Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Pseudo Static Study of Tunnel with Mohr-Coulomb and Hardening Models Located in Soft Soil

Masoud Amelsakhi[1]✉

1. Assistant Professor, Civil Engineering Department, Qom University of Technology, Qom, Iran. E-mail: mamelsakhi@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 May 2024
Received in revised form 27 October 2024
Accepted 12 November 2024

Keywords:
circle shape tunnel, pseudo static, soil parameters.

ABSTRACT

Tunnels behave differently under seismic conditions due to their geometric shape, geotechnical parameters and installation depth. Although tunnels are less damaged compared to surface structures, they are still damaged during earthquakes. Various experiences have proved this matter, so researchers are concerned to study the seismic behavior of tunnels. In this research, circular tunnels are discussed under static and pseudo-static loading. In addition to different pseudo static earthquake factors, internal soil friction angle, soil behavior models, sliding and non-sliding of tunnel wall are also studied. Three different soft, medium and stiff soil conditions are studied. Some results show that in all three soil conditions and two soil behavior models, Mohr-Coulomb and hardening soil, the horizontal displacements increase due to the increase of the pseudo static earthquake factor. It should be noted that softening of the soil increases the horizontal displacements.

Introduction

It has been shown that in most strong earthquakes, underground structures are less vulnerable than above-ground surface structures, but they may be susceptible to seismic damage, especially existing structures. At shallow depths and in weak geological conditions. Because of the indirect effects on human life and overall transport performance, tunnels are of great importance to planners and geotechnical experts. Buried structures such as piles behave differently in seismic conditions depending on their geometric shape, geotechnical parameters and depth of installation. Although tunnels are less susceptible to earthquake damage than above-ground structures, this does not mean that these structures will not be destroyed by an earthquake. Existing experience has demonstrated this problem, and therefore the need to study the seismic behavior of tunnels has been confirmed by various researchers. One of the important points in the study of the seismic behavior of tunnels is the uncertainty in the choice of the geotechnical parameters of the soil and, in general, of the environment in which the tunnel is located, so that changes in these parameters will modify the seismic behavior of the tunnel. It is obvious that in the dynamic and quasi-static behavior of the tunnel, the changes of these parameters as well as the study of their effects on the seismic behavior of the tunnel are of great importance and the extent of these changes and effects should be investigated. Nikakhtar and Zare investigated the static and dynamic behavior of the circular tunnel, with particular emphasis on the study of soil behavior (Nikakhtar and Zare, 2021). Doan et al. numerically analyzed the stresses and displacements of tunnels under static and seismic loading. In this research, the effects of covering tunnels were investigated in the analyses performed (Duan et al., 2023). Yuksel and Akbas studied the static stresses caused by multilayer soils for twin tunnels using finite element and boundary element methods (Yuksel and Akbas, 2023).

Cite this article: Amelsakhi, M. (2024). Pseudo Static Study of Tunnel with Mohr-Coulomb and Hardening Models Located in Soft Soil. Journal of Engineering Geology, 18 (3), 437-449. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.101687

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.101687

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.101687]

Materials and Methods

Two different behavior models, Mohr-Coulomb and hardening soil, were considered in the analysis. On the other hand, in the Mohr-Coulomb behavior model, different values of the friction angle of 20, 24, 28, 32 and 36 degrees were included in the analyses. It is well known that the quasi-static seismic behavior of tunnels depends on the geotechnical parameters and the nature of the environment in which the tunnel is located. In the quasi-static analysis, 3 different quasi-static coefficients of 0.2, 0.25 and 0.3 of the Earth's gravitational acceleration have been considered. These coefficients were used in both sets of analyses with different soil behavior models.

Results and Discussion

The results obtained show that in both types of soil model, i.e. Mohr-Coulomb and hardening soil, for the internal friction angle of the soil to remain constant, the amount of horizontal displacement of the tunnel wall increases with the increase in the quasi-static coefficient of the earthquake. Another point worth mentioning in this section is that in quasi-static analysis, as the soil becomes looser, the amount of horizontal displacement of the soil adjacent to the tunnel increases in both types of soil behavior models. It is also observed that in the quasi-static analysis, the horizontal displacement of the soil is estimated more with the Mohr-Coulomb behavior model, in some cases the results are up to 3 times higher.

Conclusions

The results and the discussion and interpretation of the obtained results are discussed below. The obtained results show that in the Mohr-Coulomb behavioral model, the vertical displacement at the bottom of the tunnel increases with the increase of the internal friction angle of the soil. When the possibility of moderate slip is considered, the values of vertical displacements are higher than in the case without slip. For the Mohr-Coulomb behavioral model, the vertical deformation at the bottom of the tunnel increases with the increase of the internal friction angle of the soil. Similar to the Mohr-Coulomb behavior model, when the hardening soil model is taken into account, an increase in the vertical displacement at the bottom of the tunnel was observed by increasing the internal friction angle of the soil. The results obtained in loose soils and the Mohr-Coulomb behavioral model indicate that as the internal friction angle of the soil increases, the values of ground surface settlement decrease.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.101687]

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

بررسی رفتار شبه استاتیکی تونل در مدل‌های موهر–کولمب و سخت شونده در خاک سست

مسعود عامل سخی[۱] ✉

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: mamelaskhi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

کلیدواژه‌ها:
تونل دایره‌ای، رفتار شبه استاتیکی، مدل موهر–کولمب و سخت شونده.

چکیده

در این تحقیق، رفتار تونل دایره‌ای شکل در تحلیل‌های استاتیکی و شبه استاتیکی در خاک سست مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر در نظر گرفتن ضرایب مختلف زلزله، به بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، اثر مدل‌های رفتاری موهر–کولمب و خاک سخت شونده، در نظر گرفتن شرایط لغزش و عدم لغزش دیواره تونل نیز پرداخته شده است. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داده شده است علاوه بر آنکه افزایش شباب‌های شبه استاتیک باعث افزایش تغییر مکان‌های افقی جداره تونل شده‌اند، در صورت در نظر گرفتن امکان لغزش، مقادیر تغییر مکان قائم تاج تونل نسبت به حالت بدون امکان لغزش، کمتر است. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که میزان تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در خاک‌های سست به مراتب بیشتر است، به عبارت دیگر با افزایش سفتی و سختی خاک، هم مقدار نشست سطح زمین بسیار کاهش یافته و هم از سوی دیگر میزان تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر مقدار نشست سطح زمین بسیار کمتر می‌باشد.

