

Providing a Simple Method for Estimating Ground Deformations in Building-Tunnel Interaction

Yazdan Shams Maleki^{1✉} 

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. E-mail: y.shamsmaleki@kut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2025-01-17
Received in revised form
2025-03-25
Accepted
2025-05-12
Available online
2025-06-22

Keywords:

Ground Deformation Function,
Tunnel,
Surface Building,
Simplified Finite Element
Method

ABSTRACT

Constructing underground tunnels in urban areas brings surface buildings close to excavations, leading to mutual deformation effects between tunnels and structures. Analyzing this interaction is challenging due to soil nonlinearity and complex building characteristics. In this study, a simplified method based on two- and three-dimensional finite element numerical analyses is presented to estimate the values of surface deformations of ground, tunnels, and buildings. Also, the maximum cross-section of the Kermanshah urban train tunnel has been used to perform numerical modeling. Logical and facilitating simplifications in the definition of tunnel-building interaction are presented to solve the problem more quickly. The obtained deformation values have been compared and verified with the actual values measured in other available valid references. A good agreement is observed between the results of field measurements and the numerical findings of this study. Accordingly, vertical displacement modeling yields a difference between 1.45% and 6.67% when comparing valid field results and the 2D finite element numerical model. In addition, the difference between the overall displacement results of the NATM staged tunneling model in the 3D model of the reference article and the 3D model of this study is a negligible 7.14%. Also, a simple and short-exponential mathematical equation with high accuracy (coefficient of determination greater than 0.90) is presented to estimate the amounts of deformations, efforts, and internal forces of the tunnel lining system with increasing surface construction overhead. A simple exponential mathematical relationship with an increasing upward trend with high fitting accuracy has been obtained between the changes in horizontal displacement responses, settlement, shear stress, shear strain, internal efforts of the reinforced concrete lining of the tunnel (bending moment, shear force, and axial force), and the surface structure overhead. On the other hand, the amounts of horizontal displacements of the soil mass above the tunnel crown is about 25% of the vertical displacements (settlements).

Cite this article: Shams Maleki, Yazdan. (2025). Providing a Simple Method for Estimating Ground Deformations in Building-Tunnel Interaction. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 1-19.

DOI: 10.22126/amcen.2025.8376.1001



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.8376.1001

Publisher: Razi University

Introduction

The construction of underground tunnels in urban areas brings surface buildings into proximity to these excavations. Mutual deformation effects between the tunnel and the buildings are created at this stage. Considering the complex characteristics of some surface structures as well as the nonlinear behavior of soil layers, tunnel-building interaction analysis is a very challenging issue. The location of urban tunnels under sensitive structures leads to damage to both the structure and the tunnel. The main goal of considering different assumptions is to somehow simplify the complex and intricate problem of multiple structure-soil-tunnel interactions. In fact, the interactions that occur in this problem can produce different and distinct results at different stages between soil and structure, tunnel and soil, structure and tunnel, or between all three of them. The flexural stiffness of the structure is an important parameter in the analysis of tunnel-soil-structure interaction. A method is proposed in which the response of a building to tunneling is related to the bending of a cantilever beam, and empirical-type relations are presented to estimate the bending stiffness of the building [1]. This approach is relevant for situations where the building is perpendicular to the tunnel axis and the nearest edge of that building does not overlap more than half of the tunnel cross-section. However, The aim of this research is to find a simplified solution to overcome the complexities of this multiple interaction problem.

Method

In this study, a simplified method based on two- and three-dimensional finite element numerical analyses is presented to estimate the values of surface deformations of ground, tunnels, and buildings. Also, the maximum cross-section of the Kermanshah urban train tunnel has been used to perform numerical modeling. Logical and facilitating simplifications in the definition of tunnel-building interaction are presented to solve the problem more quickly. Two-dimensional (2D) modeling of the tunnel problem has been carried out in the form of plane-strain assumptions. Three-dimensional (3D) finite element modeling has been developed based on two-dimensional models. The 15-node triangular elements were used for 2D modeling and wedge elements were used for the 3D model.

Results

The obtained deformation values have been compared and verified with the actual values measured in other available valid references. A good agreement is observed between the results of field measurements and the numerical findings of this study. Accordingly, vertical displacement modeling yields a difference between 1.45% and 6.67% when comparing valid field results and the 2D finite element numerical model.

Conclusions

The difference between the overall displacement results of the NATM staged tunneling model in the 3D model of the reference article and the 3D model of this study is a negligible 7.14%. Also, a simple and short-exponential mathematical equation with high accuracy

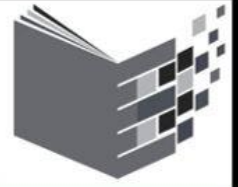
(coefficient of determination greater than 0.90) is presented to estimate the amounts of deformations, efforts, and internal forces of the tunnel lining system with increasing surface construction overhead. A simple exponential mathematical relationship with an increasing upward trend with high fitting accuracy has been obtained between the changes in horizontal displacement responses, settlement, shear stress, shear strain, internal efforts of the reinforced concrete lining of the tunnel (bending moment, shear force, and axial force), and the surface structure overhead. On the other hand, the amounts of horizontal displacements of the soil mass above the tunnel crown is about 25% of the vertical displacements (settlements).

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارائه روشی ساده جهت تخمین تغییر شکل های زمین در اندرکنش ساختمان-تونل

یزدان شمس ملکی^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: y.shamsmaleki@kut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱	
کلیدواژه‌ها: تابع تغییر شکل سطح زمین، تونل، ساختمان سطحی، روش اجزای محدود ساده شده	<p>احداث تونل‌های زیرزمینی در نواحی شهری باعث مجاورت ابنیه سطحی با این حفاری‌ها می‌شود. اثرات تغییرشکلی متقابلی بین تونل و ساختمان‌ها در این مرحله ایجاد می‌شود. با توجه به مشخصات پیچیده برخی ساختمان‌های سطحی و نیز رفتار غیرخطی لایه‌های خاک، تحلیل اندرکنش تونل-ساختمان مساله‌ای بسیار چالش برانگیز است. در این مطالعه، یک روش ساده شده بر مبنای تحلیل‌های عددی اجزای محدود دو و سه بعدی، برای برآورد مقادیر تغییر شکل‌های سطحی زمین، تونل و ساختمان ارائه شده است. همچنین مقطع عرضی بیشینه تونل قطار شهری کرمانشاه جهت انجام مدل‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است. ساده‌سازی‌های منطقی و تسهیل کننده‌ای در تعریف اندرکنش تونل-ساختمان برای حل سریع‌تر مساله، ارائه شده است. مقادیر تغییر شکل‌های حاصل شده با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در سایر مراجع معتبر موجود، مقایسه و هم‌سنجی شده است. تطابق خوبی بین نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و یافته‌های عددی این مطالعه مشاهده می‌شود. بر این اساس مدل‌سازی جابجایی قائم اختلافی بین ۱/۴۵٪ تا ۶/۶۷٪ در مقایسه نتایج میدانی معتبر و مدل عددی اجزای محدود دو بعدی بدست می‌دهد. افزون بر آن اختلاف بین نتایج جابجایی کلی مدل حفاری مرحله‌ای تونل زنی NATM در مدل سه بعدی مقاله مرجع و مدل سه بعدی این مطالعه مقدار ناچیز ۷/۱۴٪ حاصل شده است. همچنین یک رابطه ریاضی ساده و کوتاه‌نمایی با دقت بالا (ضریب تعیین بیش از ۰/۹۰) جهت برآورد میزان تغییر شکل‌ها، تلاش‌ها و نیروهای داخلی سیستم پوشش تونل با افزایش سربار ساختمانی سطحی ارائه شده است. یک رابطه ریاضی ساده‌نمایی با روند صعودی افزایشی با دقت برآورد بالا مابین تغییرات پاسخ‌های جابجایی افقی، نشست، تنش برشی، کرنش برشی، تلاش‌های داخلی پوشش بتن مسلح تونل (لنگرخمشی، نیروی برشی و نیروی محوری) و سربار ساختمان سطحی بدست آمده است. از سویی میزان جابجایی‌های افقی توده خاک بالای تاج تونل در حدود ۲۵٪ جابجایی‌های قائم (نشست‌ها) حاصل شده است.</p>

استناد: شمس ملکی، یزدان. (۱۴۰۴). ارائه روشی ساده جهت تخمین تغییر شکل‌های زمین در اندرکنش ساختمان-تونل. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در*

مهندسی عمران، ۲(۱)، ۱-۱۹. DOI: 10.22126/amcen.2025.8376.1001



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

امروزه در مناطق متراکم جمعیتی شهرها، ساخت شریان‌های حیاتی و خطوط حمل و نقل سریع زیرزمینی امری اجتناب ناپذیر است. از سوی دیگر به علت کمبود زمین و فضای کافی در این نواحی، همواره تعدادی از ابنیه‌های ناخواسته در حریم یکدیگر قرار می‌گیرند. برای نمونه هم مکانی تونل‌های زیرسطحی و ساختمان‌های سطحی روی آن‌ها، نمونه‌ای از رخداد این حالات است. فرارگرفتن تونل‌های شهری در مجاورت محل احداث ابنیه و سازه‌های سطحی، گاهی باعث بروز تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های ناایمنی در آن‌ها یا در بستر سازه‌های سطحی می‌شود. این جابجایی‌ها، همه موارد بستر خاکی و سنگی (زیرسازه)، سازه (روسازه) و هم تونل را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در مطالعات پژوهشی حاضر ایران و دنیا، روش‌های مختلفی برای حل مساله اندرکنش تونل-خاک-ساختمان پیشنهاد شده است، که هر کدام فرضیات مشخصی را وارد محاسبات خود می‌کنند. هدف عمده لحاظ فرضیات مختلف، به نحوی ساده سازی مساله پیچیده و بفرنج اندرکنش چندگانه سازه-خاک-تونل است. در واقع اندرکنش‌هایی که در این مساله ایجاد می‌شود می‌تواند در مراحل مختلف مابین خاک و سازه، تونل و خاک، سازه و تونل و یا بین هر سه آن‌ها، نتایج مختلف و مجزایی ایجاد کند. مطالعات ارزشمندی در سال‌های اخیر در این زمینه انجام شده است. برای مثال در مطالعه کمال حاجی و همکاران (۲۰۱۸) [۱] یک رویکرد طره‌ای (تیر کنسولی) جهت برآورد سختی خمشی ساختمان‌های متاثر از تونل سازی ارائه شده است. سختی خمشی ساختمان پارامتر مهمی در تحلیل برهم کنش تونل-خاک-سازه است. در این مقاله، روشی پیشنهاد شده که در آن پاسخ ساختمان به تونل زنی مربوط به خمش یک تیر طره است و روابطی از نوع -تجربی جهت تخمین سختی خمشی ساختمان ارائه شده است. این رهیافت مربوط به حالاتی است که ساختمان عمود بر محور تونل بوده و نزدیکترین لبه آن ساختمان بیش از نیمی از سطح مقطع تونل با آن همپوشانی نداشته باشد. تحلیل دقیق اجزای محدود، برای ارزیابی پاسخ ساختمان‌ها به جابجایی زمین استفاده شده و روابطی ارائه شده که رابطه بین سختی خمشی ساختمان سه بعدی با یک عبارت ریاضی تئوری تیر ساده را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که طبقه‌های پایین

