

برآورد بار وارد بر سپر و سیستم نگهداری با مدل‌سازی عددی پیوسته و ناپیوسته (سه‌بعدی)

مصطفی شریف‌زادهⁱ؛ امیر ترابی معصومیⁱⁱ

چکیده

محاسبه نیروهای وارد بر سپر از جنبه‌های مختلفی از قبیل انتخاب و طراحی دستگاه TBM (Tunnel Boring Machine) قبل از خرید و همچنین تخمین بارهای وارد بر دستگاه بعد از شروع حفاری تونل اهمیت دارد. این نیروها عبارتند از نیروی وارد بر کله حفار از طرف سینه کار و نیروی وارد بر سپر از طرف دیواره‌ها. در زمین‌هایی که سرعت و میزان همگرایی زیاد است و یا TBM بیش از زمان پیش‌بینی شده توقف داشته باشد، فضای خالی اطراف سپر بسته شده و دستگاه گیر می‌کند. در این شرایط نیروهایی از طرف زمین به سپر وارد می‌شود که دستگاه برای ادامه حرکت خود باید بر این نیروها غلبه کند. در این تحقیق، نیروهای وارد بر سپر و سیستم نگهداری تونل قمرود با استفاده از روش‌های عددی پیوسته و ناپیوسته (سه‌بعدی) برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که نخست، با توجه به وجود ناپیوستگی‌ها در سنگ‌های درونگیر محدوده مورد مطالعه نتایج تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته نسبت به یکدیگر متفاوتند می‌باشند، دوم اینکه همگرایی سنگ‌های درونگیر تونل بیشتر از مقدار فرض شده اولیه است. سوم اینکه بار وارده به سیستم نگهداری سبب افزایش پتانسیل ناپایداری آن می‌شود. شواهد تجربی از قبیل ترک‌های ایجاد شده بر روی قطعات پیش‌ساخته نتایج حاصل از تحلیل‌ها را تایید می‌کنند.

کلمات کلیدی

TBM، سپر، همگرایی تونل، مدل‌سازی پیوسته و ناپیوسته، مدل‌سازی عددی، بار وارده به سیستم نگهداری

Evaluate of Load on TBM Shield and Segments Using Continuum-Discontinuum 3D Numerical Modeling

Mostafa Sharifzadeh, Amir Torabi Masoumi

ABSTRACT

Calculation of loads on TBM (Tunnel Boring Machine) shield is extremely important in TBM type selection and estimation of support system. Two main ground loading components on TBM consist of loading on TBM cutter head from the tunnel face and loading on the TBM shield from the tunnel surrounding rock mass. In weak rock masses, where convergence rate is high or TBM maintenance take long time, the ground convergence fills the gap between shield and surrounding rocks, which leads to TBM jamming or stoppage. Thus, TBM needs to overcome two forces excreted from ground. In this research, loads on TBM and tunnel lining segments are evaluated using three-dimensional continuum – discontinuum numerical analysis in Ghomrod tunnel. It is founded that; at first, continuum analysis results are different from discontinuum ones, which is due to heavily jointed rock masses condition. Secondly, calculated tunnel convergence with new information is higher than predicted convergence using preliminary data from geotechnical investigation (before tunnel excavation). Several records of

ⁱ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده معدن و متالورژی (پلی‌تکنیک تهران): sharifzadeh@aut.ac.ir

ⁱⁱ کارشناس گروه سازه‌های زیرزمینی، موسسه مهندسی مشاور ایمن‌سازان: amiriut@yahoo.com

TBM jamming confirm these results. Finally, load on tunnel lining cause to segments instability. Evident such as cracks on installed lining segments at tunnel walls verify the numerical analysis results.

KEYWORDS

TBM, tunnel convergence, continuum-discontinuum analysis, numerical modeling, Load on support.

۱- مقدمه

سه بعدی به صورت پیوسته و ناپیوسته در محیط سنگی ضعیف انجام شده است. بدین منظور اطلاعات ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه پردازش شد و با توجه به اطلاعات به دست آمده نیروهای وارد بر سپر و سیستم نگهداری، برآورد شده است. برای برآورد نیروهای وارد بر سپر و سیستم نگهداری روش‌های عددی سه بعدی $FLAC^{3D}$ (برای مدلسازی پیوسته) و 3DEC (برای مدلسازی ناپیوسته) به کار گرفته شده و مقدار همگرایی و تنش‌های اعمالی بر سیستم نگهدارنده و سپر محاسبه شد. سرانجام نتایج به دست آمده از تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته با هم و با شواهد تجربی مقایسه شد.

۲- معرفی تونل و مطالعات ژئوتکنیک

تونل انتقال آب قمرود یکی از اجزای اصلی سیستم انتقال آب از سرشاخه‌های حوزه دز به قمرود است. این تونل به طول ۲۵۷۵۰ متر و قطر تمام شده ۲/۸ متر، امکان انتقال $23 \text{ m}^3/\text{s}$ آب را فراهم می‌کند. رقوم کف تونل در ابتدا و انتها به ترتیب ۲۰۵۵ و ۲۰۱۱ متر از سطح دریاست و آب به صورت ثقلی آزاد جریان می‌یابد. عملیات حفاری تونل قطعات ۲ و ۳ قمرود در بهمن‌ماه سال ۱۳۸۲ آغاز شد. از آغاز سال ۱۳۸۴ تا پایان شهریورماه ۸۴ بدلیل برخورد با شرایط بد زمین‌شناسی و گیرکردن TBM تنها ۱۲۰ متر حفاری شده است، متوسط ضریب بهره‌وری از ابتدای عملیات اجرایی (بهمن‌ماه ۸۲) تا پایان شهریور ۸۴ کمتر از ۱۰ درصد بوده که بسیار کمتر از حد استاندارد است [۱۰]. در این مقاله، کیلومتر ۵۳۲۱ متر از دهانه خروجی بخش در حال حفاری با روش مکانیزه مطالعه شده است. متوسط روباره در این بخش ۴۰۰ متر است. بر اساس نتایج و اطلاعات حاصل از مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی، در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود (کیلومتر ۱۸+۰۰۰ تا ۲۴+۵۵۰)، صرف نظر از رسوبات و نهشته‌های واریزه‌ای سطحی، ۵ واحد زمین‌شناسی مهندسی شناسایی شده است. سنگ‌های ژوراسیک محدوده مورد مطالعه نیز دو گونه لیتولوژیکی؛ که با علائم II و III مشخص می‌شوند، قابل شناسایی است که خصوصیات آنها در ادامه آورده می‌شود. شایان توجه است که هر یک از گونه‌های لیتولوژیکی معرفی شده گاهی اوقات به واحدهای کوچکتری به نام گونه زمین‌شناسی مهندسی نیز قابل تفکیک هستند.