مقدمه

این موضوع اثبات شده است که در اکثر زلزله‌های قوی، سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های روزمینی واقع در سطح زمین، کمتر آسیب‌پذیرند اما به هرحال ممکن است مستعد خرابی لرزه‌ای باشند، به ویژه سازه‌های موجود در اعماق کم و در شرایط ضعیف زمین‌شناسی. تونل‌ها به دلیل تأثیرهای غیرمستقیم روی زندگی مردم و عملکرد کلی حمل و نقل، دارای اهمیت زیادی از نظر برنامه‌ریزان و متخصصان ژئوتکنیک می‌باشند. سازه‌های مدفون مانند شمع‌ها در شرایط لرزه‌ای بسته به شکل هندسی، پارامترهای ژئوتکنیکی و عمق قرارگیری خود، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. گرچه تونل‌ها در اثر زلزله آسیب کمتری را نسبت به سازه‌های واقع بر روی سطح زمین متحمل می‌شوند، اما این بدان معنا نیست که در اثر زلزله، این سازه‌ها خود دچار تخریب نخواهند شد. یکی از نکات مهم در بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌ها، عدم قطعیت در انتخاب پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و در کل، محیط دربردارنده تونل است، به نحوی که تغییرات این پارامترها رفتار لرزه‌ای تونل را با تغییر مواجه خواهد کرد. بدیهی است که در رفتار دینامیکی و شبه استاتیکی تونل، تغییرات این پارامترها و نیز بررسی اثرات آن بر روی رفتار لرزه‌ای تونل از اهمیت بالایی برخوردار است که باید میزان این تغییرات و اثرات مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد.

بررسی تونل‌های احداث شده از نظر تغییر شکل و پایداری سطوح داخلی یکی از مسائل مهم می‌باشد چراکه تغییر شکل بیش از حد تونل ممکن است باعث سست شدن سطح خاک و فروریزش کامل تونل شود. یکی از چالش‌های بزرگ در مورد تونل‌های احداث شده در زمان‌های گذشته، نه فقط به علت پایداری خود تونل، بلکه به علت تغییر شکل‌هایی می‌باشد که در این تونل‌ها به مرور زمان انجام

استناد: عامل سخی، م. (۱۴۰۳). بررسی رفتار شبه استاتیکی تونل در مدلهای موهر-کولمب و سخت شونده در خاک سست. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۳)، ۴۳۷-۴۴۹. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.3.101687

ناشر: دانشگاه خوارزمی.

© نویسندگان.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.101687]

پذیرفته است (Hoek, 2001). رفتار نگاری تونل‌ها از اهمیت ویژه‌ای در دنیا برخوردار است به طوریکه در تمام تونل‌های بزرگ با نصب ابزارهای لازم، مقادیر فشارهای توده خاک و تغییر شکل‌ها چه در زمان ساخت و چه در دوران بهره‌برداری اندازه‌گیری شده و عملکرد تونل مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (Thorpe, 2007).

خسارات ناشی از زلزله می‌تواند به دو صورت حاصل شود: ۱) خسارات ناشی از ارتعاش زمین، ۲) جابه‌جایی دائمی ناشی از حرکت دو لبه گسل نسبت به سطح زمین. گسلش اغلب با آسیب‌رسانی به سازه‌های مهندسی همراه است. این آسیب‌های ناشی از گسلش، شامل گسیختگی ساختمان‌ها، بزرگراه‌ها، خطوط ریلی، پل‌ها، پله‌ای راه‌آهن، سدها، تونل‌ها، پی‌ها و خطوط انتقال نیرو می‌باشد (Lin et al., 2007). بستر خاک سربار در اثر انتشار فشار گسلی که در زیر قرار گرفته است، تغییر شکل می‌یابد و ناحیه برشی مثلث شکلی را در توده خاک ایجاد می‌کند. قرارگیری زیرساخت‌های زیرزمینی در این منطقه یا در نزدیکی آن، باعث تغییرات در میزان جابه‌جایی و تنش‌های جداره تونل‌ها نسبت به حالت استاتیکی می‌شود. این تغییرات ممکن است آسیب‌های شدیدی بر تونل‌ها وارد سازد. از آنجا که پیش‌بینی وضعیت پایداری با توجه به طبیعت ناشناخته توده خاک همواره با پیچیدگی‌هایی همراه بوده است، در حال حاضر روش‌های عددی به عنوان روش جامعی برای این منظور به کارگرفته می‌شود و در تحلیل پایداری تونل و طراحی آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده‌اند. با استفاده از نتایج مشاهدات و بررسی پایداری یا عدم پایداری شمار زیادی از تونل‌ها، مطالعات آزمایشگاهی صحرایی زیادی انجام گرفته است. در کنار آن‌ها از روش‌های عددی نیز نباید غافل شد. بدون شک آزمایش‌های بزرگ مقیاس، بهترین روش برای مطالعه رفتار تغییر شکل واقعی خاک سربار در هنگام وقوع پدیده انتشار گسل و همچنین تأثیر آن بر زیرساخت‌هایی همچون تونل است. آزمایش‌های بزرگ مقیاس، در واقعیت به مراتب بسیار پرهزینه و از نظر اجرایی دشوار است. در هر حال برای اطمینان از صحت پیش‌بینی‌های مطالعات عددی، از مدل‌های فیزیکی استفاده می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها با نتایج حاصل از آنالیزهای عددی مقایسه می‌شوند تا درستی شبیه‌سازی عددی قابل اعتماد باشد. به این ترتیب، تحلیل‌های عددی با مطالعات مدل فیزیکی بزرگ مقیاس مورد مقایسه و صحت سنجی قرار می‌گیرند. در این حالت نتایج بدست آمده می‌توانند صحت مطالعات را تأیید نمایند (Gaudin, 2003). برنسبی و همکاران (Bransby et al., 2008) مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ در آزمایشگاه انجام دادند که برای بررسی انتشار گسیختگی در محدوده ۱۵ تا ۲۵ متر را مدل‌سازی کردند. آن‌ها آزمایش‌ها مورد نظر را در شتاب خاص، انجام دادند. دستگاه ویژه‌ای در آزمایشگاه برای شبیه‌سازی گسل نرمال و معکوس طراحی و ساخته شد. طراحی دستگاه به گونه‌ای است که سیستم هدایت مرکزی و سه گوه آلومینیوم برای تحمیل جابه‌جایی در شیب زاویه مورد نظر به کارگرفته می‌شوند. لولی و همکاران (Loli et al., 2011) در بررسی‌های خود از هشت آزمایش مدل‌سازی کامل سانتریفیوژ در آزمایشگاه که در شتاب عملیاتی خاصی هدایت می‌شدند، استفاده کردند. مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی مکانیسم وقوع انتشار گسل در خاک و همچنین رفتار سازه‌هایی همچون پی صندوقه‌ای در مواجهه با این پدیده است. کیو و همکاران (Qiu et al., 2020) به بررسی رفتار شبه استاتیک پوشش‌ها و ترک آن‌ها در تونل پرداختند. نیک اختر و زارع (Nikakhtar and Zare, 2021) به بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی تونل دایروی با توجه ویژه به مطالعه رفتار خاک پرداختند. دوان و همکاران (Duan et al., 2023) به تحلیل عددی تنش‌ها و تغییر مکان‌های