ساختمان دارای اثر سختی نسبتاً بیشتری در مقایسه با طبقه‌های بالایی هستند. در تحقیق سون و کوردینگ^۱ (۲۰۲۰) [۲] برآورد خسارت وارده به ساختمان‌ها در اثر اعوجاج ۳ بعدی به دلیل حفر تونل و تغییر شکل ناشی از حفاری آن، مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مطالعه معیار برآورد آسیب مبتنی بر کرنش دوبعدی را گسترش می‌دهد.

در پژوهش زاخم و النجار^۲ (۲۰۲۰) [۳] بررسی سه بعدی اثر ساختمان‌های جدید متکی بر شالوده گسترده بر رفتار تونل‌های موجود مطالعه شده است. در تحقیق آن‌ها به کمک نرم افزار اجزای محدود PLAXIS یک تحلیل دقیق اجزای محدود سه بعدی انجام شده است، که نشان می‌دهد اندرکنشی مابین تونل قبلی موجود و پی گسترده جدید ایجاد شده است. در مقاله کویی و همکاران^۳ (۲۰۱۹) [۴] مدل‌های مدل‌های کوچک-مقیاس درباره سیستم لاینینگ سگمنتی (پوشش قطعه‌ای) تونل شیلد تحت اثر فشارهای خاک و آب، تحت مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. طبق نتایج آن، پوشش سگمنتی دارای نیروی محوری، لنگر خمشی و خروج از مرکزی بزرگ تری نسبت به تونل با پوشش قطعه‌ای NS است. در مطالعه فرانزا و همکاران^۴ (۲۰۲۰) [۵] مدل‌های تیر تیموشنکو برای تحلیل مزدوج پاسخ ساختمان به حفر تونل بررسی شده است. نظریه تیر تیموشنکو و روش کرنش کششی محدودشونده در برنامه ASRE برای تحلیل پاسخ ساختمان به حفر تونل با استفاده از یک روش تحلیل دو مرحله‌ای ارتجاعی اجرا شده است. همچنین فرانکو و همکاران^۵ (۲۰۱۹) [۶] ارزیابی احتمالاتی خسارت‌های وارده به ساختمان‌ها ناشی از حفاری تونل را ارائه کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند که خصوصیات ارتجاعی زمین و ضخامت لایه فوقانی، بیشترین تأثیر را در حرکات زمین و تغییر مکان ساختمان دارند. همچنین فو و همکاران^۶ (۲۰۱۸) [۷] تحلیل عددی پاسخ قاب‌های سازه‌ای به تونل زنی و تغییرشکل‌های القایی زمین حاصل از حفاری آن را ارزیابی کرده‌اند. پاسخ‌های مختلف از دیدگاه اعوجاج زاویه‌ای،

¹ Son and Cording

² Zakhem and El Naggar

³ Cui et al.

⁴ Franza et al.

⁵ Franco et al.

⁶ Fu et al.

می‌یابد. در مطالعه ژائو و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱] موارد تونل‌سازی مکانیزه مسبب نشست سازه‌های ساختمانی سطحی و طراحی بهینه راهکارهای رفتارسنجی زمانی مساله شامل کاربرد حساسیت اطلاعات میدانی، تحت ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه میرحبیبی و سروش (۲۰۱۳) [۱۲] اثر نوع مدل‌سازی سه بعدی ساختمان بر نشست زمین ناشی از حفاری-تونل دوقلو، مورد ارزیابی عددی قرار گرفته است. برای این منظور اطلاعات مقطع عرضی تونل متروی شهر شیراز بررسی شده است. ساختمان‌ها معمولاً به عنوان تیرهای ارتجاعی در شبیه‌سازی اجزای محدود کرنش صفحه‌ای (FE) اندرکنش ساختمان-تونل مدل می‌شوند. در تحقیق خباز و همکاران (۲۰۱۹) [۱۳] اثرات ساخت تونل دوقلو در زیر ساختمان‌های مسکونی واقع بر پی عمیق شمعی، در محدوده تجاری مرکز شهر سیدنی در استرالیا مطالعه شده است. برای این منظور مدلی اجزای محدود جهت پیش بینی اندرکنش مابین تونل و پی‌های شمعی، توسعه داده شده است. فرآیند ساخت تونل بر حسب توالی ساخت ماشین حفار تونل^{۱۰} یا TBM مدل‌سازی شده است. پس از ترکیب مولفه‌های گوناگون، یک مطالعه فراسنجی^{۱۱} در خصوص رابطه بین محل تونل، زیرزمین‌ها و شمع‌ها انجام شده است. نتایج مقاله نشان می‌دهد که حفاری تونل می‌تواند بارهای محوری و خمشی شمع‌ها را افزایش دهد. در مطالعه ژانگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۵) [۱۴] روش‌های حفاظت از تخریب و ریزش ساختمان‌های تاریخی در محل‌های حفاری تونل، شامل مطالعه موردی تونل متروی شهر ووهان چین ارائه شده است. در این مقاله تأثیر حفاری تونل در توزیع تنش معادل و اصلی با جزئیات تحلیل شده است. نتایج امکان‌پذیر بودن روش پیشنهادی و همچنین پتانسیل کاربرد آن را نشان می‌دهد. در مطالعه میرحبیبی و سروش (۲۰۱۲) [۱۵] اثر ساختمان‌های سطحی بر جایجایی‌های ایجادشده در تونل دوقلو و نشست‌های سطحی زمین به علت اثر ساختمان‌ها بررسی شده است. در این مقاله، نویسندگان نتایج یک مطالعه صحرایی درباره داده‌های خط ۱ متروی شیراز را ارائه و مدل‌سازی‌های عددی دو بعدی را ارائه داده‌اند.

تغییرشکل نسبی افقی و الگوی ترک ناحیه‌ای قاب ساختمانی، در برابر حالت‌هایی با سختی زمین مختلف، پارامترهای فصل مشترک خاک-سازه و پیکربندی‌های مختلف پرشدگی قاب سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در مطالعه گنگ و همکاران^۷ (۲۰۲۰) [۸] اثرات تغییرشکلی منتج از حفاری تونل دوقلوی شهر شانگهای چین بر ساختمان بنایی تاریخی درون این شهر، مستقر بر لایه خاک رس نرم شانگهای، مورد تحقیق قرار گرفته است. نمونه اصلی^۸ آن، خط ۱۱ مترو شانگهای است، که به تازگی در خاک رس شانگهای توسط دو ماشین EPB ساخته شده است. افت حجم نشست سطحی پس از عبور اولین تونل و دو تونل، به ترتیب تقریباً ۰/۵۸٪ و ۱/۰۲٪ مشاهده شده است. کاتبی و همکاران (۲۰۱۵) [۹] اثرات لایه بندی سطح زمین، وجود تونل و سازه‌های سطحی ساختمانی بر بارگذاری‌های رخ داده شده در سیستم لاینینگ تونل شیلد را مطالعه نمودند. برای این منظور از یک مدل اجزای محدود سه بعدی (3D) در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. طبق نتایج این مطالعه، ساختمان‌های سطحی با تعداد طبقات ۵ طبقه و بیشتر، تأثیر زیادی در بارهای لاینینگ، به ویژه در تونل‌های کم عمق دارند. در مطالعه‌ای از ژائو و همکاران^۹ (۲۰۱۹) [۱۰] پاسخ ساختمان‌ها به فرآیند حفاری تونل سطحی کم عمق در انواع مختلف خاک‌ها، تحت مدل‌سازی قرار گرفته است. این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود (FE) پاسخ‌های حاصل از تونل زنی را در انواع گوناگون خاک‌ها بررسی می‌کند. گروه گسترده‌ای از خاک‌ها، در این مطالعه بررسی شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که خاک با مدول ارتجاعی اولیه بزرگ تر، باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر و کرنش‌های افقی در ساختمان می‌شود. همچنین با مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه با نتایج تحلیل دو بعدی 2D، قابلیت اطمینان مدل‌های 2D مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که تفاوت بین نتایج با کاهش طول ساختمان و افزایش عمق تونل و وزن ساختمان افزایش

¹⁰ Tunnel boring machine: TBM

¹¹ Parametric

¹² Zhang et al.

⁷ Gong et al.

⁸ Prototype

⁹ Zhao et al.

سنگین در حدود 1 t/m^2 است. یعنی برای مثال، یک ساختمان ۱۰ طبقه سرباری یکنواخت-سطحی معادل ۱۰۰ کیلو پاسکال درست در سطح زمین خواهد داشت.

