

تحلیل و بررسی عددی جابجایی و نیروهای داخلی تونل در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای به روش المان محدود (مطالعه موردی)

مقاله علمی-پژوهشی

*مسعود خواهانی پور (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: masoud.khahanipour@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

صفحه ۹۲-۷۵

چکیده

پایداری سازه‌های زیرزمینی همواره یکی از مسائل پیچیده مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود، که تحت تأثیر تغییرات ناهمگون شرایط زمین‌شناسی، خواص و رفتار مصالح خاک و سنگ، وضعیت تنش‌های اولیه و مراحل مختلف حفاری قرار دارد. در این پژوهش، به منظور تحلیل دقیق پایداری تونل A متروی قم، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و مبتنی بر روش اجزای محدود و تئوری کرنش صفحه‌ای انجام شد. پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های مختلف خاک، مشخصات سازه‌های لاینیگ تونل و سناریوهای مختلف بارگذاری شامل شرایط استاتیکی و دینامیکی در مدل اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت پوشش اولیه تونل باعث کاهش جابجایی‌های وارده و افزایش نیروهای داخلی می‌شود؛ به گونه‌ای که افزایش ضخامت لاینیگ از ۲۰ به ۳۵ سانتی‌متر، نشست کف تونل را تا حدود ۱۰۰٪ کاهش داده است. تحلیل دینامیکی نیز بیانگر آن است که زلزله کوبه به دلیل دامنه بالاتر تغییر مکان، بیشترین تأثیر مخرب را بر جابجایی‌های افقی و قائم پوشش تونل دارد. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های شهری در مناطق لرزه‌خیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پایداری، تونل، متروی قم، نرم‌افزار پلکسیس

۱- مقدمه

سازی به گسترش و پیشرفت کانال‌سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به‌ویژه 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 حمل‌ونقل 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

تحلیل 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. 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، به‌ویژه به‌منظور حمل‌ونقل، تحرک قابل ملاحظه‌ای یافت. تونل

خصوصیات مقاومتی و مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های موجود، شرایط تنش برجا، وضعیت هیدروژئولوژی منطقه و ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بررسی خواص ژئومکانیکی توده‌های سنگی جهت تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی از دیرباز مورد بررسی قرار گرفته که در راستای همین اقدامات، تعدادی از سیستم‌های مختلف طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ، گسترش یافته‌اند (عظیمی، ۱۳۹۲). تحلیل پایداری یکی از مباحث اصلی و مهم در تونل سازی 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 کم عمق 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 هیچ‌گونه خسارتی به سیستم مترو نشد (Hashash et al. 2001).

آندو و همکاران (Anh Do, et al. 2015) به بررسی دوبعدی لاینینگ تونل‌ها تحت تأثیر بارهای لرزه‌ای پرداختند. امروزه در اکثر مناطق زلزله‌خیز از تونل‌هایی با لاینینگ چندبخشی استفاده می‌شود. در اکثر تحقیقات از تأثیر اتصال بین سگمنت‌ها صرف‌نظر می‌شود. مدل ارائه شده 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.

شن و همکاران (Shen, et al. 2014) به بررسی مکانیزم صدمات لرزه‌ای و آنالیز خواص تغییر شکل دینامیکی تونل‌های کوهستانی بعد از زلزله و نچوان پرداختند. بعد از زلزله و نچوان در سال ۲۰۰۸ بسیاری از تونل‌های کوهستانی دچار آسیب

صنعتی، تونل و فضاهای زیرزمینی برای استفاده‌های حمل‌ونقل داخل و خارج از شهر، انتقال آب و فاضلاب، لوله رانی 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 به‌کارگیری تمهیدات ویژه می‌باشد. در بسیاری از زمین‌ها تونل‌های حفر شده نمی‌تواند خود نگهدار باشد و برای پابرجا 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 موردنظر 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 باز کردن تونل بستگی دارد.

هدف اصلی این تحقیق تحلیل پایداری تونل‌ها به روش عددی در تونل A متروی قم با استفاده از نرم‌افزار Plaxis است. در این تحقیق نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای صحت سنجی با نتایج برداشت شده از حفاری تونل مورد مقایسه قرار می‌گیرد همچنین تحلیل تأثیر 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- پیشینه تحقیق

با پیشرفت کشورها نیاز به احداث فضاهای زیرزمینی و احداث تونل‌های مختلف افزایش میابد. با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری بسیار بالا ریسک انجام چنین پروژه‌هایی بالا می‌رود. بنابراین ارزیابی اجرا و پایداری فضاهای حفر شده زیرزمینی از پارامترهای مهم در این‌گونه پروژه‌های می‌باشد. روش‌های مختلف تجربی و عددی در زمینه تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی وجود دارد که پیش‌نیاز استفاده از هر کدام از این روش‌ها، دانستن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ،

که از نام آن پیداست، به محاسبه‌ی دقیق پارامتری معادله‌های کلی یا دیفرانسیل حاکم بر ارتباط میدان‌های فیزیکی مانند میدان تنش، میدان الکتریکی، میدان حرارتی و غیره پرداخته می‌شود. درحالی‌که درروش دوم به حل عددی مسئله می‌پردازد. یکی از نرم‌افزارهای موجود که دارای قابلیت‌های مناسبی جهت مدل‌سازی می‌باشد و می‌توان از آن برای تحلیل انواع مختلفی از مسائل ژئوتکنیکی به روش اجزاء محدود استفاده نمود، نرم‌افزار پلکسیس می‌باشد که در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه صنعتی دلف که در فعالیت‌های ملی و مدیریت آب در هلند پیشقدم بود، شروع به توسعه کرد.

هدف از انجام این تحقیق تحلیل پایداری تونل شماره A متروی قم تحت تأثیر بارهای استاتیک و دینامیک با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Plaxis می‌باشد. سپس نتایج تحلیل عددی با داده‌های مونیتورینگ این تونل مقایسه و سعی می‌شود دلیل عدم پایداری آن مورد ارزیابی قرار گیرد مترو قم یک سامانه قطار شهری زیرزمینی در شهر قم است که در حال ساخت می‌باشد. این سامانه در ۲ خط طراحی شده خط ۱ مترو قم دارای ۲ خط A و B است که خط A آن با پیش‌بینی 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 میدان کشاورز تا میدان شهید مطهری و خط B هم به طول ۱۸ کیلومتر، ۱۶ ایستگاه دارد.

۳-۱- اعتبارسنجی تحلیل عددی

آنچه مشخص است، داده‌های حاصل از یک تحلیل عددی باید مورد اعتبارسنجی قرار گیرند. از اینرو در این پژوهش به‌منظور صحت انجام کار در نرم‌افزار پلکسیس دویعدی 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 تونل‌زنی پرداختند. نتایج بدست آمده از این پژوهش و مدل‌سازی شده توسط پلکسیس مورد استفاده در پژوهش حاضر در نمودار ۱ الی ۳ آورده شده است.