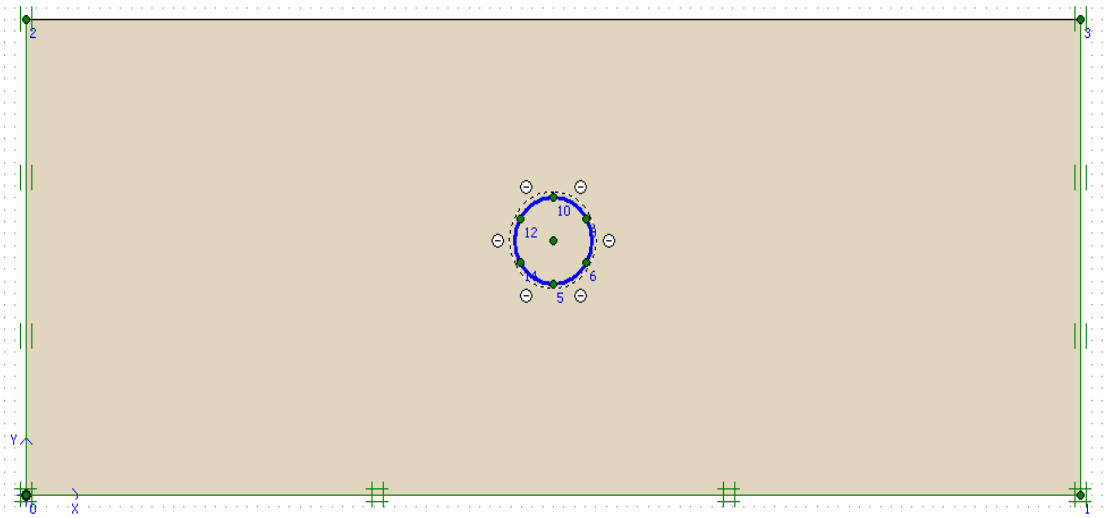
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016871]

تونل‌ها تحت بار استاتیکی و لرزه‌ای پرداختند. در این تحقیق اثرات پوشش تونل‌ها در تحلیل‌های صورت گرفته مورد مطالعه قرار گرفتند. یوکسل و عکباس (Yuksel and Akbas, 2023) به مطالعه تنش‌های استاتیکی ناشی از خاک‌های چندلایه برای تونل‌های دوقلو با استفاده از روش‌های اجزای محدود و اجزای مرزی پرداختند. جین و کومار (Jain and Kumar, 2023) با استفاده از تحلیل‌های شبه استاتیک به بررسی جابجایی و تنش در اطراف یک محیط الاستیک پرداختند. روش‌های جدیدتر برای بررسی پایداری تونل‌های دایروی تحت زلزله با روش شبه دینامیکی مورد بررسی قرار گرفتند (Sahoo and Gowtham, 2023). در بهبود خواص مقاومت خاک سست می‌توان علاوه بر روش‌های رایج از نتایج تحقیقات متعدد داخلی و خارجی نیز بهره جست. استفاده از لاستیک فرسوده و زئولیت (Karimi et al., 2024) ، استفاده از استایرن بوتادین رابر (Jalali et al., 2023)، استفاده از ژئوسل برای بهسازی خاک (Changizi et al., 2022)، استفاده از زئولیت و خاک اره (Yousefi et al., 2021) و نیز تراشه لاستیک‌های فرسوده (Amelsakhi, 2001) از مصالح قابل استفاده جهت بهسازی چنین خاک‌های سستی است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بررسی رفتار شبه استاتیکی تونل و بررسی پارامترهای رفتاری مدل در خاک‌هایی سست در تحقیق‌های صورت گرفته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی این موارد پرداخته شده است. بر این اساس به بررسی پارامترهای خاک، اثرات شباب‌های شبه استاتیک، مدل‌های رفتاری مختلف و نیز امکان و عدم امکان لغزش در خاک پیرامون تونل و بررسی اثرات آن‌ها بر رفتار شبه استاتیکی تونل به عنوان اهداف این تحقیق پرداخته شده است. بررسی مدل‌های رفتاری مختلف در حالات استاتیکی و شبه استاتیکی به همراه بررسی پارامترهای خاک، از نوآوری‌های تحقیق حاضر به شمار می‌آیند.

