

بررسی اندرکنش بین شالوده عمیق و تونل قطار شهری تحت بارهای لرزه‌ای

واحد قیاسی*^۱، خسرو اسماعیلی^۲، دانیال ارزجانی^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

^۲ کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

^۳ کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۶/۱۱/۱۵، پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲، نشر آنلاین: ۹۸/۱۰/۲۲)

چکیده

با توجه به توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی و تجاری، فضاهای زیرزمینی برای اهداف زیادی از جمله حمل‌ونقل، انتقال مواد سوختی، خطوط لوله‌های آب و فاضلاب، ایستگاه‌های مترو و سایر تأسیسات شهری به‌کار می‌روند. تونل‌های مترو ممکن است درجایی ایجاد شوند که فونداسیون پل‌ها یا ساختمان‌ها چه به‌صورت بالفعل و چه بالقوه در آن منطقه وجود داشته و بارگذاری این فونداسیون‌ها چه در حالت استاتیکی و چه در حالت دینامیکی می‌توانند باعث حرکت‌های ناپایدار کننده و یا افزایش سطح توزیع تنش در خاک اطراف تونل شوند که سبب بروز آسیب و خسارت به تونل‌ها می‌شوند. جابه‌جایی در جهت زلزله، امتداد نشست تونل از اثرات شمع‌های اجراشده در کنار تونل‌های مترو در هنگام لرزش می‌باشد. این تحقیق به بررسی تحلیل عددی رفتار اندرکنشی شالوده عمیق و تونل قطار شهری از طریق مدل‌سازی عددی به‌صورت سه‌بعدی تحت بارهای لرزه‌ای به‌روش المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) نسخه ۱-۱۳-۶ می‌پردازد. در این مقاله تأثیر افزایش فاصله گروه شمع از تونل بر روی رفتار اندرکنشی آن‌ها در طی اعمال زلزله بررسی شد. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش فاصله گروه شمع از تونل میزان جابه‌جایی تونل در جهت لرزش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و میزان نشست تونل نیز با افزایش فاصله ابتدا کاهش و سپس به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد. میزان تنش فشاری در بالا و وسط تونل با افزایش فاصله گروه شمع ابتدا افزایش یافته سپس ثابت می‌شود و در قسمت پایینی تونل با افزایش فاصله پیوسته روند کاهشی را شاهد بودیم.

کلیدواژه‌ها: شالوده عمیق، تونل‌های مترو، اندرکنش خاک-سازه، المان محدود، تحلیل دینامیکی.

۱- مقدمه

سطح توزیع تنش در خاک اطراف تونل شده که ممکن است سبب بروز شکست در نگهداری تونل‌ها شود. (رضایی و عیوض‌زاده، ۱۳۹۵) به‌طورکلی هر سازه‌ای که در خاک مدفون هست در حین زلزله تحت اثر شش مؤلفه حرکت زمین قرار می‌گیرد. این مؤلفه‌ها شامل دو مؤلفه جانبی، یک مؤلفه قائم و سه مؤلفه پیچشی حول محورهای مختصات می‌باشد. بر همین اساس سازه و خاک اطراف آن دارای اثر متقابل بر روی هم بوده و این عامل باعث تغییرات بیشتر در اثر امواج لرزه‌ای می‌شود. رفتار لرزه‌ای شمع- تونل هم از این قاعده مستثنا نبوده و به‌دلیل وجود اثرات نیرو، زمین و سیستم دارای رفتار پیچیده‌ای است که این مسئله سبب دقت بسیار بالا در مدل‌سازی تحلیل لرزه‌ای شمع- تونل می‌شود. به‌همین دلیل تحلیل لرزه‌ای

توسعه پایدار شهری با رویکرد استفاده از فضاهای زیرسطحی یکی از رهیافت‌های نوین در زمینه شهرسازی است. این رویکرد ضمن استفاده از قابلیت‌های مثبت فضاهای زیرسطحی تلاش می‌کند تا مسائل و مشکلات شهرها از قبیل کمبود فضا، مسائل حمل‌ونقل و مشکلات زیست‌محیطی را حل نماید. همچنین از جمله فاکتورهای توسعه اقتصادی، افزایش ساخت فضاهای زیرسطحی است.

در محیط‌های شهری تونل‌های مترو اغلب در کنار پی ساختمان‌ها ساخته می‌شوند. درحالی‌که بسیاری از تونل‌ها می‌توانند در مقابل حرکت‌های کوچک مقاوم باشند، شمع‌های بارگذاری شده ساختمان‌های مجاور می‌توانند باعث حرکت‌های ناپایدار و یا افزایش

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۲۵۳۷۴۲۹۵

می‌دهد که با افزایش فاصله بین ریزشمع‌ها عموماً پاسخ ریزشمع‌ها افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که نسبت S/D (نسبت فاصله ریزشمع به قطر ریزشمع) بر دامنه پاسخ دینامیکی و نیروهای داخلی در ریزشمع‌ها تأثیر می‌گذارد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که حداکثر جابه‌جایی در بالای ریزشمع از ۶۱ سانتی‌متر برای خاک رسی به ۴۸ سانتی‌متر برای خاک ماسه‌ای در $S/D=10$ می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش ۲۸ درصدی با افزایش سختی خاک است (اصغری و جانی، ۲۰۱۷). در جدول (۱) برخی دیگر از مطالعات خارجی انجام‌گرفته در این حوزه، به‌صورت خلاصه قرار گرفته شده است.

