعدی اجزای محدود و

(۲) مصالح با مقطع معادل بررسی شده است. مطالعه حاضر، اثرات نسبت عمق به قطر تونل و گام پیشروی را پوشش می‌دهد. ضریب ایمنی برای هر دو حالت تقویت‌شده و بدون تقویت بررسی گردیده است. روش کاهش مقاومت برای محاسبه ضریب ایمنی سینه‌کار مورد پذیرش قرار گرفته شده است. سپس نتایج تحلیل عددی سه‌بعدی با روش‌های تعادل حدی روز^۲ (۲۰۰۴)، پن و دیاس^۳ (۲۰۱۷) و پترنسی^۴ و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه شده است [۱۷، ۲۰ و ۲۱].

۲- روش تحلیل

حالت اول مشابه روش تونل‌زنی سپری مکانیزه است که در آن عملیات متعادل کردن به‌وسیله یک سیال تحت فشار در مقابل جبهه کار تونل اعمال می‌شود تا فشار زمین و فشار آب حفره‌ای در صورت وجود، به تعادل برسد [۸ و ۹]. حالت دوم، تمام روش‌های تسلیح و تزریق و به‌طور کلی، علاج‌بخشی خاک (قوس چتری^۱ (UAM)، ستون تزریق پرفشار، نیلینگ، انجماد خاک، و غیره) را شامل می‌شود [۱۰-۱۲].

تونل‌زنی تمام مقطع برای اولین بار ۳۰ سال قبل در ایتالیا و در تونل‌های با سطح مقطع ۱۲۰ تا ۲۲۰ مترمربع و در زمین‌های با شرایط ژئوتکنیکی مختلف و تونل‌های کم‌عمق و عمیق مورد استفاده قرار گرفت. در شرایط حفاری تمام مقطع، تنش‌ها و کرنش‌های توسعه‌یافته در محیط پیرامونی تونل (خاک یا سنگ) در هسته پیشروی تونل متمرکز می‌شوند. بنابراین مسئله پایداری سینه‌کار حفاری، اساسی‌ترین مشکل در حفاری تمام مقطع تونل است [۱۳ و ۱۴].

تحقیقات آزمایشگاهی، عددی و مشاهدات تجربی انجام شده روی وقوع نشست و جابه‌جایی‌های زمین در حین حفاری تونل نشان می‌دهد که علت اصلی فرآیند تنش-کرنش شامل شکم‌دادگی، پیش‌همگرایی و همگرایی محیط حفاری ناشی از تغییر شکل‌پذیری هسته پیشروی است. بنابراین صلبیت هسته نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری تونل در کوتاه‌مدت، طولانی‌مدت و کنترل نشست تونل ایفا می‌کند. با انجام فعالیت‌های پایداری‌سازی و تسلیح این ناحیه، حفاری را می‌توان با حداقل مخاطرات و بالاترین سرعت و ایمنی انجام داد [۱۰].

یکی از روش‌هایی که مستقیماً روی پایداری هسته پیشروی جهت بهبود خواص مقاومتی، کنترل تغییر شکل‌پذیری و نشست زمین نقش اساسی دارد، استفاده از المان‌های فایبرگلاس است. مزایای اقتصادی،

2- Ruse

3- Pan and Dias

4- Paternesi

1- Umbrella Arch Method

استفاده در مدل‌سازی عددی در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج تحلیل عددی سه بعدی انجام شده با اطلاعات به دست آمده از ابزار دقیق و مطالعات قبلی مقایسه شد. مقادیر بیشینه نشست در مدل‌سازی عددی، همخوانی نسبتاً قابل قبولی با این مطالعات داشت (شکل ۱). بنابراین از نحوه مدل‌سازی، می‌توان در این تحقیق استفاده کرد.

۲-۲- مدل رفتاری خاک

استفاده از تحلیل اجزای محدود در پروژه‌های ژئوتکنیک، به‌عنوان ابزاری برای کنترل و بهینه‌سازی فعالیت‌های مهندسی، از محبوبیت و گسترش زیادی برخوردار است. با این حال، کیفیت هر پیش‌بینی تنش- کرنش در این نوع تحلیل، وابسته به مدل رفتاری است.

یکی از مسائل اصلی در مهندسی سازه‌های ژئوتکنیکی در دهه ۱۹۷۰ میلادی و پیش از آن، تفاوت آشکار بین سختی خاک اندازه‌گیری شده از آزمون‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های برگشتی انجام شده از مشاهدات جابه‌جایی‌های زمین بود. این تفاوت‌ها در حال حاضر، به‌طور کامل به‌واسطه درک مشخصه‌های اصلی تغییرشکل خاک به‌ویژه تأثیر قابل توجه غیرخطی بودن، مرتفع شده است. این رویکرد، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک در ۳۰ سال گذشته بوده است. از اینرو، یک پیش‌بینی واقع‌بینانه‌تر از جابه‌جایی زمین، نیاز به استفاده از مدل‌های رفتاری برای محاسبه رفتار پیش از گسیختگی خاک همانند رابطه تنش- کرنش غیرخطی پیش از رسیدن به حالت نهایی را دارد.

مدل رفتاری خاک سخت‌شونده (HS^9) در چارچوب تئوری خمیری در سال ۱۹۹۹ توسط شنز^{۱۰} و همکاران پایه‌گذاری شد [۲۵]. در این مدل، کل کرنش‌ها (ارتجاعی و خمیری) براساس سختی تابع سطح تنش

در سال‌های اخیر روش‌های عددی در تحلیل مسائل ژئوتکنیک به‌سرعت در حال توسعه است. سمپریچ^۵ (۱۹۸۰) اولین بار تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی را برای محاسبه تغییرشکل نزدیک به جبهه کار حفاری تونل انجام داد [۲۲]. پس از آن باومن^۶ و همکاران (۱۹۷۷)، پایداری سینه کار تونل را در خاک و سنگ‌های نرم با استفاده از روش اجزای محدود با در نظر گرفتن مدل رفتاری الاستو- پلاستیک مور- کولمب انجام داد [۲۳]. در ادامه، محققان در سال ۲۰۰۴، مطالعات عددی گسترده‌ای را روی حفاری سینه کار تونل بدون تسلیح انجام دادند [۲۰]. مدل‌سازی اثرات نیل فایبرگلاس با روش‌های عددی توسط محققین مختلف بررسی شده است. اغلب این مطالعات روی تعیین ضریب ایمنی، تحلیل شکم‌دادگی سینه کار و کاهش نشست سطحی متمرکز بوده است [۱۱، ۱۶، ۱۷ و ۲۱].