برای توزیع واقعی و یکنواخت تنش سربار ناشی از ساختمان، از یک صفحه تحتانی صلب (ارتجاعی) توزیع کننده تنش با طول ۲۰ متر (تقریباً نزدیک به بُعد پی یک ساختمان واقعی) استفاده شده است. سختی این صفحه واسط انتقال تنش سربار، معادل سختی یک پی بتن مسلح در نظر گرفته شده است. یعنی با این ساده‌سازی، قاب سازه‌ای ساختمان (بتنی یا فولادی) از محاسبات مدل عددی حذف شده و فقط سربار معادل آن در ست در محل استقرار خود لحاظ شده است. اما مشخصات تونل، سیستم نگه داری بتن مسلح پیرامونی آن و خاک به طور کامل منطبق بر واقعیت مساله، تعریف و شبیه سازی شده است. تونل انتخاب شده جهت مدل‌سازی‌های فراسنجی این مطالعه، مقطع عرضی - بیشینه تونل قطار شهری کرمانشاه است، که فرآیند اجرای مقطع آن از نوع روش جدید تونل زنی اتریشی^{۱۴} یا NATM است. مشخصات فراسنج‌های سختی و مقاومتی خاک اطراف تونل توسط مدل رفتاری ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب MC تعریف شده است.

۲-۱. بررسی جزئیات مدل‌سازی عددی موضوع تحقیق

در این تحقیق برای مدل‌سازی واقعی تونل در مقاله، از مقطع عرضی واقعی تونل قطار شهری کرمانشاه [۱۹] بهره گرفته شده است.

مدل‌سازی در قالب روش‌های نرم افزاری اجزای محدود دو بعدی (PLAXIS 2D) [۱۷] و سه بعدی (PLAXIS 3D TUNNEL) [۱۸] با دقت بالایی قابل تعریف و انجام است.

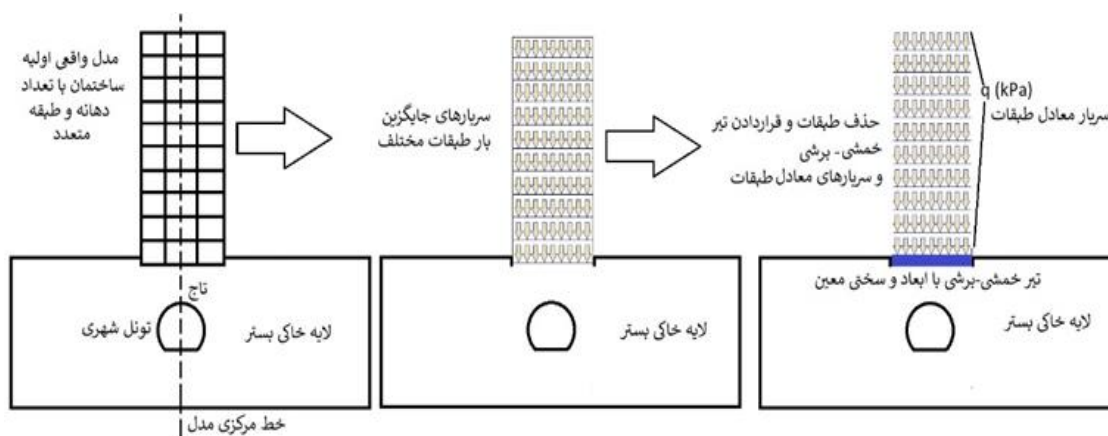
اثرات موارد گوناگونی همانند عمق تونل‌ها و فاصله مرکز تا مرکز آن‌ها، سختی و وزن ساختمان‌ها، عرض و موقعیت آن‌ها، بر سطح بررسی شده است. بر اساس نتایج فراسنج جدیدی با نام "سختی خمشی نسبی" برای ترکیب این عوامل با هم، معرفی شده است. در مقاله یانگ و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۹) [۱۶] پیش بینی و کاهش اثر ارتعاشات ناشی از حرکت واگن‌های قطار زیرزمینی بر مدل بزرگ-مقیاس ساختمان واقع بر بالای تونل مترو، بررسی شده است. یک روش پیش بینی زمانی-فرکانسی دو-مرحله‌ای برای ارتعاشات ناشی از قطار از یک روسازه ارائه شده است. به هر حال، مطابق مطالعات و بررسی‌های جامع صورت گرفته در این زمینه، مساله شبیه سازی اندرکنش تونل-خاک-ساختمان با چالش‌های محاسباتی بسیار زیادی همراه است، که به نحوی هدف عمده مطالعه حاضر کاهش تعداد فراسنج‌های دخیل در این موضوع، از طریق ساده سازی‌های منطقی مختلف مساله تحقیق است. به همین دلیل روشی ساده شده و سریع، برای محاسبه حدود تغییرشکل‌ها و نیروهای داخلی سیستم پوشش تونل در این مقاله، برای مقطع عرضی تونل انتخابی در یک مطالعه موردی واقعی پیشنهاد گردیده است.

۲. روش‌شناسی تحقیق و معرفی مدل‌های مطالعه

در این مطالعه جهت مدل‌سازی کامل مساله اندرکنش ساختمان-تونل-خاک از روشی ساده شده و کاهش یافته بر مبنای تحلیل‌های عددی دو بعدی و سه بعدی اجزای محدود در برخی نرم افزارهای با این توانمندی (برای مثال همانند PLAXIS 2D [۱۷] و PLAXIS 3D TUNNEL [۱۸]) مطابق فرض‌های مندرج در شکل (۱) استفاده شده است. با توجه به اینکه تمرکز مدل‌سازی‌های این تحقیق بر رفتار تغییرشکل-جابجایی توده خاک بستر و تاج-تونل و تلاش‌های داخلی در سیستم نگه داری بتن مسلح تونل است، اثر ساختمان به طور کلی با یک بارگذاری معادل یکنواخت سطحی جایگزین شده است. به طوری که به ازای هر طبقه از مدل‌های ساختمان، یک سربار معادل روی سطح خاک جایگذاری شده است. این سربار برای هر طبقه معادل 10 kPa است، که برابر سربار نسبتاً

¹⁴ New Austrian tunneling method: NATM

¹³ Yang et al.



شکل ۱. تعریف فرضیات ساده کننده مساله اندرکنش تونل و ساختمان سطحی با تعداد دهانه و طبقات مختلف

اولین ایستگاه شروع فاز دوم پروژه در قسمت زیرزمینی آن است. همچنین ایستگاه انتهایی بخش زیرزمینی ایستگاه M13 در میدان فردوسی در محدوده ی جنوب جغرافیایی شهر کرمانشاه است. از سوی دیگر در حدفاصل ایستگاه M1 تا M6 پروژه مطابق طراحی‌های قبلی، به صورت روزمینی (اجرای ستون-پایه و عرشه‌های بتن مسلح) اجرا شده است. از المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای برای مش بندی مدل تونل و به ویژه خاک پیرامون آن استفاده شده است.

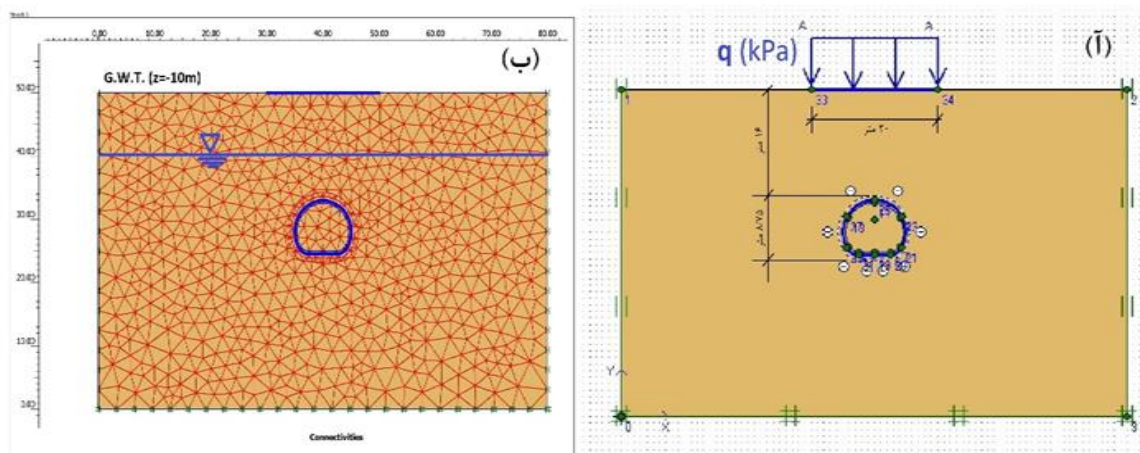
مدل عددی ساده شده اجزای محدود مقطع عرضی بیشینه تونل مطالعه موردی (قطار شهری کرمانشاه)، در شکل (۳) نمایش داده شده است. بر اساس شکل (۳) سربار q بر حسب کیلوپاسکال معادل وزن ساختمان‌های سطحی با تعداد طبقات مختلف است، که برای هر طبقه در حدود ۱۰ kPa (معادل حدود 1 ton/m²) تنظیم شده است. شرایط مرزی مدل، شامل تکیه‌گاه غلطکی در کناره‌ها و تکیه‌گاه مفصلی در کف مدل عددی دو بعدی کرنش-مسطح است. در طرح قطار شهری کرمانشاه، ایستگاه چهارراه بسیج (ایستگاه M7)



شکل ۲. مقایسه تصویر ماهواره‌ای و نیز مسیر روزمینی-زیرزمینی ایستگاه‌های ۱۳ گانه قطار شهری کرمانشاه [۱۹]

عرضی-بیشینه پیشنهادی تونل قطار شهری شهر کرمانشاه نشان شده است. بر اساس آن، ارتفاع کلی (قطر) داخل تونل ۸/۷۵ متر، ارتفاع سربار خاکی روی آن ۱۶ متر، عمق آب زیرزمینی در ژرفای ۱۰ متری از سطح زمین و مصالح پوشش تونل از نوع بتن مسلح با دو ضخامت مختلف فرض شده است [۱۹].