محاسبه نیروهای وارد بر سپر^۱ از جنبه‌های مختلف از قبیل انتخاب و طراحی دستگاه TBM^۲ قبل از خرید، تخمین بارهای وارد بر دستگاه بعد از شروع حفاری، نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک و پیشروی، و ظرفیت باربری سپر در مقابل نیروهای اعمالی اهمیت دارد.

در حالت کلی دو نیرو بر دستگاه TBM وارد می‌شود که شامل نیروی وارد بر کله حفار^۳ از طرف سینه‌کار و نیروی وارد بر سپر از طرف دیواره‌ها می‌باشد. نیروی وارد بر کله حفار با نیروی پیشران^۴ متعادل می‌شود؛ اما نیرویی از طرف سپر، برای جبران بار وارده از زمین وجود ندارد، بنابراین نیروی وارده از طرف سنگ‌های درونگیر تونل به طور مستقیم روی سپر بارگذاری شده و افزایش بیش از حد فشار روی سپر سبب گیرافتادن دستگاه می‌شود. تونل قمرود (قطعه ۲ و ۳) از جمله پروژه‌هایی است که وجود این نیروها مشکلات اجرایی فراوانی در آن ایجاد کرده است. برای جلوگیری از گیرافتادن دستگاه TBM در تونل، قطر تونل مقداری بزرگتر از قطر سپر، حفاری می‌شود. میزان اضافه حفاری به نرخ همگرایی سنگ‌های درونگیر بستگی دارد. فاصله بین دیوار تونل و دیواره خارجی سپر باید به اندازه‌ای باشد که قبل از همگرایی و رسیدن دیوار تونل به سپر دستگاه، سیستم نگهداری نصب شده و TBM از محل بدون نگهداری عبور کند [۱]. در زمین‌هایی که سرعت و میزان همگرایی زیاد است و یا TBM بیش از زمان پیش‌بینی شده توقف داشته باشد، فضای خالی اطراف سپر بسته شده و دستگاه گیر می‌کند و سبب اعمال نیرویی از طرف زمین به سپر می‌شود.

تغییرات تنش و تغییر شکل سنگ‌های درونگیر تونل با پیشروی دستگاه TBM با استفاده از نرم افزارهای سه بعدی به وسیله محققین متعددی مدلسازی شده است [۲]-[۵]. در سال‌های اخیر چندین مطالعه سه بعدی به روش پیوسته برای مدلسازی تغییر شکل زمین در تونل‌سازی در محیط‌های خاکی انجام شده است [۶] و [۷]. عمده مدلسازی‌های پیوسته به صورت دوبعدی و تعداد محدودی از آنها به صورت سه بعدی پیوسته انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۶] و [۷]. محققان اندکی نیز برای تعیین اندرکنش سپر- توده سنگ مدلسازی ناپیوسته دوبعدی را به کار گرفته‌اند [۱]. در این تحقیق، مدلسازی

کوچکتری به نام گونه زمین‌شناسی مهندسی با نام‌های JIa و JIb تفکیک شده است، که به ترتیب از ماسه سنگ‌ها و شیل و اسلیت‌ها تشکیل شده است.

مشخصات ژئومکانیکی ماده سنگ که از آزمون‌های آزمایشگاهی به دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است. محدوده‌ای از تونل؛ که دستگاه TBM در حال حاضر متوقف شده است، در زون JI قرار دارد. این زون به واحدهای

جدول (۱): پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه [۱۲]

زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	UCS (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته GPa	دانسیته (Kg/m ³)
۵۰	۱۱	۷/۵	۷۰	۰/۲۵	۱۰	۲۷۲۰

زمین و محیط اطراف سازه به وجود آمده است. روش‌های عددی، تحلیل تونل سازی با استفاده از سپر و مطالعه تاثیر پارامترهای موثر در رفتار سنگ‌های درونگیر را امکان پذیر می‌سازند [۸].

روش حفر به صورت مکانیزه با استفاده از TBM با سپر تلسکوپی و سپس نصب سیستم نگهداری از نوع قطعات پیش‌ساخته بتنی^۱ بلافاصله بعد از سپر و همزمان با پیشروی دستگاه می‌باشد. برای پر کردن فضای خالی بین سیستم نگهدارنده و دیواره تونل ابتدا شن نخودی پشت قطعات پیش‌ساخته بتنی ریخته شده و سپس دوغاب آتزیق می‌شود. با توجه به قطر داخلی تمام شده ۳/۸ متر و تعداد ۴ قطعه سگمنت در هر رینگ، طول سگمنت‌های سقف و دیواره حدود ۳/۴ متر، طول سگمنت کف حدود ۳/۵ متر، و ضخامت قطعات پیش‌ساخته در این پروژه ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

خصوصیات ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روابطی که هوک ارایه کرده است، محاسبه شد. خصوصیات توده سنگ به دست آمده برای مقادیر مقاومت فشاری تک محوره ۷۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره ۴۰۰ متری تونل مطابق جدول زیر محاسبه شد (جدول (۲)). ناپیوستگی‌هایی که بر ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های منطقه تأثیر مستقیم دارند، به سه دسته شامل سطوح لایه بندی، سطوح تورق (شیستوزیته) و درزه‌های ساختاری تقسیم می‌شوند. درزه‌ها از نظر تعداد، جهت داری، فاصله‌داری و سایر خصوصیات کاملاً به تکتونیک و شرایط ساختاری منطقه بستگی دارند. مشخصات ناپیوستگی‌های محدوده مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است.