مشخصات هندسی تونل

برای تحقیق حاضر، محیط خاکی به ابعاد ۱۰۰ متر عرض در ارتفاع ۴۰ متر و به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. تونل دارای قطر ۷/۳ متر می‌باشد و در بالای تونل ارتفاع خاک ۱۵ متر مدل‌سازی شده است. در شکل ۲-۱ مدل ایجاد شده در نرم افزار PLAXIS ارائه شده است.



[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]

شکل ۱. مشخصات هندسی مدل
Fig. 1. Geometry properties of the model

مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل‌ها

در تحلیل‌ها خاک سست با مشخصات ارائه شده در جدول‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است. دو مدل رفتاری متفاوت موهر-کولمب و خاک سخت شونده در تحلیل‌ها مدنظر بوده است. از سوی دیگر در مدل رفتاری موهر-کولمب، مقادیر مختلف زاویه اصطکاک ۲۰، ۲۴، ۲۸، ۳۲ و ۳۶ درجه در تحلیل‌ها وارد شده است.

همان‌طور که مشخص است رفتار لرزه‌ای شبه استاتیکی تونل‌ها، تابع پارامترهای ژئوتکنیکی و جنس محیط دربردارنده تونل است. در تحلیل‌های شبه استاتیکی، ۳ ضریب شبه استاتیکی مختلف ۰/۲، ۰/۲۵و ۰/۳ شتاب ثقل زمین در نظر گرفته شده است. این ضرایب در هر دو سری تحلیل با مدل‌های رفتاری مختلف خاک اعمال شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک بر اساس مدل موهر-کولمب
Table 1. Soil properties based on Mohr-Coulomb Model

Site Properties	E_{ref} (kN/m^2)	G(kN/m^2)	ν	Vs(m/s)	γ (kN/m^3)
Soft	3.2*10^4	9.6*10^4	0.3	87	16

جدول ۲. مشخصات خاک بر اساس مدل خاک سخت شونده
Table 2. Soil properties based on Hardening soil Model

Site Properties	E_{50},E_{oed} (kN/m^2)	E_{ur}(kN/m^2)	m	ν_{ur}	P_{ref}(kN/m^2)	R_f	γ(kN/m^3)
Soft	3.2*10^4	9.6*10^4	0.5	0.3	100	0.9	16

پوشش تونل‌ها نیز با مشخصاتی که در جدول ۳ ارائه شده است در مدل‌سازی با نرم‌افزار PLAXIS در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. مشخصات پوشش تونل‌ها
Table 3. Tunnel's lining properties

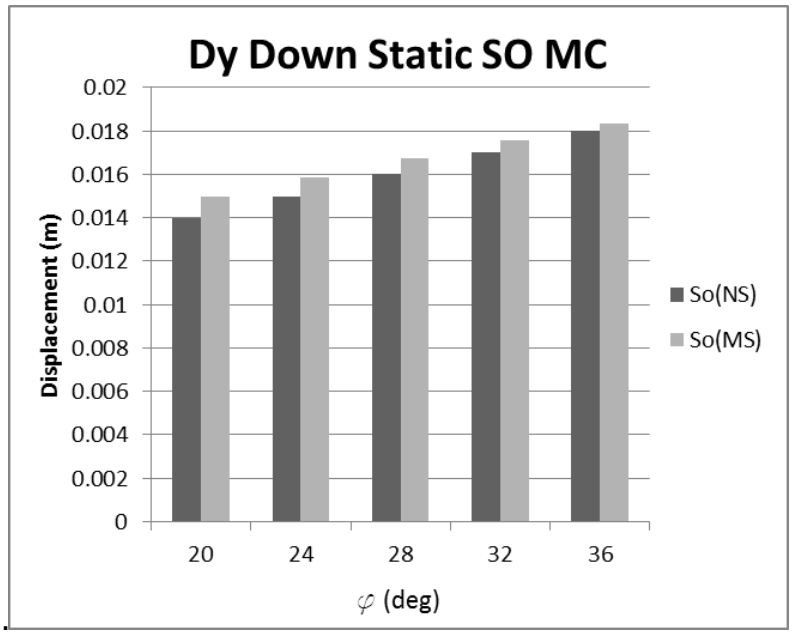
EA (kN/m)	EI(kNm^2/m)	ν	d (m)	w (kN/m/m)
1.4*10^7	1.43*10^5	0.15	0.35	8.4

در جداول ارائه شده، Vs سرعت موج برشی خاک، ν نسبت پواسون خاک، ν_{ur} نسبت پواسون خاک برای باربرداری-بارگذاری مجدد، E_{ur} مدول الاستیسیته باربرداری-بارگذاری مجدد، G مدول برشی خاک، E_{ref} مدول الاستیسیته خاک بر مبنای تنش مبنای ۱۰۰ کیلو پاسکال، E_{oed} مدول الاستیسیته بر اساس آزمایش تحکیم، E_{50} مدول الاستیسیته خاک بر اساس کرنش ۵۰ درصد، d ضخامت پوشش تونل، EI صلبیت خمشی پوشش تونل، EA سختی نرمال پوشش تونل، w وزن پوشش تونل در واحد طول، d ضخامت معادل پوشش تونل، P_{ref} تنش مبنا که در نرم افزار مورد استفاده برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال انتخاب می‌شود، m پارامتر توان است که برای تبدیل مدول الاستیسیته حاصل از تحکیم از تنش مبنای ۱۰۰ کیلوپاسکال به تنش موردنظر در پروژه به کار می‌رود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016871]

در بحث پوشش تونل‌ها لازم به ذکر است که دو ضریب مختلف یک و صفر برای امکان لغزش پوشش تونل‌ها نسبت به تونل در نظر گرفته شده است و تمامی تحلیل‌ها بر این اساس در دو بخش متفاوت با امکان لغزش و بدون امکان لغزش تحلیل و مطالعه شده‌اند.