گام‌های مدل‌سازی تعریف لایه خاک، حفاری بخش‌های داخلی تونل NATM و تعریف سربارها و پوشش بتنی تونل در ۱۰ مرحله متوالی در نرم افزار انجام شده است [۱۹]. این ۱۰ مرحله شامل بخش‌های تعریف مدل خاک، سطح آب زیرزمینی (سطح ایستابی)، ایجاد سربار معادل سازه سطحی، حفاری بخش‌های مختلف مقطع عرضی تونل NATM است. در این قسمت و در شکل (۴) مقطع



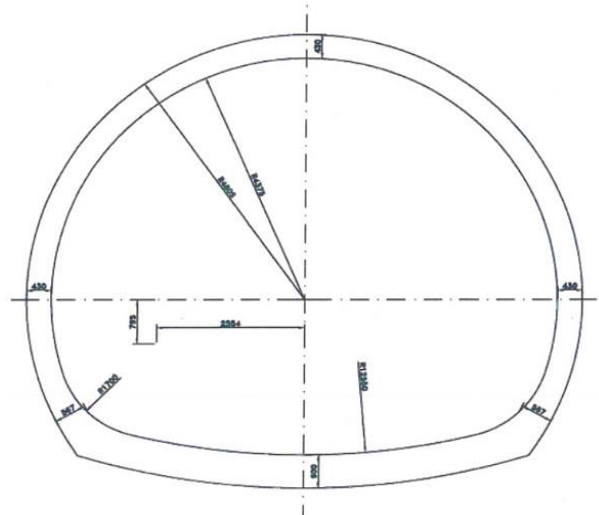
شکل ۳. مدل‌سازی ساده شده دو بعدی: (ا) ابعاد کلی مدل تونل نعل اسبی، (ب) شرایط مرزی و مش بندی اجزای محدود آن

است. مطابق این یافته اکتشافی، لایه‌های زیرسطحی خاک در طول مسیر حفاری تونل عموماً متشکل از رس لاغر CL، شن رس دار GC و ماسه رس دار SC با سطح آب زیرزمینی بالا و نسبتاً بالا است [۱۹]. مساله مهم در پروفیل‌طولی زیرسطحی این پروژه، درجه اشباع بالای لایه‌های خاک در غالب مسیر حفاری زیرزمینی و وجود تراز آب زیرزمینی مشخص در بیشتر طول مسیر پروفیل طولی پروژه است. این موضوع باعث نشست شدید آب در مقاطع حفاری شده در حین عملیات اجرای تونل NATM شده است، که به نوبه ی خود روند ادامه حفاری را با دشواری مواجه کرده است. همچنین مطابق پروفیل طولی نمایش داده شده در شکل (۵) تراز ارتفاعی بین ایستگاه شروع حفاری تونل M7 تا ایستگاه پایان حفاری M13 افزایشی است و نشان از کاهش طبیعی و ناخواسته مقادیر سربار

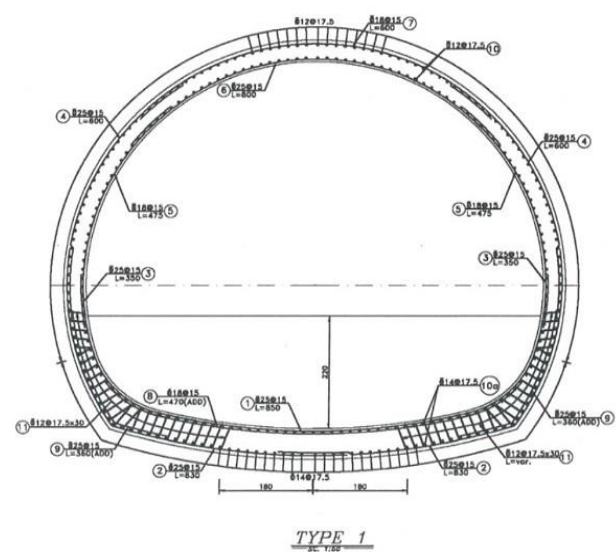
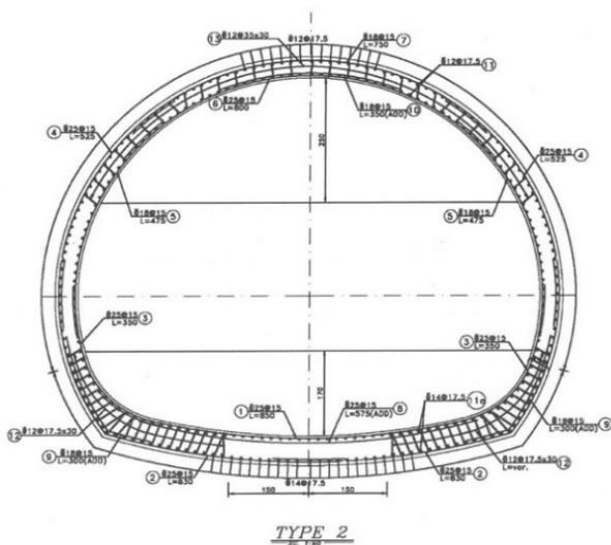
مطابق شکل (۴) ضخامت پوشش بتن مسلح تونل در بخش طاق (تاج تونل) و سقف تونل ۴۳ cm و در بخش کف تونل ۶۰ cm منظور شده است. این مقاطع با ضخامت‌های ذکر شده، بر حسب مصالح بتن مسلح شده با شبکه میلگرد، طراحی و اجرا شده‌اند. جایگذاری آرماتورهای لازم برای مقابله با بارهای محوری، برشی و لنگر خمشی، در این ضخامت‌های بتنی انجام شده است. در ادامه، در بخش‌های پایینی شکل (۴) نمونه‌ای از آرماتورگذاری پیشنهادی حساب شده (موردنیاز) تیپ ۱ و تیپ ۲ (بر اساس ترکیبات بارگذاری مختلف وارد بر تونل) برای مقطع عرضی تونل بر اساس آرماتور محاسباتی مقاطع سه گانه را نشان می‌دهد [۱۹]. در شکل (۵) پروفیل طولی زیرسطحی زمین در طول ۵/۵ کیلومتر بخش زیرزمینی قطار شهری از ایستگاه M7 تا M13 به نمایش درآمده

مقادیر ۱۴۰۰ متر در جنوب شهر (آخرین ایستگاه حفاری تونل) در تغییر است.

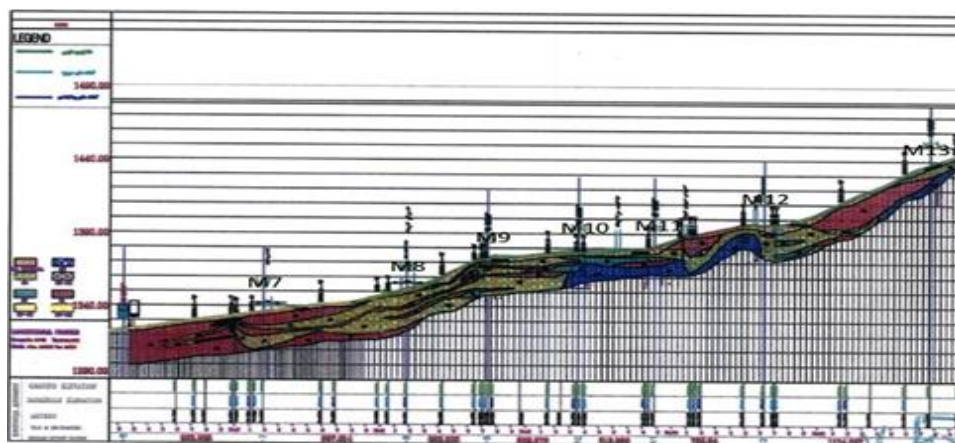
لایه‌های خاک سطحی (کاهش ضخامت آبرفت) در مسیر تونل از مرکز به بخش جنوب شهر کرمانشاه دارد. تغییرات این تراز ارتفاعی از حدود ۱۳۰۰ متر (بالای سطح دریای آزاد) در مرکز شهر تا حدود



هندسه مقطع پیشنهادی برای سازه تونل NATM



شکل ۴. در بالا مقطع عرضی طراحی شده (راست) و (چپ) اجرا شده در تونل نعل اسبی NATM بخش زیرزمینی قطار شهری کرمانشاه و پایین: آرماتورگذاری پیشنهادی (راست) تیپ ۱ و (چپ) تیپ ۲ برای مقطع عرضی تونل بر اساس آرماتور محاسباتی مقاطع سه گانه تونل [۱۹]



شکل ۵. پروفیل طولی زمین‌شناسی و زیرسطحی مسیر تونل قطار شهری مابین ایستگاه‌های فاز دوم M7 تا M13 [۱۹]

مطابق این شکل با افزایش سربار از حالت میدان-آزاد (یا $q=0$) تا حالت ساختمان ۱۰۰ طبقه (سربار ۱۰۰۰ kPa) مقادیر نشست‌ها افزایش یافته و محل-علامت (راستای) تغییرشکل‌های غالب در کف و تاج تونل، عوض می‌شود. به طوری که تغییرشکل‌های تورمی کف تونل با افزایش سربار ساختمان سطحی کاهش یافته و به مقادیر نشست‌های رو به پایین بالای سقف تونل افزوده می‌گردد. میزان نشست‌های مدل میدان-آزاد (بدون لحاظ سرباره سازه) از حدود ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر شروع می‌شود (نشست‌های بالای حفاری تونل در اثر وزن خود لایه‌های خاکی) و برای سربار سازه ۱۰۰ طبقه (معادل بار ۱۰۰۰ kPa)، مقادیر نشست به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد. این بدین معنی است که ساختمان بلندمرتبه ۱۰۰ طبقه می‌تواند در مقایسه با حالت عدم وجود سربار ساختمان سطحی، باعث افزایش نشست‌ها در لایه خاک بالای تونل تا حد ۹۰۰٪ (۹ برابر) شود. از سویی مطابق کانتورهای رنگی درون شکل (۶) با افزایش تنش سربار سطحی، تمرکز جابجایی‌های قائم در تاج تونل نسبت به کف تونل افزایش می‌یابد.

۲-۲. پارامترهای مدل‌سازی خاک و مقطع عرضی تونل NATM و بررسی خروجی‌های گرافیکی تحقیق

در جداول (۱) و (۲) پارامترهای مدل‌سازی توده خاکی اطراف تونل در مقاله حاضر که منطبق بر معیار مقاومت برشی مور-کولمب هستند، ارائه شده است. زاویه اتساع خاک در این مدل‌سازی برابر صفر درجه فرض شده است، چرا که توده‌های خاکی مهم در مسیر تونل مقادیر بالایی از زاویه اصطکاک داخلی را نشان نمی‌دهد و فرض قانون جریان خمیری ناهمراه^{۱۵} (یعنی NAFR) با تقریب خوبی همراه است. از سوی دیگر در جدول (۱) بار روباره (سربار) وارد بر سازه تونل که توسط روش پیشنهادی ترزاقی محاسبه شده، هم ارائه شده است. از سویی علت استفاده از مدل مور-کولمب این است که هدف اساسی این مطالعه بر شبیه‌سازی ساده شده رفتار اندرکنشی خاک-تونل-ساختمان معطوف شده است و موضوعات مرتبط با مدل رفتاری و میزان دقت آن در تخمین میزان واقعی این اندرکنش محل تمرکز مطالعه حاضر نیست.