۲-۱- صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، دو روش

(۱) قوس چتری (UAM) در ترکیب با نیل سینه کار (FFB^7) و

(۲) روش تونل‌زنی جدید اتریشی ($NATM^8$) که در ساخت متروی استانبول مورد استفاده قرار گرفته، استفاده شده است [۲۴].

نتایج تحلیل، عملکرد مناسب روش ترکیبی UAM و FFB را در مقایسه با NATM در کنترل نشست سازه‌های سطحی به دلیل اثر قوس‌زدگی ناشی از بهسازی محیط تونل و کاهش جابه‌جایی افقی در جبهه کار حفاری به علت اثرات نیل، نشان داد. مشخصات مصالح مورد

⁵- Semprich

⁶- Umbrella Arch Method

⁷- Fiberglass Face Bolt

⁸- New Austrian Tunneling Method

⁹- Hardening soil

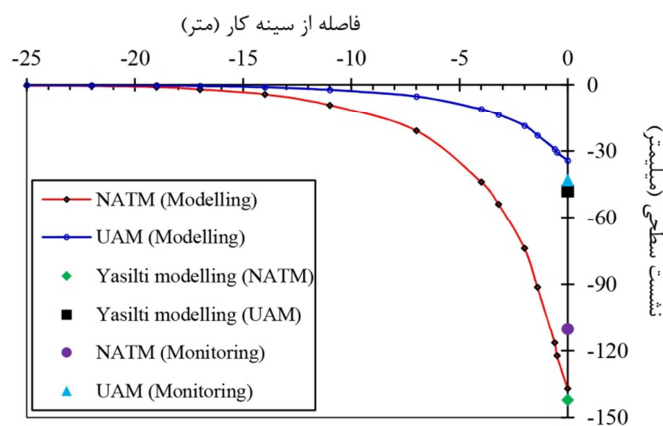
¹⁰- Schanz

محاسبه می‌شود که این سختی برای حالت بارگذاری اولیه و باربرداری بارگذاری متفاوت است. در این مدل، رفتار تا قبل از نقطه شکست، غیرخطی است و همچنین رفتار بعد

از شکست براساس پارامترهای مقاومتی مدل مور- کولمب (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) تعیین می‌شود.

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل

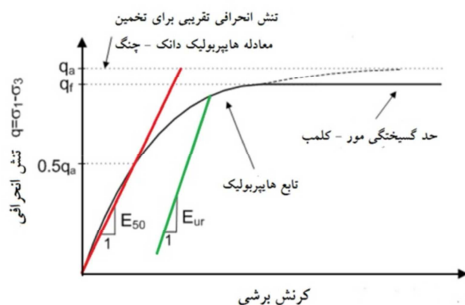
نوع مصالح	مدول ارتجاعی (kPa)	نسبت پواسون	سختی محوری (EA) (kN/m)	سختی خمشی (EI) (kNm ² /m)
شاتکریت یک روزه	$1/0 \times 10^7$	۰/۲	$2/678 \times 10^6$	$2/806 \times 10^4$
شاتکریت ۲۸ روزه	$2/85 \times 10^7$	۰/۲	$8/925 \times 10^6$	$9/352 \times 10^4$
فورپلینگ (Soilcrete)	$1/473 \times 10^6$	۰/۲۵	-	-
Face bolt (ژئوگرید)	-	-	$3/600 \times 10^4$	-
نیل خودحفرار	-	-	$2/367 \times 10^5$	۱۴۸



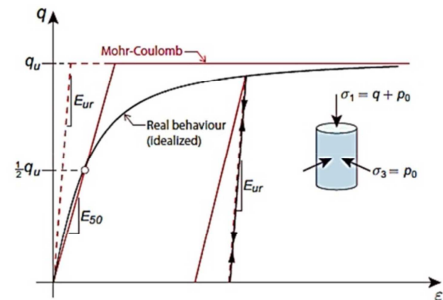
شکل ۱- مقایسه پروفیل نشست سطحی صحت‌سنجی مدل با نتایج رفتارنگاری و مطالعات قبلی

مسائل مربوط به «خاکبرداری» و «تونل‌سازی» استفاده از مدل HS نتایجی نزدیک‌تر به واقعیت و در نتیجه مطلوب‌تری را در بر خواهد داشت. از اینرو، در این تحلیل از مدل رفتاری HS استفاده شد.

در مدل رفتاری HS، سختی خاک بسیار دقیق‌تر از مدل رفتاری مور- کولمب در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که مدل مور- کولمب توانایی در نظر گرفتن تفاوت رفتار در بارگذاری و باربرداری را ندارد و در واقع تاریخچه تنش را در نظر نمی‌گیرد (شکل ۲). بنابراین در



(ب) مدل خاک سخت‌شونده



(الف) مدل مور- کولمب

شکل ۲- توصیف مدل‌های شکل‌پذیری مختلف خاک در آزمون‌های سه‌محوری [۲۷]

پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود
براساس مدل رفتاری خاک سخت‌شونده در جدول ۲

نشان داده شده است. ()

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی مدل رفتاری خاک سخت‌شونده در تحلیل اجزای محدود [۲۶]

γ (kN/m ³)	E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)	c (kPa)	ϕ (Deg)	ψ (Deg)	ν_{ur}	P_{ref} (kPa)	K_0	$Power$	R_f	
۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵۰	۴۰ و ۲۰، ۱۰	۳۰	۵	۰/۲	۱۰۰	۰/۵	۰/۲۵	۰/۹	
تنش مرجع برای سختی‌ها					P_{ref}	چسبندگی موثر						c
زاویه اتساع					ψ	زاویه اصطکاک داخلی موثر						ϕ
توان نشان دهنده وابستگی سختی به سطح تنش					$m=1$	مدول بارگذاری اذئومتری						E_{oed}
ضریب پواسون برای حالت باربرداری- بارگذاری مجدد					ν_{ur}	مدول باربرداری/بارگذاری مجدد						E_{ur}
برای خاک‌های عادی تحکیم‌یافته (1-sin ϕ)					K_0	بارگذاری- باربرداری سهمحوری						E_{50}
وزن مخصوص خاک					γ	نسبت گسیختگی است که این مقدار به‌طور پیش فرض در Plaxis، ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود.						R_f

