Journal of Engineering Geology
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
Kharazmi University
OPEN ACCESS
Online ISSN 2981-1600

Numerical analysis and investigation of axial force, shear force and horizontal displacement in underground structures (case study: pataveh-Dehdasht tunnel)

Masoud Khahanipour[1]✉, Hossein Sarbaz[2]

1. Ph.D student, Dpartman of Civil Engineering, NT.C Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: masoud.khahanipour@iau.ac.ir
2. Assistant Professor, Dpartman of Civil Engineering, NT.C Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: Dr.sarbaz@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 August 2025
Accepted 24 December 2025

Keywords:
Mohr-Columbus behavioral model, tunnel lining thickness, Plaxis finite element method.

ABSTRACT

This study aims to numerically analyze the axial force, shear force, and horizontal displacement in Tunnel B on the Pataveh-Dehdasht axis. The tunnel is part of a national project that was inaugurated in the summer of 2023. The project's technical specifications include 2.2 million cubic meters of earthwork, 2,100 meters of retaining walls, 110,000 tons of subbase and base layers, and 95,000 tons of asphalt. This study investigated the effect of tunnel lining thickness on shear force, axial force, and horizontal and vertical displacement using PLAXIS finite element software in a two-dimensional framework. Plane strain theory was employed with 15-node elements for modeling. The Mohr-Coulomb constitutive model, one of the fundamental stages in numerical analysis and a common model for tunnel excavation simulations, was applied to model the soil behavior of the study site. The results indicate that increasing the lining thickness reduces vertical and horizontal displacement at all points while increasing axial and shear forces. Maximum deformation occurs at the tunnel invert and minimum deformation occurs at the right sidewall of the tunnel. Increasing the lining thickness from 20 cm to 35 cm leads to a reduction of approximately 100% in tunnel floor settlement and a significant decrease in horizontal displacement exceeding 90% at certain points. These results demonstrate the importance of selecting an appropriate lining thickness for controlling deformations, enhancing load-bearing capacity, and improving the tunnel's seismic safety.

Introduction

Seismic loading can damage the tunnel crown, sides, and floor, reducing their bearing capacity and increasing lateral pressure, which can cause underground structures to float and settle. These structures, such as tunnels for improving and expanding road and railway networks, vital underground systems, and vast storage facilities for solid and liquid fuels, play an important role in a country's progress and development. These structures must be designed to withstand dynamic loads or loads that can be safely handled. Analyzing underground structures is difficult due to their interaction with the surrounding soil, especially under dynamic conditions. These structures are essential to modern urbanization, so it is important to study their behavior under dynamic loading, such as earthquake waves. This study numerically analyzed the shear force, axial force, and horizontal and vertical displacement in an intercity tunnel (case study of tunnel number two of the Pataveh-Dehdasht axis) using Plaxis software.

Materials and Methods

Several methods are used today to analyze and design tunnels. The numerical method is usually

Cite this article: Khahanipour, M., Sarbaz, H., (2025). Numerical analysis and investigation of axial force, shear force and horizontal displacement in underground structures (Case study: Pataveh-Dehdasht Tunnel). Journal of Engineering Geology, 19 (4), 534-562. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1020431

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1020431

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

best for tunnels executed at shallow depths and in soft soils. Selecting an appropriate behavioral model is one of the most fundamental steps in numerical analysis. In most numerical modeling of tunnel excavation, the Mohr-Coulomb behavior model is used. This model often predicts lower ground settlement than tooling results. This study investigated and analyzed the shear force, axial force, bending moment, and horizontal and vertical displacement numerically using Plaxis software in an intercity tunnel. To this end, numerical modeling was performed using the finite element method in Plaxis software. Plane strain theory and the Mohr-Coulomb behavior model were considered for the soil environment. To achieve sufficient modeling accuracy, 15-node triangular elements and appropriate meshing were used. The specifications in Table 2 were used for the geotechnical parameters of the different soil layers. Also, the properties mentioned in Table 2 were used for the structural properties of the tunnel lining. Then, by changing the parameter under study, the changes in the engineering behavior of the tunnel lining were examined. Considering the contact surface engagement coefficient between two surfaces, which in this case is the contact surface between the soil and the tunnel lining, the coefficient is considered equal to 0.7. This coefficient's value directly depends on the soil type and the method of implementing the structure in contact with the soil. In this study, however, the contact surface engagement coefficient has the same effect in all cases and does not significantly impact the final result.

Results and Discussion

Since the way the environment is meshed is one of the most important factors in finite element problems, creating a suitable mesh is key to solving the problem. However, it should be noted that a finer mesh does not necessarily yield a more accurate solution, and sometimes obvious errors are observed. To increase the accuracy of the model in this study, the environment around the tunnel is meshed more finely than the areas farther away. This type of meshing is used because the Plexis software's analysis accuracy is concentrated in areas close to the tunnel lining elements. The modeling carried out considers about 1,600 elements and 13,000 points. Additionally, the average size of each element in the modeling space is approximately 6 meters.

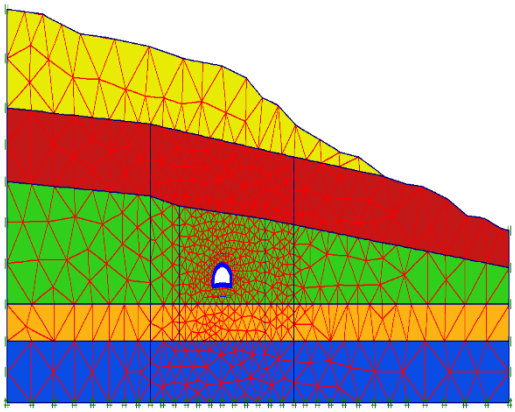


Fig. 5. Overview of the initial meshing of the modeled environment in Plaxis software

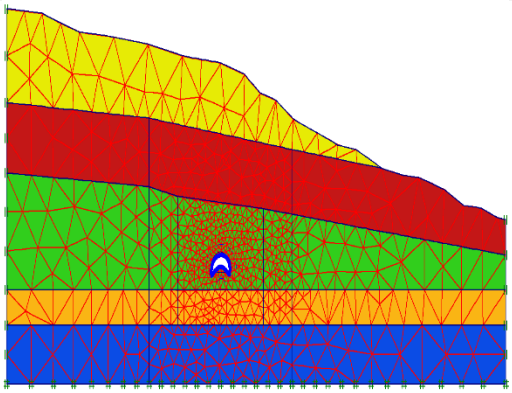


Fig. 6. Overview of the mesh deformation of the modeled environment in Plaxis software

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

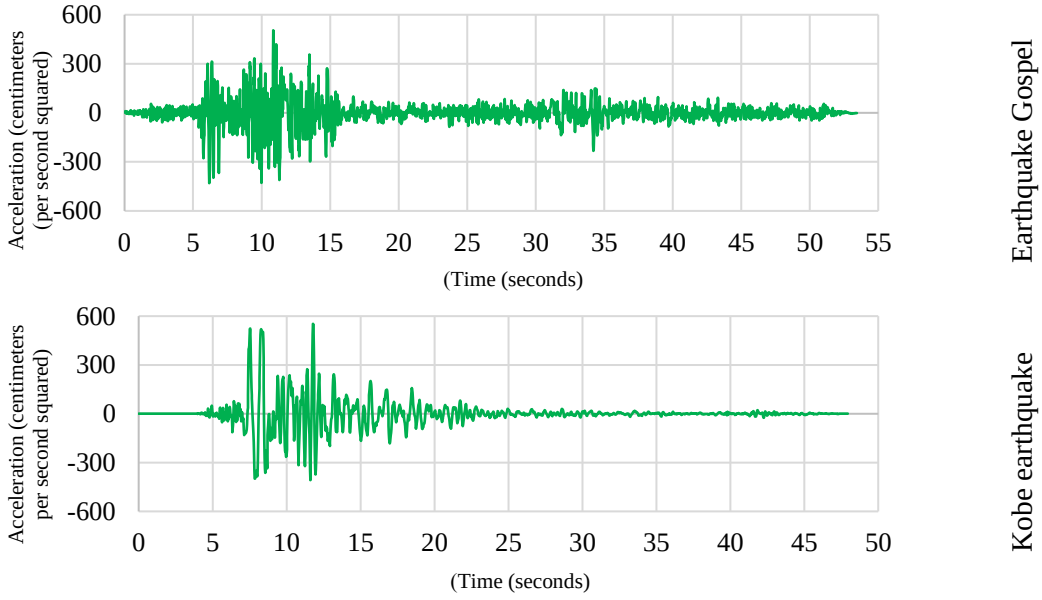
To investigate the effect of tunnel lining thickness, holes in the tunnel excavation were blocked with linings of 20, 25, 30, and 35 cm. Due to these changes, the structural specifications have also changed. To carry out the desired investigations, the maximum and minimum values of axial force, shear force, bending moment, and horizontal and vertical displacement at six points on the tunnel lining were used. These points are the upper arch of the left tunnel, the upper arch of the right tunnel, the left tunnel wall, the right tunnel wall, the left tunnel floor, and the right tunnel floor. These points will be mentioned in the relevant graphs.

Table 5. Tunnel lining specifications for modeling with thickness variations

υ	D (m)	w (kN/m/m)	EA (kN/m)	EI (kNm^2/m)	E (MPa)	Structural Element
0.15	0.2	4.8	6.90×10^6	2.30×10^4	34500	Tunnel Cover
0.15	0.25	6.2	8.63×10^6	4.49×10^4	34500	Tunnel Cover
0.15	0.3	7.2	1.04×10^7	7.76×10^4	34500	Tunnel Cover
0.15	0.35	8.4	1.21×10^7	1.23×10^5	34500	Tunnel Cover

E is the elastic modulus, EA is the compressive-tensile stiffness, EI is the flexural stiffness, w is the weight per unit length, d is the thickness, and υ is the Poisson's ratio.

Examining the maximum and minimum values of axial force in the 20 cm thick tunnel lining revealed that the lowest axial force values were obtained. Increasing the thickness from 20 to 35 cm also increased the axial force at different points. Examining the maximum and minimum values of axial force reveals that the values at the bottom of the tunnel are lower and less sensitive than at other investigated points. Additionally, it should be noted that the axial force values in the walls and arch are nearly identical.To compare different seismic conditions and the non-seismic condition, four different cases were investigated. Six different parts of the tunnel cross-section were used for this purpose: the upper arch of the left tunnel, the upper arch of the right tunnel, the left tunnel wall, the right tunnel wall, the left tunnel floor, and the right tunnel floor. Recalling the previous chapter, Figure 1 shows the accelerogram diagrams related to the Manjil, Kobe, and Elsintro earthquakes.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

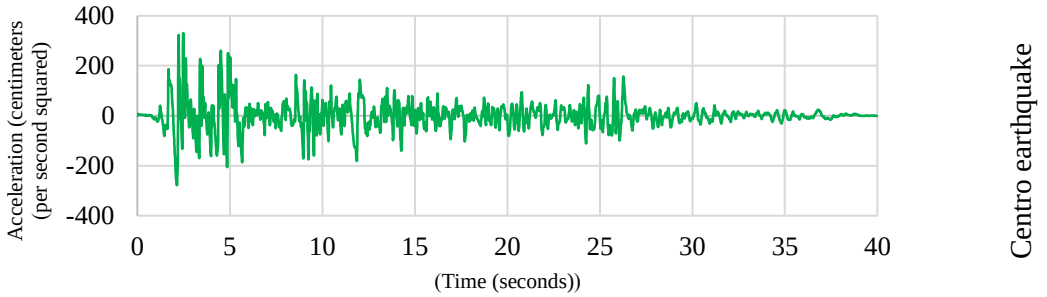


Fig. 1. Accelerograms of the studied earthquakes

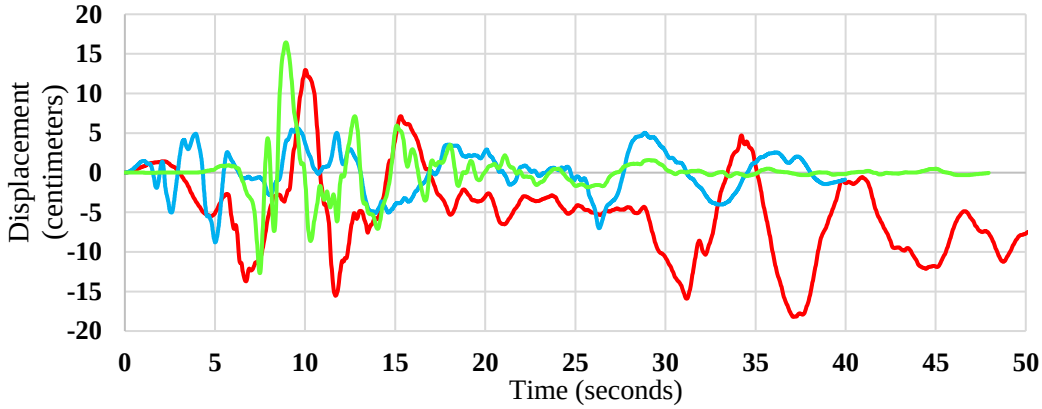


Fig. 1. Comparison of displacement-time diagrams in the three earthquakes being compared

Conclusions

In both vertical and horizontal displacement investigations of the tunnel lining, the maximum and minimum vertical displacement values were obtained in the 20-cm-thick lining. The highest values of vertical displacement were obtained. With an increase in thickness from 20 to 35 cm, vertical displacement decreased at different points; these changes were clearer in the maximum values related to the tunnel floor.

