



Research Article

Numerical tunnel stability analysis (Case study of Qom metro tunnel)

Masoud khahanipour^{1*}

1*. Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 14 June 2025; Revised: 16 June 2025; Accepted: 22 July 2025; Published: 23 September 2025

Abstract:

The stability of underground structures is a complex and difficult issue due to changes in rock and soil types, geological structure, regional stress conditions, excavation stages, and the creation of underground space from one location to another. Therefore, it is necessary to investigate the stability status of the structure in question by using different stability analysis methods, comparing the results obtained from them, and also using appropriate engineering judgment. The purpose of this research is to analyze the stability of Tunnel A of Qom Metro under the influence of static and dynamic loads. For this purpose, the studied environment has been modeled using Plaxis finite element software and using the plane strain theory with 15-node elements. By performing the geotechnical study of the area and considering the desired tunnel cross-section, it was possible to change the structural characteristics as well as the seismic environment. The results show that by increasing the thickness of the initial tunnel lining, the applied displacements decreased by 0.5% and the applied forces increased. It should be noted that by increasing the thickness of the tunnel lining from 20 cm to 35 cm, the tunnel floor has been decreased by about 100%, but this difference is less in other studied points.

Keywords: Sustainability, tunnel, Qom Metro, Praxis software

Cite this Khahanipour, M (2025). Numerical tunnel stability analysis (case study of Qom metro tunnel. (e225652). *Civil and Project*, 7(7), e225652 doi: <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.530327.1378>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: masoud.khahanipour@gmail.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

تحلیل پایداری تونل‌ها به روش عددی (مطالعه موردی تونل A متروی قم)

مسعود خواهانی پور^۱

*۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۴ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۲۶ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۳۱ تیر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مهر ۱۴۰۴

چکیده:

پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تغییر در نوع سنگ و خاک، ساختار زمین‌شناسی، شرایط تنش‌های منطقه، مراحل حفاری و ایجاد فضای زیرزمینی از محلی به محل دیگر، امری پیچیده و مشکل است. بنابراین لازم است با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری، مقایسه بین نتایج حاصل از آنها و همچنین با قضاوت مهندسی مناسب، وضعیت پایداری در سازه موردنظر بررسی شود. هدف از انجام این تحقیق تحلیل پایداری تونل A متروی قم تحت تاثیر بارهای استاتیک و دینامیک می‌باشد. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پلکسیس و با بهره‌گیری از تئوری کرنش صفحه‌ای با المان‌های ۱۵ گره‌ای به مدل‌سازی محیط مورد بررسی پرداخته شده است. با انجام شبیه‌سازی در بستر ژئوتکنیکی منطقه و با در نظر گرفتن مقطع تونل مورد نظر، به تغییر در خصوصیات سازه‌ای و همچنین محیط لرزه‌ای انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضخامت پوشش ابتدایی تونل، جابجایی‌های اعمال شده، ۰.۵٪ 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 ۱۰۰٪ کاهش یافته است ولیکن این اختلاف در دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می‌باشد.

کلمات کلیدی:

پایداری، تونل، متروی قم، نرم‌افزار پلکسیس.

۱- مقدمه

تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تغییر در نوع سنگ و خاک، ساختار زمین شناسی، شرایط تنش های منطقه، مراحل حفاری و ایجاد فضای زیرزمینی از محلی به محل دیگر، امری پیچیده و مشکل است. لذا لازم است با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری، مقایسه بین نتایج حاصل از آنها و همچنین با قضاوت مهندسی مناسب، وضعیت پایداری در سازه موردنظر بررسی شود. تونل‌سازی همزمان با انقلاب صنعتی، به ویژه به منظور حمل و نقل، تحرک قابل ملاحظه‌ای یافت. تونل‌سازی به گسترش و پیشرفت کانال‌سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بسزایی داشت. کانال‌ها یکی از پایه‌های انقلاب صنعتی بودند و توانستند در مقیاس بسیار بزرگ هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهند. تونل مال پاس با طول ۱۵۷ متر بر روی کانال دومیدی در جنوب فرانسه اولین تونلی بود که در دوره‌های مدرن در سال ۱۶۸۱ ساخته شد

با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی کشور و توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی، تونل و فضاهای زیرزمینی برای استفاده‌های حمل و نقل داخل و خارج از شهر، انتقال آب و فاضلاب، لوله‌رانی بدون حفاری سطحی برای انتقال مواد سوختنی و انرژی از قبیل نفت و گاز، احداث فضاهای زیرزمینی استراتژیکی و دفاعی، تولید برق، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ به‌طور فزاینده‌ای در حال مطالعه، ساخت و یا بهره‌برداری هستند. طراحی هر یک از فضاهای زیرزمینی مستلزم دسترسی به داده‌های مناسب و به کارگیری تمهیدات ویژه می‌باشد. در بسیاری از زمین‌ها تونل‌های حفر شده نمی‌تواند خود نگهدار باشد و برای پا برجا داشتن آنها باید از حائل‌هایی استفاده کرد، تحلیل پایداری تونل و تعیین ضریب اطمینان مناسب و ایمن و همچنین پیش‌بینی میزان نشست می‌باشد که منجر به تأمین پایداری در حین اجرا و پس از آن در زمان بهره‌برداری از سازه مورد نظر خواهد گردید، از مهمترین مراحل طراحی و تحلیل پایداری تونل، پیش‌بینی میزان جابجایی محیط تونل و تنش‌های آن است. مقدار جابجایی دیواره تونل و میزان تنش‌های ایجاد شده در آن به ابعاد تونل، نوع سیستم نگهدارنده تونل، خواص زمین اطراف تونل و شیوه بازکردن تونل بستگی دارد...

هدف اصلی این تحقیق تحلیل پایداری تونل‌ها به روش عددی در تونل A متروی قم با استفاده از نرم افزار Plaxis است. در این تحقیق نتایج حاصل از مدل سازی عددی برای صحت‌سنجی با نتایج برداشت شده از حفاری تونل مورد مقایسه قرار می‌گیرد همچنین تحلیل تاثیر بارهای دینامیک مثل زلزله بر روی تونل مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا نقاط ضعف مدلسازی عددی مشخص شود و بررسی پایداری تونل به صورت دقیق صورت پذیرد و در نهایت راهکارهای لازم برای پایداری تونل پیشنهاد شود.

۲- مبانی تحقیق

با پیشرفت کشورها نیاز به احداث فضاهای زیر زمینی و احداث تونل های مختلف افزایش میابد. با توجه به هزینه های سرمایه گذاری بسیار بالا ریسک انجام چنین پروژه هایی بالا می رود. بنابراین ارزیابی اجرا و پایداری فضاهای حفر شده زیر زمینی از پارامترهای مهم در این گونه پروژه های می باشد. روشهای مختلف تجربی و عددی در زمینه تحلیل پایداری سازه های زیرزمینی وجود دارد که پیش نیاز استفاده از هر کدام از این روش ها، دانستن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، خصوصیات مقاومتی و مشخصات هندسی ناپیوستگی های موجود، شرایط تنش برجا، وضعیت هیدروژئولوژی منطقه و ساختار زمین شناسی منطقه مورد مطالعه می باشد. بررسی خواص ژئومکانیکی توده های سنگی جهت تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی از دیرباز مورد بررسی قرار گرفته که در راستای همین اقدامات، تعدادی از سیستم های مختلف طبقه بندی مهندسی توده سنگ، گسترش یافته اند (عظیمی، ۱۳۹۲). رجایی و همکاران در سال (۲۰۲۴) تاکید کردن که با توسعه مداوم مناطق شهری، حفاری نقش حیاتی در ساخت و ساز ساختمان ها ایفا می کند و مستلزم توجه دقیق به ایمنی از دیدگاه ژئوتکنیکی است. دیوارهای مهاربندی شده به عنوان یک راه حل مقرون به صرفه برای پشتیبانی از حفاری های عمل می کنند. 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 قابل توجه تغییرپذیری پارامتر مقاومت خاک بر حفاری‌های شهری مهاربندی شده 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، ۱۳۹۹) مترو لس‌آنجلس که در چند مرحله ساخته شده است، در طول سال ۱۹۹۴ در زلزله نورتریج در حال استفاده بود، پوشش بتنی تونل‌ها پس از زلزله دست‌نخورده و سالم باقی ماند و زلزله نورتریج در حالیکه آسیب‌هایی به بزرگراه، لوله‌های آب، پل‌ها و ساختمان‌ها وارد آورده بود باعث هیچ گونه 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 قابل چشم‌پوشی نیست (Anh Do, et al., 2015).