۲-۳- ابعاد و حوزه مسئله

روش‌های عددی نظیر روش اجزای محدود (FEM)، حل‌هایی تقریبی از مسئله‌های مقدار مرزی مکانیک محیط‌های پیوسته ارائه می‌دهند. در این رویکرد، حوزه و محدوده مسئله که بخشی از محیط پیوسته است، به اجزای مجزا تقسیم می‌شوند. اندازه حوزه و محدوده مسئله باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که اثر بخش‌های حذف شده محیط پیوسته بر نتایج حل عددی ناچیز باشد. ابعاد حوزه مسئله از بزرگی و جهت‌گیری تنش‌های اصلی متناظر با حالت تنش‌های برجا نیز تأثیر می‌پذیرد. برای حالت متداول یک تونل سطحی در یک حوزه مستطیلی که تنش‌های برجا به موازات کناره‌های حوزه مسئله‌اند، بسته به عواملی که در بالا اشاره شد، تغییرمکان افقی برابر با صفر (ناچیز) در فاصله 3D تا 13D در طول کناره‌های حوزه مسئله رخ می‌دهد (D برابر عمق تونل یا ارتفاع روباره تونل است) [۸ و ۹]. همچنین به‌منظور اجتناب از تخمین کمتر تغییرمکان‌ها، برای فضاهای زیرزمینی در اعماق بیشتر، محدوده و حوزه مسئله باید به مراتب بزرگ‌تر باشد. تغییرمکان‌های نقاط درونی زمین با محیط

حفاری تونل متناسب است؛ یعنی آهنگ تغییرشکل‌های حاصل از حفاری در مصالح دانه‌ای و مصالح چسبیده متفاوت است. به‌طور کلی، نشست در خاک‌های چسبیده به دلیل قوی‌تر بودن خاصیت شکل‌گیری گنبد فشار نسبت به خاک‌های دانه‌ای، کمتر است. همچنین اگر دهانه حفاری شامل چند لایه خاک باشد، توجه به این نکته که بخش عمده دهانه، دانه‌ای است یا چسبیده، در تغییرمکان‌های نقاط اطراف دهانه حفاری تأثیرگذار است. بنابراین به‌منظور اجتناب از هرگونه سازوکار ممکن در خاک و همچنین اثرات مرز خارجی، بایستی مرزهای مدل در اطراف آن گسترش یابند.

در این مطالعه، شرایط مرزی مدل به‌صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن مدل، در مدل‌سازی دو و سه‌بعدی، از تقارن محوری استفاده شده و تونل به‌صورت نیم‌مقطع مدل شده است. برای افزایش دقت نتایج از مش‌بندی غیریکنواخت استفاده شده و اندازه مش در اطراف ناحیه حفاری تونل، ریزتر گردیده است. این مدل شامل ۴۳۴۷ المان ۱۵ گره‌ای و ۱۳۷۴۸ گره است. تمامی حرکات در پایین مدل، ثابت شده و هرگونه

باریک^{۱۱} با صلبیت خمشی مشخص و یک سختی نرمال استفاده می‌شود. در هندسه مدل به‌طور پیش فرض این المان با خطوط رنگ آبی نمایش داده می‌شود. مشخصات مربوط به جنس المان Plate در مدل اجزای محدود با سختی خمشی (EI) و سختی نرمال (EA) معرفی شده‌اند (جدول ۳).

۲-۵- مدل‌سازی تسلیح‌سینه کار با نیل فایبرگلاس

در این مطالعه، مدل‌سازی نیل‌های فایبرگلاس با استفاده از المان ژئوگرید انجام شده است (جدول ۴). ژئوگریدها سازه‌های باریکی هستند که دارای سختی نرمال می‌باشند، ولی هیچ سختی خمشی ندارند. ژئوگریدها تنها قادرند نیروهای کششی را تحمل کنند [۱۶].

تأثیر نیل در سینه‌کار حفاری با مدل‌سازی خصوصیات معادل مصالح بدون مدل‌سازی سازه‌های المان‌های تسلیح نیز بررسی شد. در این رویکرد اثرات نیل در سینه‌کار با چسبندگی معادل مدل‌سازی گردید. مطابق با این رویکرد درمی‌یابیم که چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال با تعداد ۲۰ و ۵۰ نیل در سینه‌کار به ترتیب برابر با سینه‌کار بدون تسلیح با چسبندگی ۲۰ و ۴۰ کیلوپاسکال است. نتایج هر دو روش با رویکرد تحلیلی نعمتی حیاتی و همکاران (۲۰۱۲) مقایسه شد [۲۶].

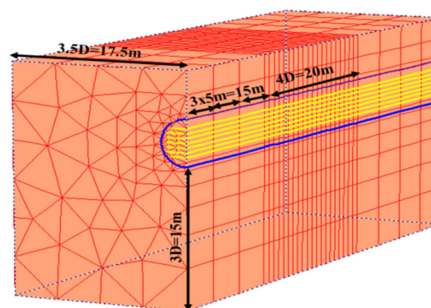
برای مدل‌سازی اثرات نیل فایبرگلاس به‌صورت چسبندگی معادل، اثرات بهسازی خاک تنها به شکل چسبندگی و هیچگونه تغییر در زاویه اصطکاک داخلی خاک به جبهه کار تونل اعمال می‌شود. در ناحیه تسلیح‌شده تونل، چسبندگی افزایش یافته، براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$c^* = c + \frac{\Delta\sigma_3}{2} \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

که در آن c و ϕ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک

تغییرمکان‌های افقی در سطوح جانبی مدل، بلوکه شده است.

قطر تونل، ثابت ($D=5m$)، روباره تونل متغیر از ۵ (برابر با قطر تونل، D) تا ۱۵ متر (سه برابر قطر تونل) و حفاری به‌صورت تمام مقطع با گام‌های پیشروی ۱ تا ۴ متر در نظر گرفته شده است. مرزهای جانبی مدل به اندازه سه و نیم برابر قطر تونل و مرز پایینی به اندازه سه برابر قطر تونل امتداد پیدا کرده است.



شکل ۳- مدل سه‌بعدی اجزای محدود در نرم‌افزار

Plaxis3DTunnel

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ۱۵ متر ابتدایی مدل به‌منظور از بین بردن اثرات پرتال با مش درشت و در سه گام ۵ متری حفاری شده است. پس از حفاری این بخش، کلیه جابه‌جایی‌ها صفر شده است. سپس به اندازه ۲۰ متر (چهار برابر قطر تونل) از تونل با المان‌های به فاصله یک متر بلوک‌بندی گردیده است. از المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی‌شکل برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شد.

۲-۴- مدل‌سازی پوشش موقت

بسیاری از مسئله‌های مهندسی ژئوتکنیک درگیر اندرکنش خاک-سازه‌اند. بنابراین مدل‌سازی مناسب المان‌های سازه‌ای در تحلیل اجزای محدود تأثیر بسزایی در صحت نتایج دارد.

به منظور مدل کردن پوشش موقت تونل (شاتکریت) از المان Plate استفاده شده است. این المان یک عنصر سازه‌ای است که برای مدل کردن سازه‌های

^{۱۱}- Selender

داخلی خاک تسلیح نشده و $\Delta\sigma_3$ افزایش در فشار محصورکنندگی تأمین شده به واسطه المان‌های

تسلیح‌کننده در سینه کار حفاری است.