Among the studied earthquakes, the Kobe earthquake is more critical due to its greater displacement amplitude; therefore, earthquakes with stronger amplitudes are more critical than those with longer application times.

As expected, as the thickness of the tunnel lining increased, the applied displacement decreased and the applied force increased. It should be noted that, when the thickness of the tunnel lining increased from 20 cm to 35 cm, the settlement of the tunnel floor decreased by approximately 100%, though this difference was less significant at other studied points.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

تحلیل و بررسی عددی نیروی محوری، نیروی برشی و جابجایی افقی در سازه‌های زیرزمینی(مطالعه موردی: تونل پاتاوه–دهدشت)

مسعود خواهانی پور[1]✉، حسین سرباز[2]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: masoud.khahanipour@iau.ac.ir

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه : Dr.sarbaz@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها:
مدل رفتاری موهر–کلمب، ضخامت پوشش تونل، روش اجزای محدود .Plaxis

چکیده

هدف از انجام این تحقیق تحلیل و بررسی عددی نیروی محوری، نیروی برشی و جابجایی افقی در تونل (تونل شماره B محور پاتاوه– دهدشت) هست. این تونل یک پروژه ملی با مشخصات فنی حجم عملیات خاکی ۲/۲ میلیون مترمکعب، اجرای دیوار حائل به متراژ ۲۱۰۰ متر، اساس و زیراساس به مقدار ۱۱۰ هزار تن و ۹۵ هزار تن اسفالت در تابستان ۱۴۰۲ افتتاح و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در پژوهش حاضر بررسی تأثیر ضخامت پوشش تونل بر نیروی برشی، نیروی محوری و جابجایی افقی و قائم به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS به‌صورت دوبعدی و با استفاده از تئوری کرنش صفحه‌ای با المان‌های ۱۵ گرهی مدل‌سازی انجام و برای محیط خاکی از مدل رفتار موهر–کلمب که یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل عددی است و در اکثر مدل‌سازی‌های عددی حفر تونل از این مدل استفاده می‌شود برای خاک مورد مطالعه این پژوهش به مدل‌سازی محیط مورد بررسی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت پوشش، جابجایی‌های قائم و افقی در همه نقاط کاهش یافته و در مقابل مقادیر نیروهای محوری و برشی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان تغییر شکل مربوط به کف تونل و کمترین مقدار مربوط به دیواره راست تونل است. افزایش ضخامت موجب کاهش نشست کف تونل و کاهش محسوس جابجایی افقی تا بیش از ۹۰ درصد در برخی نقاط شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب ضخامت مناسب پوشش نقش کلیدی در کنترل تغییر شکل‌ها، افزایش ظرفیت تحمل نیروها و ارتقای ایمنی لرزه‌ای تونل دارد.

مقدمه

امروزه به دلیل سیر صعودی افزایش جمعیت کره زمین و تراکم جمعیت در کلان‌شهرها از یک‌سو و پیشرفت تکنولوژی در تمامی زمینه‌های علمی و بالا رفتن سطح استاندارد زندگی از سوی دیگر، لزوم تحول و گسترش امکانات - جهت تأمین نیازهای عمومی جامعه - بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. تونل‌های شهری به‌عنوان راهکارهای غیرقابل اجتناب در طرح‌های آینده جهت گسترش مسیرهای ارتباطی استفاده شده و می‌شوند. اجرای تونل و متروی شهری به‌عنوان یک فعالیت اقتصادی که باعث کاهش هزینه‌های عمومی می‌شود، باید به‌عنوان راهکار مناسب جهت کاهش ترافیک در مدیریت شهری مدنظر قرار گیرند. در انتخاب مسیر حمل‌ونقل علاوه بر حجم ترافیک باید به مشکلات اجرایی و خطرات زمان بهره‌برداری توجه گردد. عبور از مسیرهایی با خطرات بالقوه که در زمان اجرا و زمان بهره‌برداری می‌توانند نقش بسزایی در کاهش ایمنی تونل داشته باشند باید در طول مسیر شناسایی‌شده و در

استناد: خواهانی پور، م.، سرباز، ح. (۱۴۰۴). تحلیل و بررسی عددی نیروی محوری، نیروی برشی و جابجایی افقی در سازه‌های زیرزمینی(مطالعه موردی: تونل پاتاوه-دهدشت. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۴)، ۵۳۴-۵۶۲. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1020431

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

صورت ناگزیر بودن عبور از آن‌ها، باید از روش‌های بهسازی و کنترل استفاده نمود. در طراحی مسیر خطوط تونل‌ها، مسیری انتخاب گردد که به لحاظ مسائل روزمینی و زیرزمینی تا حد امکان از مشکلات و مخاطرات ذکرشده پرهیز گردد. بنابراین لازم است که پایداری و مقاومت فضاهای زیرزمینی (تونل و مترو) در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد چراکه اهمیت این موضوعات فنی و اجرایی مهندسی از اهمیت فراوانی در زندگی و کیفیت زندگی جامعه داشته است. معمولاً در تونل‌های کم‌عمق تحت اثر زلزله به سبب کرنش‌های نسبی زمین اطراف، بهارخواب‌هایی ناشی از لنگر خمشی در گوشه‌های سقف تونل ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به گسیختگی و یا کاهش ظرفیت باربری پوشش تونل شود. یکی از روش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی روش اندرکنش سازه و زمین است که به مطالعه‌ی تغییرات در نحوه‌ی انتشار امواج زلزله به سبب حضور سازه‌های زیرزمینی در محیط می‌پردازد. در این حالت سختی پوشش تونل به حدی است که نمی‌توان از اثر آن چشم‌پوشی نمود .در این حالت پوشش تونل در مقابل تغییر شکل‌های زمین مقاومت می‌کند و کرنش‌های القایی پوشش و زمین اطراف با یکدیگر برابر نیستند. تاکنون روش‌های حل بسته‌ای در این زمینه ارائه‌شده است. این روش‌ها بیشتر در مقاطع دایره‌ای که جنس مصالح زمین و پوشش تونل یکنواخت است، برقرار هستند. به همین دلیل در شرایط زمین‌شناسی پیچیده و مقاطع غیر دایره‌ای استفاده از روش‌های عددی ضروری است. روش‌های اجزای محدود، تفاضل محدود و روش اجزا مجزا از رایج‌ترین روش‌های عددی مورداستفاده در تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی هستند (Molaei, 2019).

خسارات ناشی از بارگذاری لرزه‌ای در تاج و کناره‌های تونل و نشست کف تونل ممکن است باعث شود تا سازه‌های زیرزمینی به‌صورت شناور درآمده و در اثر کاهش ظرفیت باربری و افزایش فشار جانبی نشست کنند. سازه‌های زیرزمینی مثل تونل برای بهسازی و توسعه‌ی جاده و شبکه‌ی راه‌آهن، سیستم‌های متنوع شریان‌های حیاتی زیرزمینی، تسهیلات وسیع ذخیره‌سازی زیرزمینی برای سوخت‌های جامد و مایع و همچنین برای حفاظت از مردم با تجهیزات حساس نقش مهمی را در پیشرفت و توسعه‌ی یک کشور رقم می‌زنند. این‌گونه سازه‌ها باید به نوعی طراحی شوند که بتوانند در برابر بارهای دینامیکی یا امواج لرزه‌ای بدون هیچ‌گونه خطری، از خود مقاومت نشان دهند .آنالیز سازه‌های زیرزمینی به دلیل تعامل آن‌ها با خاک اطراف به‌ویژه تحت شرایط دینامیکی سخت و دشوار هست.

مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی تأثیر یک ضخامت مشخص پوشش تونل یا تحلیل رفتار سازه در یک ناحیه محدود (معمولاً تاج یا کف) پرداخته‌اند و معمولاً نیروهای محوری، برشی و جابجایی‌ها را به‌صورت جداگانه و غیرمقایسه‌ای تحلیل کرده‌اند. نوآوری اصلی این پژوهش در آن است که برای نخستین‌بار تأثیر چهار ضخامت متفاوت پوشش (۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر) به‌صورت هم‌زمان و مقایسه‌ای بر سه پارامتر کلیدی رفتار سازه‌ای یعنی نیروی محوری، نیروی برشی و جابجایی افقی–قائم در شش نقطه واقعی مقطع تونل بررسی شده است. این مطالعه با ترکیب تحلیل استاتیکی و دینامیکی و به‌کارگیری سه رکورد لرزه‌ای معتبر (منجیل، السنترو و کوبه)، امکان ارزیابی جامع‌تری از پایداری تونل را فراهم کرده؛ موضوعی که در ادبیات پیشین بسیار محدود بوده است. ارائه تغییرات درصدی دقیق نیروها و جابجایی‌ها نیز یک رویکرد نوآورانه محسوب می‌شود که تحلیل‌های قبلی فاقد آن بوده‌اند. افزون بر این، مقاله با استناد به نتایج عددی، برای نخستین‌بار استفاده از بتن الیافی را به‌عنوان گزینه‌ای کارآمدتر از افزایش ضخامت پوشش پیشنهاد می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

این پژوهش به‌عنوان یک مطالعه موردی با استفاده از داده‌های واقعی پروژه تونل پاتاوه-دهدشت، به تحلیل رفتار تونل در شرایط مختلف بارگذاری، به‌ویژه در برابر بارهای لرزه‌ای پرداخته است. نتایج مقایسه رفتار تونل در شرایط لرزه‌ای مختلف (زلزله‌های منجیل، کوبه و السنترو) بر اساس مدل عددی PLAXIS، به افزایش دقت تحلیل‌ها کمک کرده است. این پژوهش به‌ویژه برای پروژه‌های زیرزمینی در مناطق زلزله‌خیز و طراحی تونل‌ها در شرایط مشابه، نتایج کاربردی و مفیدی را ارائه می‌دهد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به بهبود مدل‌سازی، طراحی و تحلیل‌های آینده در پروژه‌های تونل‌سازی و زیرزمینی کمک کند.

با افزایش سریع استفاده از تونل‌سازی، مسائل ساختاری مختلفی مربوط به تونل‌ها نیز در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی پدیدار شده‌اند. این مسائل شامل نشست تونل، ناهم‌ترازی، ترک‌خوردگی، خرد شدن یا آسیب دیدن بخش‌های تونل و تغییر شکل کلی تونل است. برخی از این مسائل در حال حاضر بر عملکرد طبیعی تونل‌ها تأثیر گذاشته و منجر به مشکلات ثانویه‌ای شده‌اند که مانع از عملیات عادی می‌شوند و در موارد شدید، ایمنی و قابلیت اطمینان سازه‌ای تونل‌ها را به خطر می‌اندازند. دلایل اصلی این مشکلات اغلب در درک ناکافی از خواص باربری سازه‌های تونل سپری توسط افراد درگیر در ساخت‌وساز نهفته است. تجربه محدود و گاهی اوقات شیوه‌های ساخت‌وساز بیش از حد تهاجمی منجر به نقاط ضعف ذاتی در ساخت تونل می‌شود. در برخی موارد، فعالیت‌های ساختمانی یا مهندسی در نزدیکی خطوط مترو موجود، مسائل تونل موجود را تشدید کرده یا چالش‌های ساختاری جدیدی را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، عدم وجود تلاش‌های تعمیر و نگهداری با کیفیت بالا، روند تخریب این تونل‌ها را تسریع می‌کند(Wang et al,. 2025) . با این حال، قرار گرفتن طولانی مدت در معرض بارهای قطار در یک محیط فرسایشی، به‌ناچار به سازه‌های تونل حمل‌ونقل ریلی شهری آسیب می‌رساند. با این وجود، مکانیسم‌های مؤثر بر آسیب پوشش سگمنتی بر پاسخ دینامیکی سازه‌های تونل هنوز مشخص نیست. پاسخ‌های دینامیکی به بارهای فرکانس روبشی ناشی از قطار و سینوسی تحت سه حالت ساختاری تجزیه و تحلیل شدند: پوشش سگمنتی سالم، آسیب دیده از کمر و آسیب دیده از طاق. پاسخ‌های شتاب در مکان‌های مختلف تونل در هر دو حوزه زمان و فرکانس اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شدند(Yang et al., 2025). کاشیاری و فوتای (cacciari and Futai, 2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی در محیط المان مجزا، وضعیت پایداری تونل مونته سکو در برزیل را بررسی کرده‌اند. در این بررسی با استفاده از برداشت‌های میدانی توده سنگ‌های محدوده تونل به دو بخش تقسیم شده و با استفاده از شاخص‌های حجم کل بلوک تسلیم شده، متوسط جابجایی در جبهه کار تونل و درصد لغزش روی سطوح ناپیوستگی در جبهه کار تونل وضعیت پایداری تونل در اثر بارگذاری‌های مکرر ناشی از حمل و نقل ریلی بررسی شده است (cacciari and Futai, 2020).