جدول ۱- مطالعات خارجی انجام‌گرفته حول موضوع موردبررسی

پژوهشگر	عنوان پژوهش
(Mattar و Meguid, ۲۰۰۹)	مطالعه اندرکنش بین تونل- خاک و شمع در خاک‌های چسبیده
(Sevim, ۲۰۱۱)	بررسی رفتار غیرخطی زلزله بروی تونل بزرگراه اراهای (با استفاده از مدل دراگر- پراگر ^۱ در نرم‌افزار انسیس)
(Dapeng و همکاران, ۲۰۱۵)	مطالعه موردی فونداسیون‌های عمیق موزه جدید شهر چنگدا نزدیک خط ۲ مترو چنگدا در چین (به کمک نرم‌افزار FLAC ^{3D})
(Haji و Marshall, ۲۰۱۵)	مطالعه تأثیر تونل‌های ساخته‌شده در نزدیکی شمع‌های موجود با روش آنالیتیکی ^۲ مارشال و تأثیر عمق و فاصله نسبی افقی و عمودی بین شمع و تونل بر روی نتایج
(Pan و همکاران, ۲۰۱۸)	تحلیل عددی جابه‌جایی زمین و واکنش شمع به‌دلیل حفر تونل در خاک نرم با توجه به رفتار خزش (به‌کمک نرم‌افزار FLAC ^{3D})

۲- روش تحقیق

در این تحقیق مدل‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس نسخه ۱-۱۳-۶ صورت گرفته که در آن ابتدا هندسه مدل (شامل لاینینگ^۳ تونل و گروه شمع) در محیط خاکی به ابعاد ۶۰×۴۵ متر ساخته شده، سپس مش‌بندی هندسه مدل و خصوصیات مصالح برای خاک و سازه‌ها تعریف شده است. تعریف گام‌های تحلیل، نحوه بارگذاری و اعمال شرایط مرزی و درنهایت پردازش و پس‌پردازش مدل از دیگر گام‌های انجام‌شده در مدل‌سازی بوده است. بعد از مدل‌سازی و پذیرش آن توسط نرم‌افزار آباکوس و پردازش آن به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است.

خاک‌ها از جمله مصالح مهندسی هستند که زیر اثر باربری‌های مختلف رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. تاکنون مدل‌های

شمع- تونل با توجه به اندرکنش آن‌ها تا حدود زیادی نیازمند تحلیل خطر زلزله است تا براساس آن بتوان ارزیابی صحیحی از عملکرد سازه در حین وقوع زلزله و پس‌از آن انجام داد. موضوع رفتار اندرکنشی شالوده‌های عمیق و تونل قطار شهری تحت بارهای لرزه‌ای از جمله مسائلی است که طی سال‌های اخیر موردتوجه بسیاری از محققان و دانش‌پژوهان قرار گرفته است. در یکی از مطالعات اثر حفاری و احداث تونل بر شمع‌ها و گروه شمع توسط روش اجزاء محدود سه‌بعدی الاستوپلاستیک را انجام شد. نتایج حاصل از آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی آن‌ها این مطلب را می‌رساند که احداث تونل در مجاورت شمع‌ها تأثیر بسزایی بر نیروهای داخلی سازه شمع می‌گذارد، به‌علاوه توزیع نیروهای داخلی بستگی به موقعیت کف شمع نسبت به خط تقارن افقی تونل دارد (Mroueh و Shahrour, ۲۰۰۲).

جوادی و همکاران (۱۳۹۰) اثر شمع‌های باربر بر رفتار تونل‌های مترو را به روش عددی بررسی کرده‌اند. به‌منظور شبیه‌سازی مراحل ساخت گام‌به‌گام پیشروی تونل‌های مترو در کنار شمع‌ها در شرایط خاک چسبیده، نرم، همگن و زیر سطح ایستایی ارائه شده است. پارامترهای اصلی مورد بحث در بررسی پارامتریک آن‌ها شامل میزان بار وارده بر هر شمع، فاصله مستقیم بین تونل و ردیف شمع‌های کناری، قطر و طول شمع‌ها است. در این تحقیق، میزان تأثیر پارامترهای فوق‌الذکر بر روی جابه‌جایی‌های افقی و عمودی دیواره- تونل، نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر نگهداری تونل مورد ارزیابی قرار گرفته است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۰).

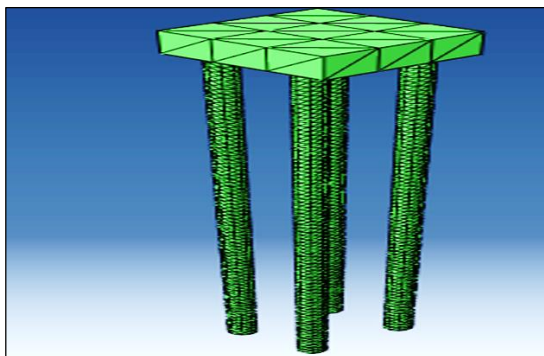
قاسمی و همکاران (۱۳۹۳) بررسی اثر حضور سازه‌های مجاور بر سازه تحت تأثیر در اندرکنش تونل و سازه‌های سطحی با استفاده از روش عددی اجزاء محدود انجام دادند. آن‌ها با مطالعه موردی پروژه تونل نیایش تأثیر احداث تونل بر سازه‌های مجاور و نشست آن‌ها را بررسی کردند. بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های عددی حضور سازه‌های مجاور بر سازه مورد مطالعه، تأثیری بر میزان نشست عرضی و جابه‌جایی افقی ناشی از ساخت تونل ندارند. سازه‌های مجاور بر سازه مورد مطالعه، سبب تغییر مقدار نشست طولی در زیر مرکز ثقل سازه می‌شوند به‌طوری‌که با کاهش عرض سازه‌های مجاور بر سازه مورد مطالعه، میزان نشست افزایش می‌یابد (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۳).

اصغری و جانی (۱۳۹۶) به بررسی رفتار لرزه‌ای گروه ریزشمع‌ها در خاک پرداخته‌اند. در این تحقیق رفتار فونداسیون‌های مستقر بر روی ریزشمع که تحت بارهای قائم و بارهای لرزه‌ای تحت تأثیر فاصله ریزشمع‌ها در گروه بررسی شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان

۳. Lining

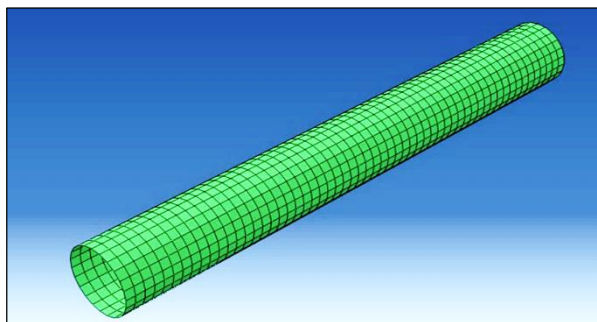
۱. Drucker-prager model

۲. Marshall Analytic



شکل ۱- نمای از هندسه گروه شمع و سر شمع

برای ساخت پوشش تونل در این تحقیق از المان shell استفاده شده است، ضخامت لاینینگ که از بتن شاتکریت^۸ شده می باشد، ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده و طول آن نیز ۸۰ متر می باشد. دانسیته آن ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول الاستیسیته 10×10^4 پاسکال و ضریب پواسون آن 0.2 در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) لاینینگ تونل به تصویر کشیده شده است.