تونل دوقلوی بولو^۱ واقع در منطقه کوهستانی در قسمتی از مسیر استانبول-آنکارا با روش اتریشی (NATM) ساخته شده‌اند. این تونل با چندین گسل فرعی موازی تقاطع پیدا می‌کنند. در اثر زلزله ۱۹۹۹ کوبه‌ای هر دو تونل ۳۰۰ متر از دهانه ورودی شرقی که پوشیده از لایه‌های رس نامرغوب بود، با وجود در نظر گرفتن ملاحظات لازم فروریخت (Amberg et al., 2001). جعفری و همکاران در سال ۱۴۰۳ طراحی مدلی پایدار برای مسئله زمان‌بندی قطارهای متروی تهران با رویکرد بهینه‌سازی استوار انجام دادند که نتایج نشان داد ظرفیت ایستگاه‌های مترو، امکان سبقت‌گیری در مواقع اضطراری و رعایت حاشیه ایمنی قطارها با توجه به شرایط عمومی شبکه‌های مترو در نظر گرفته شده است. در این تحقیق همچنین فرض بر آن بوده است که پارامترهای ظرفیت و زمان طی قطعات توسط ناوگان قطارها پارامترهای غیرقطعی باشد و بر این اساس برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها یک الگوی جدید بهینه‌سازی استوار با استفاده از شیوه‌های شبیه‌سازی ارائه شده است.

یک مهندس طراح و مجری حفاری و نگهداری تونل مترو نیز می‌تواند با استفاده از تحلیل پایداری تونل مترو نتایج مهمی در مورد پایداری تونل و تجهیزات لازم برای نگهداری آن در هنگام ساخت و بهره‌برداری بدست آورد. ایستگاه X میدان قدس در مسیر توسعه شمالی خط ۱ متروی تهران در محدوده میدان قدس و خیابان دربند است که از امتداد خط ۱ در شمال ایستگاه ۱X، شروع و تا انتهای مسیر و پارکینگ قطارها در زیر خیابان دربند به پایان می‌رسد. (Maarefvand et al., 2013) تونل راه‌آهن سانفرانسیسکو در فاصله زمانی سال ۱۸۷۶ تا ۱۸۸۰ ساخته شده است. تونل راه‌آهن سانفرانسیسکو در فاصله زمانی سال ۱۸۷۶ تا ۱۸۸۰ ساخته شده است. این تونل در حدود ۱۹۲۰ متر طول دارد و در یکی از دهانه‌هایش در حدود ۱۲۰ متر با گسل سان آندریس برخورد می‌کند. پس از زلزله سانفرانسیسکو این تونل در دو سمت گسل گسیخته شد که در اثر آن تونل به مدت بیش از یک سال مسدود شد. پس از انجام مطالعات مهندسان متوجه شدند که تونل باید با ۱/۵ متر جابجایی بازسازی شود. در این زلزله گسل بین ۲/۵ تا ۴/۵ متر جابجا شد (Hashash et al., 2001).

¹ Bolu

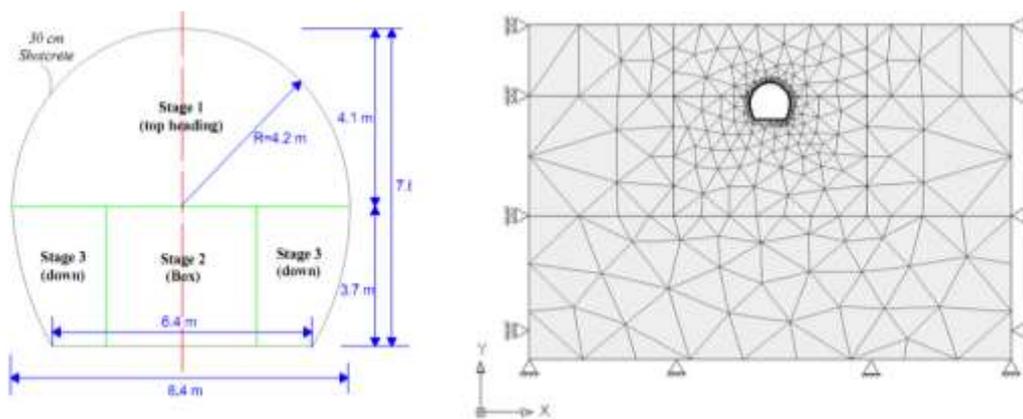
۳- روش تحقیق

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی، سه روش وجود دارد؛ حل تحلیلی دقیق، حل عددی شامل نرم افزارهای اجزای محدود و روش تجربی. در روش حل تحلیلی دقیق، همانطور که از نام آن پیداست، به محاسبه ی دقیق پارامتری معادله های کلی یا دیفرانسیل حاکم بر ارتباط میدان های فیزیکی مانند میدان تنش، میدان الکتریکی، میدان حرارتی و غیره پرداخته می شود. در حالی که در روش دوم به حل عددی مسأله می پردازد. یکی از نرم افزار های موجود که دارای قابلیت های مناسبی جهت مدلسازی می باشد و می توان از آن برای تحلیل انواع مختلفی از مسائل ژئوتکنیکی به روش اجزاء محدود استفاده نمود، نرم افزار پلکسیس می باشد که در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه صنعتی دلف که در فعالیت های ملی و مدیریت آب در هلند پیشقدم بود، شروع به توسعه نمود

مترو قم یک سامانه قطار شهری زیرزمینی در شهر قم است که در حال ساخت می باشد. این سامانه در ۲ خط طراحی شده خط ۱ مترو قم دارای ۲ خط A و B است که خط A آن با پیش بینی ۱۴ ایستگاه دارای ۸/۱۴ کیلومتر طول است. این خط به ۲ فاز تقسیم شده و فاز نخست آن به طول ۶/۴ کیلومتر، حداقل فاصل میدان کشاورز تا میدان شهید مطهری و خط B هم به طول ۱۸ کیلومتر، ۱۶ ایستگاه دارد. هدف از انجام این تحقیق تحلیل پایداری تونل شماره A متروی قم تحت تاثیر بارهای استاتیک و دینامیک با استفاده از مدل سازی عددی به کمک نرم افزار Plaxis میباشد. سپس نتایج تحلیل عددی با داده های مونیتورینگ این تونل مقایسه و سعی می شود دلیل عدم پایداری آن مورد ارزیابی قرار گیرد

۳-۱- اعتبارسنجی تحلیل عددی

آنچه مشخص است، داده های حاصل از یک تحلیل عددی باید مورد اعتبارسنجی قرار گیرند. از اینرو در این پژوهش به منظور صحت انجام کار در نرم افزار پلکسیس دوعدی از مطالعات انجام شده توسط حسامی و همکاران (۲۰۱۳) بهره گرفته شده است. هندسه مدل تحلیل شده توسط حسامی و همکاران (۲۰۱۳) و همچنین خاک مورد استفاده در مدلسازی ایشان به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. این محققان در پژوهش خود به بررسی نشست سطح زمین ناشی از تونل زنی پرداختند. نتایج بدست آمده از این پژوهش و مدلسازی شده توسط پلکسیس مورد استفاده در پژوهش حاضر در نمودار ۱الی ۳ آورده شده است.



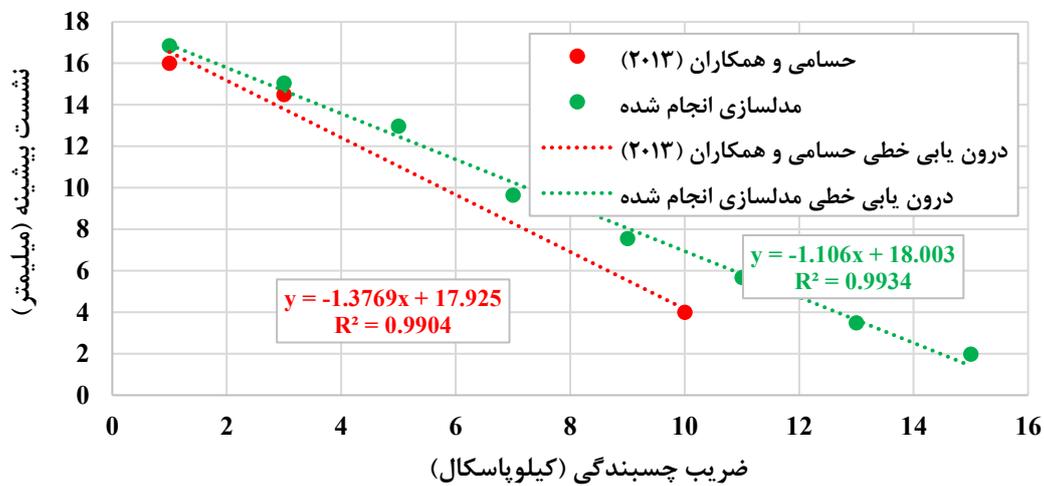
شکل ۱: هندسه مدل تحلیل شده در مطالعات حسامی و همکاران (۲۰۱۳)

جدول ۱: اطلاعات پروفیل خاک در مطالعات حسامی و همکاران (۲۰۱۳)