از آنجا که حفر تونل در خاک معمولاً در اعماق کم صورت می‌گیرد، تأثیر آن می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد و یک فرورفتگی (گود) نشست را در سطح زمین ایجاد نماید. این نشست برای سازه‌های موجود در مجاورت تونل خطراتی را به همراه دارد. در محیط‌های شهری این حرکت بر روی سازه‌های سطحی یا زیر سطحی تأثیر می‌گذارد (Leca and New, 2007). نقاط شهری به دلیل عملکرد نامناسب شبکه‌های آب و فاضلاب موجود، مشکل نشت آب‌های با کیفیت شیمیایی متفاوت در خاک‌های اطراف آن‌ها وجود دارد (Kolymbas, 2005) لذا احتمال برخورد با این مشکل که بیشتر در حین اجرای عملیات احداث تونل خود را نمایان می‌کند، دور از انتظار نیست. لازم به ذکر هست که معمولاً حجم این آب‌ها کم است اما به هر حال وجود

آن‌ها مشکلات خاص خود را همراه خواهد داشت. این آب‌ها همچنین می‌توانند در اثر فروروی آب‌های مربوط به آبیاری فضاهای سبز و پارک‌ها باشند. به دلیل قدیمی بودن و فرسودگی سیستم‌های آب و فاضلاب بسیاری از شهرهای بزرگ ایران، در تمام نواحی که مسیر تونل‌های ترافیکی از مجاورت آن‌ها عبور می‌کنند، احتمال برخورد با این مشکل وجود دارد. وجود گسل در مسیر تونل به معنی احتمال برخورد با مناطق خرد شده و شکسته و آبدار در زمان حفاری و در نتیجه ایجاد ناپایداری در زمان حفاری و پس از آن، احتمال زهکش نمودن آب به داخل تونل و دیگر مشکلات مرتبط هست. به‌ویژه در شرایط بحرانی مانند زمین‌لرزه و جابجایی در امتداد صفحات گسل‌ها، شکستگی در سیستم نگهدارنده تونل‌ها ایجاد شده و جدا از مشکلات بازسازی این مناطق، مشکلاتی مانند نفوذ آب به تونل و ایجاد نشست‌های سطحی را در بر خواهد داشت. این لایه‌های فاقد چسبندگی بصورت لنزهای کوچک و بزرگ به وفور در بخش‌های مختلف حفاری تونل نیایش مشاهده گردیده است. پیش از حفاری در زمین خاکی، نیروی وارد بر هر نقطه برابر مقدار مشخصی است که از مجموع چندین نیرو به‌ویژه نیروی وزن سرباره در آن بخش حاصل می‌شود. وقتی تونل را درون خاک حفاری می‌کنیم، این نیرو در دیواره‌های تونل به صفر می‌رسد. از آنجا که پس از این تغییر، خاک باید دوباره به تعادل برسد، ریزش در دیواره‌ها و سقف ایجاد می‌شود و تا تعادل مجدد ادامه پیدا می‌کند (Niklas, 2003).

جابری و زارع (Jaberi and Zare., 2024) تأکید کردن که با توسعه مداوم مناطق شهری، حفاری نقش حیاتی در ساخت‌وساز ساختمان‌ها ایفا می‌کند و مستلزم توجه دقیق به ایمنی از دیدگاه ژئوتکنیکی است. دیوارهای مهاربندی شده به‌عنوان یک راه‌حل مقرون به صرفه برای پشتیبانی از حفاری‌های عمل می‌کنند. این مطالعه بر مهندسی ژئوتکنیک و تحلیل پایداری حفاری‌های عمیق شهری مهاربندی شده تمرکز دارد. تحقیقات قبلی عمدتاً از روش‌های قطعی استفاده کرده و عدم قطعیت‌های ذاتی مقاومت خاک را نادیده گرفته‌اند. در مقابل، این مطالعه از تحلیل عددی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در چسبندگی و زاویه اصطکاک استفاده می‌کند. نتایج، تأثیر قابل‌توجه تغییرپذیری پارامتر مقاومت خاک بر حفاری‌های شهری مهاربندی‌شده را برجسته می‌کند و بر لزوم لحاظ کردن عدم قطعیت چسبندگی و زاویه اصطکاک در تحلیل و طراحی تأکید دارد.

تحلیل پایداری یکی از مباحث اصلی و مهم در تونل‌سازی است. از این رو در مرحله طراحی تونل و قبل از مرحله حفاری باید سازه زیرزمینی و سیستم نگهداری آن با روش‌های مختلف تحلیل و ارزیابی شود. این موضوع در خصوص تونل‌های کم‌عمق شهری از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این خصوص روش‌های تجربی، محاسباتی و عددی متعددی برای مدل‌سازی و تحلیل پایداری تونل‌ها وجود دارد. مهدوری و همکاران (Mahdevari et al., 2020) و سان و همکاران (Sun et al., 2021) در تحلیل پایداری تونل عمیق در کشور چین از نرم‌افزار UDEC استفاده کرده‌اند، بر اساس نتایج این بررسی شکستگی‌ها در تونل‌های عمیق و تحت تنش‌های برجای زیاد در کف و سقف آغاز شده و در توده سنگ اطراف سازه گسترش می‌یابد (Sun et al., 2021). حیدری و فهیمی فر (Heidari and Fahimi Far, 2018) یک روش نیمه‌تحلیلی برای محاسبات تونل در توده سنگ هوک و براون با در نظر گرفتن وزن ناحیه پلاستیک پیرامون تونل ارائه کردند. آن‌ها همچنین میزان اهمیت هر یک از پارامترهای هوک و براون را بررسی کردند. زارعی‌فرد (Zareifard, 2020) روشی نیمه‌تحلیلی برای محاسبه تونل‌ها در توده سنگ با معیارهای گسیختگی هوک و براون برای امتدادهای مختلف ارائه کردند. نتایج این روش‌ها نشان‌دهنده اهمیت وزن ناحیه پلاستیک است. مترو لس‌آنجلس که در چند مرحله ساخته‌شده است، در طول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

سال ۱۹۹۴ در زلزله نورتریج در حال استفاده بود، پوشش بتنی تونل‌ها پس از زلزله دست‌نخورده و سالم باقی ماند و زلزله نورتریج در حالی که آسیب‌هایی به بزرگراه، لوله‌های آب، پل‌ها و ساختمان‌ها وارد آورده بود باعث هیچ‌گونه خسارتی به سیستم مترو نشد (Hashash et al., 2001). امروزه در اکثر مناطق زلزله‌خیز از تونل‌هایی با لاینینگ چندبخشی استفاده می‌شود. در اکثر تحقیقات از تأثیر اتصال بین سگمنت‌ها صرف‌نظر می‌شود. مدل ارائه‌شده در این تحقیق این امکان را می‌دهد تا تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار پوشش تونل‌ها بررسی شود. نتایج این تحقیق نشان داد که تحت بار لرزه‌ای لاینینگ‌های قطعه‌ای نسبت به لاینینگ‌های یکپارچه رفتار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند. همچنین این نتایج نشان داد که تأثیرات سختی محوری اتصالات، مدول یانگ خاک اطراف تونل و ضریب اطمینان پایداری شیب فشار جانبی خاک قابل‌چشم‌پوشی نیست (Yuan et al., 2015) . از خطرات حفاری تونل‌های شهری، نشست سطح زمین هست. نشست در سطح زمین با ایجاد تغییر شکل و ناپایداری برای سازه‌های سطحی و زیر سطحی همراه هست (Suwansawat and Einstein, 2007). نشست زمین باعث می‌شود که تنش‌های وارده بر سازه تونل افزایش یابد و این امر موجب ناپایداری سازه می‌گردد. نشست گاهی در اثر برداشت آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش میزان تنش مؤثر در خاک‌های ریزدانه سیلتی و رسی اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی رفتار محیط اطراف تونل در زمان اجرا و همچنین در زمان بهره‌برداری نیاز به اجرای سیستم‌های رفتارنگاری هست. وقوع نشست‌های بزرگ و ریزش‌های عمیق که در اجرای عملیات حفاری‌های زیرزمینی در تهران مشاهده می‌گردد ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ پیش‌بینی‌نشده هست (Saeedi Abbasabad et al., 2013). همچنین برای دوام و پایداری ایمن تونل‌ها می‌توان از کامپوزیت‌های بتن مسلح به الیاف فولادی هیبریدی (HSFRC)، که از هندسه‌های مختلف الیاف فولادی تشکیل شده‌اند، از عملکرد مثبت هندسه‌های مختلف الیاف بهره‌مند می‌شوند می‌توان در تونل‌های استفاده نمود (Jamshidi Avanaki et al., 2020). همچنین جمشیدی و دهقان (Jamshidi Avanaki and Dehghan, 2021) بیان نمودند در مناطق لرزه‌خیز، عملکرد سازه‌ای تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر زلزله از دغدغه‌های طراحان تونل است و نتایج آن‌ها نشان داد الیاف فولادی عملکرد لرزه‌ای پوشش‌های بتنی را نسبت به میلگرد فولادی معمولی افزایش می‌دهند، که نشان‌دهنده یک گزینه فنی ارجح برای پوشش تونل‌های سگمنتی در مناطق لرزه‌خیز است.

یکی از نرم‌افزارهای موجود که دارای قابلیت‌های مناسبی جهت مدل‌سازی هست و می‌توان از آن برای تحلیل انواع مختلفی از مسائل ژئوتکنیکی به روش اجزاء محدود استفاده نمود، نرم‌افزار Plaxis هست، Plaxis یک نرم‌افزار المان محدود (FEM) هست که به‌صورت گسترده توسط مهندسین ژئوتکنیک برای تحلیل‌های پایداری، بررسی تغییرشکل‌ها، تعیین میزان نشست‌پذیری، سنجش پارامتری جابجایی‌ها، میدان تنش-کرنش در خاک و جریان آب‌های زیرزمینی بخصوص در محیط خاک بکار گرفته می‌شود.

تونل پاتاوه دهدشت با مشخصات و اهداف ذیل در نیمه دوم سال ۱۴۰۲ افتتاح و مورد بهره‌برداری رسید. این محور با طول ۱۳۶ کیلومتر حدفاصل شهرستان‌های دهدشت و پاتاوه و بخشی از محور ارتباطی بین استان‌های اصفهان، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان و بوشهر است که به‌عنوان کریدور شمال - جنوب و تأمین دسترسی مراکز صنعتی و تجاری مرکز کشور به آب‌های گرم خلیج‌فارس و نیز به منظور محرومیت‌زدایی و خروج استان کهگیلویه و بویراحمد از بن‌بست ارتباطی احداث گردیده است. با تکمیل و بهره‌برداری از این محور، فاصله ترانزیتی پایتخت کشور و استان‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

مرکزی و شمالی به استان خوزستان و بندر امام خمینی و آب‌های آزاد به میزان ۲۱۰ کیلومتر در مقایسه با محور خرم‌آباد – خوزستان - بندر امام کاهش می‌یابد. از جمله اهداف دیگر این طرح احداث راه ارتباطی بین ۴۰۰ روستا و خارج نمودن دو شهرستان لوداب و دهدشت از بن‌بست هست. تونل قطعه دوم راه اصلی پاتاوه - دهدشت در حد فاصل شهرستان‌های پاتاوه و دهدشت، استان کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد. مشخصات پروژه شامل حجم خاکی عملیات ۲/۲ میلیون مترمکعب، کارهای فولادی ۴۱۰۰ تن، اجرای دیوار حائل به متراژ ۲۱۰۰ متر، ۵ دستگاه تونل به متراژ کلی ۲۲۰۰ متر و احداث تقاطع هم‌سطح و تعداد ۱۱۱ دستگاه پل و آبرو هست. نقطه شروع کار از کیلومتر ۰+۰۰۰ الی کیلومتر ۲۸+۰۰۰ به طول ۲۸ کیلومتر میهست. این قطعه ادامه قطعه یک راه اصلی پاتاوه به دهدشت میهست. ۵ دستگاه تونل به طول کلی حدود ۲۸۳۰ متر، طول دیوار حائل ۱۸۲۵ متر، تعداد پل‌ها ۷ دستگاه، تعداد آبروها ۱۰۴ دستگاه، کارهای فولادی ۳۳۰۰ تن، آسفالت ۹۵۰۰۰ تن، زیر اساس و اساس ۱۱۰۰۰۰ مترمکعب از جمله مشخصات فنی و عملیاتی این پروژه ملی هست (شکل ۱).



شکل ۱. جانمایی تونل و جاده پاتاوه به دهدشت به‌عنوان کریدور شمال به جنوب

Fig. 1. Location of the Patavah-Dehdasht tunnel and road as a north-south corridor

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

مدل موهر- کولمب

امروزه برای آنالیز و طراحی تونل‌ها از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که معمولاً برای تونل‌های که در اعماق کم و در زمین‌های نرم اجرا می‌شوند، بهترین روش عددی است. انتخاب مدل رفتاری مناسب یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل عددی است. در اکثر مدل‌سازی‌های عددی حفر تونل از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده می‌شود، این مدل رفتاری اغلب منجر به پیش‌بینی نشست کمتر سطح زمین نسبت به نتایج ابزاربندی می‌شود.