شکل ۲- نمایی از لاینینگ تونل مدل سازی شده

برای ترسیم هندسه مدل یک قطعه زمین با ابعاد 60×45 مترمربع انتخاب شده، طول شمع برابر ۲۷ متر و عرض آن یک متر لحاظ شده، فاصله تاج تونل تا سطح زمین $12/95$ متر بوده و قطر تونل هم $9/16$ متر در نظر گرفته شده است. جزئیات هندسه مدل در شکل (۳) نشان داده شده است. در این تحلیل از تأثیر آب زیرزمینی صرف نظر شده و قطعه زمین به ۳ لایه تقسیم گردیده و فرض شده است که خاک همه لایه ها یکسان و از نوع رس نرم است.

رفتاری مختلفی برای بیان ویژگی های خاک ها ارائه شده است. در تحقیق حاضر به منظور انجام تحلیل ها از مدل رفتاری موهر-کولمب^۴ استفاده شده است. این مدل الاستیک-پلاستیک کامل یکی از ساده ترین و پرکاربردترین مدل های مورد استفاده در تحلیل های ژئوتکنیکی است. دلیل این امر، تعداد کم پارامترهایی است که تعیین آن ها نیاز به آزمایش های پیچیده ای ندارد. در مدل موهر-کولمب از معیار گسیختگی موهر-کولمب به عنوان سطح تسلیم استفاده شده و قانون جریان در حالت برشی به صورت غیر وابسته فرض می گردد. در استفاده از این مدل بایستی توجه کرد که برخی از جنبه های رفتارهای اساسی خاک مانند وابسته بودن سختی به مسیر و تاریخچه تنش و کرنش در آن صرف نظر شده و استفاده از این مدل به خصوص در مسائل بارگذاری- باربرداری یا بارگذاری های رفت و برگشتی صحیح نخواهد بود. پارامترهای لازم برای انجام تحلیل با این مدل شامل دانسیته جرمی، مدل های بالک^۵ و برشی، چسبندگی، مقاومت کششی، زاویه اصطکاک و اتساع است.

در این تحقیق که از خاک رس نرم برای مدل سازی هندسه خاک استفاده شده است، برای تعیین خصوصیات آن وارد ماژول property در نرم افزار شده و پس از معرفی خواص مصالح، به هندسه ساخته شده اختصاص داده می شود. پارامترهای مورد استفاده در این مدل مطابق با مدل واقعی از پل قزوین که توسط مهندسین مشاور شرکت ساحل ساخته شده، در جدول (۲) آورده شده است (گزارش خط هفت مترو تهران، ۱۳۸۹).

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده در مدل سازی

شماره لایه	نوع خاک	E (Mpa)	ω (degree)	C (Kpa)	Γd (KNm ³)
۱	رس نرم	۸۰	۳۴	۱۴	۱۸/۶
۲	رس نرم	۵۰	۳۳	۳۰	۱۹
۳	رس نرم	۳۵	۲۸	۳۱	۱۷

برای ساخت شمع ها از المان shell استفاده شده است. میلگرد استفاده شده هم برای ساخت شمع از نوع AIII بوده و به صورت درصد حجمی با ۶ درصد سطح مقطع شمع استفاده شده است. در این مدل سازی شمع ها و سرشمع به صورت جسم الاستیک با مقاومت فشاری 350 kg/cm^3 فرض شده است، مقدار مدول الاستیسیته^۶ آن $2/615E+07$ کیلو نیوتن بر مترمربع و ضریب پواسون آن 0.2 لحاظ شده است. در شکل (۱) نمای گروه شمع نشان داده شده است.

۷. Poisson's ratio

۸. Shotcrete

۴. Mohr-Coulomb theory

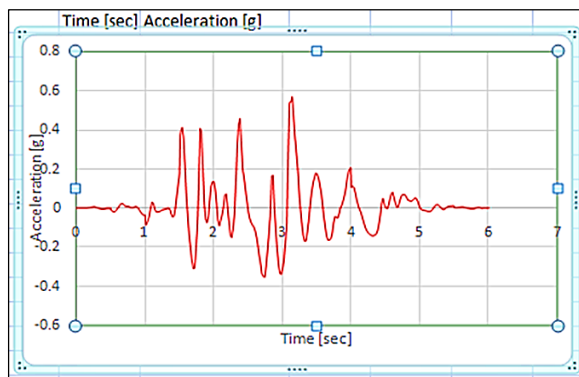
۵. Bulk

۶. Elastic modulus

در این پژوهش اثرات آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است. در مدل‌سازی قطر شمع ثابت و برابر یک متر در نظر گرفته شده است. تحلیل‌ها طی دو مرحله انجام شده، به این صورت که ابتدا بار ناشی از وزن خاک اعمال شده است سپس داده‌های شتاب‌نگاشت پس از تعریف کردن شتاب‌نگاشت برای نرم‌افزار به مدل‌ها اعمال شده است. همچنین در مرزهای سمت چپ و راست مدل‌ها تکیه‌گاه مفصلی ثابت و در مرز پایین مدل‌ها تکیه‌گاه مفصلی متحرک لحاظ شده است. دلیل انتخاب تکیه‌گاه مفصلی متحرک برای مرز پایین هندسه خاک این است که نیروهای دینامیکی اعمالی به کف مدل بتوانند در سراسر هندسه مدل انتشار یابند.