جدول ۳- مشخصات پوشش بتنی تونل در تحلیل اجزای محدود

مدل مصالح	ضریب پواسون	صلبیت خمشی (EI) (kN/m)	سختی محوری (EA) (kN/m)	ضخامت (mm)
ارتجاعی	۰/۲	$9/352 \times 10^4$	$8/925 \times 10^6$	۳۵۵

جدول ۴- مشخصات نیل فایبرگلاس در تحلیل اجزای محدود

E_n (Mpa)	E_g (Mpa)	E_{eq} (kPa)	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	A_n (mm ²)	A_g (mm ²)	D_{DH} (mm)	D_{bar} (mm)	S_h (m)
۵۰۰۰۰	۲۰	۲۴۵۷۰۴۴	۸۶۷۹۵	۱۲۲	۸۳۶	۱۴۸۳۶	۱۵۰	۶۰	۰/۵
مدول ارتجاعی مقطع معادل	E_{eq}	سطح مقطع نیل		A_n	قطر نیل	D_{bar}	فاصله افقی نیل‌ها		S_h
مدول ارتجاعی گروت	E_g	مدول ارتجاعی نیل		E_n	قطر گمانه	D_{DH}	سطح مقطع گروت		A_g

ناشی از تسلیم‌شدگی نیل، است. برای هر نیل با سطح مقطع A ، مقاومت تسلیم f_{yk} ، کمینه اصطکاک جداره نیل τ_a ، کمینه طول تزریق شده نیل L ، قطر گمانه D ، نیروی F_{VTR} برابر است با:

$$F_{VTR} = \min \left[F_1 = \frac{\tau_a \pi D k L}{FS_1}; F_2 = \frac{A f_{yk}}{FS_2} \right] \quad (3)$$

در جدول ۵ محاسبه چسبندگی معادل به ازای تعداد نیل‌های مختلف مورد استفاده در مدل اجزای محدود و تعادل حدی برای محاسبه ضریب ایمنی ارائه شده است.

جدول ۵- محاسبه چسبندگی معادل به ازای تعداد نیل‌های مختلف

N	f_{yk} (Mpa)	S (m ²)	T_a (Mpa)	k	L (m)	FS	c (kPa)	c*
۲۰	۳۰۰	۱۹/۶۲۵	۵۰	۱	۱۲	۲	۱۰	۲۰
۵۰								۴۰

فایبرگلاس، مدل‌سازی سه‌بعدی روش اجرا و حفاری تونل در نرم‌افزار Plaxis3DTunnel انجام شد [۲۷]. نتایج این تحلیل‌ها به شرح زیر است.

۳- مطالعه پارامتریک

به‌منظور بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار شامل روباره، گام پیشروی، چسبندگی خاک و تعداد نیل

فشار محصورکننده از نیروی محصورکننده F_{VTR} توسط نیل‌های فایبرگلاس محاسبه می‌شود، با فرض اینکه همه نیل، نیروهای برابری را تأمین می‌کنند. فشار محصورکننده به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta\sigma_3 = \frac{F_{VTR}}{A_s} \sum_{k=1}^f (n_k \cos i_k) \quad (2)$$

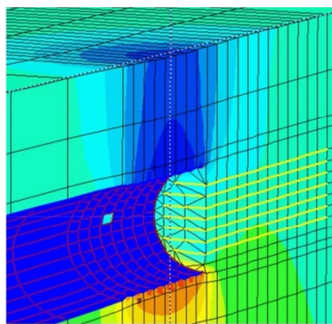
که در آن A_s سطح مقطع تونل، f تعداد خطوط نیل‌های تزریق شده، n_k و i_k به‌ترتیب تعداد نیل‌ها در k امین خط و زاویه نظیر آن است.

نیروی F_{VTR} برابر با کمترین مقدار بین نیروی F_1 ، نیروی حاصل از بیرون‌کشیدگی نیل، و F_2 ، نیروی

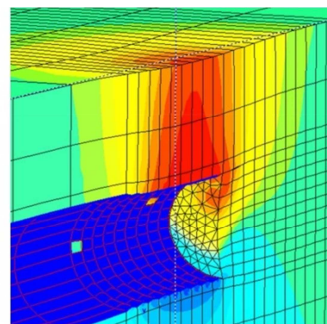
۳-۱- سازوکار گسیختگی

در شرایط تسلیح جبهه کار، جابه‌جایی در داخل جبهه کار ادامه ندارد. همچنین در حالت استفاده از المان‌های سازه‌ای فایبرگلاس، جابه‌جایی‌های افقی هسته-جبهه کار ناچیز است، ولی در حالت دوم، جابه‌جایی‌های افقی در هسته-جبهه کار متمرکز است.

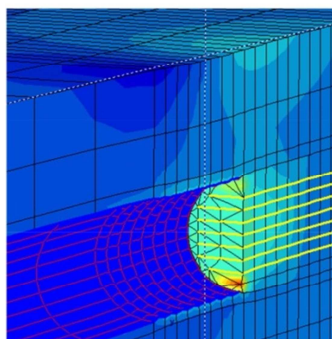
با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی خاک و المان‌های فایبرگلاس می‌توان دریافت که استفاده از المان‌های سازه‌ای فایبرگلاس، سازوکار گسیختگی را تغییر می‌دهند (شکل ۴). در حالت عدم استفاده از نیل، سازوکار گسیختگی در جابه‌جایی‌های قائم، حالت دودکش‌مانند است و در جبهه کار نیز ادامه دارد. این در حالی است که



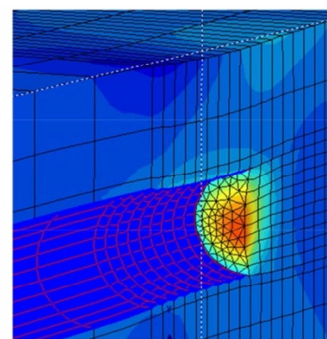
ب) جابه‌جایی قائم در شرایط تسلیح



الف) جابه‌جایی قائم در شرایط بدون تسلیح



د) جابه‌جایی افقی در شرایط تسلیح



ج) جابه‌جایی افقی در شرایط بدون تسلیح

شکل ۴- الگوی جابه‌جایی ناشی از حفر تونل در شرایط تسلیح‌شده و تسلیح‌نشده

۳-۲- اثرات گام پیشروی و روباره

2D: مدل‌سازی دوبعدی جبهه کار حفاری تونل در حالت بدون تسلیح و

C/D: نسبت عمق (روباره) به قطر تونل.