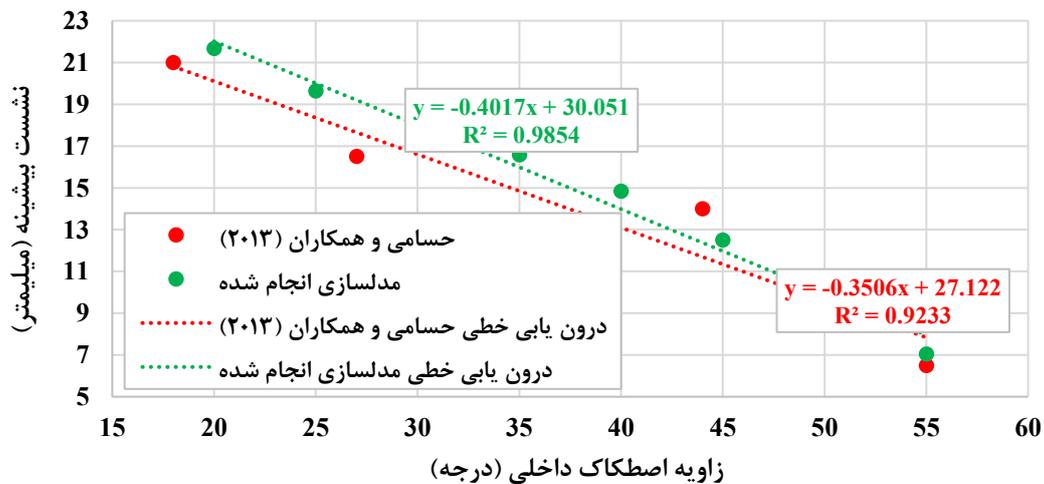
نوع خاک	عمق (m)	γ_d (KN/m ³)	C (KN/m ²)	ϕ (درجه)	ν (-)	E_m (MPa)
GP	۱۵-۰	۱۹/۵	۳	۴۲	۰/۳	۱۰۰
GW	۳۰-۱۵	۲۰	۳	۴۴	۰/۳	۱۰۰

C, ϕ , E_m , γ_d و ν به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، وزن مخصوص و نسبت پوآسون خاک می‌باشند.

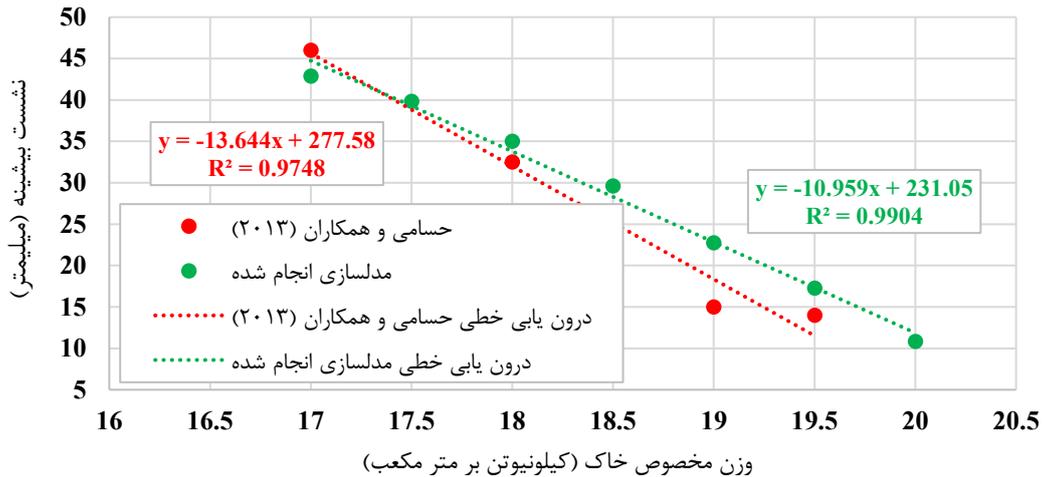
در این بخش مدل موجود در مطالعات حسامی و همکاران (۲۰۱۳) مجدداً توسط نرم افزار پلکسیس دوبعدی مدل سازی شد. با مقایسه نتایج مشخص شد که حداکثر اختلاف بین نتایج از ۲۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. لذا مدل مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند مورد اعتماد باشد.



نمودار ۱: مقایسه نشست سطح زمین تحت تاثیر تغییرات چسبندگی خاک حسامی و همکاران (۲۰۱۳)



نمودار ۲: مقایسه نشست سطح زمین تحت تاثیر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک حسامی و همکاران (۲۰۱۳)



نمودار ۳: مقایسه نشست سطح زمین تحت تاثیر تغییرات وزن مخصوص خاک حسامی و همکاران (۲۰۱۳)

۲-۳ مدلسازی عددی

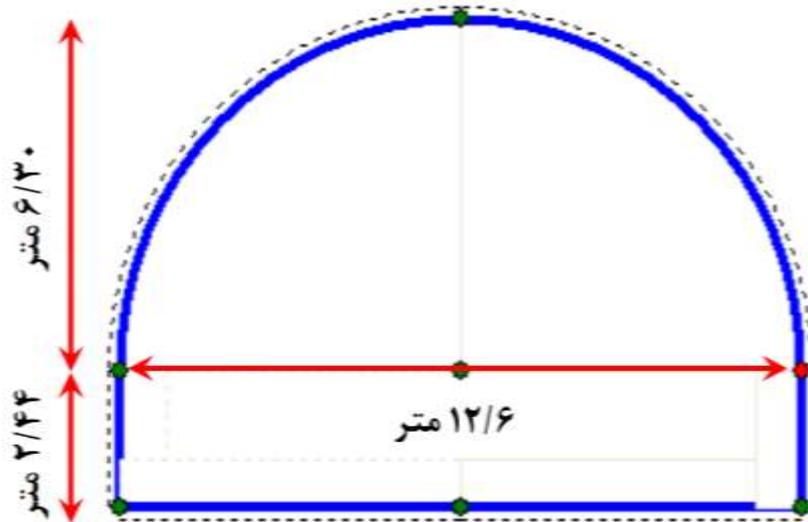
برای مدلسازی، از نرم افزار اجزاء محدود پلکسیس استفاده شد، و تئوری کرنش صفحه ای و مدل رفتاری موهر-کلمب برای محیط خاکی منظور گردید و برای حصول دقت کافی در مدلسازی المان های مثلثی ۱۵ گره ای و شبکه بندی مناسب برای آنالیز صحیح مدنظر قرار گرفته شد

برای مدلسازی از یک الگوی ثابت با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ برای پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های مختلف خاک استفاده شد. همچنین بمنظور خصوصیت های سازه ای برای مدلسازی پوشش تونل از خصوصیت های ذکر شده در جدول ۳ استفاده شد و پس از آن با تغییر در پارامترهای مورد مطالعه، تاثیر هر کدام از پارامترها، در تغییرات رفتار مهندسی پوشش تونل، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدلسازی دقیق متناسب با فضای طبیعی تحت اثر انتشار امواج زلزله، مرزهای جانبی مدل به صورت جاذب انرژی زلزله در نظر گرفته شد که از انعکاس مجدد امواج پس از برخورد با مرزهای مدل، جلوگیری شود و به مرز پایینی مدل برای مدلسازی فضای لرزه ای در راستای افق به میزان ۱۰ سانتی متر جابجایی افقی اعمال شد. با توجه به جدول ۲، ضریب درگیری سطح تماسی بین دو سطح مختلف که در این جا سطح تماس بین خاک و پوشش تونل را مدنظر قرار می دهد، در نظر گرفته شده است؛ که برابر با ۰/۷ می باشد (راهنمای پلکسیس). مقدار این ضریب بستگی مستقیم به نوع خاک و نحوه ی اجرای سازه ی در تماس با خاک دارد. از آنجا که در این مطالعه ضریب درگیری سطح تماسی در تمامی حالات تاثیر یکسانی را ایفا می کند، لذا در نتیجه ی نهایی، تأثیر قابل توجهی ندارد.

جدول ۲: مشخصات ژئوتکنیکی لایه های مختلف خاک منطقه

Rinter	ν	γw	γd	Em	φ	C	لایه بندی خاک
		(kN/m3)	(kN/m3)	(kN/m2)	(درجه)	(kN/m2)	
۰/۷	۰/۳۵	۱۹	۱۵/۵	۱/۷۵۷×۱۰ ^۴	۲۰/۷	۱۴	لایه ۱ رس سست سطحی
۰/۷	۰/۳۵	۱۵/۵	۱۳/۵	۱/۹۴۵×۱۰ ^۴	۲۱	۱۷	لایه ۲ رس شل
۰/۷	۰/۴۵	۱۹/۵	۱۷	۲/۱×۱۰ ^۴	۲۳/۴	۱۸	لایه ۳ رس مارنی سست
۰/۷	۰/۴۵	۲۱	۱۹/۵	۵/۲۵×۱۰ ^۴	۳۱/۵	۵۰	لایه ۴ رس متراکم
-	۰/۳	۲۶/۱	۲۵/۶	۱/۱۵×۱۰ ^۶	۳۹/۵	۱۰۵	لایه ۵ سنگ بستر

C , ϕ , E_m , γ_w , ν و R_{inter} به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل پذیری، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص مرطوب، نسبت پواسون و ضریب اندرکنش توده خاک می باشند.