۳- تحلیل تونل با استفاده از روش‌های عددی

با پیشرفت روش‌های عددی در زمینه تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی امکان پیش‌بینی دقیق‌تر از عکس‌العمل

جدول (۲): خصوصیات تعیین شده برای توده ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه

زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مدول الاستیسیته GPa
۴۰	۱/۵۸۷	۰/۱۷	۴/۲۲	۸/۳۷

جدول (۳): مشخصات ناپیوستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه [۱۲]

توضیحات	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی	جهت شیب / شیب	فاصله داری (cm)	دسته درزه
	۰/۱	۳۰	۶۰/۳۴۲	۳۰	۱
	۰/۱	۳۰	۶۰/۳۴۲	۲۰	۲
	۰/۱	۳۰	۶۰/۱۴۴	۲۰	۳
شیستوزیته	۰/۰۱	۲۵	۷۴/۳۶۰	۱۰	۴

۵- نیروی پیشران در تحلیل بار وارد بر سپر در نظر گرفته نشد. این بدلیل تاثیر ناچیز فشار وارد بر سینه کار در جابجایی نهایی محیط اطراف تونل است [۸].
در شکل (۱) نمای کلی از دستگاه TBM و بخش‌های مختلف آن نشان داده شده است. خصوصیات قطعات پیش‌ساخته و سپر مورد استفاده نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

۳-۱- تحلیل پیوسته

برای تحلیل پیوسته و به دست آوردن نیروهای وارد بر سپر و سیستم نگهدارنده، مدلسازی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام شد. مراحل مدلسازی و تحلیل به صورت زیر طی شده است:

(الف)- ایجاد هندسه مدل، اعمال شرایط مرزی و به تعادل رساندن مدل. (ب)- حفاری تونل و محاسبه تغییر شکل بدون نصب نگهداری. (ج)- مدلسازی سپر و سیستم نگهداری و برآورد بارهای وارده بر آنها.

برای مدلسازی سپر و سیستم نگهدارنده در تونل و به دست آوردن نیروهای وارد بر سپر، ملاحظات زیر مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است.

۱- طول سپر و کله حفار ۱۱/۷۵ متر است که حدود ۷۵ سانتی‌متر از این سپر در فضای خالی بین قطعات پیش‌ساخته و دیوار تونل قرار دارد.

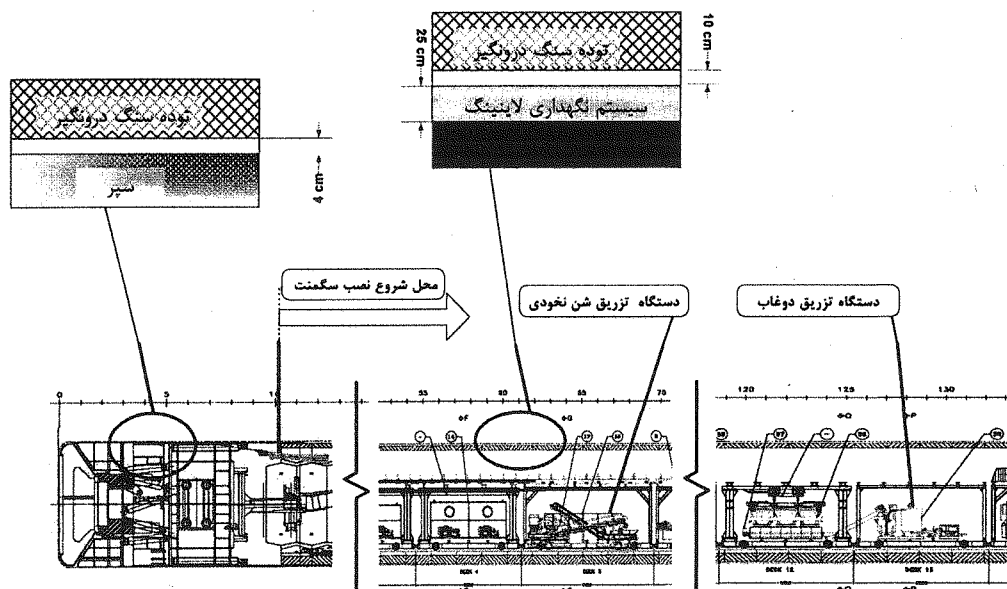
۲- محل دستگاه تزریق شن نخودی از سینه کار حدود ۶۰ متر است. محل تزریق شن نخودی بسته به نیاز پروژه توسط شلنگ تزریق قابل تغییر است.

۳- فاصله محل دستگاه تزریق دوغاب از سینه کار حدود ۱۲۰ متر است.

۴- به دلیل عمق زیاد تونل (حدود ۴۰۰ متر) و تنش‌های حاصل از روباره (حدود ۱۰ مگاپاسکال) از محاسبه تنش‌های حاصل از وزن دستگاه TBM صرف‌نظر شده است. اگر چه در تونل‌های کم عمق تنش‌های حاصل از وزن TBM اثر موضعی قابل ملاحظه‌ای دارد [۹].

جدول (۴): خصوصیات قطعات پیش‌ساخته و سپر

مصلح	مدول الاستیسیته (GPa)	جرم مخصوص (Kg/m ³)	مقاومت فشاری (MPa)	ضخامت (cm)
قطعات پیش‌ساخته	۳۰	۲۵۰۰	۳۰	۲۵
سپر	۲۱۰	۷۸۵۰	۲۰۰	۵

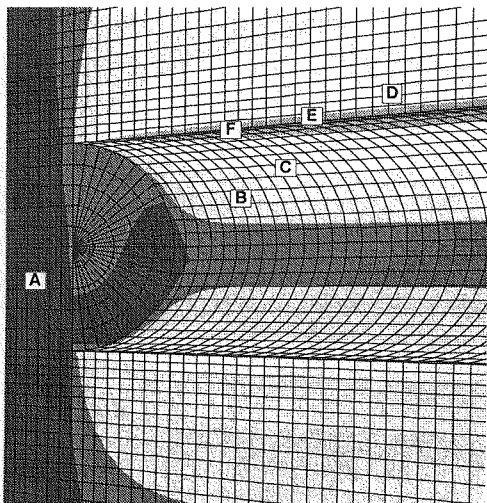


شکل (۱): نمای کلی از دستگاه TBM و بخش‌های مختلف آن

شده است. شکل (۲) مدل هندسی ایجاد شده را نشان می‌دهد. برای اعمال شرایط برجا بر مدل، با توجه به عمق قرارگیری تونل که حدود ۴۰۰ متر است، تنش‌های برجا و میزان روباره اعمالی محاسبه و به مدل اعمال شد. تنش‌های عمودی بر اساس

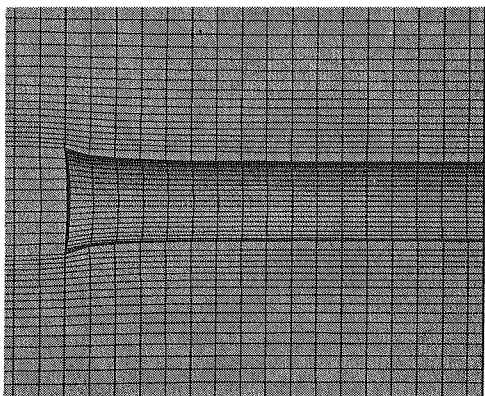
برای ایجاد هندسه تونل از خاصیت تقارن در جهت محور X استفاده شد. بنابراین نصف هندسه مدل با ابعاد ۲۰×۵۰×۴۰ متر ساخته شد که در آن شعاع تونل برابر ۲/۲۴۷۵ متر است. ابعاد مش‌بندی اطراف تونل به نسبت فاصله از دیواره تونل درشت‌تر

بتدریج کاهش می‌یابد و سرانجام در فاصله بعد از سه برابر قطر (۱۲ متر) از سینه کار همگرایی ثابت می‌ماند.