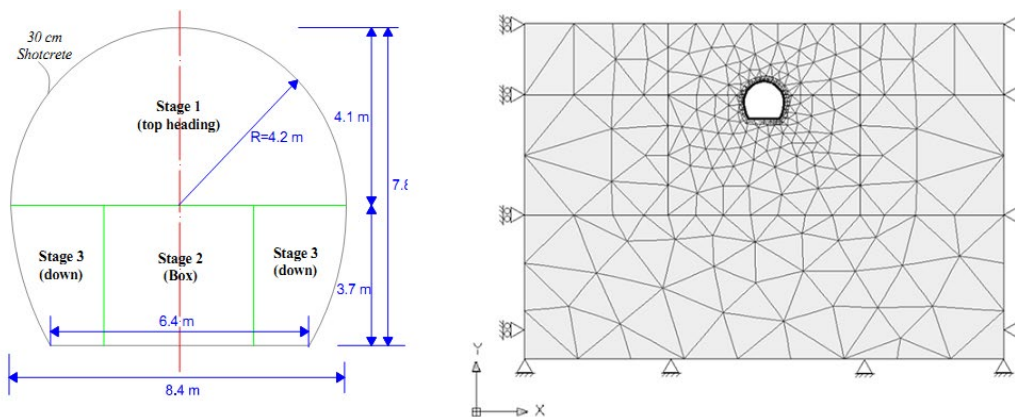
جدی شدند. به‌منظور توسعه علوم موجود در مورد عملکرد تونل‌های کوهستانی تحت بار لرزه‌ای ۵۲ تونل مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا بر اساس داده‌های مربوط به خسارت لرزه‌ای معیار آسیب‌دیدگی جدیدی تعریف شد. سپس خواص خسارت‌های لرزه‌ای و مکانیزم رفتار تونل‌های کوهستانی بر الگوهای خسارتی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و در آخر یک مدل سه‌بعدی برای مطالعه خسارات وارد بر تونل‌ها ارائه شد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که جابجایی نسبی قسمت‌های بالایی تونل بیشتر از قسمت‌های پایینی است.

تونل‌های دوقلوی بولو واقع در منطقه کوهستانی در قسمتی از مسیر استانبول-آنکارا با روش اتریشی (NATM) ساخته شده‌اند. این تونل‌ها با چندین گسل فرعی موازی تقاطع پیدا می‌کنند. در اثر زلزله ۱۹۹۹ کوبه 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).

چندین تونل بزرگراهی در زلزله ۱۹۹۹ چی‌چی در مرکز تایوان تحت تأثیر قرار گرفتند. در بازرسی‌های انجام گرفته هیچ نشانه‌ای از خرابی دیده نشده بود. اصلی‌ترین آسیب در ورودی تونل به دلیل ناپایداری شیروانی بوده است. یک تونل که از مسیر گسل چلونگ‌پو عبور کرده بود، به دلیل جابجایی ۴ متری گسل بسته شد. هیچ گزارشی مبنی بر آسیب مترو تایپه که در ۱۰۰ کیلومتری صفحه گسل واقع شده، نشده است (وجودی، ۱۳۸۲). 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).

۳- روش تحقیق

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی، سه روش وجود دارد؛ حل تحلیلی دقیق، حل عددی شامل نرم‌افزارهای اجزای محدود و روش تجربی. درروش حل تحلیلی دقیق، همانطور



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

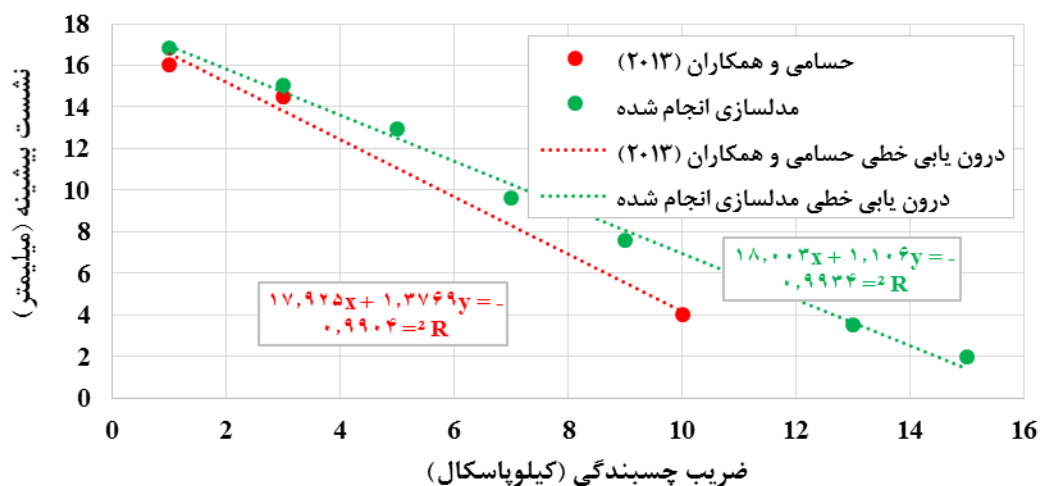
جدول ۱. اطلاعات پروفیل خاک در مطالعات حسامی و همکاران (۲۰۱۳)

نوع خاک	عمق (m)	γ_d (KN/m ³)	C (KN/m ²)	ϕ (درجه)	U ()	E_m (MPa)
GP	۲۰-۰	۱۸/۵	۵	۳۲	۰/۳	۱۰۰
GW	۲۵-۱۵	۲۲	۷	۴۳	۰/۳	۱۰۰

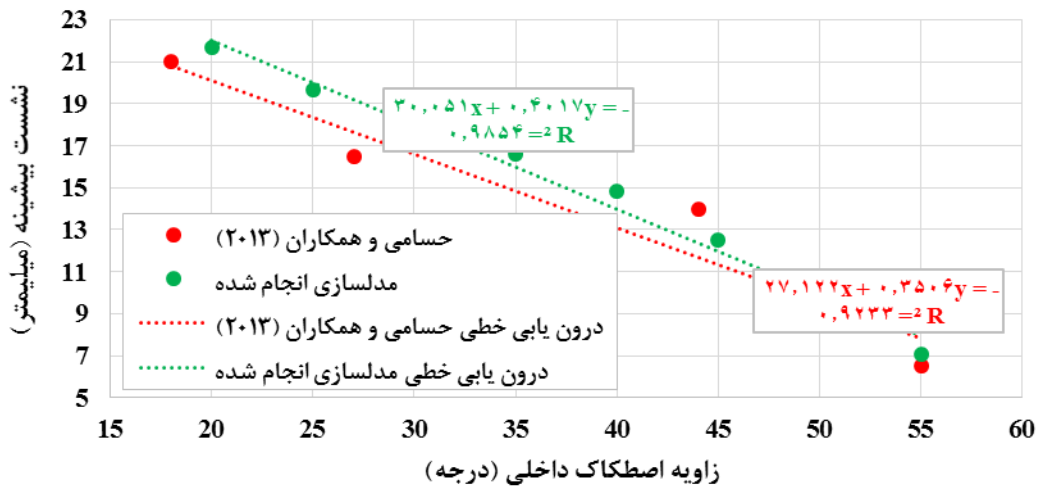
C, ϕ , E_m , γ_d و U به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، وزن مخصوص و نسبت پوآسون خاک می‌باشند.