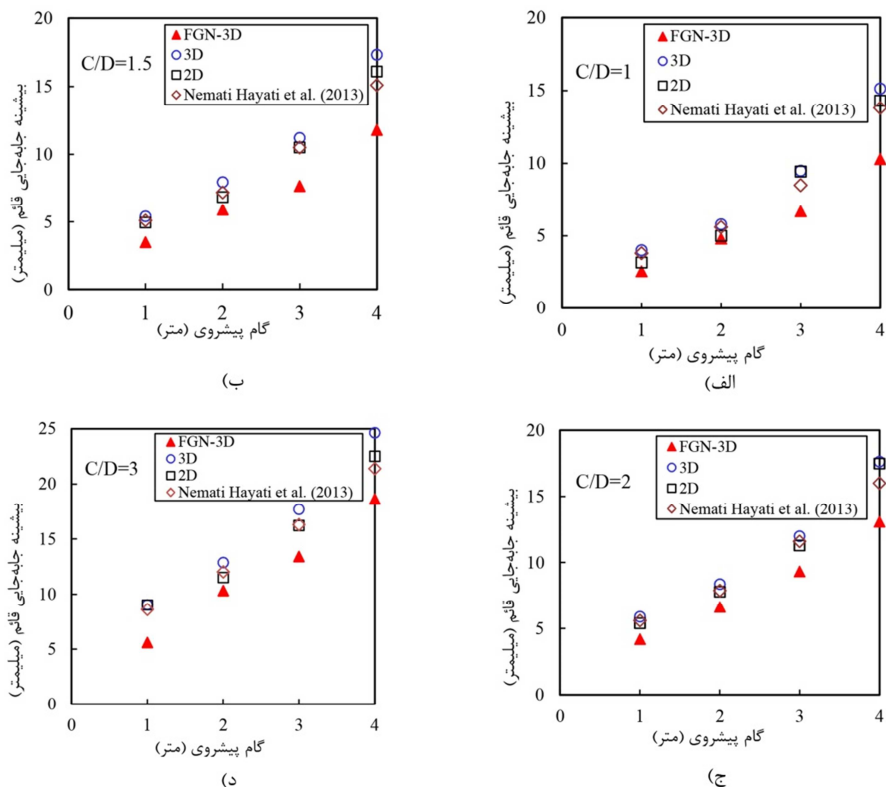
این در حالی است که گام پیشروی تأثیری در مقدار جابه‌جایی افقی تونل در هر دو روش ندارد (شکل ۶). همچنین با استفاده از نیل در جبهه کار تونل، مقدار جابه‌جایی قائم بین ۲۰ تا ۳۵ درصد و جابه‌جایی افقی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۷). بنابراین می‌توان دریافت که استفاده از نیل در جبهه کار در کاهش جابه‌جایی افقی تونل تأثیر بیشتری دارد. همچنین با

به‌طور کلی، با افزایش گام پیشروی و روباره مقدار جابه‌جایی قائم و افقی در هر دو روش، افزایش می‌یابد (شکل ۵). در شکل ۵، پارامترها به صورت زیر می‌باشند: FGN: مدل‌سازی سه‌بعدی نیل فایبرگلاس در جبهه کار حفاری، 3D: مدل‌سازی سه بعدی جبهه کار حفاری در حالت بدون تسلیح،

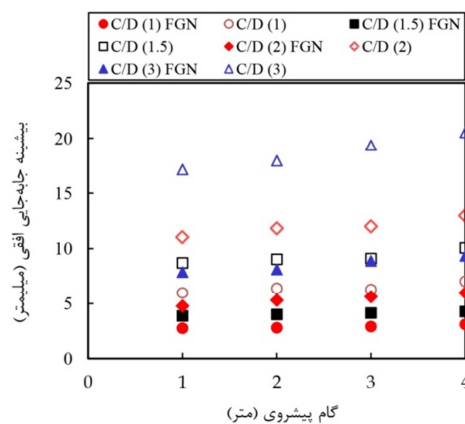
فرآیند حفاری، تحکیم و بررسی تغییرشکل تونل‌ها یک پدیده پیچیده سه‌بعدی است. با این حال، استفاده از تحلیل دوبعدی هنوز در بسیاری از مسائل اجرایی متداول است.

استفاده از روش تحلیلی نعمتی حیاتی و همکاران (۲۰۱۲) که اثرات گام حفاری و روباره را به‌طور مناسب در محاسبات لحاظ می‌کند، مشخص شد که نتایج تحلیل عددی تطابق خوبی با روش مذکور دارد [۲۶].

۳-۳- اثرات گام پیشروی و روباره

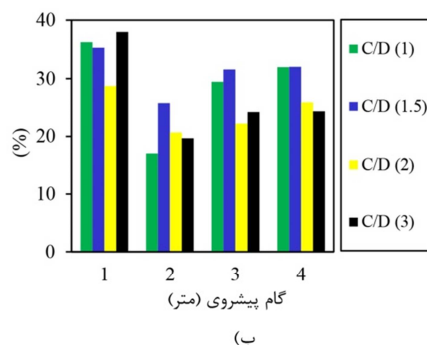


شکل ۵- بیشینه جابه‌جایی قائم تونل با نسبت‌های مختلف عمق به قطر، (الف) $C/D=1$ ، (ب) $C/D=1.5$ ، (ج) $C/D=2$ و (د) $C/D=3$

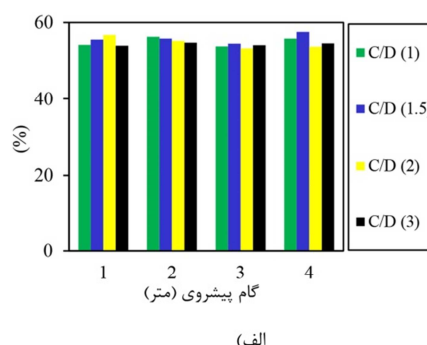


شکل ۶- بیشینه جابه‌جایی افقی جبهه کار تونل

اجرای پوشش موقت با استفاده از اثر قوس‌زدگی طولی از همگرایی بیش از حد مرز حفاری ممانعت می‌کند. قابل ذکر است که بعد از اجرای پوشش موقت در طول زیاد تونل، شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار شده و مدل دوبعدی با شرایط واقعی انطباق دارد.