Legend: ■ 6.57e-5 to 1.00e-3 ■ D 5.00e-3 to 6.00e-3
 ■ B 1.00e-3 to 3.00e-3 ■ E 6.00e-3 to 7.00e-3
 ■ C 3.00e-3 to 5.00e-3 ■ F 7.00e-3 to 7.50e-3

شکل (۳): رویه‌های هم‌جایایی پس از حفر تونل بدون نصب نگهداری



شکل (۴): نمایی از همگرایی نهایی تونل با بزرگنمایی ۱۰۰

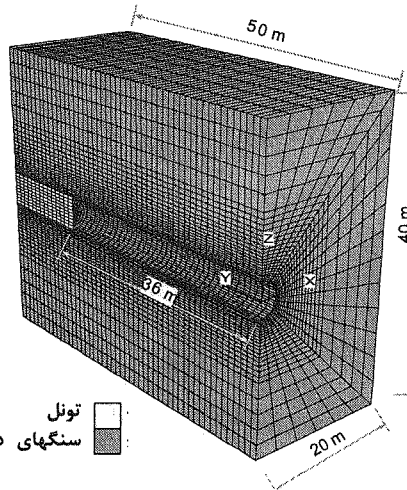
در صورتی‌که تنش‌های القایی در توده سنگ اطراف تونل از مقاومت تسلیم توده سنگ بیشتر شود، ناحیه خمیری (پلاستیک) در سنگ‌های درونگیر تونل به‌وجود می‌آید. در شکل ۵ ناحیه خمیری ایجاد شده در اطراف تونل نشان داده شده است. مطابق شکل (۵) ضخامت ناحیه خمیری در دیواره‌ها بیشتر از سقف تونل (حدود ۱ متر) و در سقف حدود ۰/۵ متر است.

تونل قمرود با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) نگهداری می‌شود. سیستم نگهداری در حفاری با TBM با سپر دوگانه در فاصله ۱۱ متری از سینه‌کار (بعد از سپر) نصب می‌شود. تاثیر نگهداری با قطعات پیش‌ساخته و سپر و برآورد بارهای وارد بر سیستم نگهداری مدلسازی شد. همان‌طور که نتایج مدلسازی بدون نصب نگهداری نشان می‌دهد، جایجایی

اصول متعارف افزایش تنش با عمق تخمین و تنش‌های افقی به صورت نسبتی از تنش‌های قائم محاسبه شد. مقدار تنش‌های قائم برابر ۱۰/۶۶ مگاپاسکال و بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مقدار K_0 برابر ۰/۴۵، مقدار تنش افقی برابر ۴/۷۹۷ مگاپاسکال بر مدل اعمال شد.

سطح آب زیرزمینی در ارتفاع حدود ۳۰ متر بالاتر از محور تونل قرار دارد. تاثیر آب به صورت فشار منفذی و استفاده از قابلیت اعمال سطح آب در نرم افزار، به مدل اعمال شد. برای اعمال شرایط مرزی از شرایط غلطکی (ثابت کردن مرزهای مدل در جهت‌های X و Y) و همچنین ثابت کردن مرز پایینی در جهت Z استفاده شد. پس از اعمال شرایط مرزی و برجا، اجرای برنامه تا رسیدن مدل به حالت تعادل مجدد ادامه یافت.

پس از به تعادل رساندن مدل ساخته شده از ۵۰ متر طول مدل ۳۶ متر آن به صورت تونلی به قطر ۴/۴۹۵ متر حفاری شده و سپس تاثیر حفاری تونل بر تغییرشکل‌های سنگ درونگیر تونل بدون نصب نگهداری بررسی شد. حفر تونل نیروی نامتعادلی در مدل ایجاد می‌کند که پس از اجرای مدل از بین می‌روند.



تونل
 سنگهای درونگیر

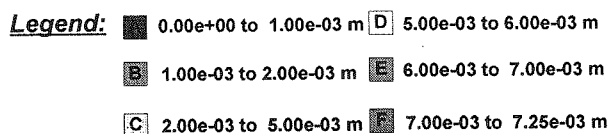
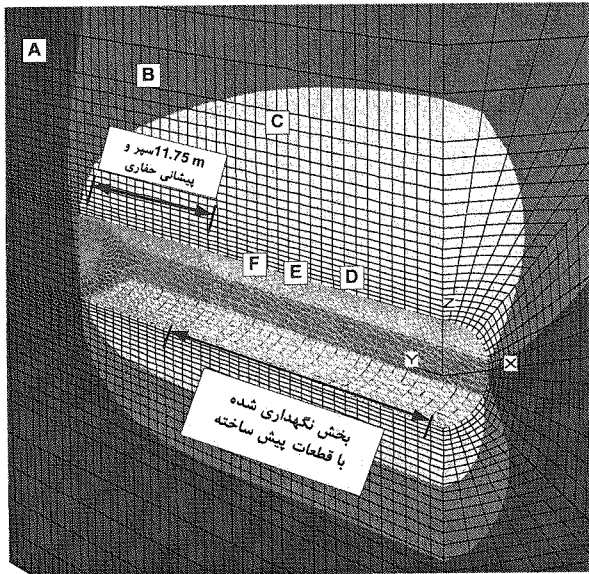
شکل (۲): هندسه مدل ساخته شده نشان دهنده تونل و سنگ‌های درونگیر

پس از حفر تونل با اجرای برنامه مقدار جایجایی، حدود ۷/۵ میلی‌متر به‌دست می‌آید. شکل (۳) رویه‌های هم‌جایایی (کنتور) پس از حفاری تونل را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۳) حداکثر جایجایی‌ها در سقف حاصل می‌شود که در نقاط بین این دو مقدار جایجایی‌ها کمتر است و همچنین مقدار جایجایی‌ها با نزدیک شدن به سینه‌کار کاهش می‌یابد.