از ۲۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. لذا مدل مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند مورد اعتماد باشد.

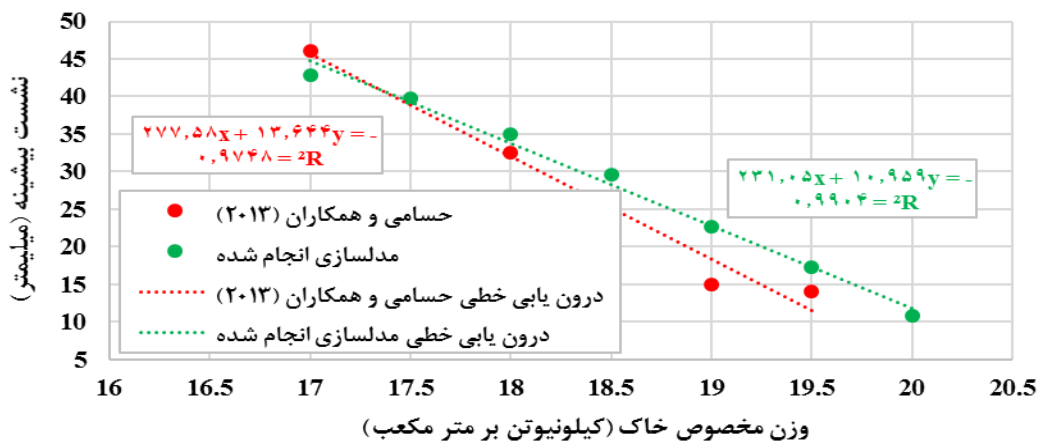
در این بخش مدل موجود در مطالعات حسامی و همکاران (۲۰۱۳) مجدداً توسط نرم‌افزار پلکسیس دوبعدی مدل‌سازی شد. با مقایسه نتایج مشخص شد که حداکثر اختلاف بین نتایج



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- مدل سازی عددی

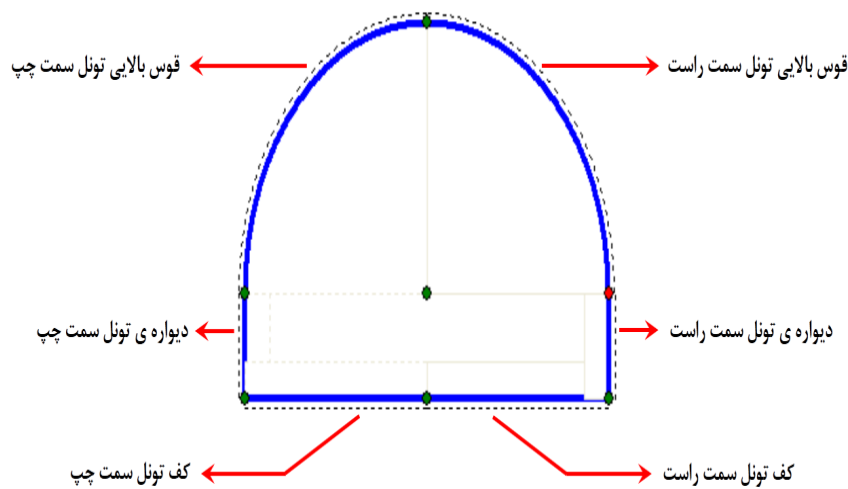
به صورت جاذب انرژی زلزله در نظر گرفته شد که از انعکاس مجدد امواج پس از برخورد با مرزهای مدل، جلوگیری شود و به مرز پایینی مدل برای مدل سازی فضای لرزه ای در راستای افق به میزان ۱۰ سانتی متر جابجایی افقی اعمال شد. با توجه به جدول ۲، ضریب درگیری سطح تماسی بین دو سطح مختلف که در این جا سطح تماس بین خاک و 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 تأثیر یکسانی را ایفا می کند، لذا در نتیجه ی نهایی، تأثیر قابل توجهی ندارد.

برای مدل سازی، 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 مدل سازی المان های مثلثی ۱۵ گره ای و شبکه بندی مناسب برای آنالیز صحیح مدنظر قرار گرفته شد. برای مدل سازی 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 مدل سازی پوشش تونل از خصوصیت های ذکر شده در جدول ۳ استفاده شد و پس از آن با تغییر در پارامترهای مورد مطالعه، تأثیر هر کدام از پارامترها، در تغییرات رفتار مهندسی پوشش تونل، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل سازی دقیق متناسب با فضای طبیعی تحت اثر انتشار امواج زلزله، مرزهای جانبی مدل

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف خاک منطقه

Rinter	ν	γ_w	γ_d	E_m	ϕ	C	لایه‌بندی خاک
		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(درجه)	(kN/m ²)	
۰/۷	۰/۳۵	۱۹	۱۵/۵	$۱/۷۵۷ \times ۱۰^۴$	۲۰/۷	۱۴	لایه ۱ رس سست سطحی
۰/۷	۰/۳۵	۱۵/۵	۱۳/۵	$۱/۹۴۵ \times ۱۰^۴$	۲۱	۱۷	لایه ۲ رس شل
۰/۷	۰/۴۵	۱۹/۵	۱۷	$۲/۱ \times ۱۰^۴$	۲۳/۴	۱۸	لایه ۳ رس مازنی سست
۰/۷	۰/۴۵	۲۱	۱۹/۵	$۵/۲۵ \times ۱۰^۴$	۳۱/۵	۵۰	لایه ۴ رس متراکم
-	۰/۳	۲۶/۱	۲۵/۶	$۱/۱۵ \times ۱۰^۶$	۳۹/۵	۱۰۵	لایه ۵ سنگ بستر

C, ϕ , E_m , γ_d , γ_w و ν و Rinter به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل‌پذیری، وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص مرطوب، نسبت پوآسون و ضریب اندرکنش توده خاک می‌باشند.

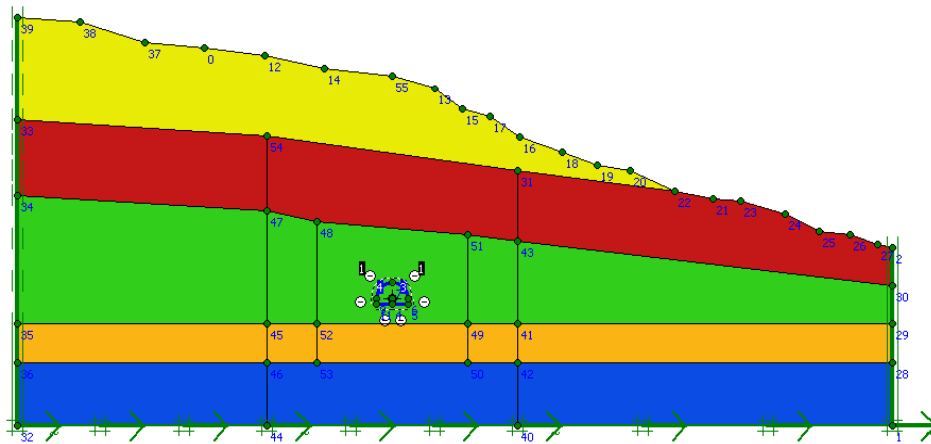


شکل ۲. مقطع تونل نعل اسبی در محیط مورد مطالعه

جدول ۳. مشخصات سازه‌ای پوشش تونل در حالت پایه

ν	d	w	EA	EI	E	المان سازه‌ای
	(m)	(kN/m/m)	(kN/m)	(kNm ² /m)	(MPa)	
۰/۱۵	۰/۲	۴/۸	$۶/۹۰ \times ۱۰^۶$	$۲/۳۰ \times ۱۰^۴$	۳۴۵۰۰	پوشش تونل