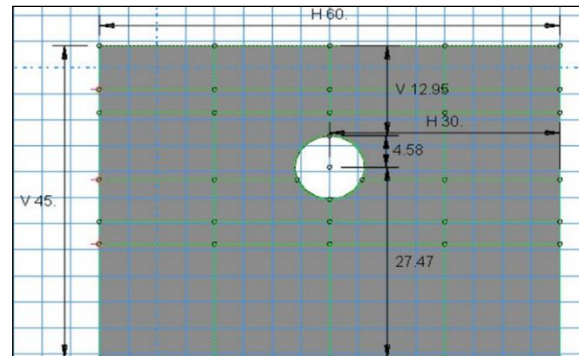
در این تحقیق از روش دینامیکی ضمنی استفاده شده است. بارگذاری لرزه‌ای طی مدت ۶ ثانیه صورت گرفته است و این ۶ ثانیه به ۱۲ نمونه زمانی برای تحلیل تقسیم شده است. حرکت زلزله به شکل تاریخچه زمانی شتاب بر سنگ‌بستر مفروض بر پایه شبکه المان محدود اعمال شده است.

شکل (۵)، نمودار شتاب-نگاشت اعمالی به مدل مربوط به زلزله لوما پریتا^۹ (۱۹۸۹) که در شهر کالیفرنیا اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. بزرگای این زلزله ۶/۹ ریشتر و ژرفای آن حدود ۱۱/۴ کیلومتر بوده است.



شکل ۵- نمودار شتاب زمان اعمالی به مدل
(Asakereh و Tajabadipour, ۲۰۱۸)

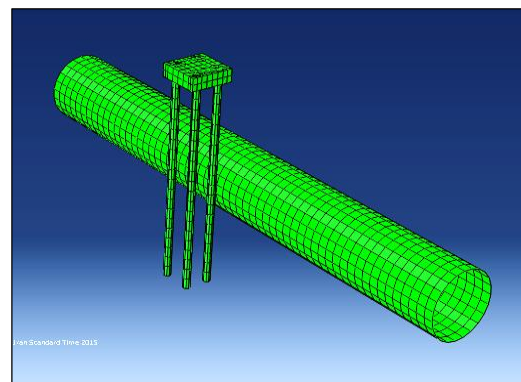
در شکل (۶) نحوه بارگذاری در مدل D (مدلی که فاصله گروه شمع از تونل) برابر قطر تونل است، نشان داده شده است.



شکل ۳- هندسه اولیه تونل و ابعاد آن (ابعاد بر حسب متر)

به‌طور کلی مش بندی در نرم‌افزار آباکوس یا بر اساس تعداد المان و یا بر اساس اندازه المان صورت می‌گیرد، در این تحلیل برای مش بندی تونل ابتدا آن را به ۸ قطاع مساوی تقسیم کرده و سپس با انتخاب آن‌ها و انتخاب شکل المان به‌صورت Quad و تکنیک المان free و الگوریتم axis medial (درون محوری) نوع مش بندی بر اساس تعداد المان‌ها و برابر ۸ (۸ گرهی) لحاظ شده است. همچنین برای مش بندی شمع از روش مش بندی بر اساس تعداد (۸ گرهی) استفاده شده است. در شکل (۴) نحوه قرارگیری گروه شمع در کنار تونل نمایش داده شده است.

با توجه به وجود سطح مقطع‌های متفاوت در مدل‌سازی تونل و وجود لایه بتن شاتکریت، ایجاد مش بندی یکنواخت با المان‌های هشت گرهی (Hex Structured) که دارای بالاترین دقت در میان المان‌های موجود در نرم‌افزار آباکوس می‌باشند، بدون ایجاد تقسیم بندی‌های فرضی در هندسه امکان پذیر نیست. برای این که بتوان از این المان‌ها استفاده کرد، هندسه تونل مدل‌سازی شده پارتیشن بندی شده است.

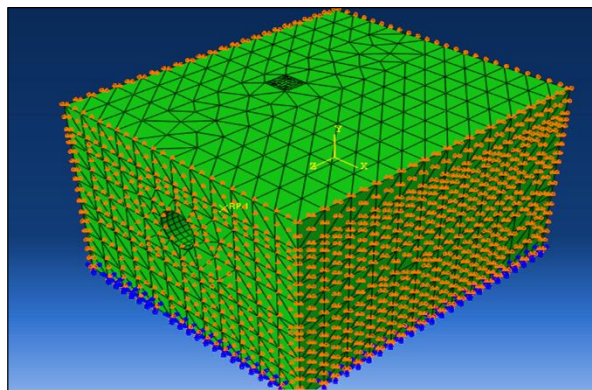


شکل ۴- نحوه قرارگیری گروه شمع در کنار تونل

افزایش فاصله ابتدا کاهش و سپس تقریباً ثابت می‌ماند، در گروه شمع نیز جابه‌جایی در جهت زلزله در ابتدا با افزایش فاصله کاهش و در فواصل دورتر تونل ثابت می‌ماند. نشست گروه شمع هم با افزایش فاصله ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقادیر تنش حداکثر و حداقل به‌جز ناحیه پایین تونل که تغییرات آن با افزایش فاصله پیوسته نیست در بالا و وسط آن افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش فاصله باعث افزایش کرنش حداکثر در ابتدا و سپس کاهش آن در پایین تونل و تقریباً ثابت ماندن آن در بالا و وسط تونل می‌شود. جابه‌جایی تونل در جهت طولی نیز با افزایش فاصله در ابتدا تا فاصله دو برابر قطر تونل کاهش و سپس افزایش ناگهانی دارد.

شکل (۷) تأثیر فاصله گروه شمع از تونل را بر روی میزان جابه‌جایی تونل در سه نقطه بالای تونل، وسط و پایین تونل نشان می‌دهد. با توجه به آن می‌بینیم که روی سطح تونل و میانه تونل با افزایش فاصله از یک برابر قطر تونل به یک و نیم برابر قطر تونل میزان جابه‌جایی در جهت زلزله افزایش می‌یابد و سپس با زیاد شدن فاصله به یک مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد و افزایش فاصله تأثیر زیادی روی جابه‌جایی ندارد، ولی روی سطح پایین تونل اگرچه افزایش فاصله در ابتدا باعث افزایش قابل توجه جابه‌جایی می‌شود ولی به تدریج با بیشتر شدن فاصله میزان جابه‌جایی کاهش می‌یابد. در کل به این نتیجه می‌رسیم که میزان جابه‌جایی در جهت زلزله در فواصل نزدیک تونل افزایش و با بیشتر شدن فاصله روی سطح و میانه تونل تقریباً ثابت و در انتهای تونل به تدریج کاهش می‌یابد.