در شکل (۶) نمونه منحنی‌های کانتوری جابجایی عمودی (نشست) لایه خاک اطراف و بالای تونل (بخش تاج تونل) در اثر اعمال سربارهای مختلف معادل سازه‌های سطحی نمایش داده شده است.

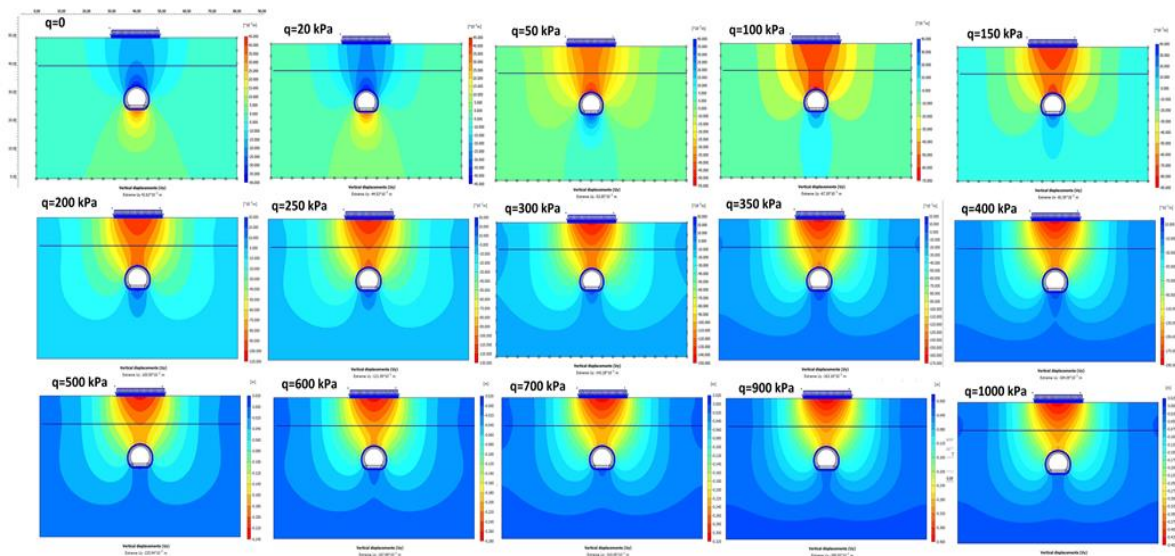
¹⁵ Non-associated flow rule (NAFR)

جدول ۱. جدول بار وارد بر سازه تونل نعل اسبی در مقاطع مختلف طراحی آن بر اساس روش محاسباتی ترزاقی [۱۹]

مقطع تونل	روباره بر حسب متر (ارتفاع مصالح)	چگالی طبیعی خاک (ton/m ³)	چسبندگی خاک (ton/m ²)	زاویه اصطکاک داخلی خاک (deg)	ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون (K ₀)	ارتفاع زون سست شده (به متر)	بار محاسبه شده توسط روش ترزاقی (ton.m ²)
مقطع ۱	۸/۰	۱/۹۱	۳/۲۰۰	۲۵/۸۸	۰/۵۶	۸/۰۰	۱۵/۲۸
مقطع ۲	۱۴/۵	۱/۹۷	۲/۰۰۰	۲۶/۶۸	۰/۵۲	۱۰/۰۰	۱۹/۷۰
مقطع ۳	۲۱/۰۹	۲/۰۶	۱/۰۳۲	۳۲/۰۰	۰/۴۷	۱۳/۲۲	۲۷/۲۳

جدول ۲. مشخصات لایه های مختلف خاکی متلاقی با مسیر تونل قطار شهری در حدفاصل ۱/۵ کیلومتر ابتدایی آن [۱۹]

ردیف	واحد زمین شناسی بر اساس USCS	حدود چگالی طبیعی خاک γ_t (g/cm ³)	چسبندگی خاک C (kg/cm ²)	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (deg)	ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون $K_0=1-\sin \phi$	نسبت پواسون ν (-)	مدول ارتجاعی E (MPa)
۱	CL (SPT \leq 32)	۱/۶۷-۱/۸۹	۰/۳۲-۰/۳۹	۲۲-۲۴	۰/۶۱	۰/۳۸	۹/۶۰
۲	CL (SPT $>$ 32)	۱/۷۸-۱/۹۴	۰/۲۵-۰/۳۹	۲۲/۵-۲۵/۵	۰/۵۹۳	۰/۳۷	۱۵/۰۰
۳	GC (SPT $>$ 50)	۱/۹۸-۲/۲۳	۰/۰۲-۰/۰۹	۳۲/۵-۳۵/۰	۰/۴۴	۰/۳۱	۶۷/۲۰
۴	GC (SPT \leq 50)	۱/۹۵-۲/۰۰	۰/۰۱-۰/۰۶	۳۱/۵-۳۲/۵	۰/۴۷	۰/۳۲	۴۳/۲۰
۵	SC (SPT $>$ 50)	۲/۰۱-۲/۰۶	۰/۰۳-۰/۰۷	۳۳/۰	۰/۴۵	۰/۳۱	۲۰/۸۰
۶	SC (SPT \leq 50)	۱/۹۵-۲/۰۸	۰/۰۵-۰/۰۶	۳۱/۵-۳۲/۵	۰/۴۷	۰/۳۲	۱۴/۴۰
۷	GP	۲/۱۵-۲/۲۴	۰/۰-۰/۰۱	۳۶/۰-۳۶/۵	۰/۴۱	۰/۲۹	۱۳۷/۵۰

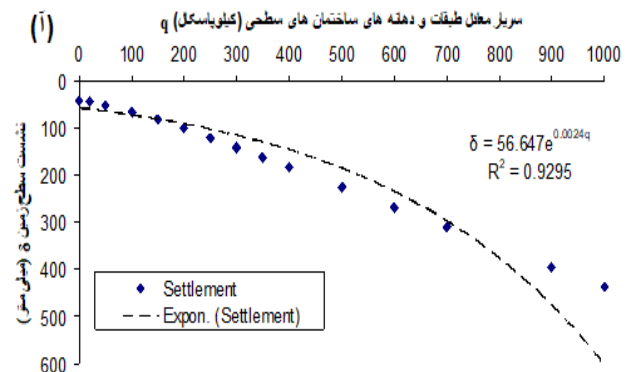
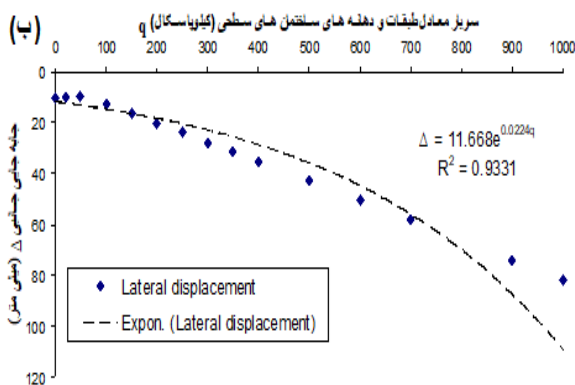


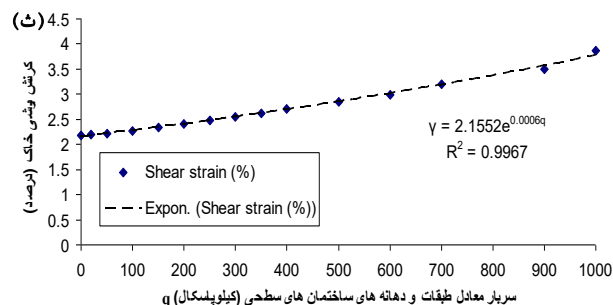
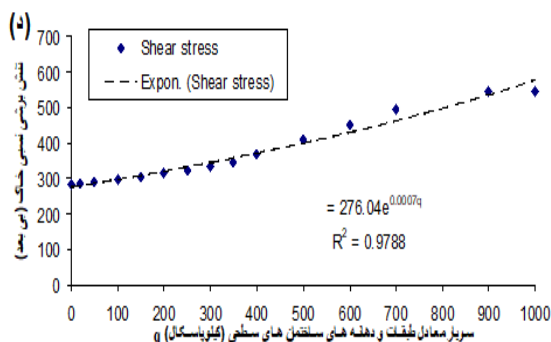
شکل ۶. نمونه منحنی‌های کانتوری جابجایی عمودی (نشست) لایه خاک اطراف تونل در اثر اعمال سربارهای مختلف معادل سازه‌ها

۳. تحلیل و تفسیر نتایج تحقیق

بیشینه مقدار حدود ۱۰۰ میلی متر را نشان می‌دهد، که حدود ۲۵٪ بیشینه مقدار جابجایی قائم مدل (نشست) است. این مقدار از جابجایی افقی برای ساخت و ساز طبقات منفی در ساختمان‌های بلندمرتبه آتی در مجاورت تونل قطار شهری، مشکل ساز خواهد بود و قطعاً باعث رانش و حرکت جانبی دیواره‌های خاکی خواهد شد. بر حسب شکل ۷-ج) کرنش برشی بیشینه در خاک مجاور تونل برای تغییرات سربار سطحی از صفر تا 1000 kPa از حدود ۲٪ تا ۴٪ در قالب یک تابع نمایی افزایشی (صعودی) تغییر است. افزون بر آن تنش برشی متناظر با این کرنش‌های برشی در شکل ۷-د) از مقدار 300 kPa تا 600 kPa در تغییر افزایشی-صعودی است، که همانند فراسنج کرنش برشی محدوده تغییرات چندان بزرگی را نشان نمی‌دهد. آنچه که در همه نمودارهای جابجایی، تنش-کرنش برشی در شکل ۷ پدیدار و آشکار است، موضوع دقت بالای تابع نمایی ساده پیشنهادی جهت تقریب تغییرات افزایشی هر یک از این فراسنج‌ها است. آنچه که در همه بخش‌های شکل (۷) به صورت بدیهی قابل ملاحظه است این است که روند تغییرات جابجایی‌ها نسبت به تغییرات تنش و کرنش برشی با اثر سربار بسیار تندتر و ملموس‌تر است.