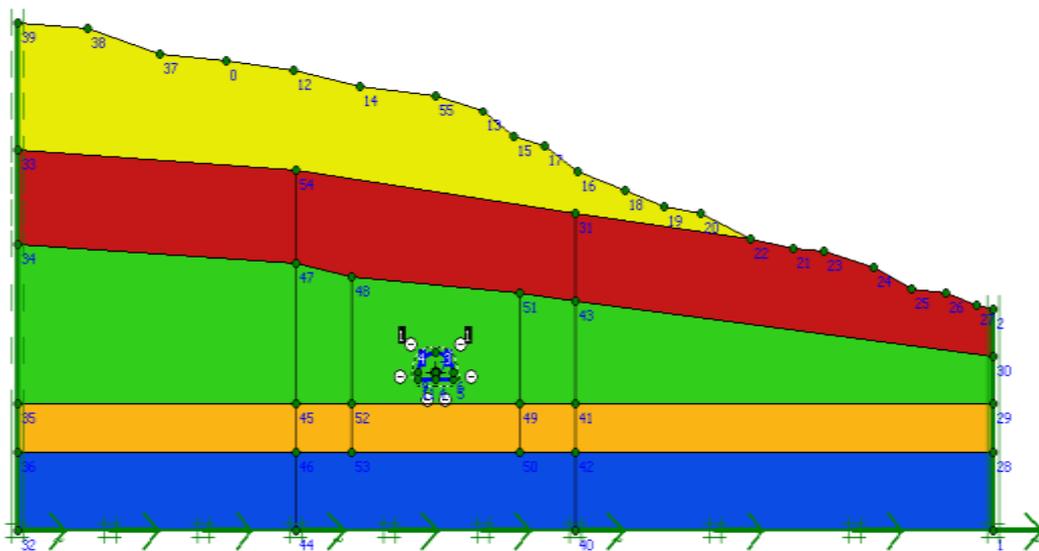


شکل ۲: مقطع تونل نعل اسبی در محیط مورد مطالعه

جدول ۳: مشخصات سازه ای پوشش تونل در حالت پایه

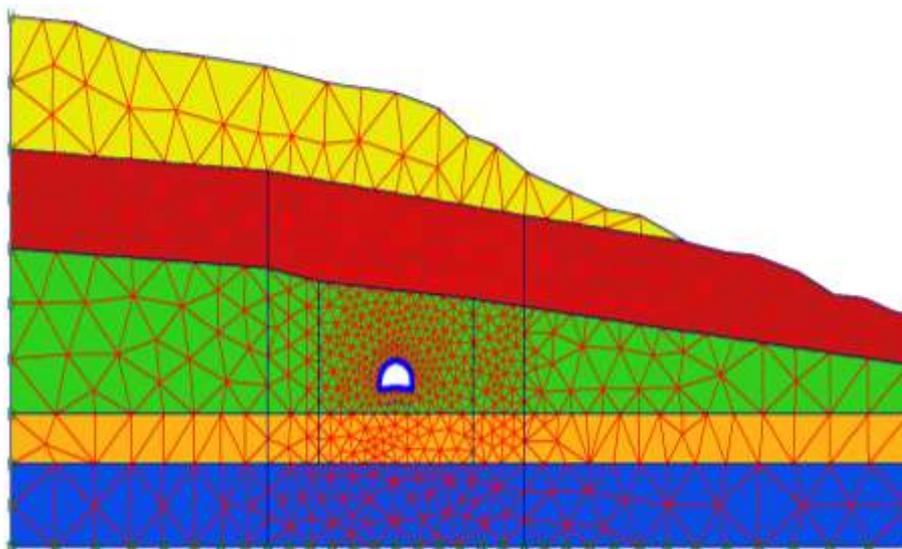
ν	d (m)	w (kN/m/m)	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	E (MPa)	المان سازه ای
۰/۱۵	۰/۲	۴/۸	$۶/۹۰ \times 10^6$	$۲/۳۰ \times 10^4$	۳۴۵۰۰	پوشش تونل

E مدول الاستیک، EA سختی فشاری-کششی، EI سختی خمشی، w وزن در واحد طول، L طول المان، d ضخامت و ν نسبت پواسون می باشند.

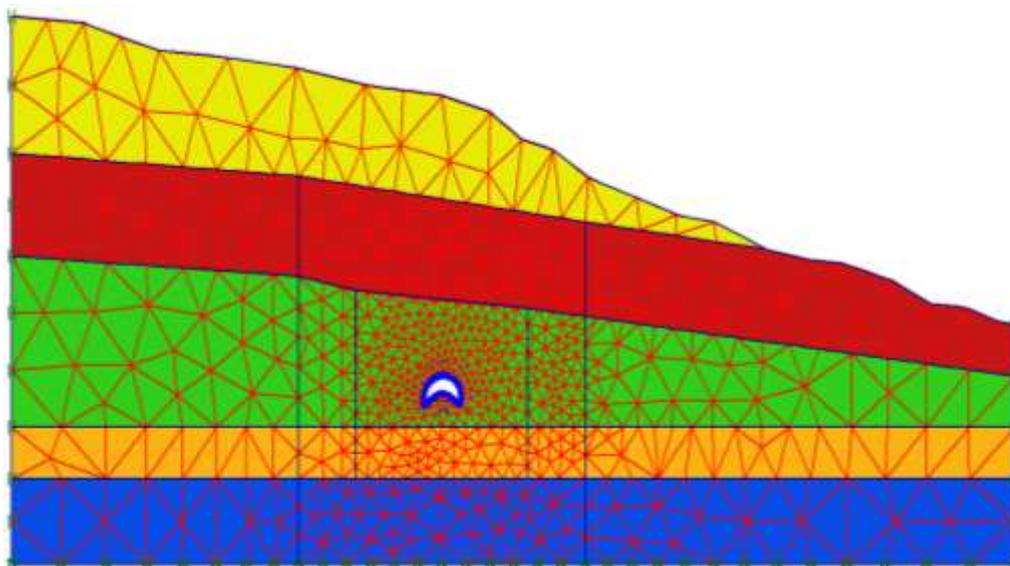


شکل ۳: نمای کلی شبیه سازی در نرم افزار پلکسیس

در این مطالعه برای افزایش دقت مدل‌سازی، محیط اطراف تونل دارای شبکه بندی ریزتری نسبت به نواحی دورتر می باشد. دلیل این نوع شبکه بندی، تمرکز دقت تحلیل نرم افزار پلکسیس در نواحی نزدیک به المان های لاینینگ تونل می باشد. در مدل‌سازی های انجام شده تعداد المان ها و تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی به ترتیب در حدود ۱۶۰۰ المان و ۱۳۰۰۰ نقطه می باشد. همچنین اندازه ی متوسط هرکدام از المان ها در فضای مدل‌سازی در حدود ۶ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: نمای کلی از شبکه بندی اولیه ی محیط مدل شده در نرم افزار پلکسیس

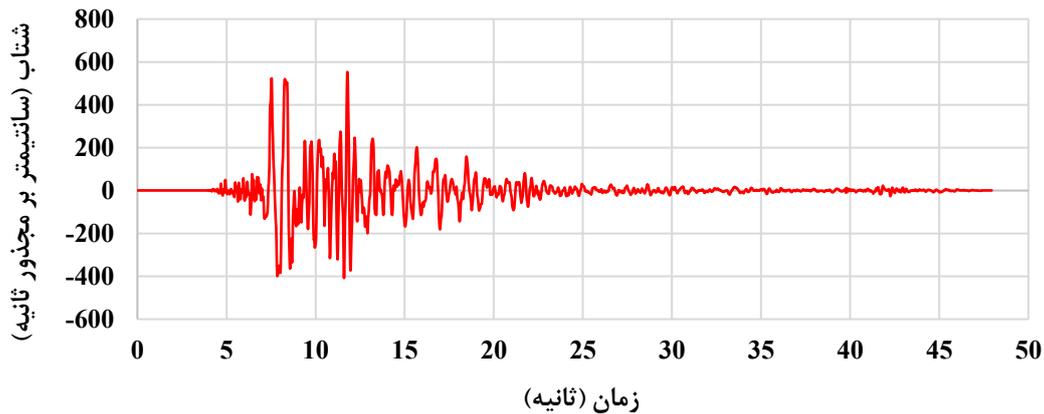


شکل ۵: نمای کلی از تغییر شکل شبکه بندی محیط مدل شده در نرم افزار پلکسیس

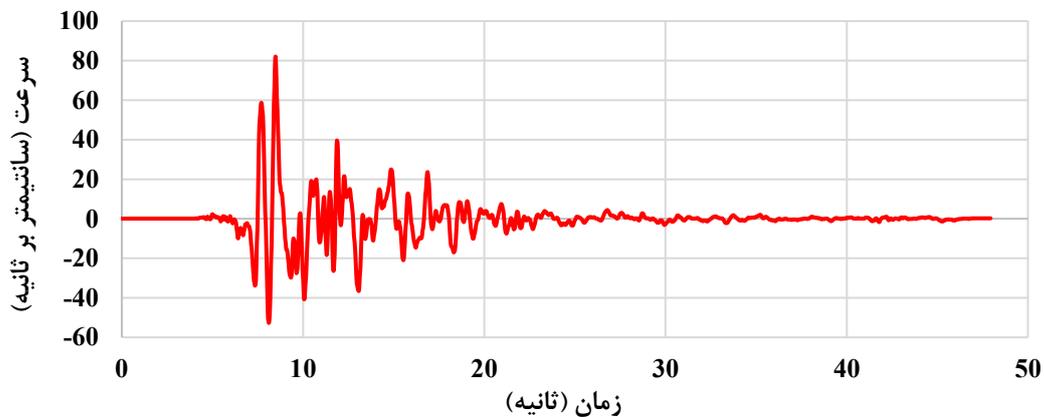
در این مطالعه برای تحلیل پایداری تونل ها به روش عددی، اقدام به تحلیل نتایج حاصل از تغییرات در خصوصیات سازه ای لاینینگ تونل و همچنین زمین لرزه های متفاوت شده است. از اینرو برای در نظر گرفتن تاثیر تغییرات خصوصیات سازه ای لاینینگ تونل بر پایداری تونل، از لاینینگ ابتدایی و لاینینگ ثانویه برای پایدار سازی استفاده شده است و در هر مرحله به