در نمودار شکل (۸) که تأثیر فاصله را بر روی نشست قائم تونل را در سه ناحیه بالای تونل، وسط تونل و پایین آن نشان می‌دهد، مشاهده خواهیم کرد که در سطوح بالا، وسط و پایین تونل با افزایش فاصله شمع از تونل به میزان یک و نیم برابر قطر تونل مقدار نشست قائم تونل کاهش می‌یابد و این کاهش مقدار در سطح پایین تونل مشهودتر است و با افزایش بیشتر فاصله گروه شمع از تونل مقدار نشست تغییر نکرده و تقریباً ثابت می‌ماند، بنابراین تغییر فاصله از تونل به‌جز در نواحی نزدیک تونل که باعث کاهش میزان نشست آن می‌شود تأثیر چشم‌گیری روی نشست ندارد.



شکل ۶- نحوه بارگذاری در مدل‌سازی

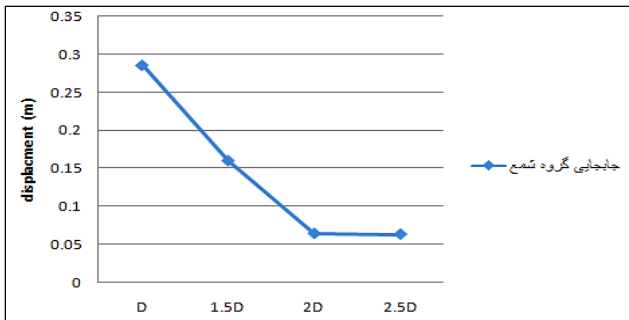
پس از ساخت هندسه مدل، تعریف خصوصیات مصالح برای آن، مش‌بندی، بارگذاری و اعمال شرایط مرزی، بایستی بر روی مدل پردازش صورت گیرد.

برای پس‌پردازش وارد ماژول Visualization شده که در آن نتایج میدانی و تاریخچه تحلیل قابل مشاهده است. خروجی‌های حاصل از پردازش نرم‌افزار در این تحقیق شامل تنش، کرنش، جابه‌جایی در سه جهت X ، Y و Z ، مشخص کردن نقاط آسیب‌دیده تحت تنش و کشش برای تونل و گروه شمع است.

۳- نتایج و بحث

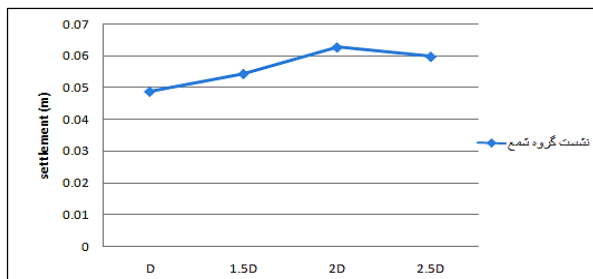
در این تحقیق با استفاده از مطالعات پارامتری به بررسی تأثیر فاصله بین گروه شمع و تونل در حالت دینامیکی پرداختیم. به‌منظور بررسی تأثیر فاصله گروه شمع از تونل بر روی رفتار اندرکنشی شمع و تونل، فواصل مورد استفاده در این مطالعه پارامتری ضریبی از D در نظر گرفته شده است که D قطر تونل و مقدار آن $9/16$ متر در نظر گرفته شده است. برای این کار از چهار مدل مختلف با فواصل D ، $1/5D$ ، $2D$ ، $2/5D$ استفاده شده است و ارتفاع سطح زمین تا کف تونل حدود 23 متر و عمق شمع نیز 27 متر است. در این تحقیق مطالعات خاک به‌صورت سه لایه مدل‌سازی شده و از خصوصیات رفتاری خاک رس که در جدول (۲) ارائه شده، استفاده شده است.

در ادامه نمودارهایی آورده شده است که تأثیر فاصله را بر روی مقادیر جابه‌جایی و نشست تونل و گروه شمع و هم‌چنین تنش و کرنش در سطح بالا، وسط و پایین تونل نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی تونل در جهت زلزله در بالا و وسط تونل با افزایش فاصله ابتدا افزایش و سپس به یک مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد ولی در پایین تونل جابه‌جایی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقدار نشست تونل نیز در هر سه نقطه بالا، وسط و پایین آن با



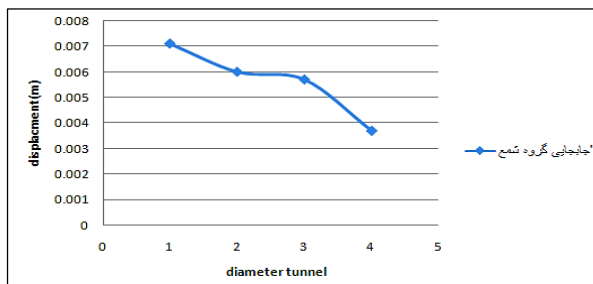
شکل ۳- تأثیر فاصله گروه شمع از تونل روی جابه‌جایی گروه شمع در جهت زلزله

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۰) مشخص است نشست گروه شمع با افزایش فاصله از محور تونل تا دو برابر قطر تونل روند افزایشی به میزان ۱/۲ سانتی‌متر دارد ولی در فاصله دو و نیم برابر قطر تونل (حدود ۲۳ متر) شروع به کاهش می‌کند.