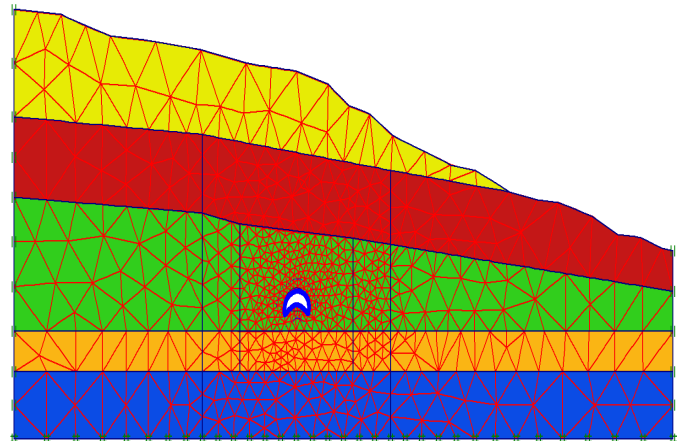
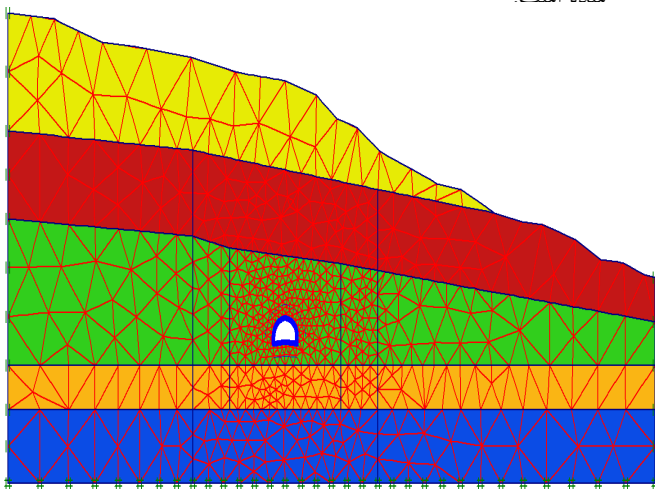
E مدول الاستیک، EA سختی فشاری-کششی، EI سختی خمشی، w وزن در واحد طول، L طول المان، d ضخامت و ν نسبت پوآسون می‌باشند.



شکل ۳. نمای کلی شبیه سازی در نرم افزار پلکسیس

نظر گرفته شده برای مدل سازی به ترتیب در حدود ۱۶۰۰ المان و ۱۳۰۰۰ نقطه می باشد. همچنین اندازه ی متوسط هر کدام از المان ها در فضای مدل سازی در حدود ۶ متر در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه برای افزایش دقت مدل سازی، 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 مدل سازی های انجام شده تعداد المان ها و تعداد نقاط در

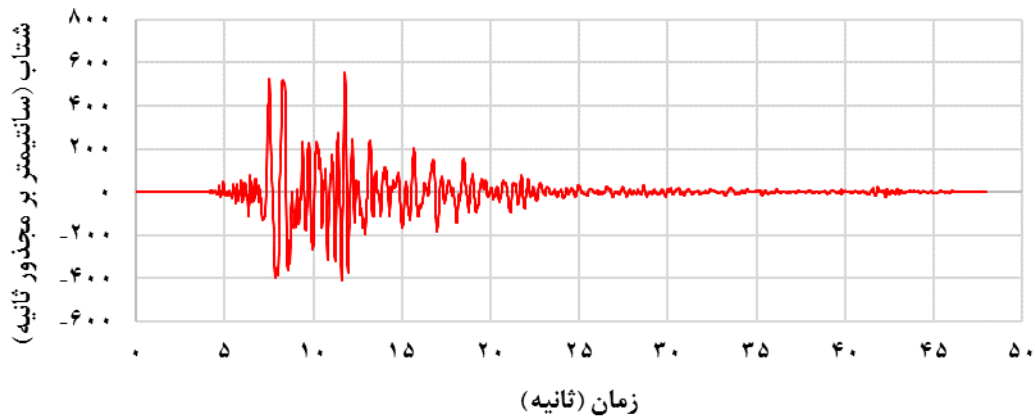


شکل ۴. نمای کلی از تغییر شکل شبکه بندی محیط مدل شده در نرم افزار پلکسیس شکل ۵. نمای کلی از شبکه بندی اولیه ی محیط مدل شده در نرم افزار

زمین لرزه ی منجیل، السسترو و کوبه و همچنین حالت غیر لرزه 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 مشخحات 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

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 تأثیر 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

جابجایی-زمان مربوط به زمین لرزه‌ی کوبه آورده شده است. داده‌های مربوط به نمودار جابجایی-زمان استفاده شده است. در فضای نرم‌افزار پلکسیس برای مدل‌سازی موردنظر از



نمودار ۱. شتاب - زمان زلزله‌ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران- مرکز لرزه‌نگاری کشوری)



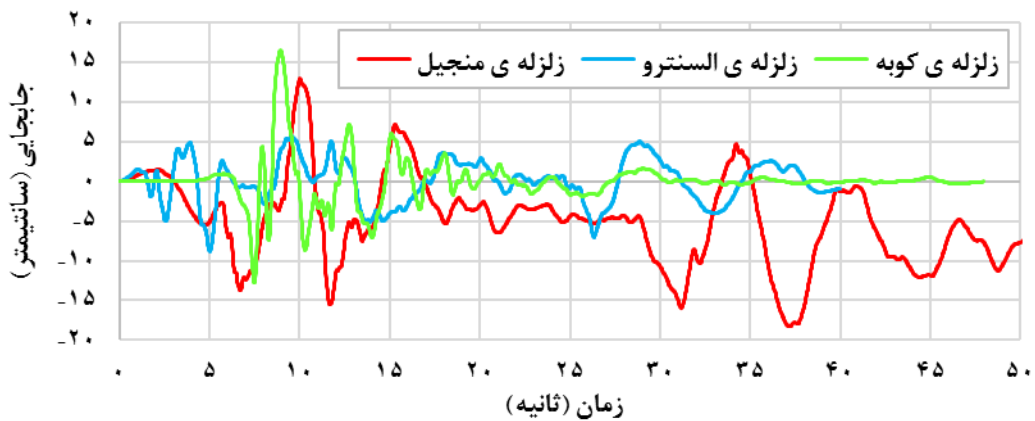
نمودار ۲. نمودار سرعت - زمان زلزله‌ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران- مرکز لرزه‌نگاری کشوری)



نمودار ۳. نمودار جابجایی زمان زلزله‌ی کوبه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران- مرکز لرزه‌نگاری کشوری)

لرزه‌های کوبه، السنترو و منجیل در قالب نمودار ۴ آورده شده است.