معیار موهر–کلومب یک رابطه تجربی ـ تحلیلی است که شرایط شروع شکست یک ماده تحت تنش را بیان می‌کند. این معیار فرض می‌کند که شکست زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی روی یک صفحه از تنش‌های عادی وارد بر همان صفحه فراتر رود.

این معیار بر پایه دو پارامتر مستقل است:

۱- چسبندگی(c) میزان مقاومت ماده در برابر گسیختگی حتی در شرایط بدون تنش نرمال

۲- زاویه اصطکاک داخلی(φ) نشان‌دهنده مقاومت ناشی از اصطکاک بین ذرات در برابر لغزش.

در نرم‌افزار Plaxis ، برای شبیه‌سازی رفتار شکست در مواد مختلف، از مدل موهر–کلومب به عنوان یک مدل اصلی برای شبیه‌سازی وضعیت تنش و شکست در خاک‌ها و سنگ‌ها استفاده می‌شود. پارامترهای ورودی اصلی این مدل به شرح زیر هستند:

۱ – مدول الاستیسیته (E): مدول الاستیسیته که به عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی ماده شناخته می‌شود، بیانگر سختی ماده در برابر تغییر شکل الاستیک است. این پارامتر برای تعیین مقاومت ماده در برابر تغییر شکل‌های کوچک تحت بارهای اعمالی استفاده می‌شود.

۲) زاویه اصطکاک داخلی(ϕ). : زاویه اصطکاک داخلی، که با نماد (\phi) نمایش داده می‌شود، بیانگر مقاومت ماده در برابر لغزش در سطح تماس ذرات دانه‌ای است. این پارامتر در مدل‌های خاک‌شناسی و سنگ‌شناسی اهمیت زیادی دارد زیرا نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت برشی مواد در شرایط مختلف بارگذاری دارد.

۳- چسپندگی (C) :چسبندگی یا مقاومتی که ماده در برابر گسیختگی در شرایط بدون تنش نرمال از خود نشان می‌دهد. این پارامتر به‌ویژه در مواد چسبنده و خاک‌های رسی بسیار اهمیت دارد.

۴- نسبت پواسون (ν): نسبت پواسون که نشان‌دهنده تغییرات نسبی در عرض و طول ماده تحت کشش یا فشار است، در تعیین رفتار کششی و فشاری مواد به‌ویژه در تحلیل‌های تنش و کرنش مهم است.

۵- زاویه اتساع : در تحلیل رفتار مکانیکی مواد دانه‌ای مانند خاک‌ها و سنگ‌ها، زاویه اتساع به تغییرات حجم ماده تحت بارگذاری برشی اشاره دارد. این پارامتر به‌ویژه در شبیه‌سازی‌هایی که تغییرات حجم مواد تحت بارهای مختلف بررسی می‌شود، اهمیت دارد. زاویه اتساع نشان‌دهنده تغییرات در حجم ماده هنگام اعمال تنش برشی است و می‌تواند تأثیر زیادی بر پیش‌بینی رفتار کرنش و شکست در مواد دانه‌ای بگذارد.

در این تحقیق، از مدل موهر-کلومب برای شبیه‌سازی رفتار خاک در پروژه تونل پاتاوه-دهدشت استفاده شده است به دلایل مختلف. نخست، این مدل به دلیل سادگی و کاربرد گسترده در تحلیل رفتار خاک‌های دانه‌ای و رس‌ها یکی از مدل‌های مرسوم در پروژه‌های زیرزمینی است. مدل موهر-کلومب قادر است به‌طور مؤثر نیروهای برشی و تنش‌های نرمال را در خاک‌ها شبیه‌سازی کند و پیش‌بینی دقیقی از شکست و لغزش مواد دانه‌ای تحت بارگذاری‌های مختلف ارائه دهد. علاوه بر این، این مدل در تحلیل‌های دینامیکی و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

لرزه‌ای عملکرد مناسبی دارد، به‌ویژه در منطقه احداثی تونل پاتاوه-دهدشت که خطر زلزله وجود دارد، که می‌تواند رفتار خاک در برابر بارهای لرزه‌ای را شبیه‌سازی کند. همچنین، مدل موهر-کلومب در نرم‌افزار PLAXIS به‌راحتی پیاده‌سازی می‌شود و قادر است تحلیل‌های پیچیده‌ای از جابجایی‌ها و نیروها در پروژه‌های تونل‌سازی ارائه دهد. در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر مانند Hardening Soil یا Plasticity، این مدل به‌طور قابل توجهی ساده‌تر و سرعت شبیه‌سازی بالاتری دارد، در حالی که همچنان نتایج معتبری در بسیاری از شرایط فراهم می‌آورد. به همین دلیل، استفاده از مدل موهر-کلومب برای این مطالعه انتخاب به‌جا و مناسبی بوده است.

برای مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود از نرم‌افزار Plaxis استفاده شد، تئوری کرنش صفحه‌ای و مدل رفتاری موهر-کلمب برای محیط خاکی منظور گردید و برای حصول دقت کافی در مدل‌سازی المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای و شبکه‌بندی مناسب برای آنالیز صحیح مدنظر قرار گرفته شد. برای مدل‌سازی از مشخصات ذکر شده در (جدول ۱) برای پارامترهای ژئوتکنیکیِ لایه‌های مختلف خاک استفاده شد. همچنین به‌منظور خصوصیت‌های سازه‌ای برای مدل‌سازی پوشش تونل از خصوصیت‌های ذکر شده در جدول (۱) استفاده شد و پس از آن با تغییر در پارامتر مورد مطالعه، در تغییرات رفتار مهندسی پوشش تونل، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ضریب درگیری سطح تماسی بین دو سطح مختلف که در اینجا سطح تماس بین خاک و پوشش تونل را مدنظر قرار می‌دهد، برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است (Plaxis et al., 1998). مقدار این ضریب بستگی مستقیم به نوع خاک و نحوه‌ی اجرای سازه‌ی در تماس با خاک دارد. از آنجا که در این مطالعه ضریب درگیری سطح تماسی در تمامی حالات تأثیر یکسانی را ایفا می‌کند، لذا در نتیجه‌ی نهایی، تأثیر قابل توجهی ندارد. در جدول ۱ پارامترهای ذکر شده به ترتیب γ_d ,γ_w ,C ،φ ،E_m ،υ و R_{inter} (وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص مرطوب، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل‌پذیری، نسبت پوآسون و ضریب اندرکنش توده خاک هست.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف خاک منطقه

Table 2. Geotechnical characteristics of different soil layers in the region

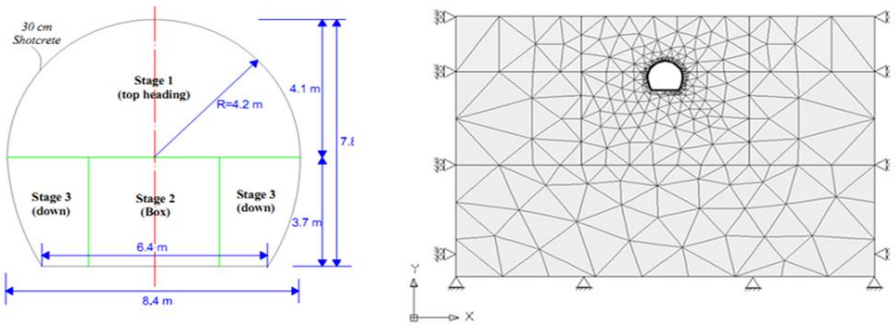
لایه‌بندی خاک		C (kN/m2)	φ (درجه)	E_m (kN/m2)	γd (kN/m3)	γw (kN/m3)	υ	R_{inter}
لایه ۱	رس سست	12	21	$2*10^3$	15.5	19	0.35	0.7
لایه ۲	رس شل	16	22	$2.07*10^3$	13.5	15.5	0.35	0.7
لایه ۳	رس مارنی	17	24	$2.23*10^3$	17	19.5	0.45	0.7
لایه ۴	رس متراکم	55	35	$4.20*10^3$	19.5	21	0.45	0.7
لایه ۵	سنگ بستر	115	49.5	$1.09*10^5$	25.6	26.1	0.3	0.7

صحت سنجی

در این پژوهش به منظور صحت انجام کار در نرم‌افزار Plaxis دوبعدی از مطالعات انجام شده توسط حسامی و همکاران (Hesami et al., 2013) بهره گرفته شده است. هندسه مدل تحلیل شده توسط حسامی و همکاران (Hesami et al., 2013) و همچنین خاک مورد استفاده در مدل‌سازی به ترتیب در شکل ۲ ارائه‌شده است. این محققان در پژوهش خود به بررسی نشست سطح زمین ناشی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

از تونل‌زنی پرداختند. نتایج به دست آمده از این پژوهش و مدل‌سازی شده توسط Plaxis مورد استفاده در پژوهش حاضر در شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۲. هندسه مدل تحلیل شده در مطالعات (Hesami et al., 2013)

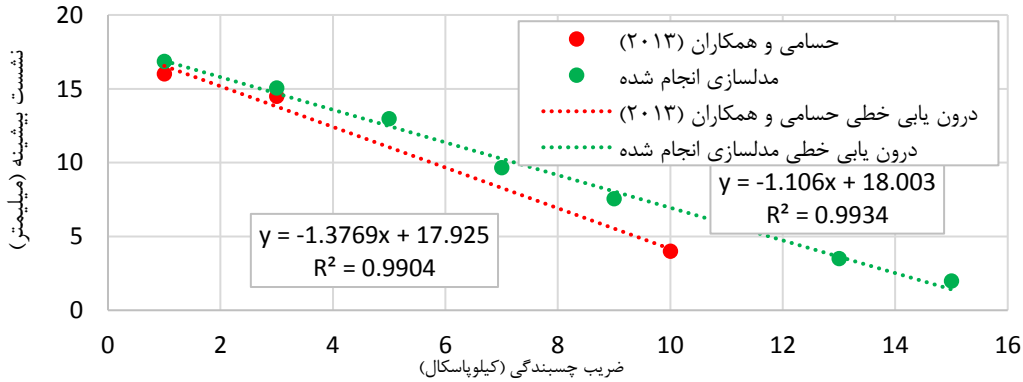
Fig. 2. Geometry of the model analyzed in the studies of (Hesami et al., 2013)

جدول ۲. اطلاعات پروفیل خاک در مطالعات (Hesami et al., 2013)

Table 2. Soil profile information in the studies of (Hesami et al., 2013)

نوع خاک	عمق	γ_d	C	φ	υ	Em
	(m)	(KN/m^3)	(KN/m^2)	(درجه)	(-)	(MPa)
GP	0-15	20.5	4	32	0.3	100
GW	15-30	22	4	32	0.3	100

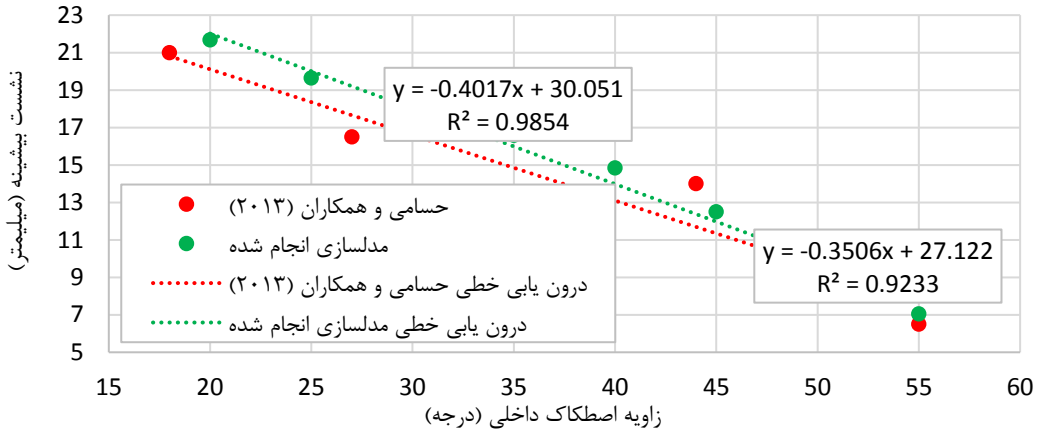
در این بخش مدل موجود در مطالعات حسامی و همکاران (Hesami et al., 2013) مجدداً توسط نرم‌افزار Plaxis دوبعدی مدل‌سازی شد. با مقایسه نتایج مشخص شد که حداکثر اختلاف بین نتایج از ۲۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. لذا مدل مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند مورد اعتماد هست.