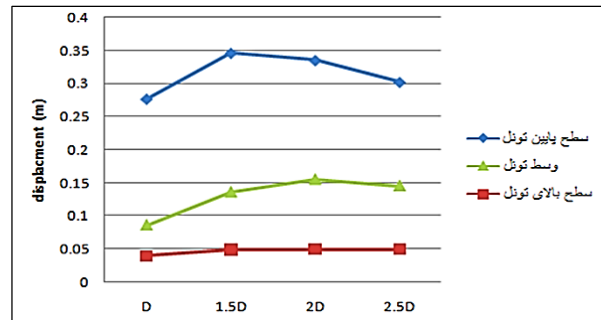


شکل ۴- تغییرات نشست گروه شمع بر حسب فاصله از محور تونل

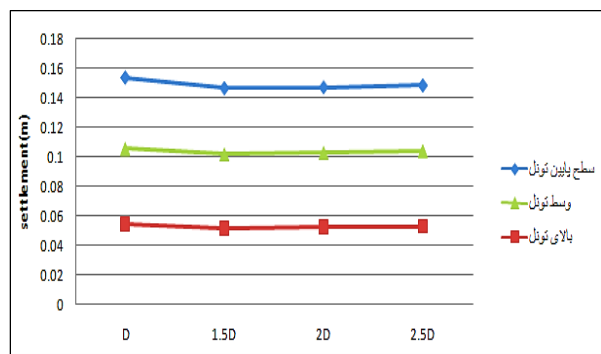
در شکل (۱۱) نمودار جابه‌جایی گروه شمع در جهت طولی (راستای تونل) نشان داده شده است، با توجه به آن ملاحظه خواهیم کرد که با افزایش فاصله از تونل جابه‌جایی شمع در جهت راستای تونل کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵- نمودار جابه‌جایی گروه شمع در جهت راستای تونل بر حسب فاصله از محور تونل



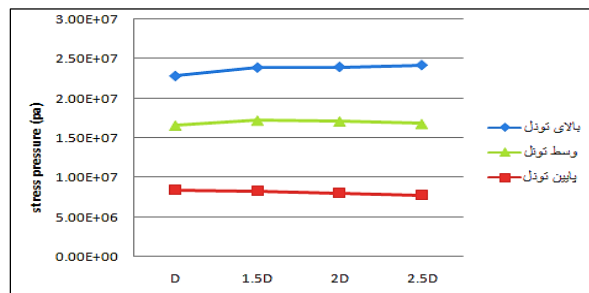
شکل ۱- تأثیر فاصله شمع از تونل بر روی جابه‌جایی تونل در جهت زلزله در نقاط مختلف تونل



شکل ۲- تأثیر فاصله شمع از تونل روی تغییرات نشست قائم تونل در نقاط مختلف تونل

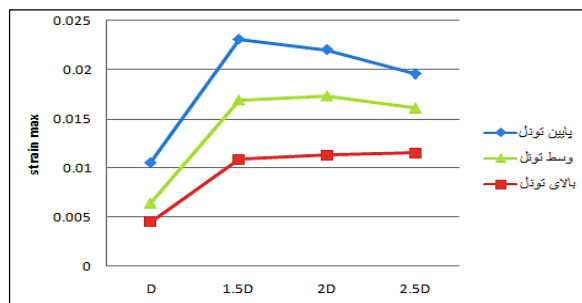
در نمودار شکل (۹) که تأثیر فاصله شمع از تونل را بر روی جابه‌جایی گروه شمع در جهت زلزله را نشان می‌دهد ملاحظه می‌کنیم که با افزایش فاصله از تونل به میزان دو برابر قطر تونل جابه‌جایی گروه شمع کاهش می‌یابد ولی در فاصله بیشتر از دو برابر قطر تونل (حدود ۱۸/۵ متر) جابه‌جایی گروه شمع به یک مقدار ثابتی رسیده و تغییری نمی‌کند. در کل نتیجه می‌گیریم که افزایش فاصله تا حدی باعث کاهش جابه‌جایی گروه شمع شده و این کاهش محسوس و در حدود ۲۵ سانتی‌متر است و در فواصل زیاد جابه‌جایی گروه شمع تغییر آن‌چنانی نخواهد داشت.

نمودار شکل (۱۴) تغییرات تنش فشاری را سه نقطه بالا، وسط و پایین تونل نشان می‌دهد، طبق آن میزان تنش فشاری در قسمت بالا و وسط تونل در فاصله یک برابر قطر تونل (حدود ۹/۲ متر) افزایش و بعد از آن روند تغییرات آن به یک مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. ولی در قسمت پایینی تونل هرچقدر گروه شمع از تونل فاصله می‌گیرد میزان تنش فشاری به صورت پیوسته کاهش می‌یابد.



شکل ۸- نمودار تنش‌های فشاری تونل در نقاط مختلف آن برحسب فاصله از محور تونل

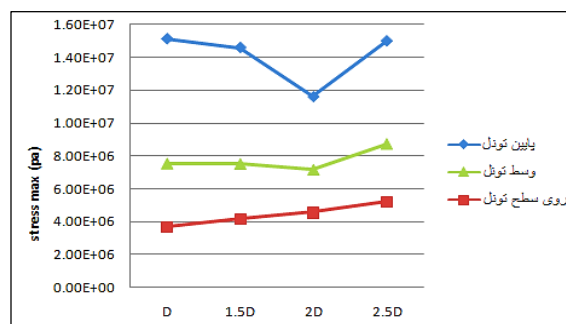
مقدار کرنش حداکثر با توجه به نمودار شکل (۱۵) با افزایش فاصله از یک برابر قطر تونل تا یک و نیم برابر قطر تونل در نقاط بالا، وسط و پایین تونل افزایش چشمگیری دارد و بعد از آن در بالای تونل با افزایش فاصله مقدار آن تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند. ولی در وسط تونل تا فاصله دو برابر قطر تونل مقدار آن ثابت و با بیشتر شدن فاصله از مقدار آن کاسته می‌شود، در پایین تونل با بیشتر شدن فاصله از یک و نیم برابر قطر تونل میزان کرنش حداکثر به طور پیوسته کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تأثیر فاصله روی کرنش حداکثر تونل در نقاط مختلف آن

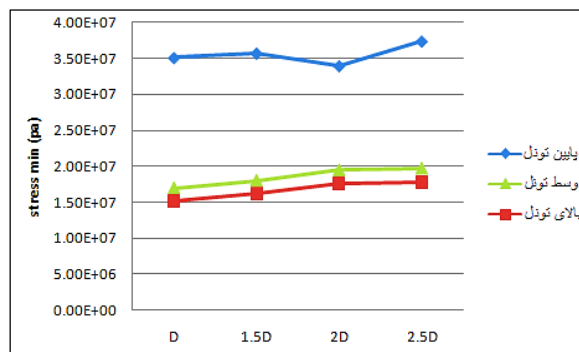
با توجه به شکل (۱۶) که نمودار تأثیر فاصله گروه شمع از تونل را بر روی جابه‌جایی تونل در جهت طولی در بالا، وسط و پایین تونل نشان می‌دهد، می‌بینیم که در هر سه نقطه ذکر شده تونل میزان

مقدار تنش حداکثر طبق شکل (۱۲) بروی سطح تونل با افزایش فاصله گروه شمع از تونل به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. ولی در وسط تونل و قسمت پایین تونل افزایش فاصله از یک برابر قطر تونل به یک و نیم برابر قطر تونل باعث کاهش تنش حداکثر به مقدار کمی و افزایش فاصله تا دو برابر قطر تونل باعث کاهش بیشتر تنش حداکثر می‌شود، ولی در فاصله دو و نیم برابر قطر تونل (حدود ۲۳ متری) میزان تنش حداکثر به صورت جهشی افزایش می‌یابد که این قضیه در قسمت انتهایی تونل بیشتر مشهود است.