بمنظور مقایسه‌ی بهتر در مورد تفاوت‌های زمین لرزه‌های مورد بررسی در این مطالعه، نمودار جابجایی-زمان زمین



نمودار ۴. مقایسه‌ی نمودار جابجایی - زمان در سه زلزله‌ی مورد مقایسه (سایت ژئوفیزیک دانشگاه تهران - مرکز لرزه‌نگاری کشوری)

۳-۳ شرایط مرزی

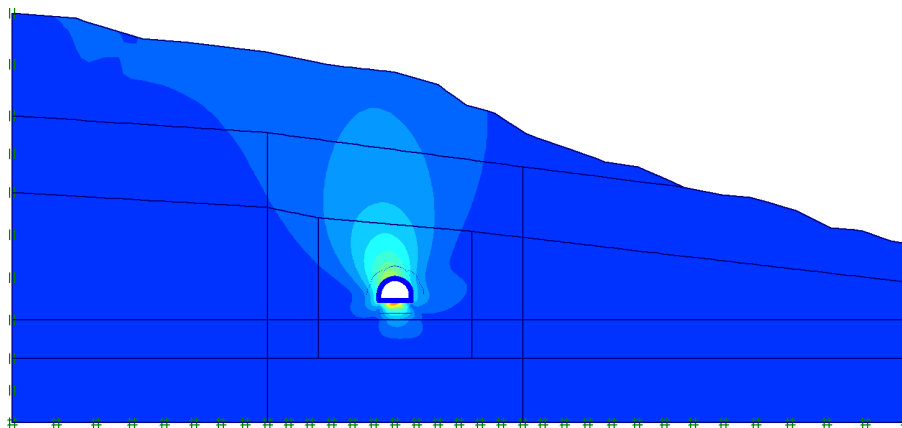
بارگذاری، هم به صورت نقطه‌ای و هم به صورت بار گسترده بر روی گره‌ها و اجزا قابل اجرا می‌باشد (راهنمای پلکسیس).

در نرم افزار پلکسیس، تغییر مکان‌ها و فشارهای آب منفذی از پیش تعیین شده بر وجه اجزا نیز قابل اعمال بوده و هم چنین

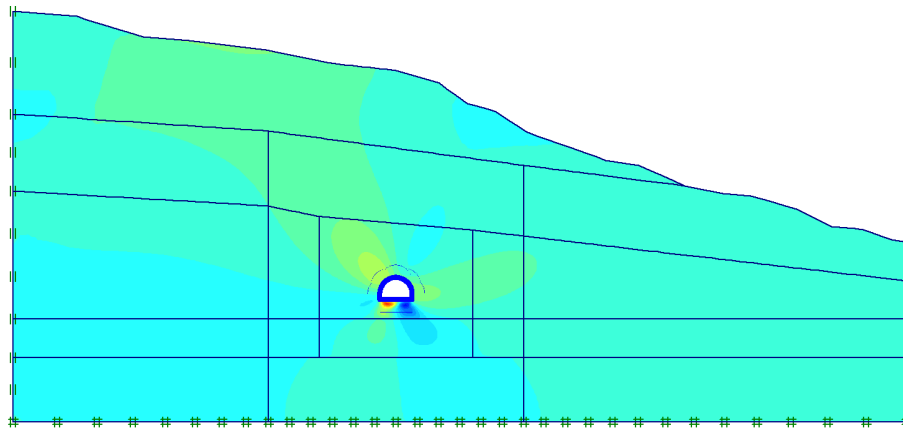
۴- بحث

سمت راست، دیواره‌ی تونل سمت چپ، دیواره‌ی تونل سمت راست، کف تونل سمت چپ و کف تونل سمت راست، بهره گرفته شده است. در شکل‌های ۶ الی ۸ جابجایی‌های ایجاد شده در مدل ترسیم شده است.

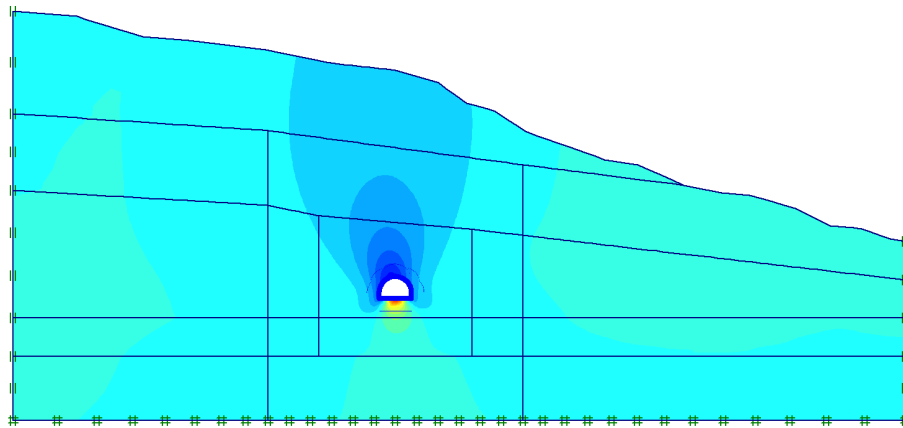
به منظور ایجاد مقایسه بین شرایط مختلف لرزه‌ای و همچنین ایجاد مقایسه باحالت غیر لرزه‌ای؛ ۴ حالت متفاوت بررسی شده است. برای این منظور از شش قسمت متفاوت مقطع تونل که عبارتند از قوس بالایی تونل سمت چپ، قوس بالایی تونل



شکل ۶. جابجایی‌های کلی ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیر لرزه‌ای



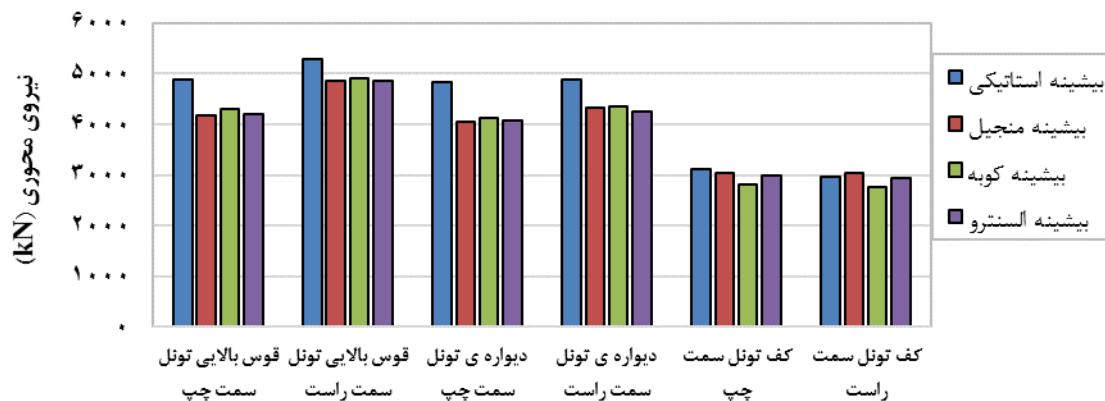
شکل ۷. جابجایی های افقی ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیر لرزه ای