صورت مجزا تغییر داده و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی رفتار لرزه ای تونل از امواج زمین لرزه ی منجیل، السنترو و کوبه، و همچنین حالت غیرلرزه ای استفاده شده و مقایسه ای بین آنها انجام شده است.

همانطور که پیشتر اشاره شد، زمین لرزه ی کوبه یکی از مهمترین زمین لرزه های تاریخ جهان و به خصوص کشور لرزه خیز ژاپن می باشد. لذا انجام مطالعات عددی، با استفاده از مشخات لرزه ای زمین لرزه ی کوبه، کمک شایانی به تحقیقات دانشگاهی و مقایسه ی آن با دیگر زمین لرزه ها خواهد کرد. در ادامه نمودارهای شتاب-زمان، سرعت-زمان و جابجایی-زمان مربوط به زمین لرزه ی کوبه آورده شده است. در فضای نرم افزار پلکسیس برای مدلسازی مورد نظر از داده های مربوط به نمودار جابجایی-زمان استفاده شده است.



نمودار ۱: شتاب - زمان زلزله ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران - مرکز لرزه نگاری کشوری)

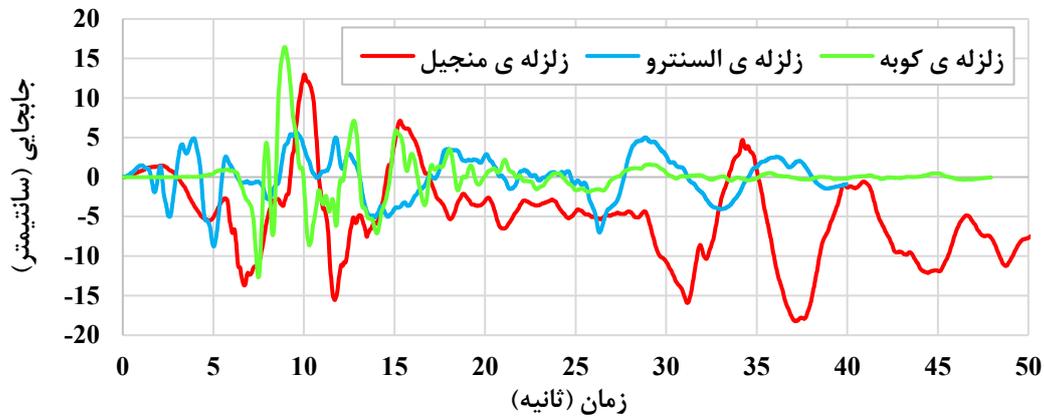


نمودار ۲: نمودار سرعت - زمان زلزله ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران - مرکز لرزه نگاری کشوری)



نمودار ۳: نمودار جابجایی - زمان زلزله ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران - مرکز لرزه نگاری کشوری)

بمنظور مقایسه ی بهتر در مورد تفاوت های زمین لرزه های مورد بررسی در این مطالعه، نمودار جابجایی-زمان زمین لرزه های کوبه، السنترو و منجیل در قالب نمودار ۴ آورده شده است.



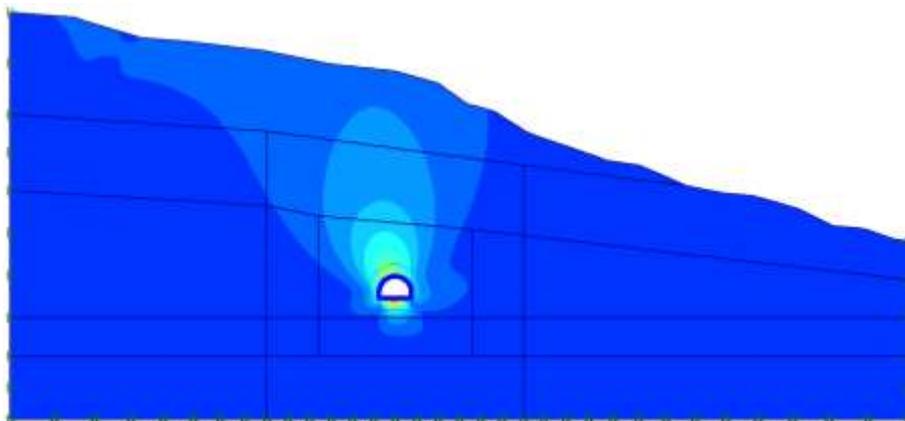
نمودار ۴: مقایسه ی نمودار جابجایی - زمان در سه زلزله ی مورد مقایسه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران - مرکز لرزه نگاری کشوری)

۲-۲ شرایط مرزی

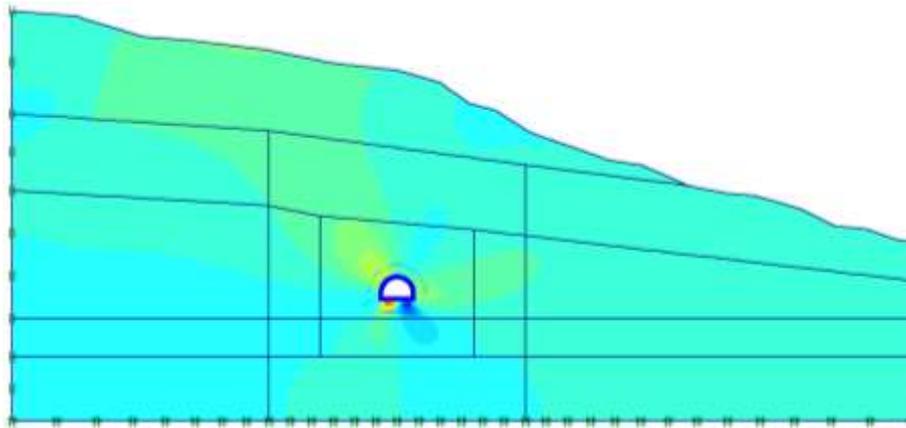
در نرم افزار پلکسیس، تغییر مکان ها و فشار های آب منفذی از پیش تعیین شده بر وجوه اجزا نیز قابل اعمال بوده و هم چنین بارگذاری، هم به صورت نقطه ای و هم به صورت بار گسترده بر روی گره ها و اجزا قابل اجرا می باشد (راهنمای پلکسیس).

۴- بحث و نتیجه گیری

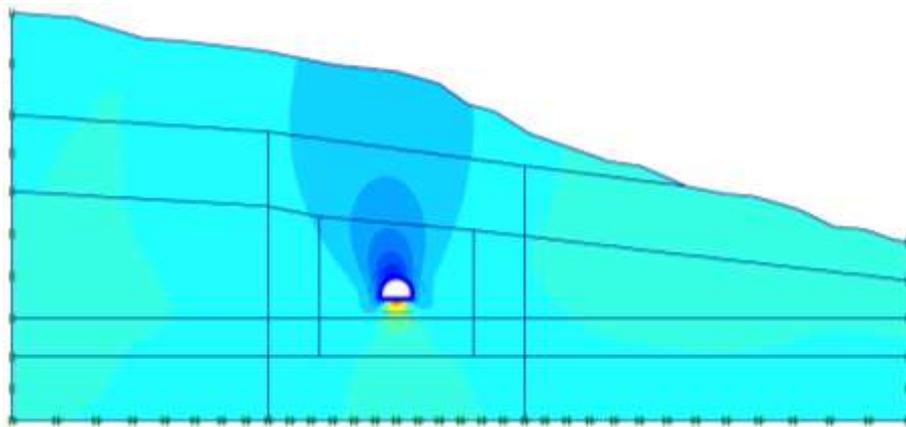
به منظور ایجاد مقایسه بین شرایط مختلف لرزه ای و همچنین ایجاد مقایسه با حالت غیرلرزه ای؛ ۴ حالت متفاوت بررسی شده است. برای این منظور از شش قسمت متفاوت مقطع تونل که عبارتند از قوس بالایی تونل سمت چپ، قوس بالایی تونل سمت راست، دیواره ی تونل سمت چپ، دیواره ی تونل سمت راست، کف تونل سمت چپ و کف تونل سمت راست، بهره گرفته شده است. در شکل های ۶ الی ۸ جابجایی های ایجاد شده در مدل ترسیم شده است.