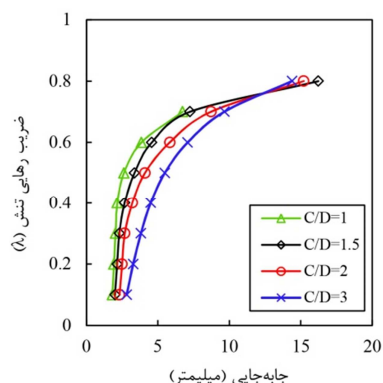


حذف المان‌های خاک در تحلیل دوبعدی، معادل خاک‌برداری به طول نامحدود در طول مسیر تونل می‌شود. این امر، منجر به همگرایی المان‌های مرز حفاری بیش از مقدار واقعی و حتی گسیختگی در مدل عددی می‌گردد. در عمل، خاک پیش‌رو در هر گام حفاری قبل از

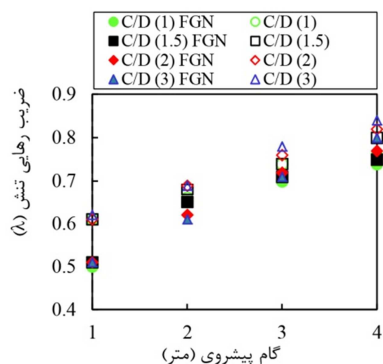


شکل ۷- درصد کاهش جابه‌جایی (الف) افقی و (ب) قائم در شرایط تسلیح جبهه کار به‌ازای C/D و گام‌های پیشروی مختلف

مختلف در گام‌های حفاری ۱ تا ۴ متر نشان داده شده است. مطابق با این شکل با افزایش روباره و گام حفاری، مقدار ضریب رهایی تنش افزایش می‌یابد.



شکل ۸- منحنی همگرایی تونل بدون نگهداری



شکل ۹- تغییرات ضریب رهایی تنش در برابر گام حفاری در

نسبت‌های مختلف عمق به قطر

برای استفاده از مدل دوبعدی در هنگام خاک‌برداری، بخشی از نیروهای نامتعادل کننده ناشی از حفاری به مدل عددی کرنش صفحه‌ای اعمال می‌شود تا اثر گام حفاری در کاهش تغییرشکل‌ها و همگرایی مرز حفاری منظور شود. میزان نیروهای نامتعادل کننده‌ای که در مرحله حفاری آزاد می‌شود، به‌صورت ضریب رهایی تنش بیان می‌گردد. برای تخمین میزان این مقادیر در مراحل مختلف حفاری از مقایسه نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی با دوبعدی استفاده می‌شود. معیار معادل‌سازی تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، همگرایی مرز حفاری است.

به‌منظور لحاظ کردن اثرات مدل‌سازی سه‌بعدی در مدل دوبعدی در نرم‌افزار Plaxis2D از ضریب رهایی تنش (λ) استفاده شد [۲۸]. ضریب رهایی تنش برای روباره‌های مختلف در مدل‌سازی دوبعدی در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۸، می‌توان دریافت که رفتار زمین تا $\lambda=0.4$ به‌صورت ارتجاعی است که متناظر با جابه‌جایی ۲ تا ۵ میلیمتر است. سپس خاک تا $\lambda=0.8$ تغییرشکل می‌دهد (جابه‌جایی ۱۵ تا ۱۷ میلیمتر) و در نهایت گسیختگی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۹ ضریب رهایی تنش به‌ازای روباره‌های

۴- مقایسه ضریب ایمنی FEM با روش تعادل

حدی

یکی از روش‌های کارآمد در کنترل پایداری تونل‌ها، محاسبه ضریب ایمنی است. به‌طور کلی، دو روش برای پایداری تونل‌ها وجود دارد. اولین روش، نسبت بین ظرفیت مقاوم به بارهای وارده خارجی است. به‌عنوان مثال، می‌توان نسبت نرخ استهلاک انرژی کل سیستم به نرخ کار خارجی را بیان کرد. در حالی که در روش دوم (روش تکنیک کاهش مقاومت)، از کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح مور-کولمب، ضریب ایمنی تا لحظه گسیختگی تعیین می‌شود [۱۶ و ۲۱].

در این تحقیق از روش کاهش مقاومت برای محاسبه ضریب ایمنی پایداری جبهه کار تونل در روش اجزای محدود استفاده شده است. ضریب ایمنی محاسبه‌شده در روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis3DTunnel انجام شد. همچنین معیار گسیختگی مور-کولمب برای خاک در نظر گرفته شد. عناصر تقویت‌کننده جبهه کار با استفاده از المان‌های ژئوگرید مدل‌سازی شدند. این المان‌ها هیچگونه سختی خمشی ندارند، اما توانایی محدود کردن نیروهای محوری را دارند. گام حفاری ۱ تا ۴ متر، روباره از ۵ تا ۱۵ متر و دانسیته نیل فایبرگلاس برابر با ۲۰ عدد نیل (معادل با چسبندگی ۲۰ کیلوپاسکال)، ۵۰ عدد نیل (معادل با ۴۰ کیلوپاسکال) با طول ثابت ۱۲ متر، همپوشانی ۴ متر و جبهه کار حفاری در حالت بدون تسلیح (چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال) با زاویه اصطکاک داخلی ثابت ۳۰ درجه در تمام مدل‌ها به‌صورت سه‌بعدی تحلیل شد (جدول‌های ۴ و ۵). همچنین ضریب ایمنی برای طول‌های بدون نگهداری و نسبت‌های عمق به قطر مختلف با روش تعادل حدی، محاسبه گردید. همچنین در این روش، اثرات نیل در جبهه کار با چسبندگی معادل محاسبه شد [۱۹]. محققین مختلف با استفاده از نتایج تحلیل عددی به روش کاهش مقاومت، روابط مختلفی را برای محاسبه ضریب