مطابق شکل (۷) نمودارهای مختلف پاسخ خاک روباره تونل به ازای تغییر در تنش سربار ساختمان‌های مدل در سطح زمین (مقادیر معادل ساده شده) برای فراسنج‌های متفاوت نشست، جابجایی جانبی (افقی)، کرنش برشی و تنش برشی ارائه شده است. بر اساس یافته‌های این شکل، در غالب موارد مورد مطالعه، یک رابطه ریاضی تابع نمایی با دقت برازش بالا (با ضریب تعیین R^2 نزدیک به عدد بدست آمده است. خوشبختانه این رابطه نمایی برای همگی فراسنج‌ها قابل محاسبه است و فقط مقادیر کمی ضرایب و توان‌های آن متفاوت است. در شکل ۷-آ) نمودار نمایی نشست سطح زمین در برابر تغییرات افزایشی سربار ساختمان سطحی ترسیم شده است. بر اساس این نمودار محدوده نشست‌ها بین ۴۰ میلی متر تا حدود ۴۵۰ میلی متر در تغییر است. این نمودار نشان می‌دهد که برای ساخت و سازهای آتی تا حد سربار ساختمان بلندمرتبه ۴۰ طبقه، میزان نشست در حدود ۲۰۰ میلی متر خواهد بود. و با افزایش تعداد طبقات از ۴۰ تا ۱۰۰ طبقه (برای ۶۰ طبقه اضافی بعدی مفروض) این مقدار رشدی حدود دو برابری و تا حد ۴۰۰ تا ۴۵۰ میلی متر خواهد داشت. از سویی مطابق نمودار برازش داده شده در شکل ۷-ب) جابجایی جانبی (افقی) لایه خاک بالای تاج تونل

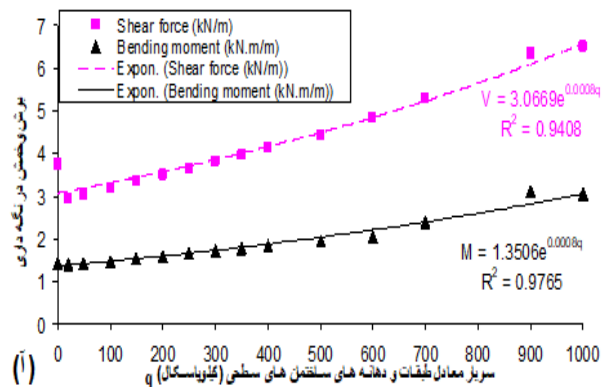
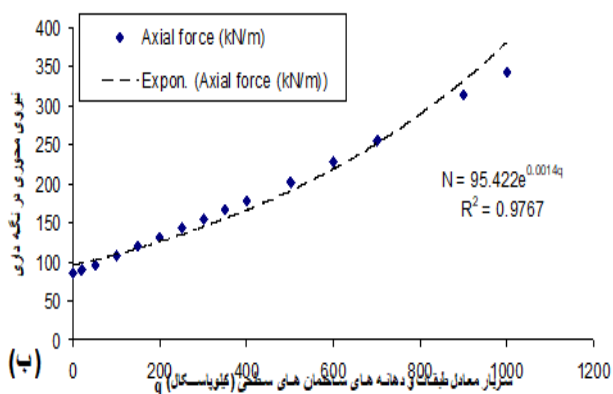




شکل ۷. نمودار نمایی پارامترهای پاسخ خاک روباره تونل به ازای تغییر در تنش سربار ساختمان: (آ) نشست، (ب) جابه جایی جانبی، (ج) کرنش برشی، (د) تنش برشی

مطابق شکل ۸-آ) تغییرات نیروی برشی سیستم بتن مسلح پوشش تونل از حدود ۳ kN/m تا ۷ kN/m در تغییر است. از طرفی مقادیر لنگر خمشی پوشش بتن مسلح تونل (در واحد طول تونل) نیز بین مقادیر ۱/۳ kN.m/m تا ۳ kN.m/m در تغییر است. تابع برازش این دو فراسنج نیز نمایی و صعودی با دقت تقریب بالا است. نمودار مشابهی در شکل ۸-ب) برای تغییرات نمایی نیروی محوری پوشش بتن مسلح تونل بدست آمده است.

به طور مشابهی در نمودارهای شکل ۸) تغییرات مقادیر سربار ساختمان سطحی واقع بر روی تونل در مقابل نیروهای داخلی سیستم نگه داری (پوشش بتن مسلح تونل زیرزمینی) شامل شکل ۸-آ) نیروی برشی و لنگر خمشی و در شکل ۸-ب) نیروی محوری در واحد طول تونل ترسیم شده است. مطابق این شکل، بازهم می‌توان با تعریف یک رابطه ساده و کوتاه نمایی با دقت برازش بسیار بالا (ضریب تعیین R^2 بیش از ۰/۹۴)، ارتباط ریاضی بین نیروی برشی و لنگر خمشی و نیز نیروی محوری درون پوشش تونل با مقادیر تغییرات افزایشی سربار ساختمان‌های سطحی برقرار کرد.



شکل ۸. تغییرات سربار سطحی در مقابل نیروهای پوشش تونل: (آ) نیروی برشی و لنگر خمشی، (ب) نیروی محوری

و آکپینار^{۱۸} داده شده است [۲۰]. مورد مهم آنست که ویژگی‌های مقاومتی هر دوی این توده‌های سنگی به هم نزدیک بوده و هر دو جنس سنگ، بسیار ضعیف با معضل ایجاد خواص منفی تورم^{۱۹} و مچاله شوندگی^{۲۰} به ترتیب در کف و سقف تونل همراه‌اند. اما با توجه به شرایط تونل و اطلاعات مندرج در مطالعه مرجع [۲۰] و این که عمده ترک‌ها و تغییر شکل‌ها در دیواره سمت راست تونل که از سنگ نوع پورسوک تشکیل شده، اتفاق افتاده است، پس مشخصات مقاومتی این نوع سنگ برای اطمینان جهت مدل‌سازی توده سنگی در نرم افزار بکار گرفته شده است [۲۰]. در مرجع انتخابی [۲۰] مدل‌سازی تونل با شیوه تونل زنی NATM در توده سنگی درزه دار در ۱۱ مرحله (۱۱ فاز محاسباتی مجزا و متوالی) انجام شده است، که دقیقاً همان ۱۱ مرحله با رعایت ترتیب فازها در مدل‌های دو و سه بعدی اجزای محدود صحت سنجی مطالعه حاضر دوباره شبیه سازی و اجرا شده‌اند. اثرات زیست محیطی منفی ناشی از ساخت سد ارائه می‌کند. در واقع نوآوری این پژوهش ارزیابی اثرات زیست محیطی سد آبرده به روش ماتریس لئوپولد ایرانی می‌باشد. جدول ۲، مقایسه ماتریس‌های گوناگون را نشان می‌دهد. هدف بخش صحت سنجی مقاله، کنترل کمی و کیفی مدل‌سازی عددی دو بعدی تونل NATM و نیز بررسی درستی نتایج و عملکرد نرم افزار [۱۷] است. مقطع عرضی تونل و روش تعریف حفاری آن کاملاً شبیه تونل مورد بررسی در تحلیل‌های بخش‌های قبلی این مقاله است. مقادیر تغییر شکل‌های قائم و کلی تاج و کف تونل در مدل‌سازی‌های مرجع [۲۰] و نیز قسمت حاضر از تحقیق موضوع اصلی مورد بررسی بوده است. در مرجع [۲۰] جابجایی عمودی تونل بعد از نصب نگه داری نوع NDSS بین "۱۳۸ تا ۱۵۰ میلی متر" بیان شده، که در تحلیل دو بعدی مطالعه حاضر مطابق شکل (۱۰) مقدار بیشینه برابر ۱۴۰ mm حاصل شده است. همچنین میزان بیشینه جابجایی قائم از اندازه گیری‌های پایش میدانی ۱۵۰ mm [۲۰] مشخص شده که در نتایج مقاله حاضر نیز میزان ۱۰ mm (با طیف رنگ سرد-آبی) و تقریباً ۱۴۰ mm (با رنگ گرم-قرمز) بدست آمده است، که هماهنگی و

۴. صحت سنجی مدل عددی اندرکنش تونل-لایه خاک

برای صحت سنجی مساله مدل تونل NATM و بررسی درستی مدل‌سازی‌های نرم افزاری اجزای محدود [۱۷] مدل میدانی-عددی متناسبی از یک مقاله مرجع [۲۰] شامل نوع تونل با شرایط تونل زنی مشابه NATM انتخاب شده است. در مقاله مرجع انتخابی [۲۰] گام‌های حفر تونل NATM کاملاً مدل‌سازی شده، همچنین مدل رفتاری بکاررفته در مطالعه مرجع [۲۰] دقیقاً مشابه مدل مور-کولمب است، با این تفاوت که بر مبنای مدل مور-کولمب جهت لحاظ شرایط توده سنگی درزه دار بسط و تعمیم داده شده است. در مقاله مرجع انتخابی برای صحت سنجی نتایج میدانی [۲۰] مدل سنگ درزه دار^{۱۶} JRM بکار رفته است. مدل سنگ درزه دار JRM یک مدل الاستوپلاستیک کامل انیزوتروپیک (ناهمسانگرد) است [۲۰]. در مدل JRM شکست مصالح توده سنگی درزه دار به کمک فرانسج‌های مقاومتی مدل الاستوپلاستیک کامل مور-کولمب تعریف می‌شود، که این فرانسج‌ها شامل چسبندگی C، زاویه

اصطکاک داخلی ϕ و زاویه ی اتساع λ خاک هستند. افزون بر آن فرانسج‌های معرف سختی خاک در JRM همان فرانسج‌های مدل الاستیک (ارتجاعی) از قبیل مدول ارتجاعی E و نسبت پواسون ν هستند (فرانسج‌های E_1 و ν_1). در مدل JRM به منظور تعریف فرانسج‌های سختی خاک در صفحه عرضی ناهمسانگردی (انیزوتروپی) از مدول الاستیک، نسبت پواسون و مدول برشی با زیرنویس شماره ۲ استفاده می‌گردد (یعنی فرانسج‌های E_2 ، ν_2 و G_2). همچنین جهت تعریف صفحات ناهمسانگردی در توده سنگ درزه دار، تا میزان ۳ صفحه مختلف توسط تعریف زاویه شیب صفحه درزه یا زاویه ی α_1 و زاویه جهت شیب صفحه درزه α_2 در این مدل رفتاری قابل تعریف هستند.