شکل ۶: جابجایی های کلی ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیرلرزه ای

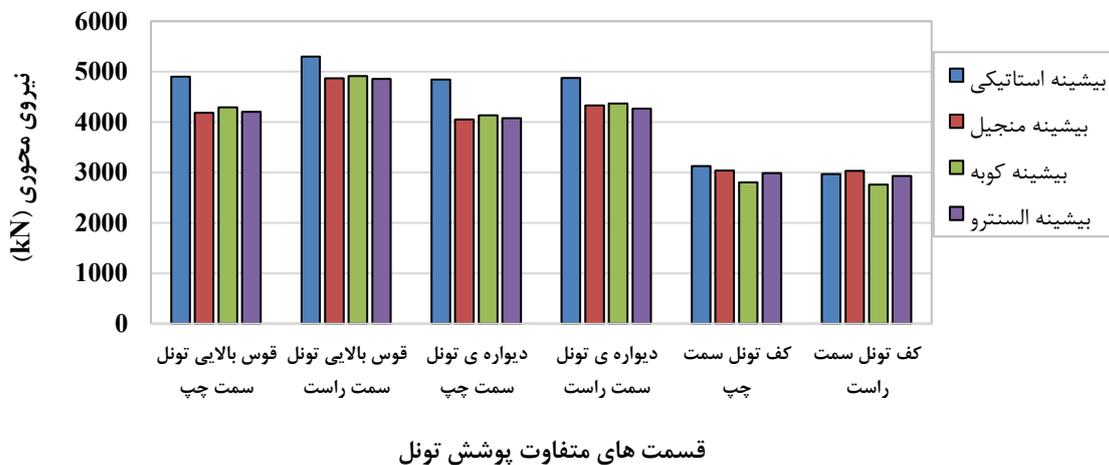


شکل ۷: جابجایی های افقی ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیرلرزه ای

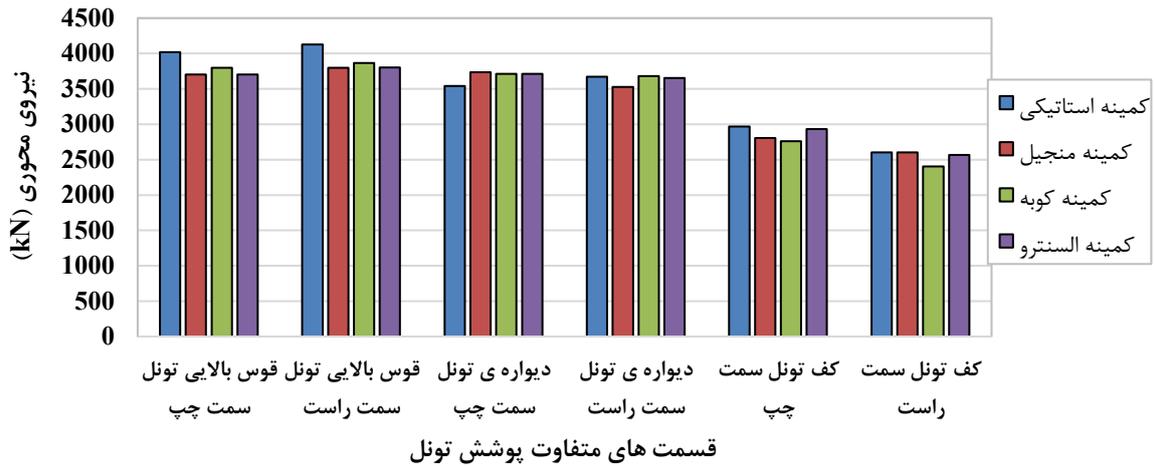


شکل ۸: جابجایی های قائم ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیرلرزه ای

بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری در شرایط لرزه ای گوناگون به ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری در شرایط استاتیکی بیشتر از حالات لرزه ای می باشد. در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی محوری دیده می شود که مقادیر نیروی محوری در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می باشد و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که تفاوت مقادیر ثبت شده در حالات لرزه ای متفاوت و حالت غیرلرزه ای، تفاوت چشمگیری را از خود نشان نمی دهد و همگی در یک محدوده رفتار می کنند.

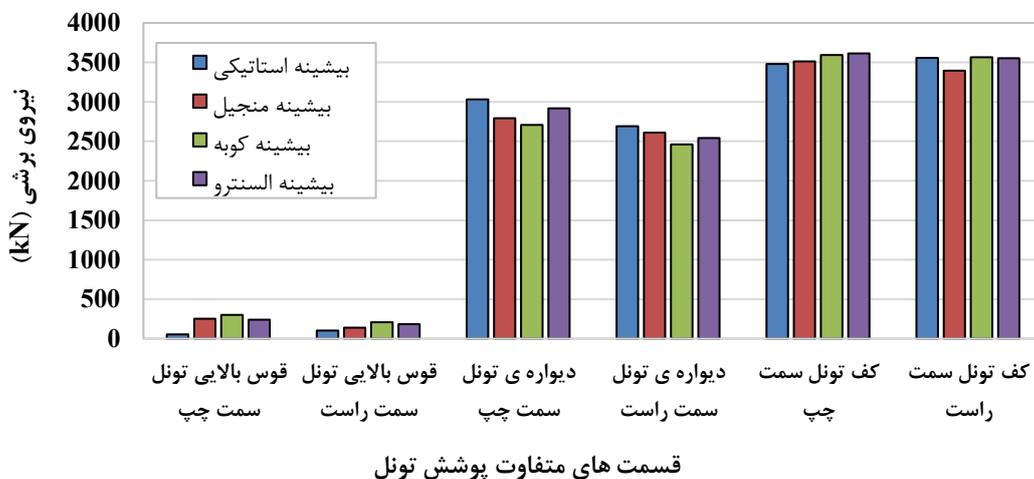


نمودار ۵: بیشینه مقادیر نیروی محوری در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

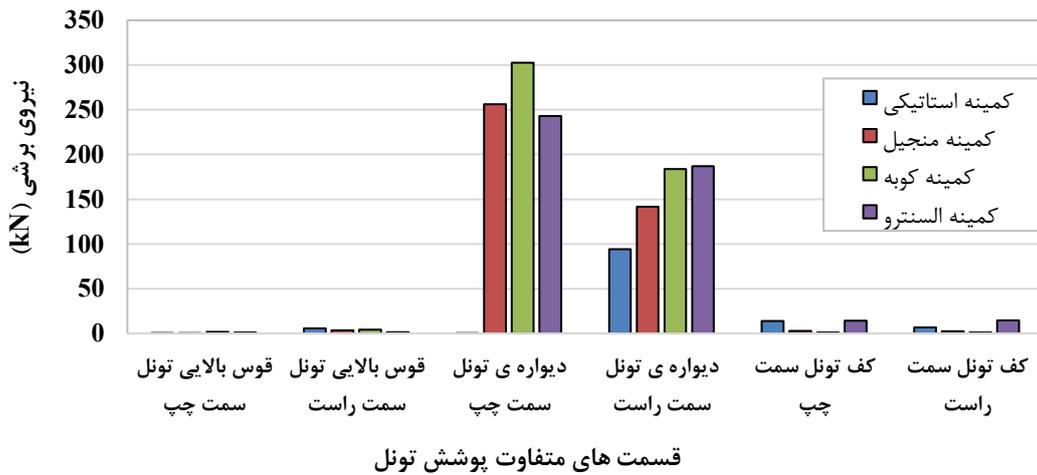


نمودار ۶: کمینه مقادیر نیروی محوری در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی در شرایط لرزه ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۷ و ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که بیشینه مقادیر نیروی برشی در شرایط استاتیکی و حالات لرزه ای در یک محدوده می باشند در حالی که معمولاً در نقاط مورد بررسی کمینه مقادیر نیروی برشی در حالت استاتیکی کمتر می باشد. در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی دیده می شود که مقادیر برشی در قوس بالایی تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می باشد و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات بسیار زیاد در کف تونل، بررسی نیروی برشی در این مناطق بحرانی تر می باشد.