شکل ۶- نمودار تنش حداکثر تونل در نقاط مختلف آن برحسب فاصله از محور تونل

مقدار تنش حداقل تونل با توجه به شکل (۱۳) به روی سطح تونل و در وسط آن با افزایش فاصله از تونل افزایش می‌یابد، اگرچه وقتی فاصله به دو برابر قطر تونل می‌رسد به یک مقدار ثابتی می‌رسد، ولی در قسمت پایین تونل افزایش فاصله تا یک و نیم برابر قطر تونل باعث افزایش تنش حداقل می‌شود و از فاصله یک و نیم برابر تا دو برابر قطر تونل میزان آن کاهش و سپس از این فاصله تا دو و نیم برابر قطر تونل شاهد افزایش مقدار آن هستیم.



شکل ۷- نمودار تنش حداقل تونل در نقاط مختلف آن برحسب فاصله از محور تونل

به صورت جهشی افزایش می‌یابد که این قضیه در قسمت انتهایی تونل مشهودتر است و به مقدار ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد.

د) طبق نتایج به دست آمده تنش حداکثر تونل هم در بالا و وسط تونل با افزایش فاصله تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. اگرچه در فاصله دو برابر قطر تونل مقدار آن ثابت می‌ماند. ولی در پایین تونل ابتدا تا فاصله یک و نیم برابر قطر تونل افزایش و سپس تا فاصله دو برابر قطر تونل کاهش ولی باز با افزایش فاصله مقدار آن ۷ درصد افزایش می‌یابد و به عدد ۳۶/۴ مگاپاسکال می‌رسد.

ه) طبق نتایج کرنش حداکثر تونل با افزایش فاصله تا یک و نیم برابر قطر تونل در نقاط بالا، وسط و پایین آن افزایش چشم‌گیری بیش از ۱۰۰ درصد دارد و بعد از آن در بالای تونل با افزایش فاصله مقدار آن تغییر محسوسی نمی‌کند ولی در وسط تونل تا فاصله دو برابر قطر تونل مقدار آن ثابت و با بیشتر شدن فاصله از مقدار آن کاسته می‌شود. در پایین تونل نیز از فاصله یک و نیم برابر قطر تونل به بعد میزان کرنش حداکثر به طور پیوسته تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

و) جابه‌جایی تونل در جهت طولی نیز در هر سه نقطه تونل تا فاصله دو برابر قطر تونل تا حدود ۵۰ درصد کاهش و سپس بیش از ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد که این امر در قسمت انتهایی تونل محسوس تر است و به حداکثر کرنش ۲/۲ میلی‌متر می‌رسد.

در مجموع با توجه به بررسی‌های انجام شده، وجود ساختمان مجاور تونل سبب افزایش نیروهای داخلی تونل تحت بار زلزله خواهد شد که این افزایش بستگی به فرکانس بارگذاری، عمق قرارگیری تونل، ابعاد تونل و ابعاد و ارتفاع ساختمان دارد.

از نتایج می‌توان این نتیجه را گرفت که در فواصل نزدیک شمع به تونل (D)، شمع‌ها نقش یک دیوار حائل برای تونل را ایفا کرده، به طوری که کم‌ترین میزان کرنش و جابه‌جایی و بار وارده بر تونل را دارد.

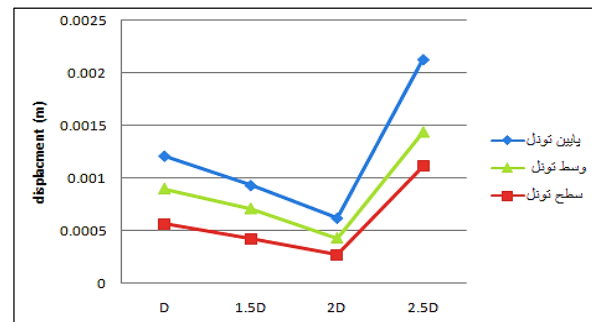
۵- مراجع

اصغری و، جانی ر، "بررسی عددی رفتار لرزه‌ای گروه ریزشمع با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه- خاک- ریزشمع"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶.

رضایی فرعی، ا، عیوض زاده بسطام ر، "بررسی و تحلیل عددی تأثیر شالوده عمیق (شمع) بر رفتار تونل‌ها"، چهارمین کنگره بین المللی عمران- معماری و توسعه شهری، ۱۳۹۵.

جوادی بوسجین ح، جوادی اصطهبانی م، گلشنی ع، ا، شیرزاد حقیقت ح، "بررسی نشست زمین ناشی از حفاری مرحله‌ای تونل‌های دوقلوی شهری به روش تجربی و عددی- مطالعه موردی: تونل

جابه‌جایی در جهت طولی با افزایش فاصله تا دو برابر قطر تونل (حدود ۱۸/۳ متر) کاهش می‌یابد ولی از فاصله دو برابر قطر تونل تا دو و نیم برابر قطر تونل حداکثر مقدار جابه‌جایی در هر سه نقطه بالا، وسط و پایین تونل افزایش می‌یابد که این افزایش هرچقدر به سمت پایین تونل پیش می‌رویم محسوس تر است. در کل به این نتیجه می‌رسیم که تغییرات جابه‌جایی طولی تونل با افزایش فاصله پیوسته نبوده و در فواصل دورتر تونل حداکثر مقدار خود را دارد.