شکل ۸. جابجایی های قائم ایجاد شده در محیط مورد مطالعه در حالت غیر لرزه ای

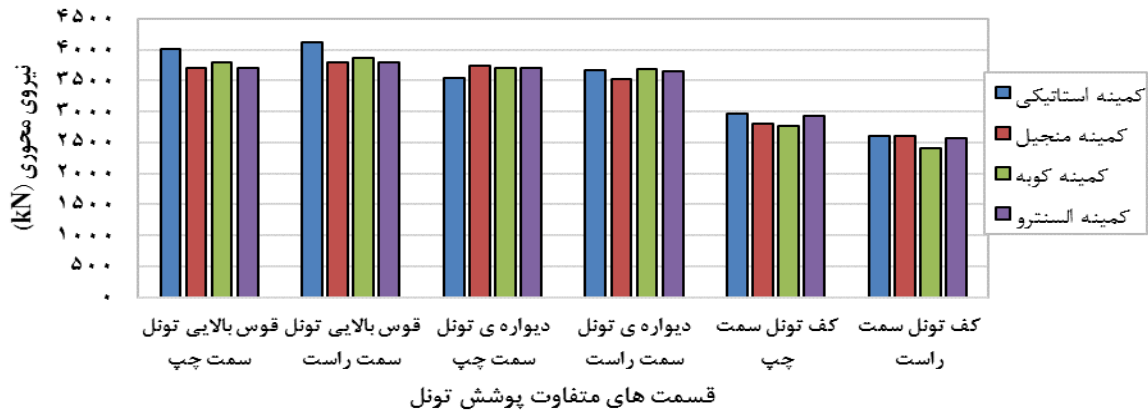
نقاط مورد بررسی کمتر می باشد و از حساسیت کمتری برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که تفاوت مقادیر ثبت شده در حالات لرزه ای متفاوت و حالت غیر لرزه ای، تفاوت چشمگیری را از خود نشان نمی دهد و همگی در یک محدوده رفتار می کنند.

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



قسمت های متفاوت پوشش تونل

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



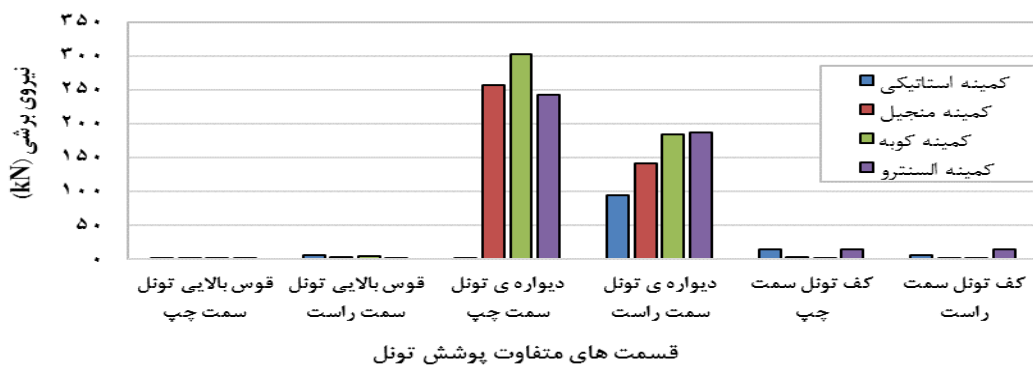
نمودار ۶. کمینه مقادیر نیروی محوری در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

مقادیر نیروی برشی دیده می‌شود که مقادیر برشی در قوس بالایی تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می‌باشد 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 بحرانی‌تر می‌باشد.

بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۷ و ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه مقادیر نیروی برشی در شرایط استاتیکی و حالات لرزه‌ای در یک محدوده می‌باشند. درحالی‌که معمولاً در نقاط مورد بررسی کمینه مقادیر نیروی برشی در حالت استاتیکی کمتر می‌باشد. در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه



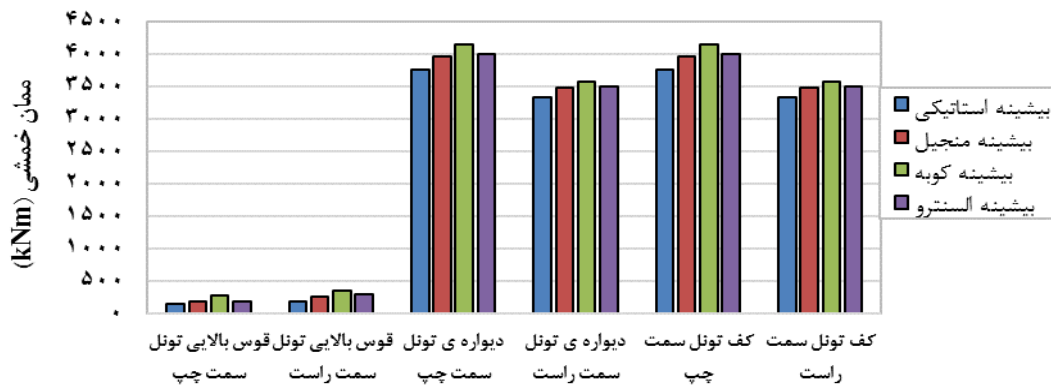
نمودار ۷. بیشینه مقادیر نیروی برشی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون



نمودار ۸. کمینه مقادیر نیروی برشی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

مقادیر ممان خمشی دیده می‌شود که مقادیر ممان خمشی در قوس بالایی تونل نسبت به دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می‌باشد 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 بحرانی‌تر می‌باشد.

بیشینه و کمینه مقادیر ممان خمشی در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه مقادیر ممان خمشی در شرایط استاتیکی و حالات لرزه‌ای در یک محدوده می‌باشند در حالی که معمولاً در نقاط مورد بررسی کمینه مقادیر ممان خمشی در حالت لرزه‌ای کوبه بیشتر می‌باشد. در هر دو حالت بررسی بیشینه و کمینه