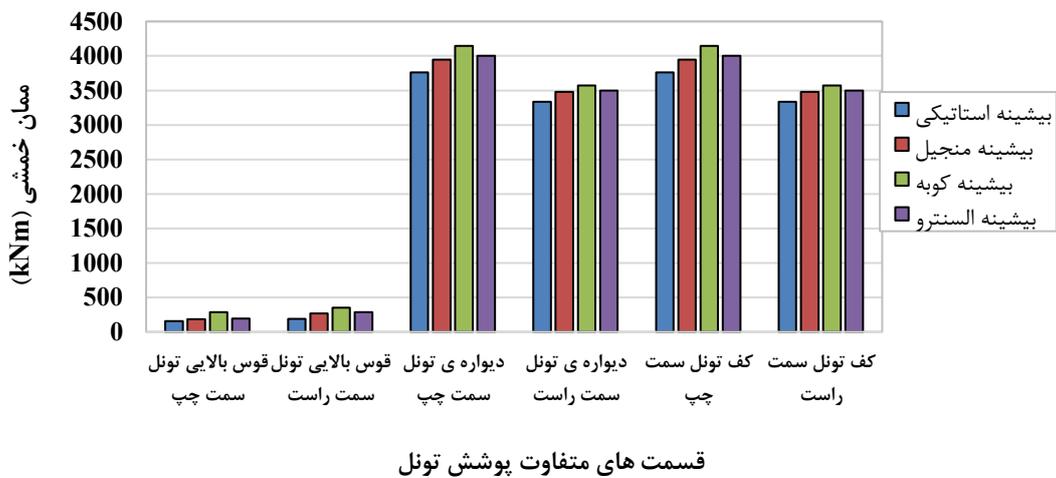


نمودار ۷: بیشینه مقادیر نیروی برشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

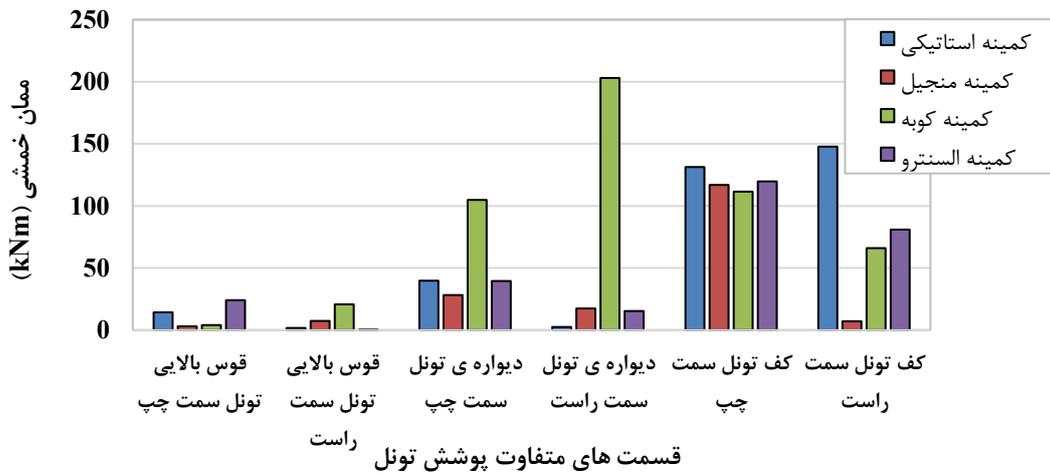


نمودار ۸: کمینه مقادیر نیروی برشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

بیشینه و کمینه مقادیر ممان خمشی در شرایط لرزه ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می شود که بیشینه مقادیر ممان خمشی در شرایط استاتیکی و حالات لرزه ای در یک محدوده می باشد در حالی که معمولاً در نقاط مورد بررسی کمینه مقادیر ممان خمشی در حالت لرزه ای کوبه بیشتر می باشد. در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر ممان خمشی دیده می شود که مقادیر ممان خمشی در قوس بالایی تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می باشد و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات بسیار زیاد در کف تونل، بررسی ممان خمشی در این مناطق بحرانی تر می باشد.

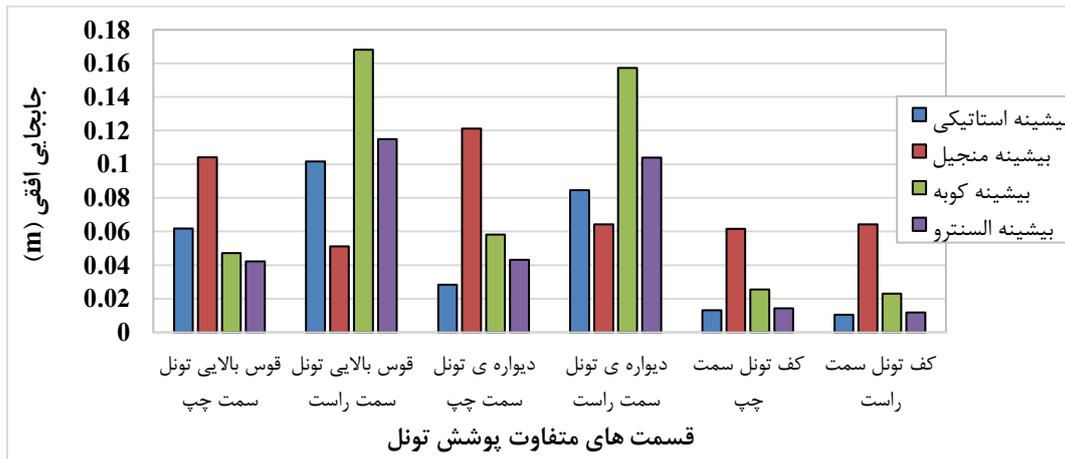


نمودار ۹: بیشینه مقادیر ممان خمشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

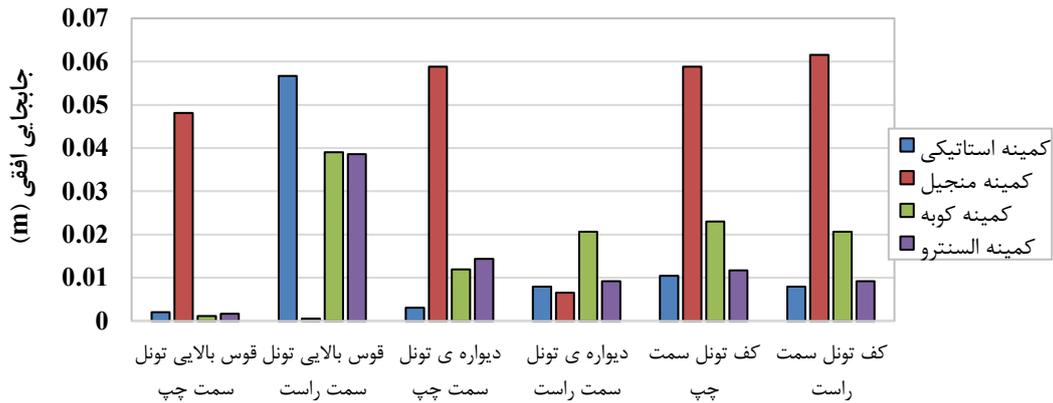


نمودار ۱۰: کمینه مقادیر ممان خمشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط لرزه ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می شود که بیشینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط استاتیکی در بیشتر نقاط مورد بررسی کمتر از حالات لرزه ای می باشد، این حالت به طور نسبی در کمینه مقادیر مورد بررسی نیز مشاهده می شود. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی افقی دیده می شود که مقادیر جابجایی افقی در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می باشد و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات بسیار زیاد در قوس بالایی و دیواره های تونل، بررسی جابجایی افقی در این مناطق بحرانی تر می باشد. با توجه به نمودار ترسیم شده مشخص است که زمین لرزه ی کوبه در ایجاد جابجایی افقی در پوشش تونل نقش پررنگتری ایفا می کند.



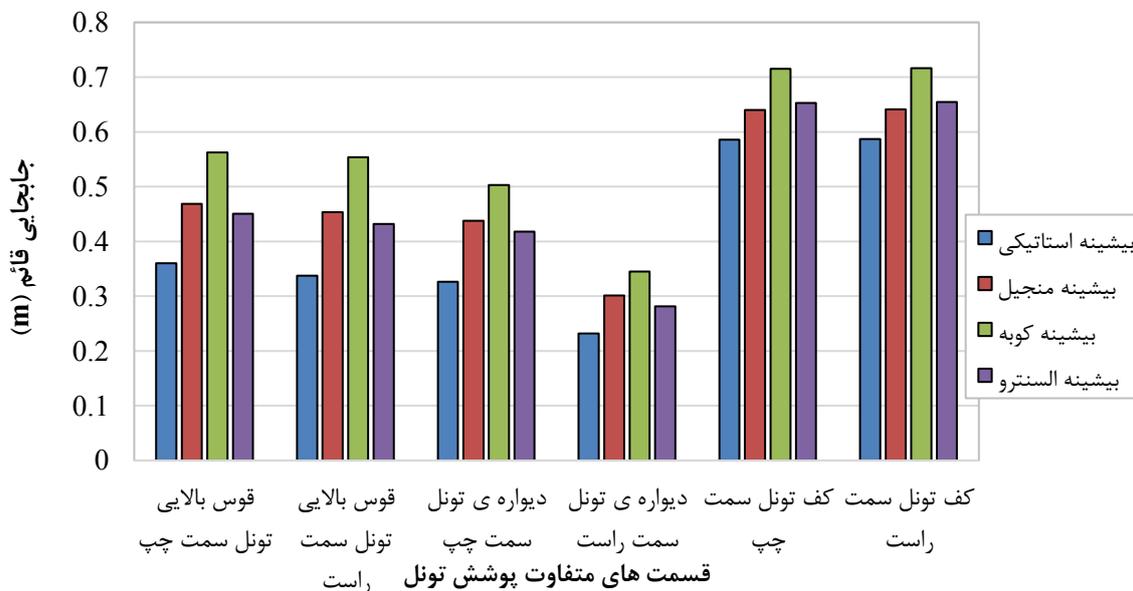
نمودار ۱۱: بیشینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون



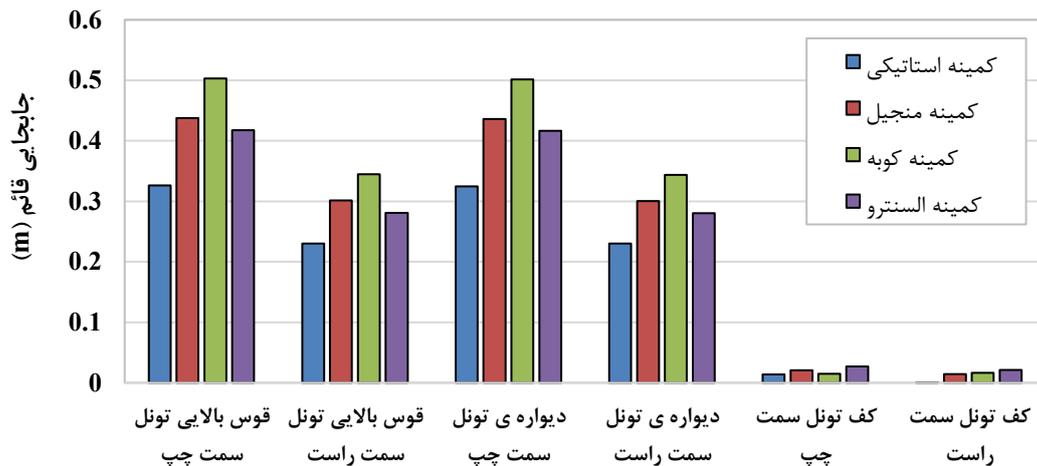
قسمت های متفاوت پوشش تونل

نمودار ۱۲: کمینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در شرایط لرزه ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در شرایط استاتیکی در نقاط مورد بررسی کمتر از حالات لرزه ای می باشند. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی قائم دیده می شود که مقادیر جابجایی قائم در کف تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی بیشتر می باشد 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 بحرانی تر می باشد. با توجه به نمودار ترسیم شده مشخص است که زمین لرزه ی کوبه در ایجاد جابجایی قائم در پوشش تونل نقش پررنگتری ایفا می کند.



نمودار ۱۳: بیشینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون



قسمت‌های متفاوت پوشش تونل

نمودار ۱۴: کمینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

با تغییر در محیط‌های لرزه ای و مقایسه با حالت استاتیکی، هر کدام از پارامترهای مورد بررسی در حالت بیشینه و کمینه در نمودارهای بالا به صورت شماتیک ترسیم شد و به صورت کیفی مورد بحث قرار گرفت. در جدول ۴ با 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 مقایسه ی 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 می‌باشند.

جدول ۴- درصد تغییرات پارامترهای مورد بررسی تونل در شرایط لرزه ای گوناگون

قوس بالایی تونل (چپ)	قوس بالایی تونل (راست)	دیواره ی تونل (چپ)	دیواره ی تونل (راست)	کف تونل (چپ)	کف تونل (راست)	تغییرات	درصد
۱۷	۹	۲۰	۱۴	۱۱	۱۰	تغییرات بیشینه	تغییرات
۹	۹	۵	۴	۸	۸	تغییرات کمینه	نیروی محوری
۴۵۴	۱۰۱	۱۲	۹	۴	۵	تغییرات بیشینه	درصد تغییرات
۸۴۲	۲۸۲	۷۳۲۶۷	۹۸	۱۵۳۱	۱۲۷۲	تغییرات کمینه	نیروی برشی
۸۲	۸۳	۱۰	۷	۱۰	۷	تغییرات بیشینه	درصد تغییرات
۷۲۷	۲۱۱۵۱	۲۷۳	۷۸۶۹	۱۸	۲۰۰۴	تغییرات کمینه	ممان خمشی
۱۴۶	۲۲۹	۳۲۹	۱۴۵	۳۶۷	۵۱۳	تغییرات بیشینه	درصد تغییرات
۴۲۰۴	۱۰۸۸۷	۱۸۲۳	۲۱۶	۴۶۲	۶۷۶	تغییرات کمینه	جابجایی افقی

درصد تغییرات	۵۶	۶۴	۵۴	۴۹	۲۲	۲۲
تغییرات بیشینه						
جابجایی قائم	۵۴	۵۰	۵۴	۴۹	۹۷	۳۸۴۳
تغییرات کمینه						

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

۵- نتایج

با بررسی مدلسازی محیط مورد تمرکز در ارتباط با فضای مورد بررسی و امان های پوشش تونل و همچنین تجزیه و تحلیل شبیه سازی انجام شده، پیرامون پارامترهای مورد بررسی، نتایج استخراج شده از مطالعه ی حاضر به شرح ذیل می باشد در این فصل نتیجه گیری کلی و پیشنهادات برای تحقیقات آینده به شرح زیر خلاصه می شود.

مابین نقاط متفاوت مورد مطالعه در پوشش تونل، کف تونل در تمامی حالات بررسی شده، بحرانی ترین نقطه در مورد نشست اعمالی می باشد. و از سوی دیگر دیواره ی سمت راست تونل (دیواره ی با روباره ی کمتر) کمترین میزان نشست ۰/۱ میلیمتر تغییرات و درصد تغییرات جابجایی افقی با حائل گذاری متفاوت با تغییرات بیشینه ۲۲ درصد در دیواره تونل(سمت چپ) و درصد تغییرات کمینه ۴۱۷ درصد را گزارش می دهد.

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

از بین زمین لرزه های مورد مطالعه، زمین لرزه ی کوبه به دلیل دامنه ی اعمال جابجایی بیشتر، بحرانی تر است، از اینرو زمین لرزه های با دامنه ی اعمال قویتر، بحرانی تر از زمین لرزه های با زمان اعمال بالا، هستند.

همانطور که انتظار می رفت، با افزایش ضخامت پوشش ابتدایی تونل، جابجایی های اعمال شده در حائلگذاری، 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 می باشد.

۵-پیشنهادهات

استفاده از مصالح الیافی در ساخت تونل می تواند به عنوان جایگزینی برای افزایش ضخامت پوشش بتنی در نظر گرفته شود. بتن الیافی به دلیل ویژگی هایی مانند افزایش مقاومت کششی و کاهش ترک خوردگی، می تواند در لاینینگ تونل ها مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش ضخامت پوشش بتنی کمک کند (Ghodratnama, M t al., 2025)

سپاسگزاری:

نویسنده این مقاله از هم فکری تمام اعضای دفتر فنی و سرپرستان کارگاه متروی قم، موسسه حرا وابسته به قرارگاه خاتم النبیه و مدیریت پروژه قرارگاه خاتم النبیه کمال سپاسگزاری را دارد.

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

Davoud Jafari, Mehran Khalaj, Pazman Salehi (2023) Designing a Stable Model for Tehran Metro Train Scheduling with a Robust Optimization Perspective Scientific Journal of Software Computing. Persian.

Kordestani ·Reza و Shahriar ·Kurosh و Maarefvand ·Parviz (2013) Stability analysis of Qods Square Station, Line 1 of Tehran Metro, according to the considered excavation method using PLAXIS software Quarterly Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering. Persian.

Sattar Azami (2013) "Stability Analysis and Design of Sardasht Long Tunnel Support System" Master's Thesis in Rock Mechanics Engineering, Isfahan University of Technology, Faculty of Mining. Persian.

Mahdori, Sattar and Esmaeili, Erfan and Abedi, AmirSalar, (2019), 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. Persian.

Vojoudi, Mehdi (2003), Investigation of the effect of earthquake on underground structures with a special focus on tunnels and underground metro stations, International Research Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Persian.

Hashash, Y.M.A and Hook, J.J. and Schmidt, B. and I-Chiang Yao, J. (2001), "Seismic design and analysis of underground structures", Tunnelling and Underground Space Technology, 16, pp 247-293.

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, PP: 348 – 359.

Shen, Y., GAO, B., Yang, X., Tao, S., (2014) Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake. Engineering Geology 180, PP: 85–98.

Walter Amberg and Marco Russo,(2001) "Seismic design of underground structures the bolu tunnel", Lombardi SA Engineering Limited, Via Simen 19, CH – 6648 Minusio, Switzerland.

Hesami, S., Ahmadi, S. (2013) Ground Surface Settlement Prediction in Urban Areas due to Tunnel Excavation by the NATM. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 18.

Rajae, A., Abrishmi, S., Javankhosdel, S., & Dastpak, P(2024). Soil Strength Parameters Sensitivity Analysis of Tied-Back Urban Deep Excavation, 77th Canadian Geotechnical Conference, GeoMontreal, Canada,

Ghodratnama, M., Rajae, A., Masoodi, A. R., Abrishami, S., Davarpanah, T. A., & 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, 104969