شکل نهایی تونل بعد از همگرایی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) آهنگ همگرایی نهایی اطراف تونل در نزدیکی سینه کار زیاد بوده و با فاصله گرفتن از سینه کار

نهایی اطراف تونل در طولانی مدت در فاصله ۱۲ متری از سینه‌کار ایجاد می‌شود.

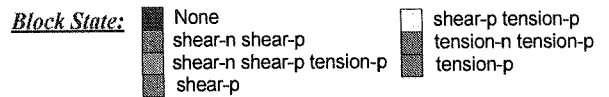
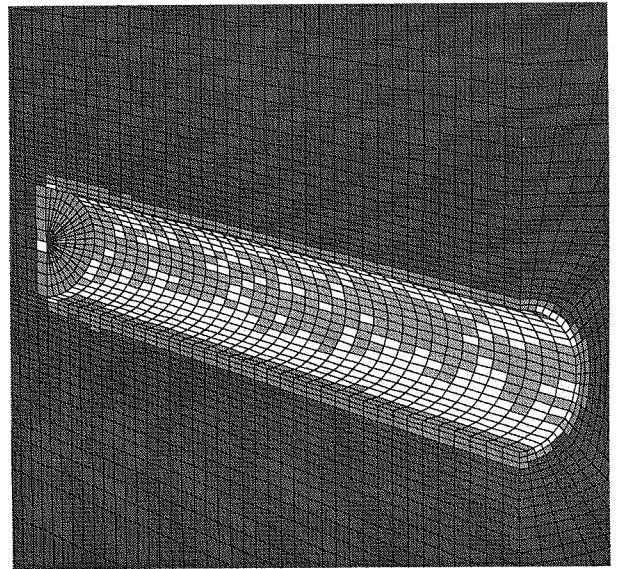


شکل (۶): کنتورهای جابجایی نهایی پس از نصب نگهداری و سپر

مطابق شکل (۷-الف) حداکثر تنش روی سیستم نگهداری در دیواره تونل حدود $6/22 \text{ MPa}$ است. مطابق شکل (۷-ب) حداکثر تنش روی سپر نیز در دیواره و انتهای سپر و حدود 28 MPa می‌باشد.

۳-۲- تحلیل ناپیوسته

برای تحلیل دقیق‌تر رفتار توده‌سنگ درونگیر تونل و بار وارده بر سپر، استفاده از مدل‌های ناپیوسته ضروری است. این به دلیل وجود لایه‌بندی و دسته‌درزه‌های متعدد و طبیعت ناپیوسته توده سنگ می‌باشد. مدل‌های ناپیوسته با استفاده از روش اجزای مجزا ساخته می‌شوند. نرم افزار UDEC^۲ که در سال ۱۹۸۰ طراحی شده، برای مدلسازی بلوک‌های صلب و تغییر شکل‌پذیر؛ که به وسیله ناپیوستگی‌ها از هم جدا شده‌اند، استفاده می‌شود [۱۱]. در سال ۱۹۸۳ اولین تحقیقات برای ساخت نرم افزار سه بعدی معادل UDEC یعنی 3DEC^۳ بر مبنای روش اجزای مجزا شروع شد. در این تحقیق نیز برای تحلیل بارهای وارد بر سپر و سیستم نگهداری از نرم‌افزار 3DEC (نسخه ۲) استفاده شد. برای این منظور برای مدلسازی و تحلیل مراحل چهار گانه زیر انجام شد:

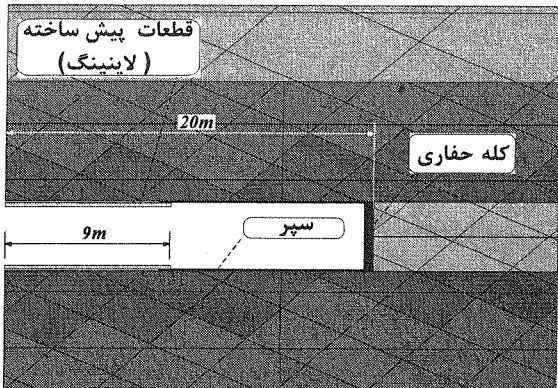


شکل (۵): ناحیه خمیری ایجاد شده در اطراف تونل

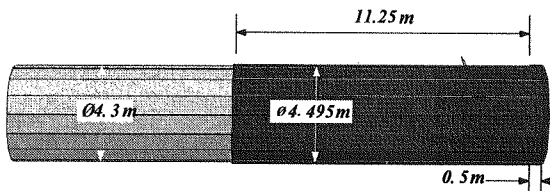
برای مدلسازی سپر از المان پوسته‌ای^۱ با خصوصیات فولاد استفاده شد (شکل ۶). این المان به طول $11/75$ متر جلوی سینه‌کار نصب و کله حفاری نیز به صورت المان پوسته‌ای مدلسازی شد در شکل (۶) محل نصب سپر و سیستم نگهداری و همچنین رویه‌های نهایی پس از نصب سپر سیستم نگهداری نشان داده شده است.

شکل (۷) مقادیر تنش‌های اصلی حداکثر به‌وجود آمده در سپر و سیستم نگهداری را نشان می‌دهد.

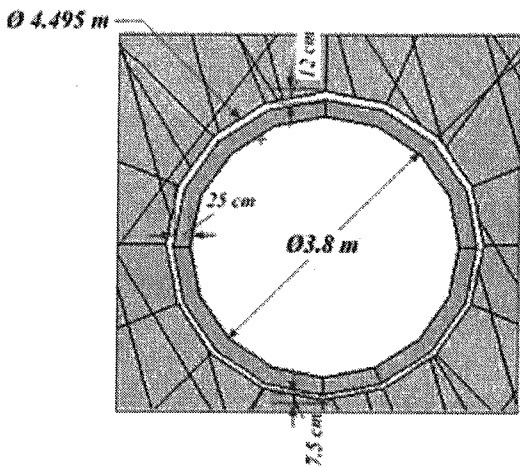
شکل (۸-ب) ابعاد هندسی سپر و سیستم‌نگهداری و در شکل (۸-ج) مقطع تونل و ابعاد فضای خالی بین سیستم نگهداری و دیواره تونل، که در مدلسازی لحاظ شده است، نشان داده شده است.