شکل ۳. مقایسه نشست سطح زمین تحت تأثیر تغییرات چسبندگی خاک (Hesami et al., 2013)

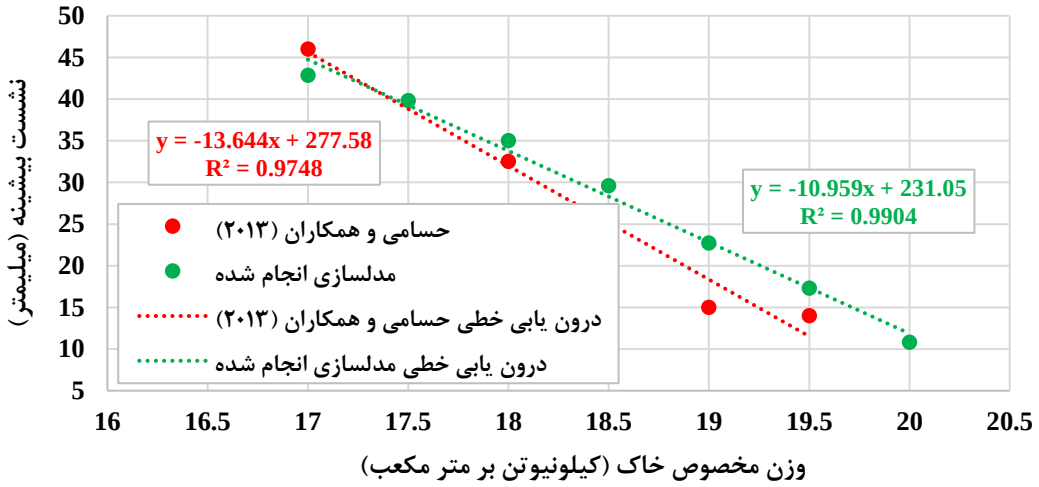
Fig. 3. Comparison of land surface settlement under the influence of soil adhesion changes (Hesami et al., 2013)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۴. مقایسه نشست سطح زمین تحت تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک (Hesami et al., 2013)

Fig. 4. Comparison of ground surface settlement under the influence of changes in the soil internal friction angle (Hesami et al., 2013)



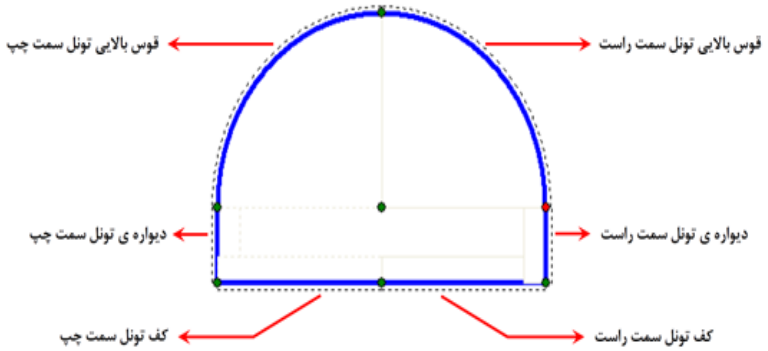
شکل ۵. مقایسه نشست سطح زمین تحت تأثیر تغییرات وزن مخصوص خاک (Hesami et al., 2013)

Fig. 5. Comparison of land surface settlement under the influence of changes in soil specific gravity (Hesami et al., 2013)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

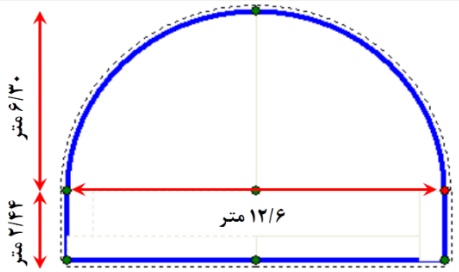
برای بررسی دقیق موضوع مورد پژوهش مطالعه مورد نظر، از شش نقطه مختلف تونل استفاده شده است که عبارت‌اند از؛ قوس بالایی تونل سمت چپ و سمت راست، دیواره‌ی قائم تونل سمت چپ و سمت راست و همچنین کف تونل سمت چپ و سمت راست (شکل ۶) مشخصات سازه‌ای تونل در جدول ۴ ذکر شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۶. قسمت‌های مورد مطالعه در تونل محور پاتاوه دهدشت

Fig. 6. Study areas in the Patavah Dehdasht axis tunnel



شکل ۷. مقطع تونل محور پاتاوه-دهدشت در محیط مورد مطالعه

Fig. 7. Cross-section of the Pataveh-Dehdasht axis tunnel in the study area

جدول ۳. مشخصات پوشش تونل

Table 3. Tunnel lining specifications

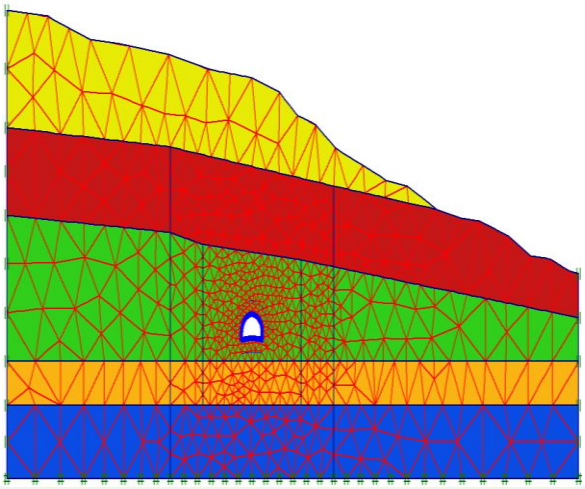
المان سازه‌ای	E (MPa)	EI (kNm^2/m)	EA (kN/m)	w (kN/m/m)	d (m)	υ
پوشش تونل	44500	$3.30*10^4$	$6*10^7$	6.2	0.2	0.15

E مدول الاستیک،EA سختی فشاری-کششی، EI سختی خمشی،w وزن در واحد طول، d ضخامت و υ نسبت پوآسون هست.

شبکه‌بندی محیط شبیه‌سازی

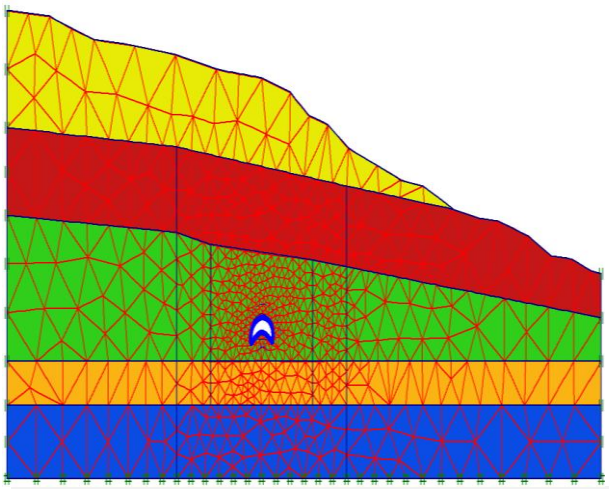
از آنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل در مسائل اجزای محدود نحوه‌ی شبکه‌بندی محیط مورد بررسی میهست، ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب نقش مؤثری در حل مسئله دارد. باید توجه داشت که الزاماً با ریزتر کردن شبکه‌بندی، جواب دقیق‌تری حاصل نمی‌شود و گاهی در این حالت خطاهای بسیار مشهودی مشاهده می‌شود. در این مطالعه برای افزایش دقت مدل‌سازی، محیط اطراف تونل دارای شبکه‌بندی ریزتری نسبت به نواحی دورتر میهست. دلیل این نوع شبکه‌بندی، تمرکز دقت تحلیل نرم‌افزار Plaxis در نواحی نزدیک به المان‌های لاینینگ تونل میهست. در مدل‌سازی‌های انجام شده تعداد المان‌ها و تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی به ترتیب در حدود ۱۶۰۰ المان و ۱۳۰۰۰ نقطه میهست. همچنین اندازه‌ی متوسط هرکدام از المان‌ها در فضای مدل‌سازی در حدود ۶ متر در نظر گرفته شده است(شکل ۸ و شکل۹).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۸. نمای کلی از شبکه‌بندی اولیه‌ی محیط مدل شده در نرم‌افزار Plaxis

Fig. 8. Overview of the initial meshing of the modeled environment in Plaxis software



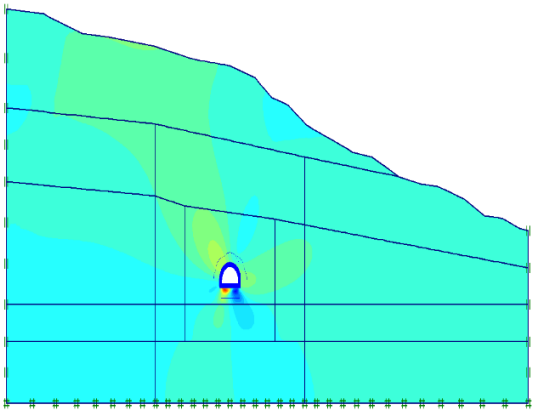
شکل ۹. نمای کلی از تغییر شکل شبکه‌بندی محیط مدل شده در نرم‌افزار Plaxis

Fig. 9. Overview of the mesh deformation of the modeled environment in Plaxis software

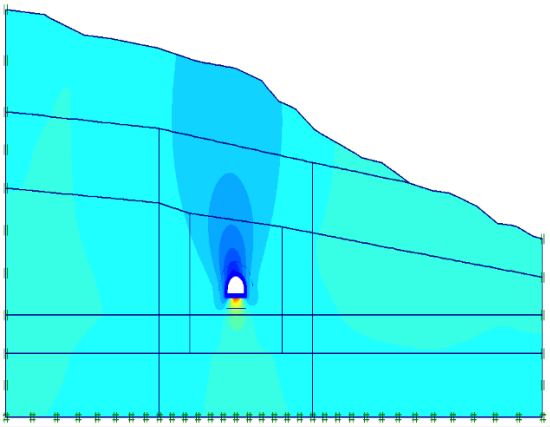
محاسبه عرض و عمق بهینه برای مدل

یافتن عرض و عمق مناسب به هنگام مدل‌سازی باید مورد دقت قرار بگیرد که با به دست آمدن عرض و عمق مناسب، از محدود بودن ابعاد مدل در فضای نرم‌افزار در دو راستای افقی و عمودی، چشم‌پوشی کرد؛ این روند، آنالیزِ حساسیت به منظور یافتن ابعادِ مدل، میهست، لذا عرض و عمق بهینه، برابر با ابعادی است که در آن خطای حاصل از محدود در نظر گرفتن عرض و عمق قابل صرف‌نظر کردن هست. از ویژگی آنالیز حساسیت می‌توان به کم کردن زمان حل مسئله اشاره کرد، چون با وسعت گرفتن سطح مدل، تعداد المان‌ها زیاد شده و زمان حل مسئله نیز به دنبال آن، افزایش می‌یابد. برای به دست آوردن عرض بهینه‌ی مدل، با تغییر در عرض مدل و افزایش پلکانی آن، باید توجه شود که کانتورهای جابجایی کلی حادث‌شده در مدل مرزهای کناری را قطع نکنند که در غیر این صورت تقاطع ایجاد شده موجب کاهش دقت در روند مدل‌سازی می‌شود. در اشکال زیر (شکل ۱۰و ۱۱) جابجایی‌های ایجاد شده در مدل ترسیم شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۱۰. جابجایی‌های افقی ایجاد شده در محیط مورد مطالعه
Fig. 10. Horizontal displacements created in the studied environment



شکل ۱۱. جابجایی‌های قائم ایجاد شده در محیط مورد مطالعه
Fig. 11. Vertical displacements created in the studied environment

برای بررسی تأثیر ضخامت پوشش تونل از ضخامت‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتیمتر به منظور حائل گذاری حفره‌ی حفاری تونل استفاده شده است. با توجه به تغییرات صورت گرفته در ضخامت پوشش تونل، مشخصات سازه‌ای نیز دستخوش تغییر قرار گرفته که در جدول (۴) به تشریح مورد اشاره قرار گرفته است. برای انجام بررسی‌های مورد نظر از بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی، جابجایی افقی و جابجایی قائم در شش نقطه‌ی متفاوت از پوشش تونل که عبارت‌اند از قوس بالایی تونل سمت چپ، قوس بالایی تونل سمت راست، دیواره‌ی تونل سمت چپ، دیواره‌ی تونل سمت راست، کف تونل سمت چپ و کف تونل سمت راست، بهره گرفته شده است که در شکل‌های مربوطه مورد اشاره قرار داده خواهد شد.