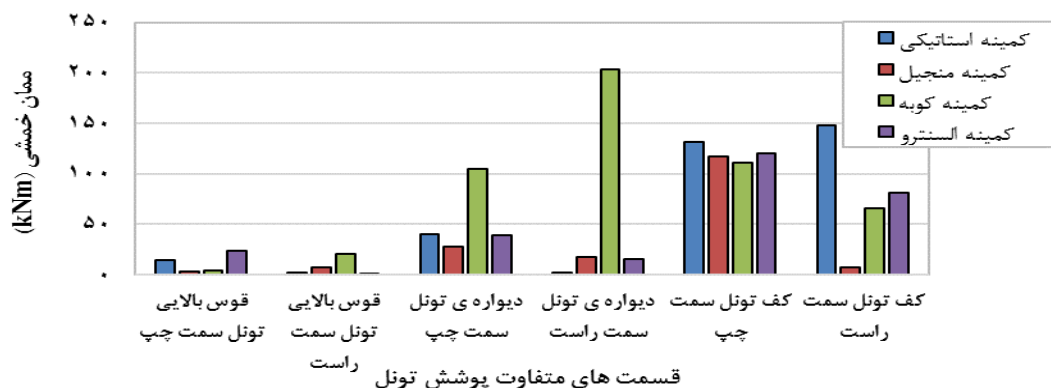


قسمت های متفاوت پوشش تونل

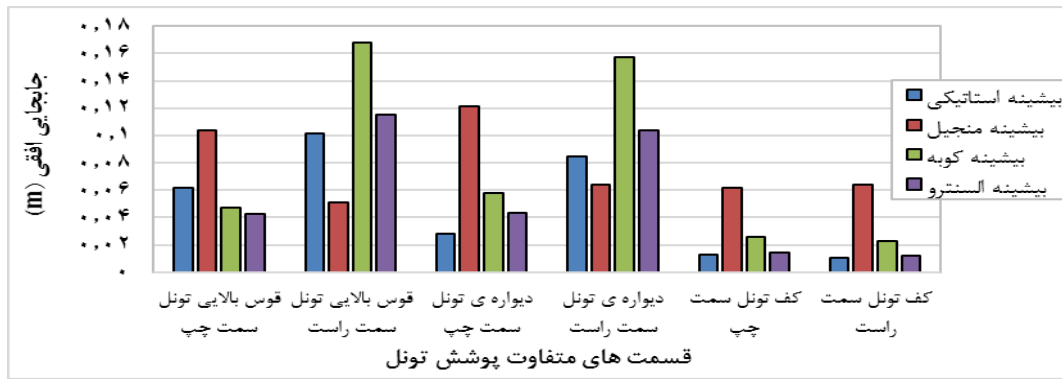
نمودار ۹. بیشینه مقادیر ممان خمشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

دیگر نقاط مورد بررسی کمتر می‌باشد 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 می‌باشد. با توجه به نمودار ترسیم شده مشخص است که زمین لرزه‌ی کوبه در ایجاد جابجایی افقی در پوشش تونل نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند.

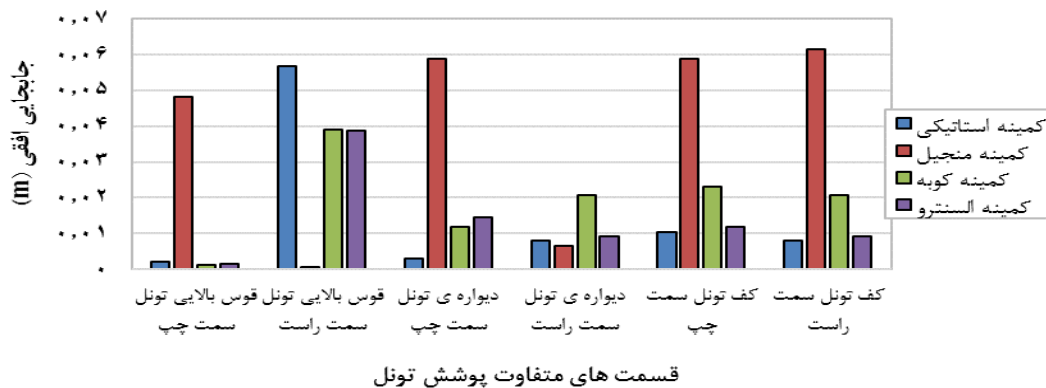
بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه مقادیر جابجایی افقی در شرایط استاتیکی در بیشتر نقاط مورد بررسی کمتر از حالات لرزه‌ای می‌باشند، این حالت به طور نسبی در کمینه مقادیر مورد بررسی نیز مشاهده می‌شود. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی افقی دیده می‌شود که مقادیر جابجایی افقی در کف تونل نسبت به



نمودار ۱۰. کمینه مقادیر ممان خمشی در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون



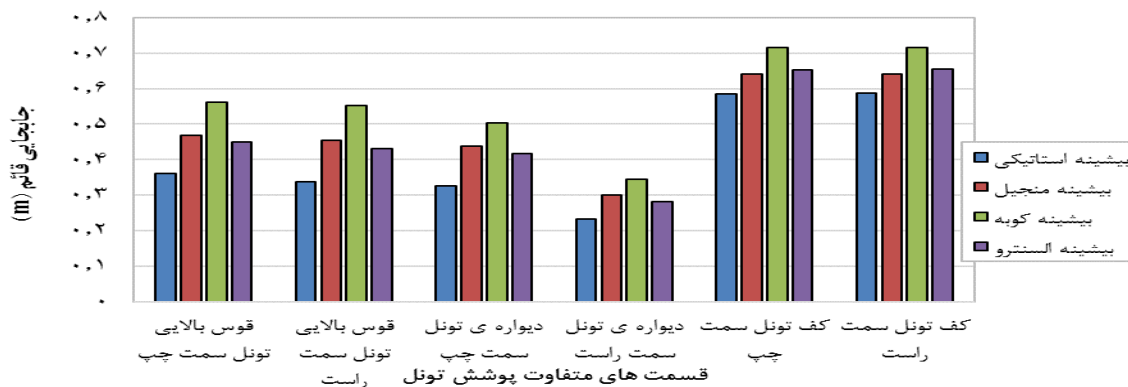
نمودار ۱۱. بیشینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون



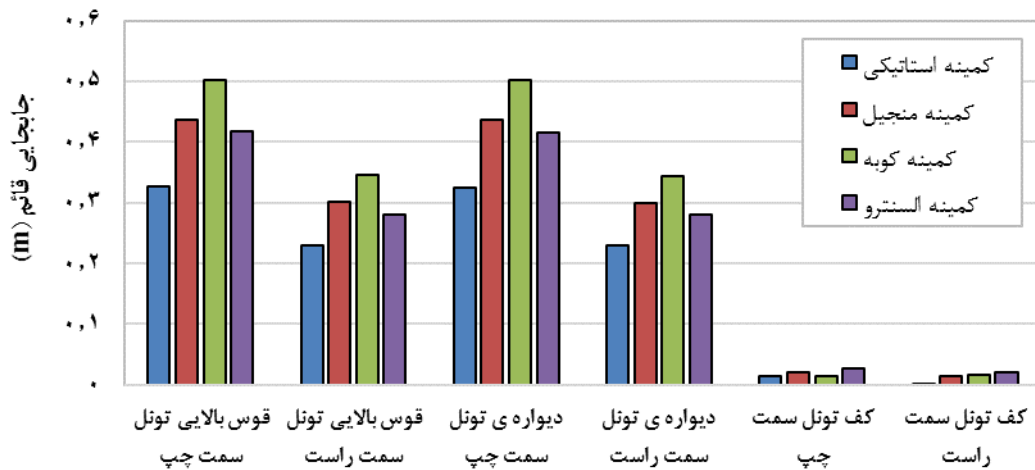
نمودار ۱۲. کمینه مقادیر جابجایی افقی در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

به دیگر نقاط مورد بررسی بیشتر می‌باشد 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 می‌باشد. با توجه به نمودار ترسیم شده مشخص است که زمین لرزه‌ی کوبه در ایجاد جابجایی قائم در پوشش تونل نقش پررنگتری ایفا می‌کند.