روش پژوهش صورت گرفته چنین است که در تحقیق حاضر به بررسی دو مدل رفتاری متفاوت برای خاک دربرگیرنده محیط اطراف تونل پرداخته شده است و نتایج با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مدل‌های رفتاری، مدل موهر-کولمب و مدل کرنش سخت شونده بوده‌اند. از سوی دیگر تمامی تحلیل‌ها در حالت شبه استاتیک با حالت استاتیک مورد مقایسه قرار گرفته و اثر رفتار شبه استاتیک زلزله بر پاسخ تونل مورد بررسی قرار گرفته است. مطلب مورد بررسی دیگر در این پژوهش، مطالعه پارامترهای خاک در شرایط گفته شده می‌باشد.



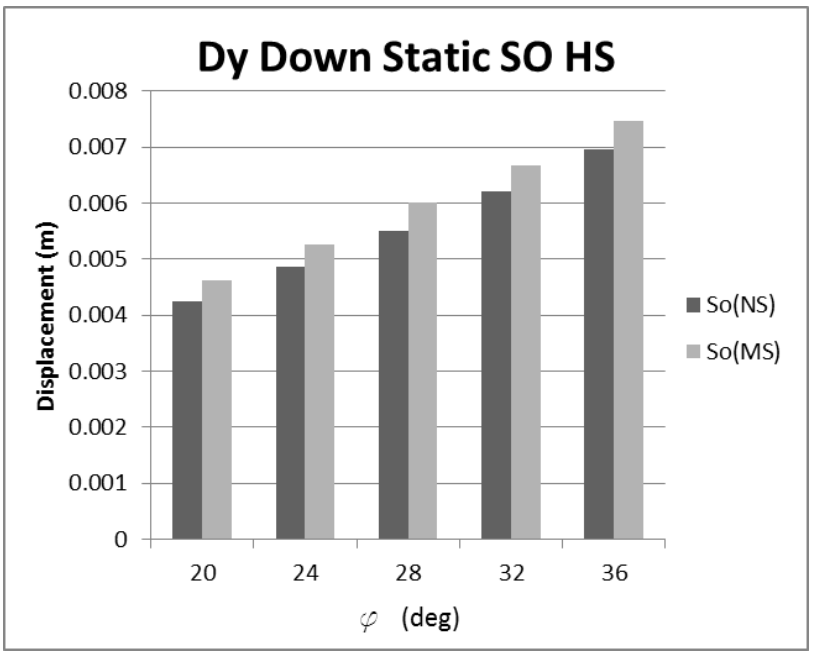
شکل ۲. تغییر مکان قائم پایین تونل در تحلیل‌های استاتیکی با مدل رفتاری موهرکولمب در دو حالت با امکان لغزش (NS) و بدون لغزش (MS) در خاک سست

Fig. 2. Vertical displacement at the bottom of the tunnel in static analyses with Mohr-Coulomb Model, with and without sliding conditions in soft soil

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مدل رفتاری موهر-کولمب با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، تغییر مکان قائم پایین تونل افزایش می‌یابد. نکته قابل ذکر دیگر این است که در صورت درنظرگرفتن امکان لغزش متوسط، مقادیر جابجایی‌ها نسبت به حالت بدون لغزش بیشتر است. نتایج حاصل از تحلیل‌های شبه استاتیکی با مدل رفتاری موهرکولمب نشان می‌دهد که هرچه خاک سست‌تر باشد، جابجایی و تغییر مکان قائم پایین تونل بیشتر است، به طوری که در خاک سخت، مقدار تغییر مکان‌ها بسیار اندک است. دلیل این افزایش مقادیر جابجایی‌ها، امکان لغزش پوشش تونل و خاک اطراف تونل است. آنچه که در عمل مشاهده می‌شود به شرایط بینابینی شرایط در نظر گرفته شده مرتبط است. وجود تراکم بیشتر خاک با توجه به زاویه اصطکاک داخلی بیشتر منجر به افزایش مقادیر جابجایی در پایین تونل شده است.

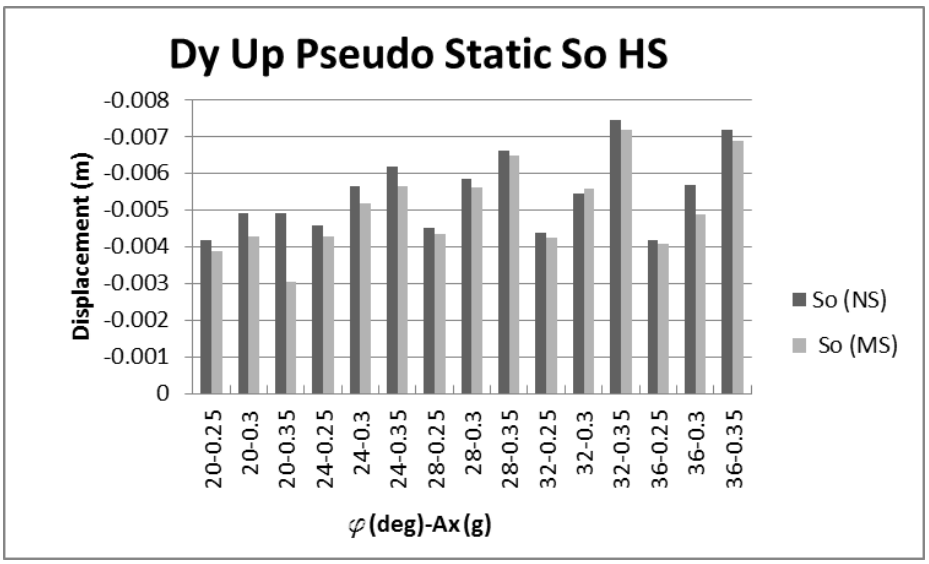
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]



شکل ۳. تغییر مکان قائم پایین تونل در تحلیل‌های استاتیکی با مدل رفتاری خاک سخت شونده در دو حالت با امکان لغزش (NS) و بدون لغزش (MS) در خاک سست