جدول ۴. مشخصات پوشش تونل برای مدل‌سازی با تغییرات ضخامت
Table 5. Tunnel lining specifications for modeling with thickness variations

المان سازه‌ای	E (MPa)	EI (kNm²/m)	EA (kN/m)	w (kN/m/m)	d (m)	υ
پوشش تونل	34500	$2.30*10^4$	$6.90*10^6$	4.8	.2	.15
پوشش تونل	34500	$4.49*10^4$	$8.63*10^6$	6.0	.25	.15
پوشش تونل	34500	$7.76*10^4$	$1.04*10^7$	7.2	.3	.15
پوشش تونل	34500	$1.23*10^5$	$1.21*10^7$	8.4	.35	.15

E مدول الاستیک، EA سختی فشاری-کششی، EI سختی خمشی، w وزن در واحد طول، d ضخامت و υ نسبت پوآسون هست

بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری باضخامت‌های متفاوت پوشش تونل به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری در پوشش تونل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر کمترین مقادیر نیروی محوری به دست آمده است و با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، نیروی محوری نیز در نقاط مختلف افزایش یافته است. در بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری دیده می‌شود که مقادیر نیروی محوری در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر میهست و از حساسیت کمتری برخوردار

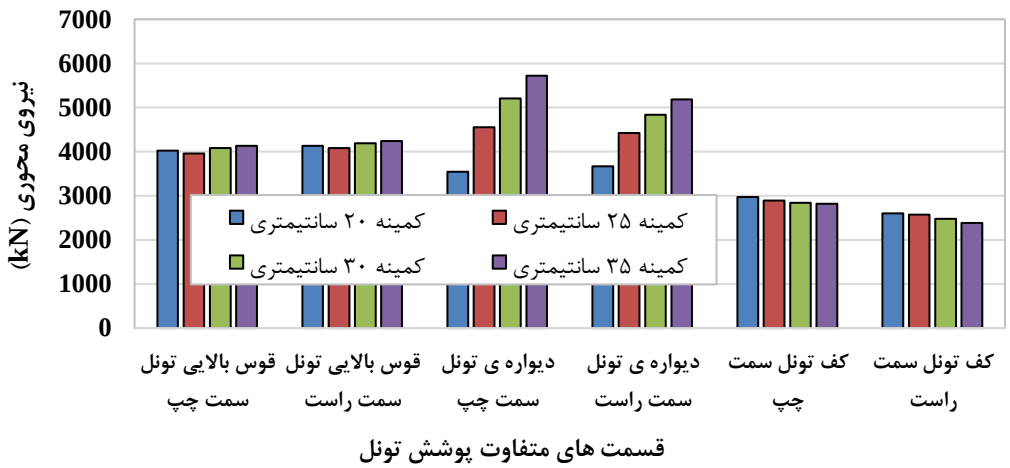
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر نیروی محوری در دیواره‌ها و قوس تقریباً در یک محدوده هست.



شکل ۱۲. بیشینه مقادیر نیروی محوری در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig .12. Maximum axial force values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses



شکل ۱۳. کمینه مقادیر نیروی محوری در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig.13. Minimum axial force values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

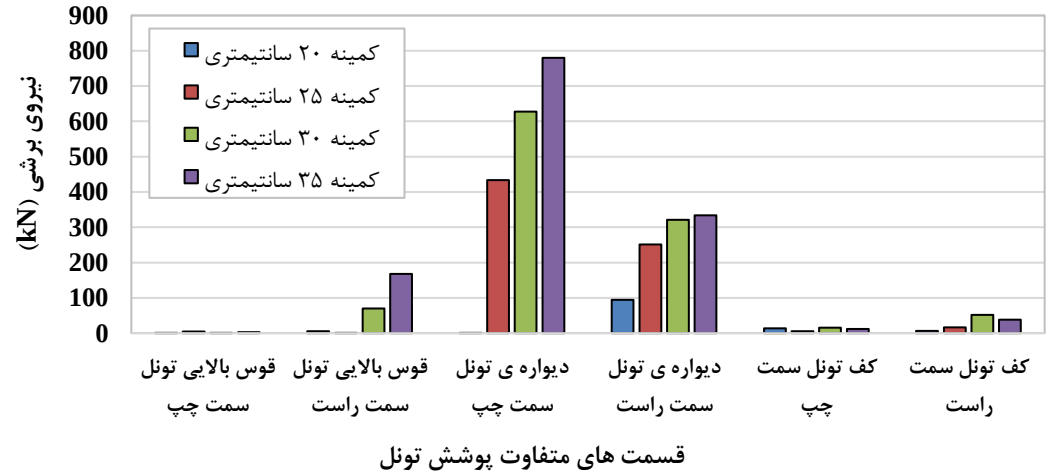
بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی باضخامت‌های متفاوت پوشش تونل به ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی در پوشش تونل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر کمترین مقادیر نیروی برشی به دست آمده است و با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، نیروی برشی نیز در نقاط مختلف افزایش یافته است. در بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی دیده می‌شود که مقادیر نیروی برشی در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی بیشتر میهست و از حساسیت بیشتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر نیروی برشی در قوس بالایی تونل نسبت به دیگر نقاط مقادیر کمتری را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۱۴. بیشینه مقادیر نیروی برشی در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig. 14. Maximum shear force values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

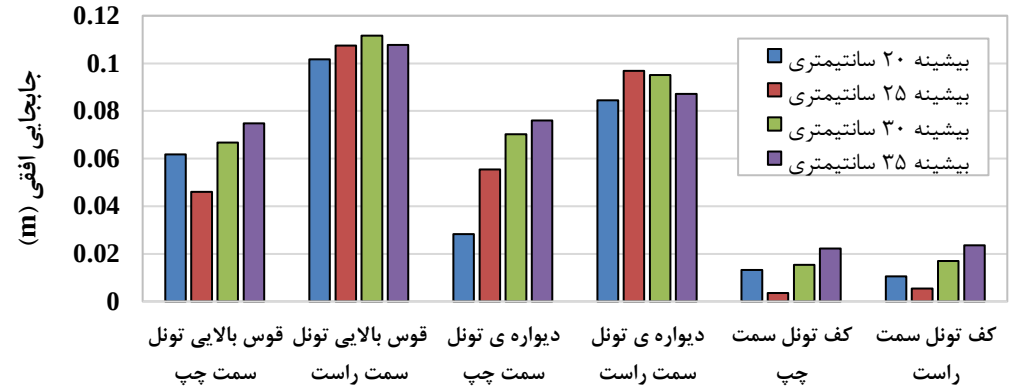


شکل ۱۵. کمینه مقادیر نیروی برشی در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig.15. Minimum shear force values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

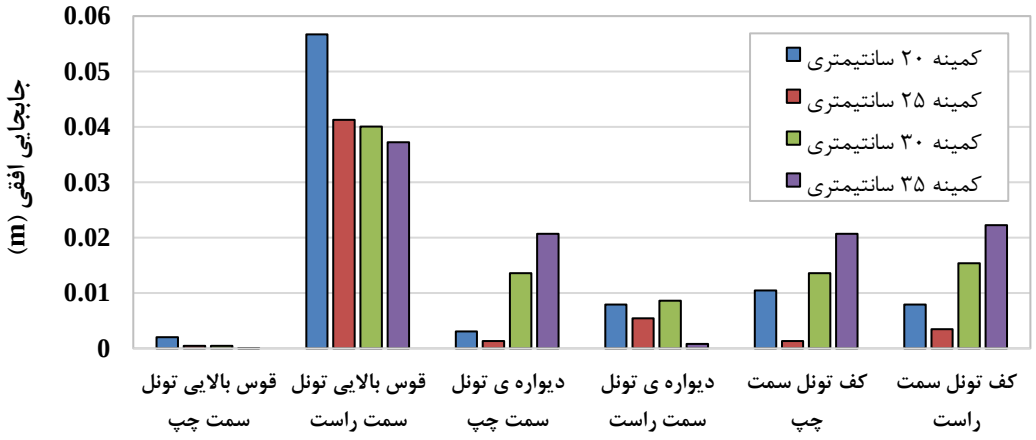
بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی باضخامت‌های متفاوت پوشش تونل به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی در پوشش تونل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر، در اکثر موارد کمترین مقادیر جابجایی افقی به دست آمده است و با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، جابجایی افقی نیز در نقاط مختلف تا حدودی افزایش یافته است. در بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی دیده می‌شود که مقادیر جابجایی افقی در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر میهست و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که مقادیر جابجایی افقی در قوس بالایی تونل و دیواره‌های تونل مقادیر تقریباً یکسان را در بررسی حالت بیشینه نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۱۶. بیشینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig. 16. Maximum horizontal displacement values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

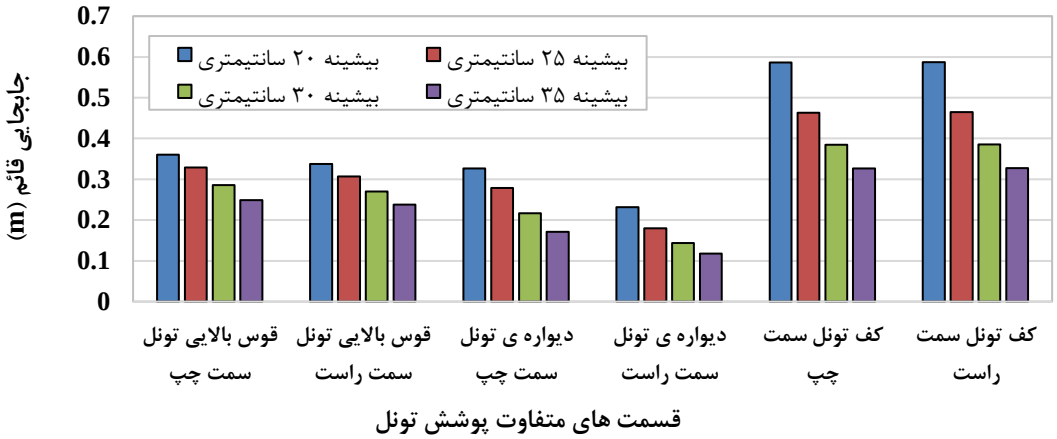


شکل ۱۷. کمینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig. 17. Minimum horizontal displacement values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

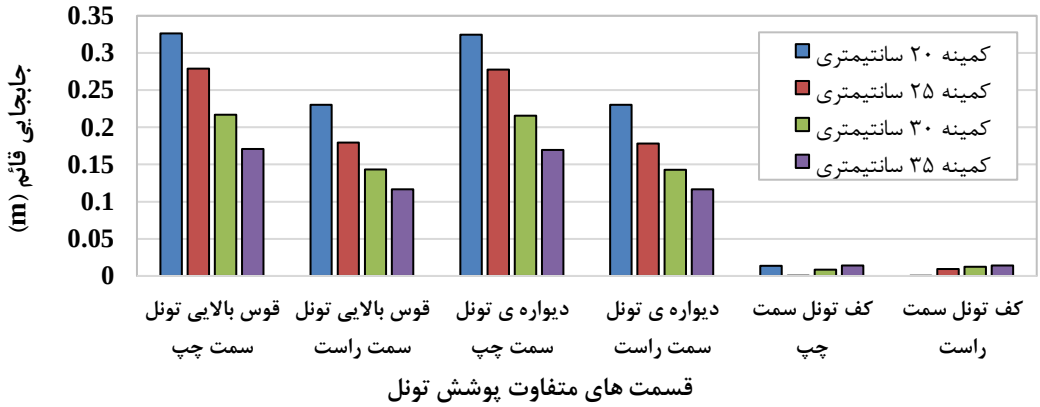
بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم باضخامت‌های متفاوت پوشش تونل به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در پوشش تونل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر، بیشترین مقادیر جابجایی قائم به دست آمده است و با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، جابجایی قائم نیز در نقاط مختلف کاهش یافته که این تغییرات در بیشینه مقادیر مربوط به کف تونل روشن‌تر است. در بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم دیده می‌شود که مقادیر جابجایی قائم در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی بیشتر میهست و از حساسیت بیشتری برخوردار است. لازم به ذکر است که مقادیر جابجایی قائم در قوس بالایی تونل و دیواره‌های تونل مقادیر تقریباً یکسان را در بررسی حالت بیشینه و کمینه نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۱۸. بیشینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig. 18. Maximum vertical displacement values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses



شکل ۱۹.کمینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل باضخامت متفاوت پوشش

Fig. 19. Minimum vertical displacement values in different parts of the tunnel with different coating thicknesses

با تغییر در ضخامت پوشش تونل و مقایسه بین شرایط مختلف، هرکدام از پارامترهای مورد بررسی در حالت بیشینه و کمینه در شکل ۱۲ الی شکل ۱۹ به صورت شماتیک ترسیم شد و به صورت کیفی مورد بحث قرار گرفت. توجه به تغییرات صورت گرفته در هر قسمت از تونل، درصد رشد پارامترهای مورد بررسی محاسبه و آورده شده است. از آنجا که داده‌های مربوط به کمینه مقادیر در بررسی پارامترهای مهندسی تونل، در برخی مواقع اعداد کوچکی هستند، درصد تغییرات محاسبه شده به شدت بزرگ بوده که از این‌رو، برای ایجاد مقایسه‌ی منطقی، از درصد تغییرات بیشینه در قسمت‌های متفاوت تونل بهره گرفته می‌شود. با توجه به داده‌های محاسباتی مشاهده می‌شود که قوس بالایی تونل در نیروهای بسیج شده و کف و دیواره‌های تونل در جابجایی‌های اعمالی، بحرانی‌تر هست.