(الف)



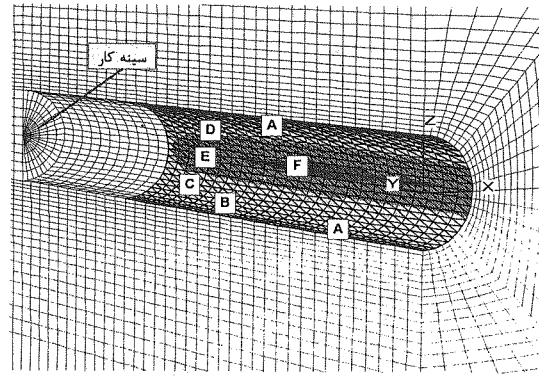
(ب)



(ج)

شکل (۸): (الف) مشخصات هندسی مقطع طولی، (ب) سپر و سیستم‌نگهداری و (ج) مقطع تونل و ابعاد فضای خالی در مدل ساخته شده

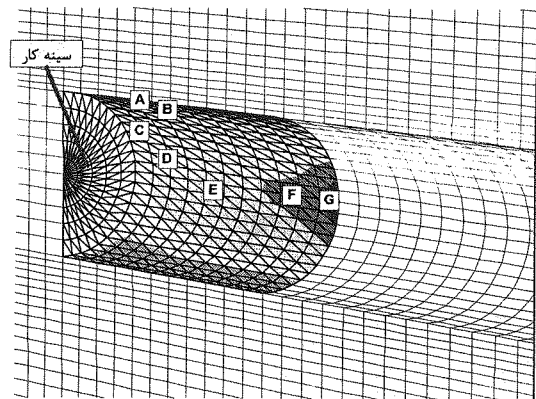
بعد از ساخت مدل هندسی، در مرحله دوم، خصوصیات رفتاری سنگ سالم و درزه‌ها مطابق جداول (۲) و (۴) وارد مدل شد. در مرحله سوم شرایط اولیه شامل تنش‌های برجای ناشی از روباره (حدود ۴۰۰ متر) به مدل اعمال شد و شرایط مرزی



Legend:

A	8.15e-10 to 0.00e+00 Pa	D	-3.00e+06 to -4.50e+06 Pa
B	00e+00 to -1.50e+06 Pa	E	-4.50e+06 to -6.00e+06 Pa
C	-1.50e+06 to -3.00e+06 Pa	F	-6.00e+06 to -6.22e+06 Pa

(الف)



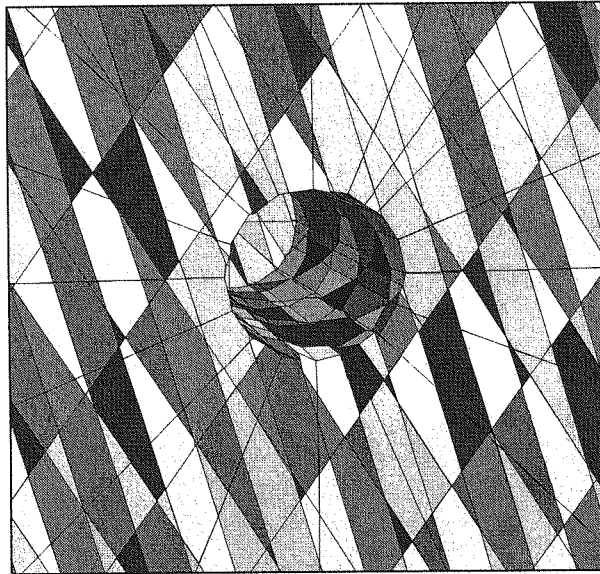
Legend:

A	4.65e-10 to 0.00e+00 Pa	E	-1.500e+07 to -2.00e+07 Pa
B	0.00e+00 to -5.00e+06 Pa	F	-2.0e+07 to -2.50e+07 Pa
C	-5.00e+06 to -1.00e+07 Pa	G	-2.50e+07 to -2.8e+07 Pa
D	-1.00e+07 to -1.50e+07 Pa		

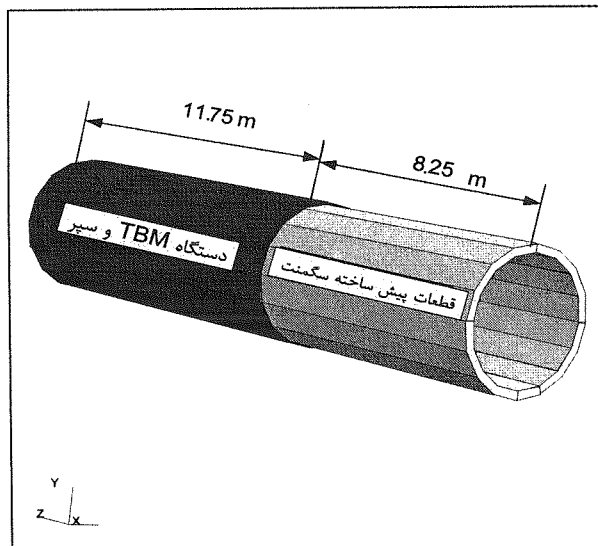
(ب)

شکل (۷): تنش اصلی حداکثر نهایی در قطع‌ات پیش‌ساخته (الف) و سپر (ب)

نخست هندسه تونل و محدوده اطراف به صورت بلوکی با ابعاد $15m \times 15m \times 30m$ (طول ۳۰ متر، عرض ۱۵ متر و ارتفاع ۱۵ متر) ساخته شد و مشخصات واقعی هندسی لایه‌بندی و درزه‌ها مطابق جدول (۴) وارد شد. با توجه به محدودیت حل کامپیوتری (حافظه کامپیوتر) هندسه بلوک به دو محدوده تقسیم شد. در محدوده $10m \times 10m \times 30m$ مرکز بلوک شبکه‌بندی با ابعاد ریز (با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر در شعاع ۵ متری مرکز تونل و ابعاد ۱ متری در فاصله بین شعاع ۵ متری و ۱۰ متری) و مشخصات واقعی هندسه درزه‌ها وارد شد. به عبارت دیگر مطابق مشخصات هندسی دسته درزه‌های برداشت شده برای مدلسازی استفاده شد. در خارج از محدوده مرکزی (از شعاع ۱۰ متری تا مرز مدل) شبکه‌بندی با ابعاد درشت (ابعاد ۲ متر) و همچنین فاصله هندسی دو برابر شده درزه‌ها وارد شد. در شکل (۸-الف) مقطع طولی از مدل ساخته شده با 3DEC، در



(الف)



(ب)

شکل (۹): (الف) مدل حفاری شده، (ب) هندسه TBM به همراه قطعات پیش ساخته (سگمنت)

در شکل (۱۰) نمودارهای جابجایی در سقف تونل در فواصل ۲ متری از ابتدای تونل در چند نقطه در دو حالت بدون نگهدارنده (الف) و با نگهداری (ب) نشان داده شده است. جابجایی در تونل بدون نگهداری در نقاط برداشت شده حدود ۲۰ سانتی متر است (حداکثر جابجایی با استفاده از بردارهای جابجایی در اطراف تونل حدود ۲۴ سانتی متر به دست آمد). این مقدار جابجایی با نصب نگهداری محدود شده و به حدود ۱۴ سانتی متر کاهش می یابد.