۴-۱. ارائه جزئیات مدل‌سازی و نتایج خروجی حاصل از مدل صحت

سنجی تحقیق

در جدول (۱) فرانسج‌های توده سنگ ضعیف درزه دار مقاله مرجع [۲۰] برای دو جنس سنگ موجود در مدل تونل پورسوک^{۱۷}

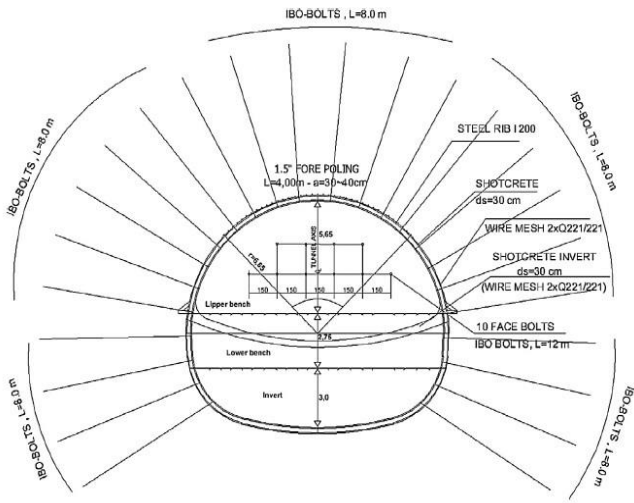
¹⁸ Akpinar

¹⁹ swelling

²⁰ squeezing

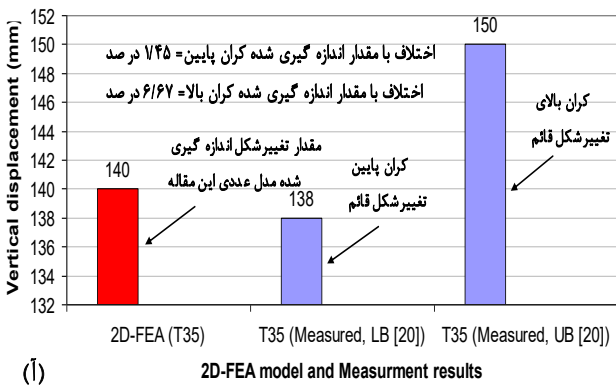
¹⁶ Jointed Rock Mass Model: JRM

¹⁷ Porsuk



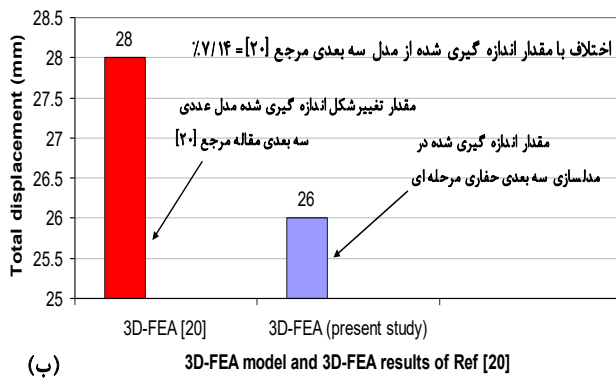
شکل ۹. سیستم نوین پوشش (نگه داری) بدون-تغییرشکل طراحی شده در تونل T35 جهت صحت سنجی مقاله حاضر

توافق بسیار مناسبی را با نتایج میدانی (صحرائی) حاصل از اندازه گیری‌های محلی مقاله مرجع [۲۰] بدست می‌دهد. بر این اساس مطابق شکل ۱۰- (آ) و نتایج گرافیکی کانتوری شکل (۱۱) اختلاف بین نتایج عددی اجزای محدود دو بعدی این مقاله برای جابجایی قائم مدل با مقادیر میدانی اندازه گیری شده کران بالا برای تونل مدل واقعی T35 مرجع [۲۰] برابر ۶/۶۷٪ و با مقادیر میدانی اندازه گیری شده کران پایین آن اختلاف آن به میزان ۱/۴۵٪ است. از طرفی مطابق نتایج مندرج در شکل ۱۰- (ب) و نیز نتایج کانتوری موجود در شکل (۱۲) اختلاف بین نتایج تحلیل اجزای محدود سه بعدی مقاله مرجع [۲۰] برای مقطع عرضی تونل T35 و نتایج اجزای محدود سه بعدی این مطالعه برای تغییر شکل کلی مدل در روند شبیه سازی پیشرفت گام به گام حفاری مرحله‌ای روش تونل زنی NATM (حفاری مرحله‌ای بخش‌های تاج^{۲۱} (کراون)، بنج^{۲۲} و اینورت^{۲۳} مقطع عرضی بیشینه تونل) برابر مقدار ناچیز ۷/۱۴٪، بدست آمده است. نتایج تحلیل‌های سه بعدی شکل (۱۲) هم رضایت بخشی خوبی دارند.



جدول ۳. مشخصات توده های سنگی در حال حفاری در مطالعات فراسنجی مطالعه مرجع [۲۰] و جهت صحت سنجی نتایج حاضر

مدل رفتاری JRM (جهت صحت سنجی)	یکای فراسنج ها	فراسنج های مدل های رفتاری مصالح
	$E_1=86.15, E_2/G_2=2.64$	مدول (ضریب ارتجاعی) E(MPa)
	γ_t و γ_{sat} (kN/m ³) (kN/m ³)	وزن مخصوص اشباع و مرطوب (طبیعی)
	$C_1=0.068, C_2=0.072$	چسبندگی C (kPa)
	$\phi_1=31, \phi_2=24$	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (deg)
	$\nu_1=0.29, \nu_2=0.32$	نسبت پواسون ν (-)
	$K_0=0.408$	ضریب فشار جانبی حالت عادی تحکیم NC
	$\alpha_{1,1}=66, \alpha_{2,1}=22, \alpha_{1,2}=70, \alpha_{2,2}=40.0$	شیب/جهت شیب درزه ها (α_1, α_2)
	$UCS=0.115$	مقاومت فشاری تک محوری UCS (MPa)

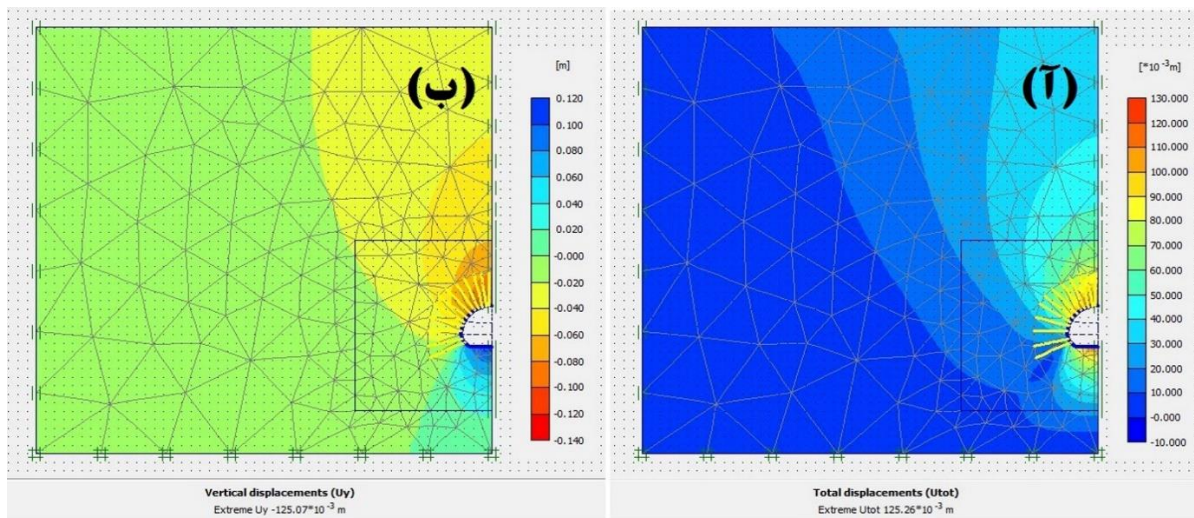


شکل ۱۰. مقایسه اختلاف بین نتایج: (آ) جابه جایی قائم اجزای محدود دو بعدی این مطالعه و اندازه گیری شده مرجع [۲۰]؛ (ب) نتایج جابه جایی کل مدل سه بعدی این مقاله و مدل سه بعدی مقاله مرجع [۲۰]

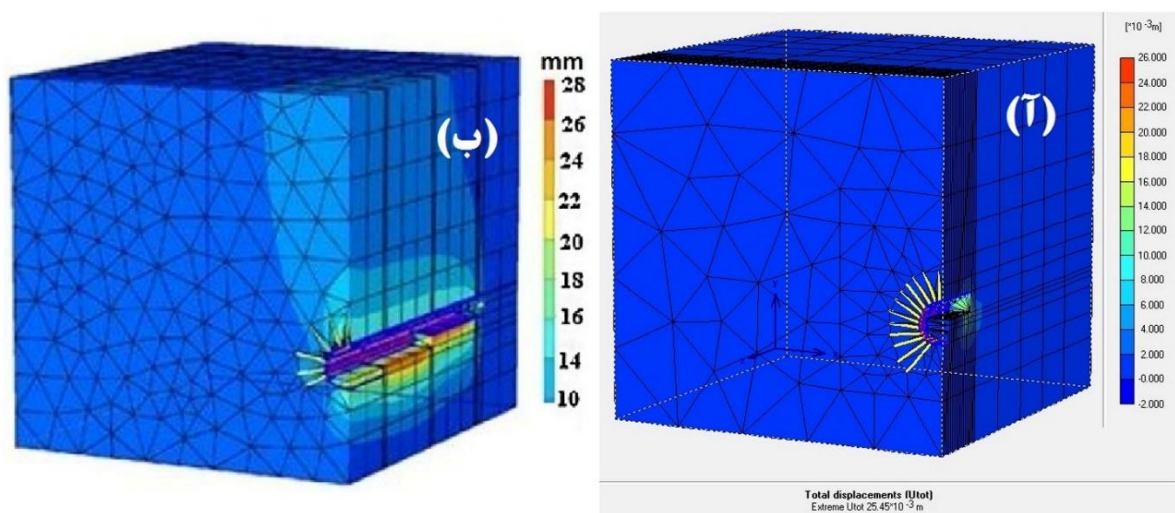
²¹ Crown
²² Bench
²³ Invert

جدول ۴. مشخصات المان‌های سازه‌ای موجود در مدل‌های عددی اجزای محدود دو و سه بعدی [۲۰].