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که بیشترین درصد تغییرات نیروی محوری در حالت بیشینه مربوط به دیواره چپ تونل با مقدار ۶۲٪ است؛ این یعنی دیواره چپ بیشترین حساسیت را نسبت به افزایش ضخامت پوشش دارد و بار محوری بیشتری را جذب می‌کند.کمترین تغییرات نیروی محوری در حالت کمینه مربوط به قوس‌های بالایی تونل (۴٪) است که نشان می‌دهد بخش تاج تونل نسبت به تغییر ضخامت لاینینگ کمتر تحت فشار محوری قرار می‌گیرد و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

پایداری نسبی بیشتری دارد. در بخش نیروی برشی، بیشترین تغییرات بیشینه برابر ۶۹/۲٪ در کف راست تونل است؛ این بیانگر آن است که کف تونل در برابر تغییر ضخامت بسیار حساس بوده و افزایش سختی پوشش، برش را به‌شدت افزایش می‌دهد. در مقابل، قوس بالایی سمت راست تنها ۱۰٪ تغییر برشی را در حالت بیشینه تجربه می‌کند؛ یعنی ناحیه تاج تونل نسبت به برش ناشی از تغییر ضخامت، کمترین آسیب‌پذیری را دارد. بیشترین تغییرات جابجایی قائم (بیشینه و کمینه) در کف تونل با اعداد بسیار بالا (۹۱٪ تا ۹۸٪) رخ داده که ثابت می‌کند کف تونل بحرانی‌ترین محل از نظر نشست و تغییر شکل عمودی است و بیشترین منفعت را از افزایش ضخامت پوشش می‌برد.

جدول ۵. درصد تغییرات پارامترهای مورد بررسی تونل

Table 6. Percentage of changes in the parameters examined in the tunnel

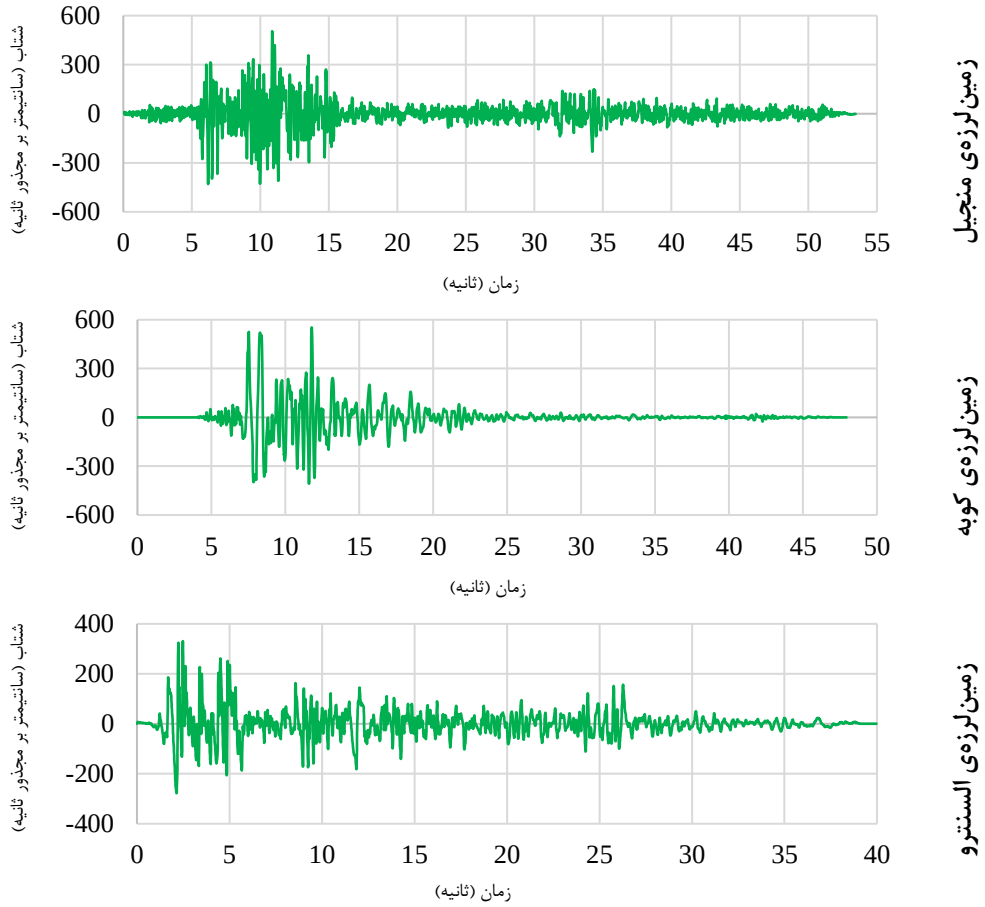
		قوس بالایی تونل (چپ)	قوس بالایی تونل (راست)	دیواره‌ی تونل (چپ)	دیواره‌ی تونل (راست)	کف تونل (چپ)	کف تونل (راست)
درصد تغییرات نیروی محوری	تغییرات بیشینه	20	11	20	17	11	5
	تغییرات کمینه	4	4	62	41	5	9
درصد تغییرات نیروی برشی	تغییرات بیشینه	13.38	22.4	15	13	64	44
	تغییرات کمینه	25.95	50.40	18.9	25.4	18.5	69.2
درصد تغییرات جابجایی افقی	تغییرات بیشینه	62	10	16.9	15	53.9	33.2
	تغییرات کمینه	119	52	14.73	95.3	14	53
درصد تغییرات جابجایی قائم	تغییرات بیشینه	45	42	91	97	79	79
	تغییرات کمینه	91	98	91	98	66	25

اعداد جدول، تغییرات به وجود آمده مابین کمترین و بیشترین مقادیر در بیشینه و کمینه حالت را نشان می‌دهد.

بررسی تأثیر زمین‌لرزه

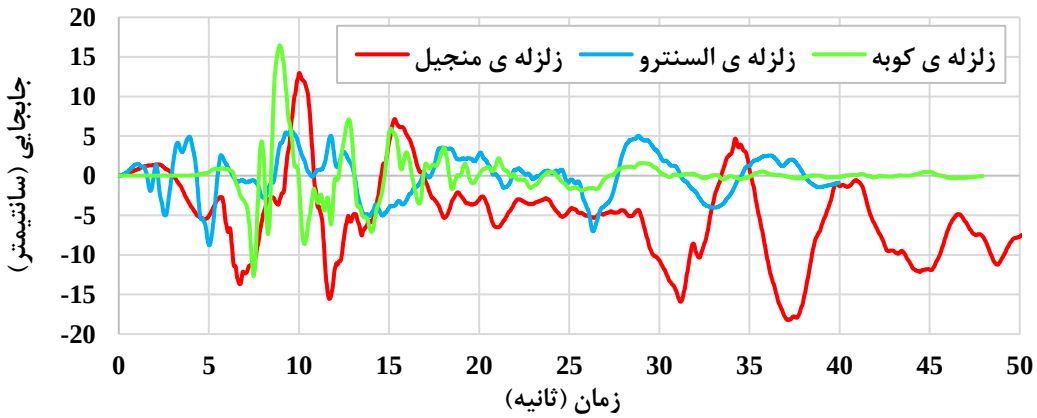
به منظور ایجاد مقایسه بین شرایط مختلف لرزه‌ای و همچنین ایجاد مقایسه با حالت غیرلرزه‌ای؛ ۴ حالت متفاوت بررسی شده است. برای این منظور از شش قسمت متفاوت مقطع تونل که عبارت‌اند از قوس بالایی تونل سمت چپ، قوس بالایی تونل سمت راست، دیواره‌ی تونل سمت چپ، دیواره‌ی تونل سمت راست، کف تونل سمت چپ و کف تونل سمت راست، بهره گرفته شده است. برای یادآوری مطالب فصل گذشته، شکل‌های شتاب نگاشت مربوط به هرکدام از زمین‌لرزه‌های منجیل، کوبه و السنترو، در شکل ۲۰ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۲۰. شتاب نگاشت زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه

Fig. 20. Accelerograms of the studied earthquakes



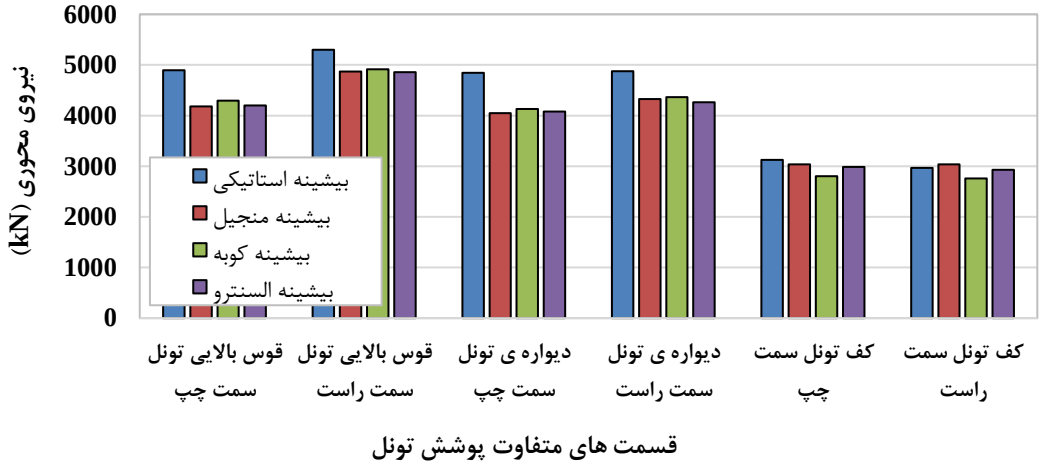
شکل ۲۱. مقایسه‌ی شکل جابجایی - زمان در سه زلزله‌ی مورد مقایسه

Fig. 21. Comparison of displacement-time diagrams in the three earthquakes being compared

بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در شکل ۲۲ و شکل ۲۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری در شرایط استاتیکی بیشتر از حالات لرزه‌ای هست.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری، مقادیر نیروی محوری در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر هست و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که تفاوت مقادیر ثبت شده در حالات لرزه‌ای متفاوت و حالت غیرلرزه‌ای، تفاوت چشمگیری را از خود نشان نمی‌دهد و همگی در یک محدوده رفتار می‌کنند.



شکل ۲۲. بیشینه مقادیر نیروی محوری در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 22. Maximum axial force values in different parts of the tunnel under different seismic conditions



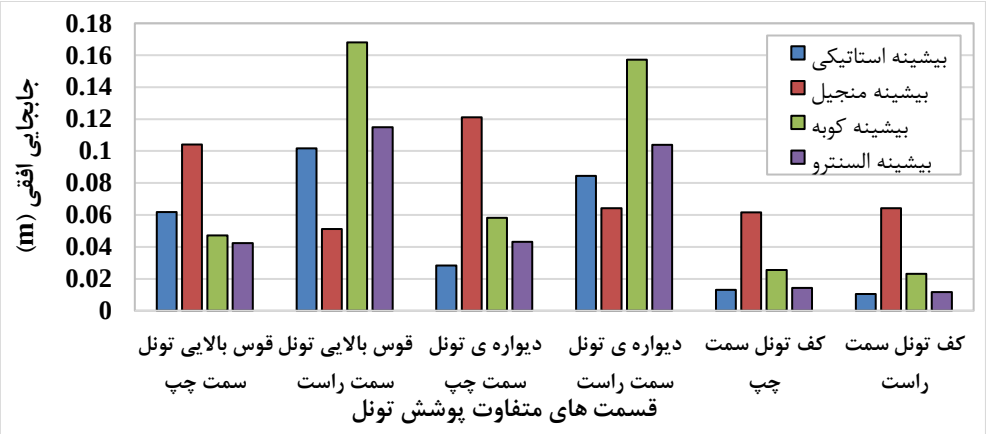
شکل ۲۳. کمینه مقادیر نیروی محوری در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 23. Minimum axial force values in different parts of the tunnel under different seismic conditions

بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در شکل ۲۴ و شکل ۲۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط استاتیکی در بیشتر نقاط مورد بررسی کمتر از حالات لرزه‌ای هست ، این حالت به طور نسبی در کمینه مقادیر مورد بررسی نیز مشاهده می‌شود. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی افقی، مقادیر جابجایی افقی در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر هست و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات بسیار زیاد در قوس بالایی و دیواره‌های تونل، بررسی جابجایی افقی در این مناطق بحرانی‌تر هست. با توجه به شکل ترسیم شده مشخص است که زمین‌لرزه‌ی کوبه در

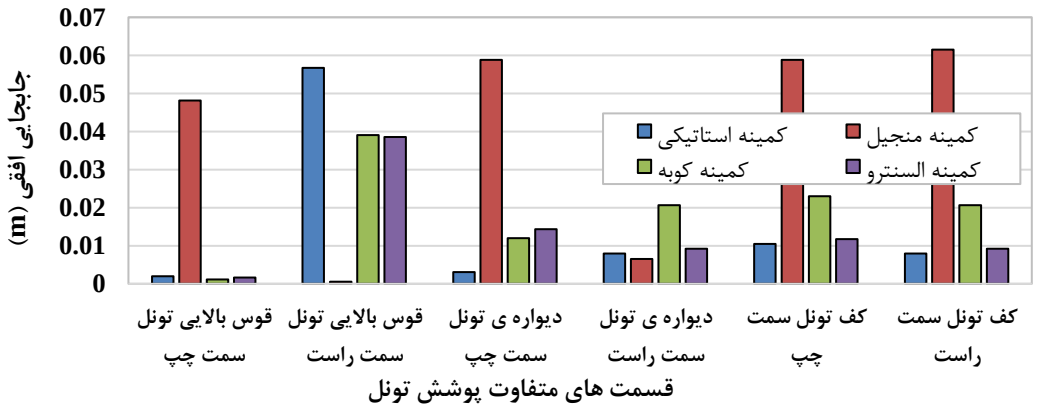
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

ایجاد جابجایی افقی در پوشش تونل نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند.