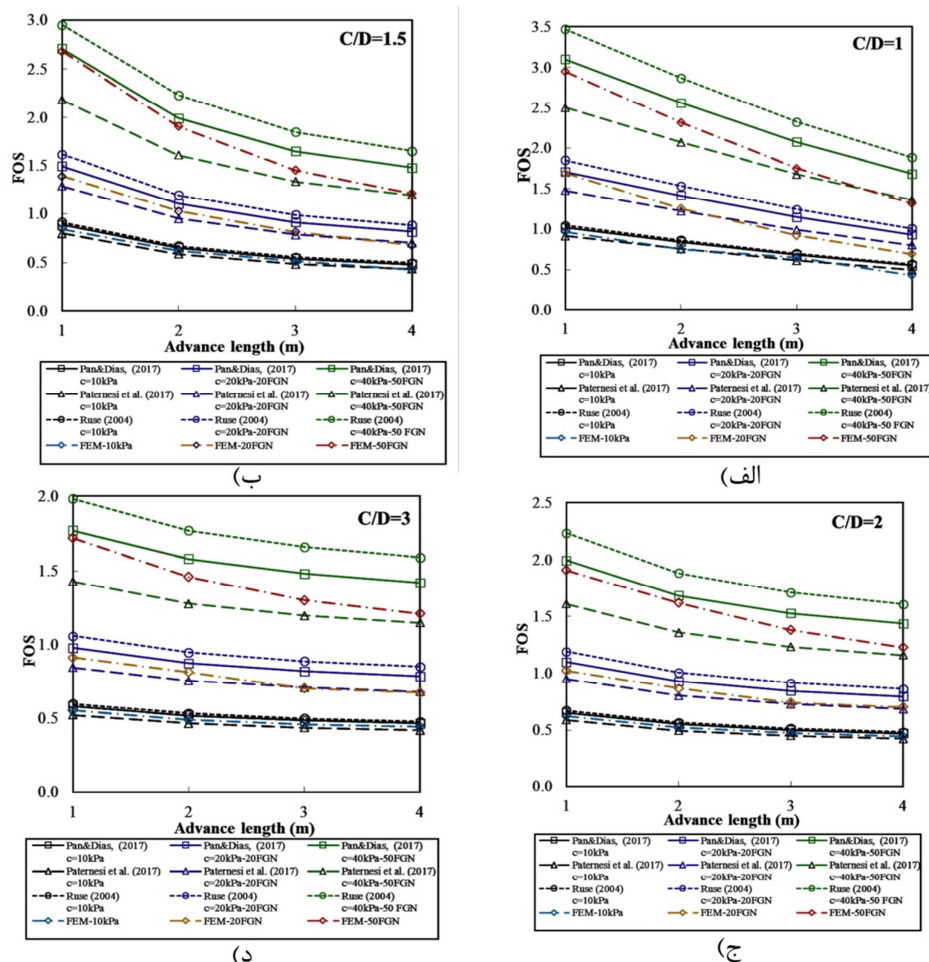
ایمنی پیشنهاد دادند. در جدول ۶، تعدادی از این روابط ارائه شده است که در آن، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، c' چسبندگی خاک، γ وزن مخصوص خاک، D قطر تونل و d گام حفاری تونل است.

مطابق شکل ۱۰، درمی‌یابیم که به‌طور کلی، با افزایش چسبندگی، پایداری جبهه کار تونل افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش نسبت عمق به قطر و گام حفاری، ضریب ایمنی کاهش می‌یابد.

جدول ۶- روابط پیشنهادی برای محاسبه ضریب ایمنی تونل

$FS = \frac{0.9 \tan(\phi') + \frac{18c'}{\gamma D}}{2 + 3(d/D)^6 \tan(\phi'/FS)} \quad [20]$
$FS = \frac{1.23 \tan(\phi') + \frac{15.46c'}{\gamma D}}{2 + 3(d/D)^6 \tan(\phi'/FS)} \quad [17]$
$FS = \frac{0.9 \tan(\phi') + 11.2 \left(\frac{c'}{\gamma D}\right)^{-0.13} \cdot \frac{c'}{\gamma D}}{2 + 3(d/D)^6 \tan(\phi'/FS)} \quad [21]$

همچنین تأثیر روباره در کاهش ضریب ایمنی با افزایش گام حفاری، قابل توجه‌تر است. حداقل چسبندگی برای پایداری جبهه کار بین ۲۰ تا ۳۰ کیلوپاسکال با توجه به روباره تونل است و در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال تونل ناپایدار است. در مقادیر بالای چسبندگی (بزرگ‌تر از ۲۰ کیلوپاسکال) مقدار ضریب ایمنی از همگرایی مناسبی بین روش‌های مختلف برخوردار نیست. مقایسه روش‌های مختلف تعادل حدی نشان می‌دهد که روش روز در سال ۲۰۰۴ ضریب ایمنی بالاتری را ارائه می‌کند [۲۰]. این موضوع به دلیل این است که گسیختگی کششی را در محاسبات لحاظ نمی‌کند. مقایسه روش تعادل حدی و اجزای محدود نشان می‌دهد که روش‌های تعادل حدی در مقادیر چسبندگی پایین از دقت و تطابق قابل‌قبولی برخوردار هستند. این در حالی است که در مقادیر بالای چسبندگی، تغییر در مقادیر ضریب ایمنی بین روش اجزای محدود و همچنین روش‌های مختلف تعادل حدی قابل‌ملاحظه است.



شکل ۱۰- مقایسه ضریب ایمنی در برابر گام حفاری در نسبت‌های در نسبت‌های مختلف عمق (روباره) به قطر تونل، الف) $C/D=1$ ، ب)

ج) $C/D=1.5$ ، د) $C/D=3$

۵- نتیجه‌گیری

- به‌طور کلی با افزایش چسبندگی، پایداری جبهه کار تونل افزایش می‌یابد. در حالی‌که با افزایش نسبت عمق به قطر (C/D) و گام حفاری، ضریب ایمنی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش روباره در کاهش ضریب ایمنی همزمان با افزایش گام حفاری، تأثیر کمتری دارد. حداقل چسبندگی برای پایداری جبهه کار بین ۲۰ تا ۳۰ کیلوپاسکال با توجه به روباره تونل است و در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال، تونل ناپایدار است.

- در تحلیل دوبعدی، رفتار زمین تا $\lambda=0/4$ ، به‌صورت ارتجاعی است که متناظر با جابه‌جایی ۲ تا ۵ میلی‌متر است. سپس خاک تا $\lambda=0/8$ تغییر شکل

در مطالعه حاضر، تحلیل اجزای محدود دو و سه‌بعدی و روش تعادل حدی برای بررسی ضریب ایمنی و رفتار تغییر شکل تونل بررسی شد. جمع‌بندی و مقایسه نتایج به‌دست آمده از هر دو روش، به‌طور خلاصه شامل موارد زیر است:

- با استفاده از نیل در جبهه‌کار تونل، مقدار جابه‌جایی قائم بین ۲۰ تا ۳۵ درصد و جابه‌جایی افقی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان دریافت که استفاده از نیل در جبهه کار در کاهش جابه‌جایی افقی تونل تأثیر بیشتری دارد.

- روش تحلیلی نعمتی حیاتی و همکاران به طور مناسب اثرات روباره و گام حفاری را برای محاسبه مقادیر نشست سطحی تونل لحاظ می‌کند [۲۶]. بنابراین از این رویکرد تحلیلی می‌توان با در نظر گرفتن اثرات نیل فایبرگلاس به صورت چسبندگی معادل در محاسبات مقادیر نشست تا چسبندگی ۴۰ کیلوپاسکال استفاده کرد.

- استفاده از نیل فایبرگلاس ضریب ایمنی تونل را بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ (به ازای ۲۰ نیل فایبرگلاس) و ۱/۲۵ تا ۲ برابر (به ازای ۵۰ نیل فایبرگلاس) با توجه به نسبت عمق به قطرهای مختلف افزایش می‌دهد.