بیشینه و کمینه مقادیر جابجایی قائم در شرایط لرزه‌ای گوناگون به ترتیب در نمودار ۱۳ و ۱۴ 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 می‌باشند. در بررسی بیشینه مقادیر جابجایی قائم دیده می‌شود که مقادیر جابجایی قائم در کف تونل نسبت



نمودار ۱۳. بیشینه مقادیر جابجایی قائم در قسمت‌های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون



قسمت های متفاوت پوشش تونل

نمودار ۱۴. کمیته مقادیر جابجایی قائم در قسمت های متفاوت تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

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 می‌باشند.

با تغییر در محیط‌های لرزه‌ای و مقایسه باحالت استاتیکی، هرکدام از پارامترهای مورد بررسی در حالت بیشینه و کمیته 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 کمیته مقادیر در بررسی پارامترهای مهندسی تونل،

جدول ۴. درصد تغییرات پارامترهای مورد بررسی تونل در شرایط لرزه‌ای گوناگون

درصد تغییرات	تغییرات بیشینه	نیروی محوری	درصد تغییرات	تغییرات بیشینه	نیروی برشی	درصد تغییرات	تغییرات بیشینه	ممان خمشی	کمیته
قوس بالایی تونل (چپ)	قوس بالایی تونل (راست)	دیواره‌ی تونل (راست)	دیواره‌ی تونل (چپ)	قوس بالایی تونل (راست)	قوس بالایی تونل (چپ)	کف تونل (راست)	کف تونل (چپ)		
۱۷	۹	۲۰	۱۴	۱۰۱	۴۵۴	۱۰	۱۱		
۹	۹	۵	۴	۲۸۲	۸۴۲	۸	۸		
۴۵۴	۱۰۱	۱۲	۹	۲۸۲	۸۴۲	۵	۴		
۸۴۲	۲۸۲	۷۳۲۶۷	۹۸	۲۸۲	۸۴۲	۱۲۷۲	۱۵۳۱		
۸۲	۸۳	۱۰	۷	۲۸۲	۸۴۲	۷	۱۰		
۷۲۷	۲۱۱۵۱	۲۷۳	۷۸۶۹	۲۸۲	۸۴۲	۲۰۰۴	۱۸		

درصد	تغییرات	۱۴۶	۲۲۹	۳۲۹	۱۴۵	۳۶۷	۵۱۳
تغییرات	بیشینه						
جابجایی	تغییرات	۴۲۰۴	۱۰۸۸۷	۱۸۲۳	۲۱۶	۴۶۲	۶۷۶
افقی	کمینه						
درصد	تغییرات	۵۶	۶۴	۵۴	۴۹	۲۲	۲۲
تغییرات	بیشینه						
جابجایی	تغییرات	۵۴	۵۰	۵۴	۴۹	۹۷	۳۸۴۳
قائم	کمینه						

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

۵- نتیجه‌گیری

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 سانتی‌متر، جابجایی قائم نیز در نقاط مختلف کاهش یافته که این تغییرات در بیشینه مقادیر مربوط به کف تونل روشتتر است. از بین زمین لرزه‌های مورد مطالعه، زمین لرزه ی کوبه به دلیل دامنه ی اعمال جابجایی بیشتر، بحرانی‌تر است، از اینرو زمین لرزه‌های با دامنه ی اعمال قویتر، بحرانی تر از زمین لرزه‌های با زمان اعمال بالا، هستند. همانطور که انتظار می‌رفت، با افزایش ضخامت پوشش ابتدایی تونل، جابجایی‌های اعمال شده در حائل گذاری، 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 می‌باشد.

با بررسی مدل‌سازی محیط مورد تمرکز در ارتباط با فضای مورد بررسی و المان‌های پوشش تونل و همچنین تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی انجام شده، پیرامون پارامترهای مورد بررسی، نتایج استخراج شده از مطالعه‌ی حاضر به شرح ذیل می‌باشد در این فصل نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادات برای تحقیقات آینده به شرح زیر خلاصه می‌شود. مابین نقاط متفاوت مورد مطالعه در پوشش تونل، کف تونل در تمامی حالات بررسی شده، بحرانی ترین نقطه در مورد نشست اعمالی می‌باشد. و از سوی دیگر دیواره‌ی سمت راست تونل (دیواره‌ی با روباره‌ی کمتر) کمترین میزان نشست ۰/۱ میلی‌متر تغییرات و درصد تغییرات جابجایی افقی با حائل‌گذاری متفاوت با تغییرات بیشینه ۲۲ درصد در دیواره تونل (سمت چپ) و درصد تغییرات کمینه ۴۱۷ درصد را گزارش می‌دهد. در هر دو حالت بررسی جابجایی قائم و افقی در پوشش تونل بیشینه و کمینه مقادیر

۶- مراجع

-وجودی، مهدی (۱۳۸۲). بررسی اثر زلزله بر سازه‌های زیرزمینی با نگرشی ویژه بر تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

-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.

- عظمی، ستار (۱۳۹۲). تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل بلند سردشت. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی اصفهان دانشکده معدن. -مهدوری، ستار و اسماعیلی، عرفان و عابدی، امیرسالار (۱۳۹۹). مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری تونل‌های کم عمق با روش تفاضل محدود، هفتمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری و ششمین نمایشگاه تخصصی انبوه‌سازان مسکن و ساختمان استان.

-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, 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.

-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.

-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, 247-293.

-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.

-Rajaei, 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.

Numerical Analysis and Investigation of Displacement and Internal Forces of a Tunnel under Static and Seismic Conditions Using the Finite Element Method (Case Study)

*Masoud Khahanipour, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,
NT.C Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

E-mail: masoud.khahanipour@iaau.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

The stability of underground structures remains a major challenge in geotechnical engineering, influenced by heterogeneous geological conditions, the mechanical behavior of soil and rock, initial stress states, and various excavation stages. In this study, the stability of Tunnel A of the Qom Metro was investigated using numerical modeling based on the finite element method and plane strain theory in PLAXIS. Geomechanical properties of different soil layers, structural characteristics of the tunnel lining, and both static and dynamic loading scenarios were incorporated into the model. Results indicate that increasing the initial lining thickness reduces displacements while increasing internal forces; specifically, increasing the lining thickness from 20 to 35 cm reduced the tunnel floor settlement by approximately 100%. Dynamic analysis further showed that the Kobe earthquake, due to its higher displacement amplitude, exerts the most significant adverse effect on both horizontal and vertical tunnel lining displacements. The findings of this study can serve as a basis for optimizing the design of urban tunnel support systems in seismically active regions.

Keywords: Sustainability, Tunnel, Qom Metro, Plaxis Software