برای برآورد مقدار تنش ها و نیروهای اعمالی به سیستم نگهداری و سپر تنش های اصلی ماکزیمم در مقاطع مختلف به دست آمده است. در شکل (۱۱) مقادیر تنش های اصلی حداکثر در فواصل مختلف از سینه کار نشان داده شده است.

غلتکی در جوانب مدل و شرایط مرزی ثابت کردن مرز پایینی در جهت z استفاده و با توجه به ارتفاع سطح آب (۳۰ متر بالاتر از تونل) اثر فشار منفذی در مدل اعمال شد. در مرحله چهارم پس از اعمال شرایط مرزی و برجا مدل اجرا شد تا به حالت تعادل برسد.

پس از به تعادل رساندن مدل ساخته شده از ۳۰ متر طول تونل ۲۰ متر آن به صورت تونلی به قطر ۴/۴۹۵ متر حفاری و سپس تاثیر حفاری تونل بر تغییر شکل های سنگ درونگیر تونل بدون نصب نگهداری بررسی شد. حفر تونل نیروی نامتعادلی در مدل ایجاد می کند که بیانگر عدم تعادل مدل ناپیوسته است.

پس از حفر تونل با اجرای برنامه میزان جابجایی حدود ۲۴ سانتی متر به دست می آید. در حالی که فاصله ۴ سانتی متر برای همگرایی تونل در نظر گرفته شده، به همین دلیل این جابجایی در طولانی مدت سبب گیر کردن ماشین و اعمال بار به سپر می شود. حفاری تونل سبب القای تنش در اطراف آن می شود. در صورتی که تنش های القایی در توده سنگ اطراف تونل از مقاومت تسلیم توده سنگ بیشتر شود، ناحیه خمیری (پلاستیک) در سنگ های درونگیر تونل به وجود می آید. با توجه به مطالب فوق، ریزش های بلوکی در اطراف تونل قابل پیش بینی است، به همین دلیل نصب نگهداری ضروری است. یکی از مزیت های استفاده از نرم افزار سه بعدی مدل سازی دقیق مطابق با واقعیت تونل سازی است. در این تحقیق برای محاسبه بار وارد بر سپر و سیستم نگهداری مدل سازی مطابق با شکل (۹-ب) انجام و برای مدل سازی هندسه استوانه ای سپر همراه با کله حفاری و قطعات پیش ساخته دو برنامه کمکی^۱ و با استفاده از المان بلوک به شکل استوانه ای با خصوصیات رفتاری الاستیک و مشخصات فولاد و بتن استفاده شد. با توجه به جابجایی زیاد دیواره تونل در مناطق ضعیف، قبل از تزریق شن نخودی، فضای خالی بین قطعات پیش ساخته و دیوار تونل با بلوک های اطراف زمین پر خواهد شد، به همین دلیل این فاصله به صورت فضای خالی مدل شده است که در فرایند اجرای برنامه با همگرایی زمین پر می شود و نیروهایی به قطعات پیش ساخته وارد می شود. شکل (۹-الف) مدل حفاری شده و شکل (۹-ب) هندسه بلوک های استوانه ای ساخته شده برای مدل سازی سپر همراه با کله حفاری TBM و سیستم نگهداری را نشان می دهد.

با توجه به شکل (۱۱) مقدار حداکثر و حداقل تنش در سپر به ترتیب برابر ۶۵ و ۱۲ مگاپاسکال است. این شکل نشان می‌دهد که تغییر تنش‌ها در طول سپر و قطعات پیش‌ساخته یکنواخت نیست. این به دلیل ناپایداری بلوک‌های موضعی در طول تونل می‌باشد. مقدار حداکثر و حداقل تنش در قطعات پیش‌ساخته نیز به ترتیب برابر ۱۰ و ۲/۱ مگاپاسکال است.

ع- بحث

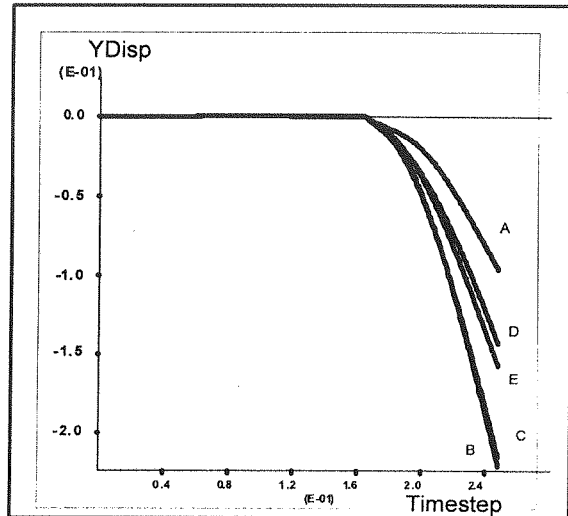
از آنجا که همگرایی مجاز تونل در حدود ۴ سانتی‌متر در فضای اطراف سپر در نظر گرفته شده است، و مطابق شکل (۱۰-الف) میزان جابجایی‌ها از تحلیل ناپیوسته حدود ۲۰ سانتی‌متر به دست آمد؛ بنابراین مقدار جابجایی در نظر گرفته شده کمتر از مقدار همگرایی به دست آمده حاصل از تحلیل است. جابجایی نهایی به دلیل نصب سیستم نگهداری به مقدار حدود ۷/۵ میلی‌متر در تحلیل پیوسته و ۱۴ سانتی‌متر در تحلیل ناپیوسته محدود می‌شود.