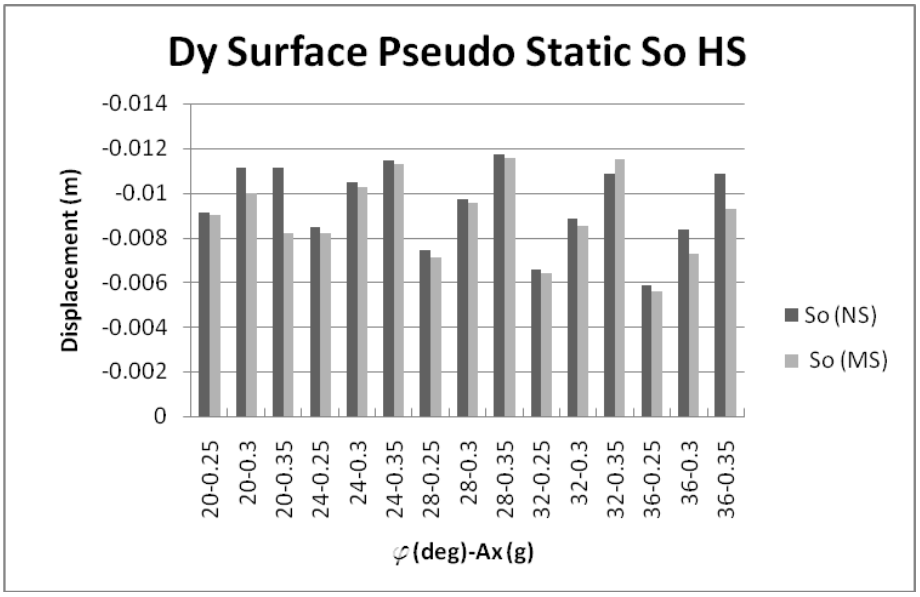
Fig. 3. Vertical displacement at the bottom of the tunnel in static analyses with Hardening soil Model, with and without sliding conditions in soft soil



شکل ۴. تغییر مکان قائم بالای تونل در تحلیل‌های شبه استاتیکی با مدل رفتاری خاک سخت شونده برای خاک سست

Fig. 4. Vertical displacement at the top of the tunnel in pseudo static analyses with Hardening soil Model in soft soil

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن لغزش برای هر حالت، مقادیر تغییر مکان قائم بالای تونل نسبت به حالت بدون لغزش، کمتر است. در شرایط امکان وجود لغزش نیز مشاهده می‌گردد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان بالای تونل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر رفتار در حالت لغزش یا بدون لغزش برای هر دو حالت تقریباً یکسان است.

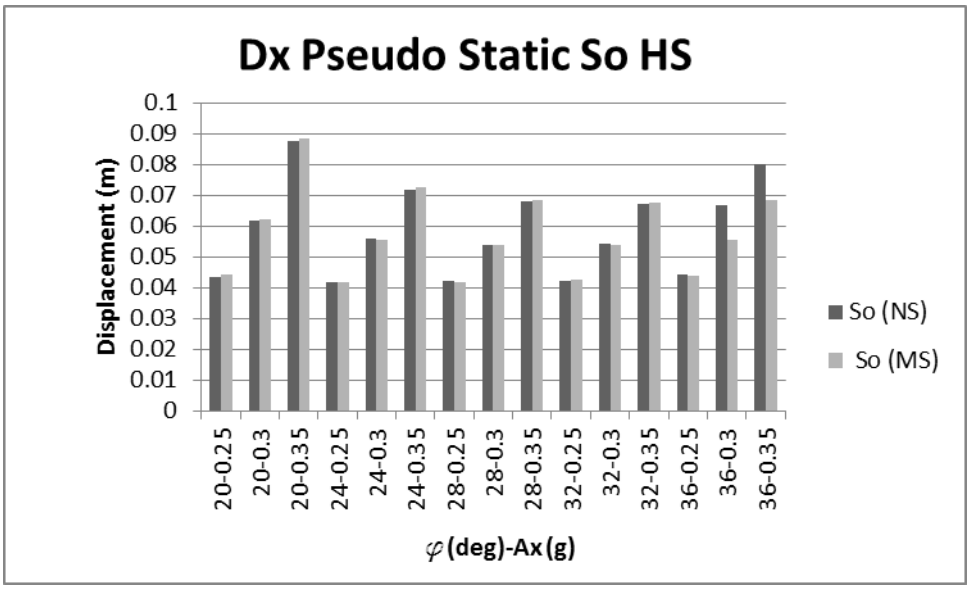


شکل ۵. تغییر مکان قائم سطح زمین در تحلیل‌های شبه استاتیکی با مدل رفتاری خاک سخت شونده برای خاک سست

Fig. 5. Vertical displacement at the surface of the ground in pseudo static analyses with Hardening soil Model in soft soil

در شکل ۵ نتایج تغییر مکان قائم سطح زمین در تحلیل‌های شبه استاتیک با در نظر گرفتن مدل رفتاری خاک سخت شونده در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن لغزش، مقادیر نشست سطح زمین نسبت به حالت بدون لغزش، کمتر می‌باشد. در شرایط لغزش نیز مشاهده می‌گردد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان قائم سطح زمین افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که روند کلی تقریباً یکسان است نه اینکه جواب‌ها دقیقاً یکسان هستند. نکته قابل ذکر دیگر در این نمودار این است که در ضرایب یکسان شبه استاتیکی، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، مقادیر تغییر مکان‌های قائم در سطح زمین کاهش یافته است. تقریباً در خاک سست در حالت شبه استاتیک مشاهده می‌شود که افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک باعث کاهش در تغییر مکان‌های قائم شده است، به عبارت دیگر بیشترین تأثیر در این مورد، مربوط به خاک سست بوده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]