می‌دهد (جابه‌جایی ۱۵ تا ۱۷ میلیمتر) و در نهایت گسیختگی اتفاق می‌افتد.

- نتایج تحلیل نشان داد که استفاده از روش مصالح معادل برای شبیه‌سازی اثرات نیل فایبرگلاس همانند مدل‌سازی با المان‌های سازه‌ای در مدل اجزای محدود، از دقت قابل‌قبولی برای محاسبه ضریب ایمنی تونل برخوردار است.

- مقایسه روش‌های مختلف تعادل حدی نشان می‌دهد که روش روز ضریب ایمنی بالاتری را ارائه می‌کند [۲۰]. این موضوع به دلیل این است که گسیختگی کششی را در محاسبات لحاظ نمی‌کند. همچنین ضریب ایمنی محاسبه شده با روش اجزای محدود به‌طور میانگین، برابر با روش‌های پن و دیاس [۱۷] و پترنسی و همکاران [۲۱] است.

مراجع

- [1] Elyasi, A., Javadi, M., Moradi, T., Moharrami, S., Parnian, S., & Amrac, M. (2016). "Numerical modeling of an umbrella arch as a pre-support system in difficult geological conditions: a case study", *Bull Eng Geol Environ*, 75(1), 211-221.
- [2] Taromi, M., Eftekhari, A., Khademi Hamidi, J., & Aalianvari, A. (2017). "A discrepancy between observed and predicted NATM tunnel behaviors and updating: a case study of the Sabzkuh tunnel", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(2), 713-729.
- [3] Taromi, M., Eftekhari, A., Khademi Hamidi, J., & Eghbali, A. (2018). "Tunnel designing and construction process in difficult ground conditions using Controlled Deformations (ADECO) approach; a Case Study", *IJMGE*, 52(2), 149-160.
- [4] Mikaeil, R., Ataei, M., Sereshki, F., & Jafarpour, A. (2019). "Evaluation of the Environmental Impacts of Groundwater Levels Drop Due to the Excavation of Large-Scale Tunnels (Case Study: Kouhin Rail-Way Tunnel)", *Journal of Civil and Environmental Research*, 5(1), 89-103.
- [5] Alaghaa, A. S., & Chapman, D. N. (2019). "Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 94, 103096.
- [6] Shiau, J., & Al-Asadi, F. (2020). "Two-dimensional tunnel heading stability factors F_c , F_s and F_γ ", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103293.
- [7] Liua, K., Lia, Sh., Dinga, W., Houa, M., Gongc, Y., & Lic, H. (2020). "Pre-supporting mechanism and supporting scheme design for advanced small pipes in the silty clay layer", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103259.
- [8] Chen, S.L., Lee, Ch. Sh., & Wei, Y.S. (2016). "Numerical Analysis of Ground Surface Settlement Induced by Double-O Tube Shield Tunneling", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5), 04016012.
- [9] Zhao, Ch., Alimardani Lavasan, A., Barciaga, Th., Zarev, V., Datcheva, M., & Schanz, T. (2015). "Model validation and calibration via back analysis for mechanized tunnel simulations- The Western Scheldt tunnel case", *Computers and Geotechnics*, 69, 601-614.
- [10] Sterpi, D., Rizzo, F., Renda, D., Aguglia, F., Carla, L., & Zenti, e. (2013). "Soil nailing at the tunnel face in difficult conditions: A case study", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 129-139.
- [11] Janin, J. P., Dias, D., Emeriault, F., Kastner, R., Le Bissonnais, H., & Guilloux, A. (2015). "Numerical back-analysis of the southern Toulon tunnel measurements: A comparison of 3D and 2D approaches", *Engineering Geology*, 195, 42-52.

- [12] Jin, D., Yuan, D., Li, X., & Zheng, H. (2018). "An in-tunnel grouting protection method for excavating twin tunnels beneath an existing tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 27-35.
- [13] Lunardi, P. (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media.
- [14] Hernández, Y. Z., Farfána, A. D., & Pacheco de Assis, A. (2019). "Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103062.
- [15] Tonon, F. (2010). "Sequential Excavation, NATM and ADECO: What They Have in Common and How They Differ", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 245–265.
- [16] Schweiger, H. F., & Mayer, P. M. (2004). "Fe-analysis of reinforced tunnel face", *Felsbau*, 22(4), 47–51.
- [17] Pan, Q., Dias, D. (2017), "Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 62, 96-102.
- [18] Peila, D. (1994). "A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face", *Geotechnical and Geological Engineering*, 12(3), 145- 168.
- [19] Grasso, P., Mahtab, A., & Pelizza, S. (1989). "Riquilificazione della massa rocciosa: un criterio per la stabilizzazione di gallerie", *Gallerie e grandi opere sotterranee*, 29, 35–41.
- [20] Ruse, N. M. (2004). *Räumliche Betrachtung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Tunnelvortrieb* (Vol. 51). Institut für Geotechnik.
- [21] Paternesi, A., Schweiger, H. F., & Scarpellia, G. (2017). "Numerical analyses of stability and deformation behavior of reinforced and unreinforced tunnel faces", *Computers and Geotechnics*, 88, 256–266.
- [22] Semprich, S. (1980). "Berechnung der Spannungen und Verformungen im Bereich der Ortsbrust von Tunnelbauwerken in Fels", *Report of the Inst. of Geotech. Engng of the RWTH Aachen*, Report No. 8, ISSN 0341-7956.
- [23] Baumann, T., Sternath, R., & Schwarz, J. (1997). "Face stability of tunnels in soft rock – Possibilities for the computational analysis", *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 1389-1392.
- [24] Yasitli, N. E. (2013). "Numerical modeling of surface settlements at the transition zone excavated by New Austrian Tunneling Method and Umbrella Arch Method in weak rock", *Arabian journal of geosciences*, 6(7), 2699–2708.
- [25] Schanz, T., Vermeer, P.A., & Bonnier, P.G. (1999), The hardening-soil model: formulation and verification. In: Brinkgreve, R.B.J. (Ed.), *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Balkema, Rotterdam, 281–290.
- [26] Nemati Hayati, A., Ahmadi, M. M., Hajjar, M., & Kashighandi, A. (2012), "Unsupported advance length in tunnels constructed using New Austrian Tunneling Method and ground surface settlement", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(14), 2170-2185.
- [27] Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., & Swolfs, W.M. (2012). *Plaxis 2D version 2012 manual*, Delft the Netherlands.
- [28] PLAXIS. (2006). "Plaxis user manual (version 8.6)". *Delft University of Technology & Plaxis BV*, The Netherlands.