تحلیل جابجایی با و بدون نصب سیستم نگهداری نشان می‌دهد که ایجاد محدودیت جابجایی به دلیل نصب سیستم نگهداری و سپر باعث به وجود آمدن تنش در سیستم نگهداری می‌شود. مقدار تنش‌های به وجود آمده در قطعات پیش‌ساخته حدود ۶/۲ MPa در تحلیل پیوسته و ۱۵ MPa در تحلیل ناپیوسته و در سپر مقدار ۲۸ MPa در تحلیل پیوسته و ۷۰ MPa در تحلیل ناپیوسته می‌باشد.

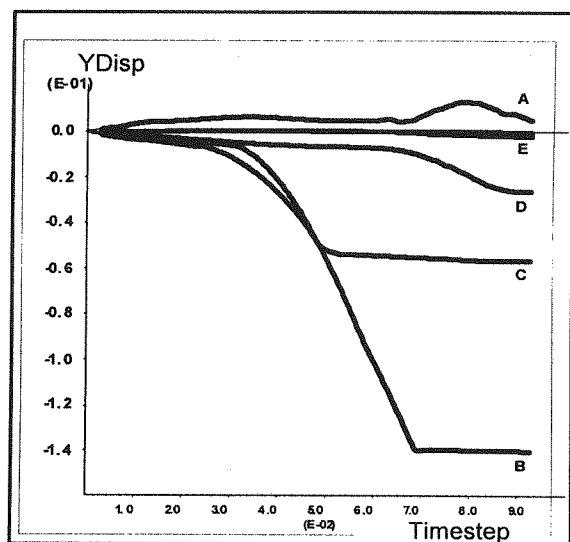
ه- نتیجه گیری

تونل قمرود در توده سنگ با ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل دسته درزه‌ها و شیستوزیته قرار دارد؛ لذا همگرایی تونل در طول مسیر آن غیریکنواخت است و باعث تمرکز تنش در نقاط مختلف می‌شود. همگرایی بیش از حد که در تحلیل ناپیوسته به دست آمده است، بیانگر ناپایداری بلوکی در طول تونل می‌باشد. لذا با جابجایی بیش از حد بلوک‌ها نیروی بیشتری به سپر وارد شده سبب گیر افتادن دستگاه می‌شود. این مقدار بار سبب اعمال تنش زیاد به سیستم نگهداری می‌شود.

تنش‌های ایجاد شده در قطعات پیش‌ساخته باعث ایجاد پتانسیل شکست این قطعات می‌شود. وجود این تنش‌ها روی قطعات پیش‌ساخته از یک طرف و تنش‌های حاصل از نیروهای اعمال شده از طرف جک‌های پیشران از طرف دیگر باعث تشدید ناپایداری سیستم نگهداری می‌شود. شواهد تجربی به صورت ترک‌هایی روی قطعات پیش‌ساخته این واقعیت را تایید

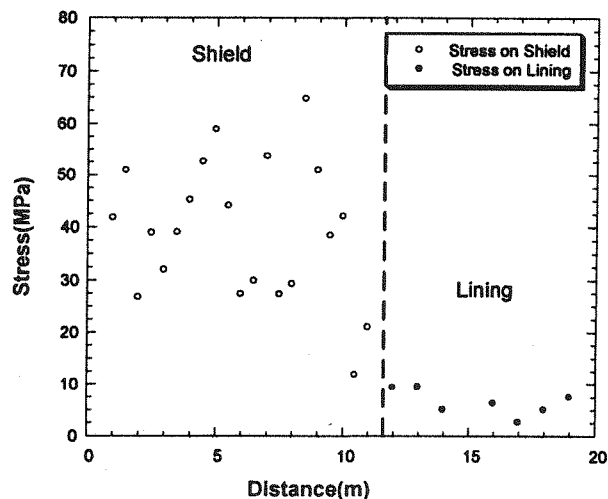


(الف)



(ب)

شکل (۱۰): نمودارهای جابجایی در سقف تونل در فواصل مختلف از سینه کار (الف) بدون نصب نگهداری، (ب) بعد از نصب نگهداری



شکل (۱۱): مقادیر تنش‌های اصلی حداکثر در فواصل مختلف از سینه کار

۶- مراجع

- [۱] Barla G., Pelizza S. "TBM tunneling in different ground condition", Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino, 1998.
- [۲] Barla G., Barla M., " Continuum and discontinuum modelling for design analysis of tunnels", Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy, 1999.
- [۳] Lee K.M., Rowe R.K. Finite Element modeling of the Three-Dimensional Ground Deformations due to tunneling in soft cohesive soils. Part1- Method of analysis; Computer and Geotechnics, 10:111-138, 1990.
- [۴] Lee K. M. and Rowe R. K. Finite Element Modeling of the Three-Dimensional Ground Deformations due to tunneling in soft cohesive soils. Part2- Results; Computer and Geotechnics, 10:111-138, 1990.
- [۵] Swoboda G.. Numerical Modeling of tunnels; Numerical Methods and Constitutive Modeling in Geomechanics; (311),277-318. Eds.C.S. Desai and G. Gioda. Springer Verlag Wien, 1990.
- [۶] Lee K.M. Rowe R.K. An Analysis of three dimensional ground movement. the Thunder Bay Tunnel; Canadian Geotechnical Journal, 28:25-41, 1991.
- [۷] Swoboda G., Mertz W.. and Schmid A.; Three Dimensional Numerical models to simulate tunnel excavation; Numerical Models in Geomechanics Swoboda G., Mansour M. Three Dimensional Numerical Modeling of Slurry Shield Tunneling. PP 27-41
- [۸] Kasper, T., Meschke G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling., Tunneling and underground technology, PP 160-171, V.21, 2006.
- [۹] Sharifzadeh, M., Hemmati Shaabani, A. TBM Tunneling in adverse rock mass with emphasis on the TBM Jamming accident in Ghomrud water transfer tunnel. In printing, EUROCK06, Charlier ed. May 8-12, 2006, liege, Belgium.
- [۱۰] Hart, R.D. An introduction to distinct element method for rock engineering; PP245-261, Comperhensive in Rock Engineering, Hudson Ed., 1993.
- [۱۱] Sahel consulting Engineering report, SHL 2019 UNGR MTUN RM RP 003 DO, June 2005.

۷- زیر نویس‌ها

- ¹ *Shield*
- ² *Tunnel Boring Machine*
- ³ *Cutter head*
- ⁴ *Trust*
- ⁵ *Segment*
- ⁶ *Shell*
- ⁷ *Universal Distinct Element Code*
- ⁸ *3 Dimensional Distinct Element Code*
- ⁹ *Fish*