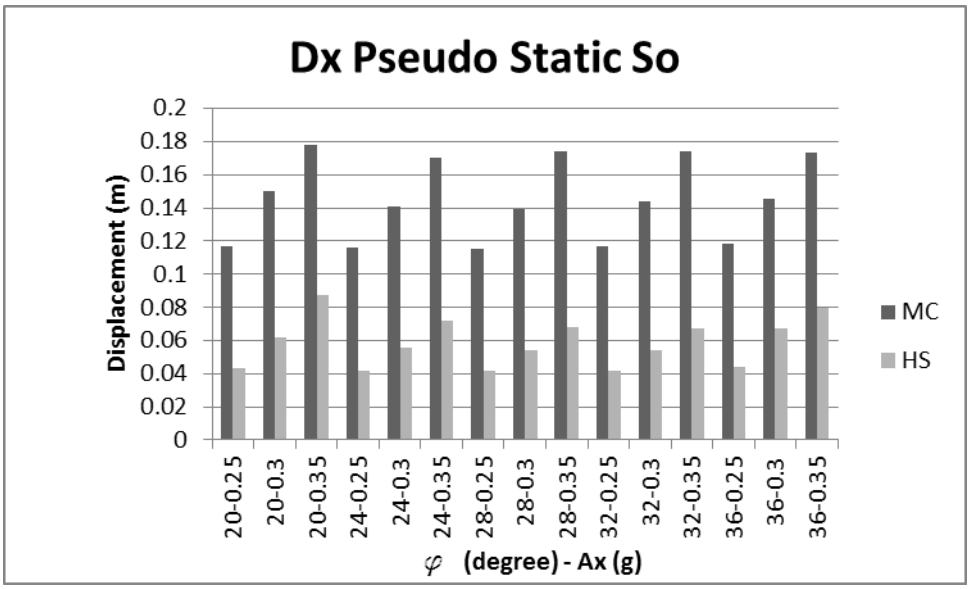


شکل ۶. تغییر مکان افقی کناره تونل در تحلیل‌های شبه استاتیکی با مدل رفتاری خاک سخت شونده برای خاک سست

Fig. 6. Horizontal displacement at the corner of the tunnel in pseudo static analyses with Hardening soil Model in soft soil

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن لغزش، مقادیر تغییر مکان افقی کناره تونل نسبت به حالت بدون لغزش، تقریباً برابر است، البته در مواردی عدم تطابق قابل مشاهده است، به طوری که در زاویه اصطکاک داخلی زیاد، نتایج مربوط به در نظر گرفتن لغزش منجر به جواب‌های کمتری شده است و در زوایای اصطکاک کمتر، نتایج مربوط به در نظر گرفتن لغزش منجر به نتایج اندکی بیشتر شده است. بر این اساس می‌توان انتظار داشت که در خاک‌های سست‌تر، در نظر گرفتن امکان لغزش بین خاک و جداره تونل می‌تواند منجر به نتایج محافظه‌کارانه‌تری گردد. به عبارت دیگر در خاک متراکم نسبت به خاک سست، در نظر گرفتن لغزش منجر به جواب‌هایی متفاوت خواهد شد. در حالت کلی نتایج نشان می‌دهد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان افقی کناره تونل در هر دو حالت لغزش یا بدون لغزش افزایش می‌یابد. به عبارت می‌توان گفت که نتایج نشان داده است که روند کلی رفتار در حالت لغزش یا بدون لغزش برای هر دو حالت تقریباً" یکسان بوده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]



شکل ۷. تغییر مکان افقی کناره تونل در تحلیل‌های شبه استاتیکی با مدل‌های خاک سخت شونده و موهر-کولمب در خاک سست

Fig. 7. Horizontal displacement at the corner of the tunnel in pseudo static analyses with Hardening soil and Mohr-Coulomb Models in soft soil

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در هر دو نوع مدل خاک یعنی موهر-کولمب و خاک سخت شونده، به ازای ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک، با افزایش ضریب شبه استاتیکی زلزله، مقدار تغییر مکان افقی جداره تونل افزایش می‌یابد. نکته قابل ذکر دیگر در این قسمت این است که در تحلیل‌های شبه استاتیکی، با سست‌تر شدن خاک، مقدار جابجایی افقی خاک کناره تونل در هر دو نوع مدل رفتاری خاک، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر نتایج نشان داده است که در تحلیل‌های شبه استاتیکی، تغییر مکان افقی خاک با مدل رفتاری موهر-کولمب بیشتر برآورد می‌شود و در مواردی نتایج تا ۳ برابر بیشتر می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که مدل رفتاری بر روی نتایج بدست آمده کاملاً مؤثر است و اگر از اثرات سخت‌شوندگی خاک صرف‌نظر گردد، در نظر گرفتن مدل رفتاری موهر کولمب منجر به نتایج بیشتری می‌گردد. این مطلب در مورد خاک سست در مقایسه با خاک متراکم از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مدل رفتاری موهر-کولمب با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک به عبارت دیگر با افزایش تراکم خاک، تغییر مکان قائم پایین تونل افزایش می‌یابد. در صورت درنظرگرفتن امکان لغزش متوسط، مقادیر جابجایی‌های قائم نسبت به حالت بدون لغزش بیشتر است. با مدل رفتاری موهر-کولمب، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک یا به عبارت دیگر افزایش تراکم خاک، تغییر شکل قائم در پایین تونل‌ها افزایش می‌یابد. مشابه مدل رفتاری موهر-کولمب، با در نظر گرفتن مدل خاک سخت شونده نیز، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش تغییر مکان قائم در پایین تونل مشاهده شده است. نتایج به دست آمده در خاک‌های سست و مدل رفتاری موهر-کولمب نشان دهنده این مطلب است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، مقادیر نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. در یک زاویه اصطکاک داخلی ثابت، هرچه شتاب افقی وارده شبه استاتیکی بیشتر

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]