مصلح	نوع رفتار	سختی محوری EA (kN/m)	سختی خمشی EI (kN.m ² /m)	وزن واحد طول w (kN/m/m)	نسبت پواسون ν (-)
شاتکریت بتنی	ارتجاعی خطی	۱۳۲۸۰۰۰۰	۱۷۷۰۶۶	۹/۶	۰/۱۵
راک بولت (پیچ سنگ)	ارتجاعی خطی	۵۶۷۰۰	-	-	۰/۱۵



شکل ۱۱. تغییر مکان (آ) کلی و (ب) قائم برای تونل T35 (بین ۱۳/۸ تا ۱۵/۰ سانتی متر در تاج) [۲۰] توسط روش اجزای محدود دو بعدی



شکل ۱۲. تغییر مکان (آ) کلی (نتیجه مطالعه حاضر) و (ب) کلی (از مرجع [۲۰]) برای تونل T35 توسط روش اجزای محدود سه بعدی

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدلی ساده شده از اندرکنش یک تونل با حفاری و ساخت به روش NATM و سربار ساختمان سطحی ارائه شده است. مدل‌سازی‌های عددی دو و سه بعدی در قالب روش مرسوم اجزای محدود [۱۸ و ۱۹] برای این منظور بکار گرفته شده‌اند. برای ساده‌سازی مساله اندرکنش تونل-خاک-ساختمان، مدل ساختمان‌های چند طبقه سطحی با سربار سطحی معادل خود جایگزین شده است. مقطع تونل مورد بررسی تونل نعل اسبی NATM پروژه قطار شهری کرمانشاه است. مدل رفتاری ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب برای مدل‌سازی توده‌های خاک اطراف تونل بکار رفته است. بر اساس یافته‌های این مطالعه نتایج اساسی زیر قابل بیان هستند:

۱- نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رابطه‌ای نمایی، صعودی-افزایشی و ساده با دقت قابل قبول مابین سربار ساختمان‌های سطحی مختلف و نیز تغییر شکل‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های برشی خاک و تلاش‌ها-نیروهای داخلی شامل لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری سیستم در پوشش بتن مسلح تونل وجود دارد.

۲- مدل رفتاری مور-کولمب با توجه به فرض قانون جریان ناهمراه (غیروابسته) جهت تخمین اولیه پاسخ اندرکنشی تونل-ساختمان سطحی- خاک انتخاب مناسبی است.

۳- مقایسه نتایج مدل‌سازی‌های صحت‌سنجی و راستی‌آزمایی روش اجزای محدود دو بعدی انتخابی مدل تونل NATM این مطالعه (یعنی رویکرد عددی 2D-FEA) و اندازه‌گیری‌های مقاله مرجع با شرایط کاملا نزدیک و مشابه مدل پارامتری این مقاله، برای پارامتر مهم جابجایی قائم (نشست) مدل مقطع عرضی بیشینه تونل T35 بین ۱/۴۵٪ تا ۶/۶۷٪ اختلاف را نشان می‌دهد، که مقداری ناچیز و به خوبی قابل قبول است. این اختلاف ناچیز دقت بسیار مناسب سایر مدل‌سازی‌های عددی این مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- مقایسه نتایج صحت‌سنجی تحلیل‌های اجزای محدود سه بعدی این مطالعه و مقاله مرجع اختلافی حدود ۷/۱۴ درصد را نشان می‌دهد. این اختلاف با توجه به جزئیات متعدد مدل‌سازی‌های عددی اجزای محدود سه بعدی 3D-FEA مدل واقعی تونل T35 بسیار ناچیز و کاملا قابل اغماض است.

۵- مطابق یافته‌های این مطالعه، میزان جابجایی قائم (نشست) توده خاک بالای تاج تونل که یک تغییرات افزایشی نمایی با افزایش سربار سطحی دارد، در مدل‌های عددی این مطالعه حدود ۴ برابر جابجایی‌های افقی بدست آمده است. علت عمده این مساله اثر تنش‌های محصورکننده افقی در توده خاک نسبت به تنش‌های قائم ثقلی (وزنی) سربار است، که البته با روند حفاری تونل و تغییرات سربار ساختمان سطحی و وقوع شرایط غیرقابل پیش‌بینی و رخداد ناپایداری حفاری تونل (برخورد به لایه‌های خاکی با شرایط خاص)، می‌تواند تعادل آن به کلی به هم خورده و جابجایی-ناپایداری جانبی توده خاکی نیز تا آستانه مقادیر نشست‌ها افزایش یابد.

۶- با توجه به ابعاد بسیار بزرگ پروژه‌های تونل‌سازی و حفاری، تعیین مقادیر و اثرات تغییر شکلی در خاک با دقت و تقریبی قابل قبول، می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از وقوع موارد ناپایداری و فجایع مرتبط با ایمنی این سازه و ابنیه مجاور آن داشته باشد.

۶. منابع

- [1] Kamal Haji, T. Marshall, A.M. W. Tizani, T. (2018). "A cantilever approach to estimate bending stiffness of buildings affected by tunnelling," *Tunn Undergr Space Technol*, 71, pp 47-61.
- [2] Son, M. Cording, E.J. (2020). "Estimation of building damage in a 3D distorting structure to tunnel and underground excavation-induced ground movements," *Tunn Undergr Space Technol*, 97, 103222.
- [3] Zakhem, A.M., El Naggar, H. (2020). "Three-dimensional investigation of how newly constructed buildings supported on raft foundations affect pre-existing tunnels," *Transportation Geotechnics*, 22, 100324.
- [4] Cui, G. Cui, J. Fang, Y. Chen, Z. and Wang, H. (2019). "Scaled model tests on segmental linings of shield tunnels under earth and water pressures," *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*.
- [5] Franza, A. Acikgoz, S. De Jong, M.J. (2020). "Timoshenko beam models for the coupled analysis of building response to tunnelling," *Tunn Undergr Space Technol*, 96, 103160.

- constructed on subway tunnel,” *Sci e Tot Environ*, 668, pp 485-499.
- [17] Brinkgreve, R.B.J. Swolfs, W.M. Engin, E. (2007). “PLAXIS 2D (1942-2007). Version 8.6, Reference Manual,” Delft University of Technology and PLAXIS B.V., The Netherlands.
- [18] Plaxis 3D (2000). “PLAXIS 3D Tunnel,” Version 1.2, User Manual, (2000).
- [۱۹] شرکت سازمان قطار شهری کرمانشاه (۱۳۹۵). “گزارش تحلیل سازه‌ای و طراحی پوشش بتنی تونل اتریشی،” با مشارکت شرکت مهندسی مشاور عمران محیط زیست- بهان سد، خردادماه ۱۳۹۵. تهران. ایران.
- [20] Aksoy, C.O. Og̃ul, K. Topal, I. Posluk, E. Gicir, A. Kucuk, K. Uyar Aldas, G. (2014). “Reducing deformation effect of tunnel with Non-Deformable Support System by Jointed Rock Mass Model,” *Tunn and Undergr Space Technol*, 40, pp 218-227.
- [6] Franco, V.H., Gitirana, G.F.N. A.P. Assis A.P. (2019). “Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage,” *Comput Geotech*, 113, 103097.
- [7] Fu, J. Yu, Z. Wang, S. Yang, J. (2018). “Numerical analysis of framed building response to tunnelling induced ground movements,” *Engineering Structures*, 158, pp 43-66.
- [8] Gong, C., Ding, W. Xie, D. (2020). Twin EPB tunneling-induced deformation and assessment of a historical masonry building on Shanghai soft clay. *Tunn Undergr Space Technol*, 98, 103300.
- [9] Katebi, H. Rezaei, A.H. Hajjalilue-Bonab, M. Tarifard, A. (2015). “Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM),” *Tunn Undergr Space Technol*, 49, pp 67-78.
- [10] Zhao, C. Schmüderich, C. Barciaga, T. Röchter, L. (2019). “Response of building to shallow tunnel excavation in different types of soil,” *Comp Geotech*, 115, 103165.
- [11] Zhao, C. Alimardani Lavasan, A. Hölter, R. Schanz, T. (2018). “Mechanized tunneling induced building settlements and design of optimal monitoring strategies based on sensitivity field,” *Comp Geotech* 97, pp 246-260.
- [12] Mirhabibi, A. Soroush, A. (2013). “Effects of building three-dimensional modeling type on twin tunneling-induced ground settlement,” *Tunn Undergr Space Technol*, 38, pp 224-234.
- [13] Khabbaz, H. Gibson, R. Fatahi, B. (2019). “Effect of constructing twin tunnels under a building supported by pile foundations in the Sydney central business district,” *Underground Space*.
- [14] Zhang, L. Wu, X. Skibniewski, M.J. Fang, W. Deng, Q. (2015). “Conservation of historical buildings in tunneling environments: Case study of Wuhan metro construction in China,” *Const Buil Mat*, 82, pp 310-322.
- [15] Mirhabibi, A. Soroush, A. (2012). “Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements,” *Tunn Undergr Space Technol*, 29, pp 40-51.
- [16] Yang, J. Zhu, S. Zhai, W. Kouroussis, G. Wang, Y. Wang, K. (2019). “Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building