شکل ۲۴. بیشینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 24. Maximum horizontal displacement values in different parts of the tunnel under different seismic conditions

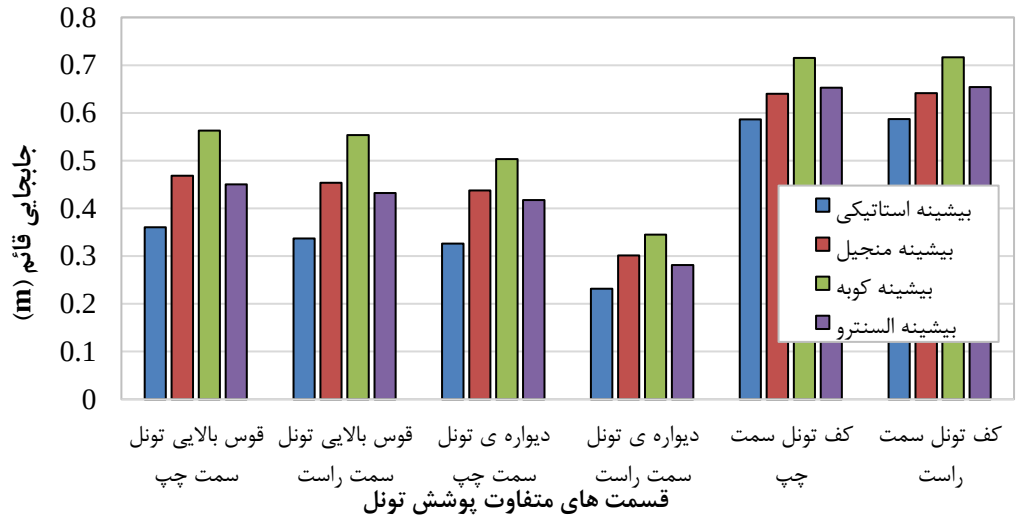


شکل ۲۵. کمینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 25. Minimum horizontal displacement values in different parts of the tunnel under different seismic conditions

بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در شکل ۲۶ و شکل ۲۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در شرایط استاتیکی در نقاط مورد بررسی کمتر از حالات لرزه‌ای هست. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی قائم دیده می‌شود که مقادیر جابجایی قائم در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی بیشتر هست و از حساسیت بیشتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات بسیار زیاد در کف تونل، بررسی جابجایی قائم در این قسمت تونل بحرانی‌تر هست. با توجه به شکل ترسیم شده مشخص است که زمین‌لرزه‌ی کوبه در ایجاد جابجایی قائم در پوشش تونل نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]



شکل ۲۶. بیشینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 26. Maximum vertical displacement values in different parts of the tunnel under different seismic conditions



شکل۲۷. کمینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

Fig. 27. Minimum vertical displacement values in different parts of the tunnel under different seismic conditions

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نیروی محوری، نیروی برشی و جابجایی افقی در تونل پاتاوه–دهدشت تحت تأثیر تغییر ضخامت لاینینگ (۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی‌متر) در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای مختلف بصورت عددی بررسی شده است . تحلیل‌ها بر اساس مدل موهر–کلمب در نرم‌افزار PLAXIS و در شش نقطه شامل قوس چپ، قوس راست، دیواره چپ، دیواره راست، کف چپ و کف راست تونل انجام گردید.

با بررسی مدل‌سازی محیط مورد تمرکز در ارتباط با فضای مورد بررسی و المان‌های پوشش تونل و همچنین تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی انجام شده، یافته‌های عددی پژوهش را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

در حالت استاتیکی جابجایی قائم (نشست) با افزایش ضخامت لاینینگ از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر نشست کف تونل ۱۰۰٪ کاهش یافت. در سایر نقاط، کاهش نشست بین ۴۲٪

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

تا ۹۸٪ گزارش شد. کف تونل بحرانی‌ترین بخش بوده و بیشترین مقدار تغییر شکل را تجربه کرده است.

در حالت استاتیکی جابجایی افقی، افزایش ضخامت پوشش سبب کاهش ۵۲٪ تا ۱۱۹٪ در بیشینه و کمینه جابجایی افقی در دیواره‌ها شد. بیشترین حساسیت جابجایی افقی در کف تونل و سپس دیواره‌ها مشاهده شد.

نیروی محوری در حالت استاتیکی، با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر نیروی محوری بیشینه در قوس چپ۲۰٪ افزایش و در دیواره‌ها تا ۶۲٪ افزایش و کمترین مقدار نیرو در کف تونل مشاهده شد (حساسیت پایین‌تر سازه به بار محوری) همچنین در حالت استاتیکی بیشترین مقادیر برشی در قوس‌ها و سپس در دیواره‌ها رخ داد.

در حالت لرزه‌ای، پرخطرترین رکورد زلزله کوبه بیشترین جابجایی افقی و قائم را ایجاد کرده است (به دلیل دامنه قوی و مدت‌زمان مؤثر ارتعاش). جابجایی‌ها در حالت لرزه‌ای کمتر از حالت استاتیکی ثبت شد. ضخامت ۳۵ سانتی‌متر بهترین عملکرد سازه‌ای را ایجاد کرده است (کاهش شدید جابجایی‌ها و افزایش قابل کنترل نیروهای داخلی).

نشست کف تونل مهم‌ترین و بحرانی‌ترین شاخص عملکرد بوده است تونل از نظر مقاومتی، در برابر بارهای دینامیکی و استاتیکی دارای پایداری کافی است. به طور کلی، مقادیر نیرو با ضخیم‌تر شدن پوشش افزایش و مقادیر تغییرشکل‌ها کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش سختی و مقاومت سازه است.

مابین نقاط متفاوت مورد مطالعه در پوشش تونل، کف تونل در تمامی حالات بررسی شده، بحرانی‌ترین نقطه در مورد نشست اعمالی هست؛ و از سوی دیگر دیواره‌ی سمت راست تونل (دیواره‌ی با روباره‌ی کمتر) کمترین میزان نشست۰۱/ میلی‌متر تغییرات و درصد تغییرات جابجایی افقی با تغییرات بیشینه ۱۶/۹درصد در دیواره تونل (سمت چپ) و درصد تغییرات کمینه۹۵/۳ درصد را گزارش می‌دهد.

هدف از تحلیل دینامیکی تونل در برابر بار زلزله، بررسی پایداری تونل و نگهداری آن در برابر لرزش‌های ناشی از زلزله‌های احتمالی است. برای شبیه‌سازی بار زلزله‌ی منطقه، با در نظر گرفتن ملاحظات مختلف، چند شتاب نگاشت با بیشترین شتاب۰/۳۵g بر اساس مبانی احتمالات زلزله‌ی مبنا انتخاب شده است. ثبت رکوردهای پارامترهای مورد نظر در محدوده‌ی مرز تونل نشان می‌دهد، همواره ، نیروی محوری و تنش برشی در نیمه‌ی بالایی تونل مقادیر بیشتری را نسبت به رکوردهای ثبت شده در نیمه‌ی پایینی نشان می‌دهد. پوشش نهایی تونل مذکور در برابر تنش برشی اعمالی توسط زلزله‌های مورد اشاره در پژوهش دارای مقاومت کافی است. ضریب ایمنی پوشش نهایی برابر با ۲/۰۴ است.

در هر دو حالت بررسی جابجایی قائم و افقی در پوشش تونل بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در پوشش تونل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر، بیشترین مقادیر جابجایی قائم به دست آمده است و با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، جابجایی قائم نیز در نقاط مختلف کاهش یافته که این تغییرات در بیشینه مقادیر مربوط به کف تونل روشن‌تر است.

از بین زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه، زمین‌لرزه‌ی کوبه به دلیل دامنه‌ی اعمال جابجایی بیشتر، بحرانی‌تر است، از این‌رو زمین‌لرزه‌های با دامنه‌ی اعمال قوی‌تر، بحرانی‌تر از زمین‌لرزه‌های با زمان اعمال بالا، هستند.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش ضخامت پوشش تونل، جابجایی‌های اعمال شده، کاهش یافته و میزان نیروهای اعمالی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که با افزایش ضخامت پوشش تونل از ۲۰ سانتیمتر به ۳۵ سانتیمتر، نشست کف تونل در حدود صد درصد کاهش یافته است ولیکن این اختلاف در دیگر نقاط مورد بررسی کمتر هست.

پیشنهاد می‌گردد استفاده از مصالح الیافی در ساخت تونل می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای افزایش ضخامت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

پوشش بتنی در نظر گرفته شود. بتن الیافی به دلیل ویژگی‌هایی مانند افزایش مقاومت کششی و کاهش ترک‌خوردگی، می‌تواند در لاینینگ تونل‌ها مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش ضخامت پوشش بتنی کمک کند (Ghodratnama et al., 2025).

References

Cacciari, P. P., & Futai, M. M. (2021). The influence of fresh and weathered rock foliation on the stability of the monte seco tunnel. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(2), 537-558.

Ghodratnama, M., Rajaee, A., Masoodi, A. R., Abrishami, S., TQ, A. D., & Pournoori, P. (2025). Enhancing the fracture toughness of eco-friendly self-compacting concrete with waste glass coarse aggregates and steel fibers: A mixed-mode I/II fracture analysis using SCB specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 138, 104969.

Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I. C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and underground space technology, 16(4), 247-293.

Heidari, .R., & Fahimi Far, A. (2018). The effect of the weight of the fractured area on the stress distribution and displacement of the environment around the tunnel. Scientific Research Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 4(1), 17-26. (In Persian)

Hesami, S., Ahmadi, S., Ghalesari, A. T., & Hasanzadeh, A. (2013). Ground surface settlement prediction in urban areas due to tunnel excavation by the NATM. Electr. J. Geotech. Eng, 18, 1961.

Jaberi, A., & Zare, S. (2024). The effect of soil characteristics on predicting settlement caused by tunnel excavation in different behavioral models in Line A of Qom Metro. Journal of Mining Engineering, 18(58), 15-35. (In Persian)

Jamshidi Avanaki, M., Abedi, M., & Hoseini, A. (2020). Experimental and numerical-based design of hybrid steel fibre-reinforced concrete tunnels. Magazine of Concrete Research, 72(14), 720-733.

Jamshidi Avanaki, M. J., & Dehghan, A. N. (2021). Seismic performance of steel fiber reinforced concrete segmented lining tunnels. In Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art (pp. 5685-5691). CRC Press.

Kolymbas, D. (2005). Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Leca, E., & New, B. (2007). Settlements induced by tunneling in soft ground. Tunnelling and Underground Space Technology, 22(2), 119-149.

Mahdevari, S., Esmaeili, E., Abedi, A., (2020). Numerical modeling and stability analysis of shallow tunnels using finite difference method, 7th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management and 6th Specialized Exhibition of Housing and Building Manufacturers in the Province. (In Persian)

Molaei, A. (2019). Development of urban subsurface spaces, a new strategy in urban development, Quarterly Journal of Urban Structure and Function Studies, 6 (18), 57-86. (In Persian)

Niklas, F. J. (2003). Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Imperial College of Science, UK).

Plaxis, B. V., Vermeer, C., & Team, P. (1998). Plaxis. Benchmarking, 1(5).

Saeedi Abbasabad, M., Mousavi, M. & Nejad Shah Mohammad, F. (2013). Systematic evaluation of the maintenance of the tunnel of Tehran Metro Line 4 at the non-level intersection with the Tohid Tunnel and the tunnel of Tehran Metro Line 7 against dynamic loads caused by earthquakes. Tunnel and Underground Space Engineering, 2(1), 1-11. (In Persian)

Suwansawat, S., & Einstein, H. H. (2007). Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 133(4), 445-468.

Sun, X., Zhao, C., Tao, Z., Kang, H., & He, M. (2021). Failure mechanism and control technology of large deformation for Muzhailing Tunnel in stratified rock masses. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(6), 4731-4750.

Wang, R., Zhang, D., Guo, C., & Yan, J. (2025). Structural Safety Early Warning and Treatment

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]

Technology of Metro Tunnel in Soft Soils. Springer.

Yang, L., Yang, W., Zhou, Y., Chen, Z., & Yao, C. (2025). An experimental study of the influence of local segment damage on dynamic response characteristics of shield tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 166, 106976.

Yuan, Z., Xu, C., Cai, Y., & Cao, Z. (2015). Dynamic response of a tunnel buried in a saturated poroelastic soil layer to a moving point load. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 77, 348-359.

Zareifard, M. R. (2020). Stability Of Tunnels Considering The Gravity Loading And The Lining Stiffness. Journal of Mining Engineering, 15(48), 45-60. (In Persian)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.3.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1020431]