باشد، تغییر مکان قائم کمتری در پایین تونل رخ می‌دهد. این مطلب نکته قابل توجهی است چرا که انتظار اولیه، افزایش تغییر مکان قائم است در حالیکه این حالت رخ نداده است. قابل ذکر است که در مدل رفتاری خاک سخت شونده، عکس این موضوع نتیجه شده است، به عبارت دیگر در نظر گرفتن مدل رفتاری متفاوت می‌تواند منجر به نتایج کاملاً برعکس گردد. نتایج تحلیل‌های شبه استاتیک با مدل رفتاری خاک سخت شونده نشان دهنده این مطلب است که با ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک، با افزایش ضریب شبه استاتیکی زلزله، تغییر مکان افقی کناره تونل افزایش می‌یابد. در صورت در نظر گرفتن لغزش متوسط، مقادیر تغییر مکان قائم بالای تونل نسبت به حالت بدون لغزش، کمتر است. در شرایط امکان لغزش نیز مشاهده می‌گردد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان بالای تونل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر رفتار کلی در حالت لغزش متوسط یا بدون لغزش برای هر دو حالت تقریباً یکسان است. نتایج نشان داده است که در صورت در نظر گرفتن امکان لغزش، مقادیر نشست سطح زمین نسبت به حالت بدون لغزش، کمتر می‌باشد. در شرایط لغزش نیز مشاهده می‌گردد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان قائم سطح زمین افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر روند کلی رفتار در حالت لغزش یا بدون لغزش برای هر دو حالت تقریباً یکسان است. در صورت در نظر گرفتن لغزش، مقادیر تغییر مکان افقی کناره تونل نسبت به حالت بدون لغزش، تقریباً برابر است البته در برخی موارد عدم تطابق‌هایی قابل مشاهده است، به طوری که در زاویه اصطکاک زیاد، نتایج مربوط به در نظر گرفتن لغزش منجر به جواب‌های کمتری شده است و در زوایای اصطکاک کمتر، نتایج مربوط به در نظر گرفتن لغزش منجر به نتایج اندکی بیشتر شده است. آنچه که مشخص است پارامترهای خاک و نیز مقدار زاویه اصطکاک در این مورد تأثیرگذار بوده‌اند. به عبارت دیگر، تراکم خاک در پاسخ‌های بدست آمده کاملاً مؤثر بوده است. مطلب بسیار مهم مستخرج از این تحقیق این است که در نظر گرفتن یک مدل رفتاری یکسان در شرایط مختلف تراکم خاک، می‌تواند منجر به نتایج گمراه کننده شود. نتایج عددی بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش شتاب افقی زلزله، مقادیر تغییر مکان افقی کناره تونل در هر دو حالت لغزش یا بدون لغزش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در جنس یکسان خاک، روند افزایش تغییر مکان مشاهده می‌شود.

References

Amelsakhi, M. (2001). Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds. In Partial Fulfillment of the Requirements the Degree of Master of Science, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Bransby, M.F., Davies, M.C.R., & El Nahas, A. (2008). Centrifuge Modelling of Normal Fault-Foundation Interaction. Bull Earthq Eng, Special Issue: Integrated Approach to Fault Rupture- and Soil-Foundation Interaction.

Changizi, F., Razmkhah, A., Ghasemzadeh, H., & Amelsakhi, M. (2022). Behavior of geocell-reinforced soil abutment wall: A physical modeling. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(3), 04021495.

Duan, Y., Huang, J., Zhau, M., Li, H., & Du, X., (2023). Analytical solutions for stresses and displacements of tunnels under static and seismic loading, Computers and Geotechnics, 162, 105630.

Gaudin, C. (2003). Experimental and Theoretical Study of the Behavior of Supporting Walls: Validation of Design Methods. Ph.D.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.1016687]

Dissertation, Laboratoire Central Des Ponts Chaussées, Nantes, France.

Hoek, E. (2001), Big Tunnels in Bad Rock", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, vol. September.

Lin, M.L., Chung, C.F, Jeng, F.S, & Yao, T.C. (2007). The Deformation of Overburden Soil Induced by Thrust Faulting and Impact on Underground Tunnels. Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan Mohand Associates Inc., Taipei, Taiwan.

Jain, H., & Kumar, J. (2023). Displacements and stresses around a circular tunnel in an elastic medium with pseudo-static horizontal earthquake body forces. Computers and Geotechnics, 162, 105663

Jalali, S., Amelsakhi, M., Momeni Roghabadi, M., Hosseini, S. A., & Khajavi, R. (2023). Plastic Properties and Collapse Investigation of Fine-grained Soil Rehabilitated with Styrene Butadiene Rubber: A Case Study in Kerman, Iran. International Journal of Engineering, 36(10), 1746-1757.

Karimi, A., Amelsakhi, M., Yousefi, R., & Amooei, A. A. (2024). Experimental Study on the Effect of Waste Rubber Powder and Zeolite Replacement on Cemented Sandy Soil. AUT Journal of Civil Engineering.

Loli, M., Anastasopoulos, I., Bransby, F. M., & Gazetas, G. (2011). Normal and Reverse Fault Rupture Interaction with Caisson Foundations: Centrifuge Modeling and Numerical Simulation. Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taiwan. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Chile.

Nikakhtar, L. & Zare, S., (2021). Dynamic and Static Analysis of Circular Tunnel with Special Focus on the Hydro-Mechanical Coupling Behavior of Soil. Numerical Methods in Civil Engineering, 6(1), 31-41.

Qiu, W., Li, B., Gong, L., Qi, X., Deng, Z., Huang, G., & Hu, H. (2020). Seismic capacity assessment of cracked lining tunnel based on the pseudo-static method. Tunneling and Underground Space Technology, 97, 103281.

Sahoo, J. P., & Gowtham, G. (2023). Stability evaluation of circular tunnels in cohesive frictional soil under earthquake loading using the modified pseudo-dynamic approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 166, 107740.

Thorpe, J.P. (2007), Ground Movements during Tunneling Sand, Department of Civil Engineering, Qeen s University, Kingston, Ontario, Canada.

Yousefi, R., Amooei, A. A., Amel Sakhi, M., & Karimi, A. (2021). Experimental study on influence of using urease enzyme on stabilized sandy soil's engineering property by zeolite and sawdust. International Journal of Maritime Technology, 15, 17-27.

Yuksel, Y., & Akbas, S. (2023), Static stress analysis of multi-layered soils with twin tunnels by using finite and infinite elements. Geomechanics and Engineering, 33(4), 369-380.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.3.6.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.3.101687]