شکل ۱۶- تأثیر فاصله شمع از تونل بروی جابه‌جایی تونل در جهت طولی

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از مطالعات پارامتری در تحقیق حاضر به شرح زیر است:

الف) نتایج نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی تونل در امتداد نشست، در ابتدا تا فاصله یک و نیم برابر قطر تونل کاهش و سپس به یک مقدار ثابتی می‌رسد و افزایش فاصله تأثیر آن چنانی روی آن ندارد. نشست گروه شمع نیز بعد از افزایش ۲۰ درصدی (۶/۲ سانتی‌متر) در فاصله تا دو برابر قطر تونل، کاهش کمی را در فاصله دو و نیم برابر قطر تونل داشت.

ب) نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی تونل در جهت افقی (جهت زلزله) با افزایش فاصله تا یک و نیم برابر قطر تونل افزایش و سپس با زیاد شدن فاصله به یک مقدار ثابتی می‌رسد (در سطوح بالا و میانی تونل). ولی در سطح پایین تونل اگرچه افزایش فاصله در ابتدا باعث افزایش قابل توجه جابه‌جایی می‌شود ولی به تدریج با افزایش فاصله از مقدار آن کاسته می‌شود. جابه‌جایی افقی گروه شمع نیز با افزایش فاصله تا دو برابر قطر تونل کاهش و پس از آن کاهش و پس از آن به یک مقدار ثابتی می‌رسد.

ج) نتایج نشان می‌دهد که تنش حداکثر تونل بر روی سطح تونل به صورت پیوسته با افزایش فاصله زیاد می‌شود ولی در وسط و پایین تونل تا فاصله دو برابر قطر تونل مقدار آن کاهش ولی بعد از آن

امیرکبیر"، نهمین همایش ملی تونل، ۱۳۹۰.
 قاسمی قدرت م، شریفزاده م، تابش م، "بررسی اثر حضور سازه‌های
 مجاور بر سازه تحت تأثیر در اندرکنش تونل وسازه‌های سطحی
 با استفاده از روش عددی اجزاء محدود (مطالعه موردی پروژه
 تونل نیایش)"، پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، ۱۳۹۳.
 شرکت راه آهن شهری و خدمات مهندسی پروژه خط ۷ متروی تهران
 قطعه شرقی- غربی "بررسی عبور تونل (متروی خط ۷ تهران)
 از محدوده پل قزوین"، با مشاوره مهندسی ساحل و مؤسسه
 حرا، ۱۳۸۹.

- Asakereh A, Tajabadipour M, "Analysis of Local Site Effects on Seismic Ground Response under Various Earthquakes", *AUT Journal of Civil Engineering*, 2018, 2 (2), 227-40.
- Dapeng Z, Liangkai Q, Yundian L, "Analytical study on dynamic response of deep foundation pit support structure under the action of subway train vibration load: A case study of deep foundation pit of the new museum near metro line 2 in Chengdu", *China, Shock and Vibration*. 2015.
- Marshall AM, Haji T, "An analytical study of tunnel-pile interaction", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 45, 43-51.
- Meguid MA, Mattar J, "Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135 (7), 973-9.
- Mroueh H, Shahrour I, "Three- dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26 (3), 217-30.
- Pan Y, Zheng JJ, Cui L, Zhang RJ, "Numerical Analysis of Ground Displacement and Pile Response Due to Tunneling in Soft Soil Considering the Creep Behavior", *InGeoShanghai International Conference 2018 May*, pp. 121-130, Springer, Singapore.
- Sevim B, Contadakis ME, "Nonlinear earthquake behaviour of highway tunnels", *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2011, 1, 11 (10).
- Smith M, "Simulia Abaqus 6.13-1", *Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA*, 2013.

EXTENDED ABSTRACT

Pile- Tunnel Interaction in Subway Tunnels under Seismic Loads

Vahed Ghiasi ^{a,*}, Khosro Esmaili ^a, Danial Arzjani ^b

^a Faculty of Civil Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

^b School of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran

Received: 05 February 2018; **Accepted:** 13 January 2020

Keywords:

Pile Foundation, Subway Tunnel, Soil-Structure Interaction, Finite Element, Dynamic Analysis.

1. Introduction

Developing transportation system in populated cities needs to construct subsurface infrastructures, such as tunnels. With a close attention to densely surface structured urban environments, it is most likely that tunnels would inevitably cross near of adjacent structures. It should be considered, whether the settlement induced by tunneling are in allowable range or not. Several factors may affect the magnitude of ground movement due to tunneling and consequently the tunnel- structure interaction, such as ground geotechnical properties, adjacent structure stiffness and relative position of structures and tunnels, and tunnel construction parameters.

When pile foundations are exposed to intense dynamic transverse loads during earthquakes, soil- structure interaction (SSI) plays an important role in allocating the response of pile foundations to lateral excitation. The numerical investigation with analysis subway tunnels and deep foundation interaction behavior under seismic loads by the finite element method was carried out.

2. Methodology

2.1. Material Characteristics

In this research, Mohr- Coulomb Behavioral Model was used to conduct analyzes. This elastic-plastic model is one of the easiest and most used models used in geotechnical analysis. The reason for this is the number of parameters that are difficult to determine, which requires no complex testing. In this study, soft clay was used for soil geometry modeling, whose properties were according to Table 1.

Shell elements are used to make piles. The AIII type of rebar is also used for the manufacture of piles and is used as a volume percent with 6% of the area of the pile. In this modeling, the piles and pile caps are assumed to be an elastic body with a compressive strength of 350 Kg/cm³, and its elasticity is 2.615E+07 KN/m² and the Poisson coefficient is 0.2.

The shell element was used to construct the tunnel lining. The lining thickness of the shotcrete is 20 cm and the length is 80 meters. Its density is 2500 kg/m³, the modulus of elasticity is 2*10¹⁰ Pascal and its Poisson coefficient is 0.2.

* Corresponding Author

E-mail addresses: v.geotec@gmail.com (Vahed Ghiasi), khosrosmaili64@gmail.com (Khosro Esmaili), arzjani.danial@gmail.com (Danial Arzjani).

Table 1. Geotechnical parameters used in modeling

Layer Number	Soil Type	γd (KNm ³)	C (Kpa)	ϕ (degree)	E (Mpa)	ν
1	Soft Clay	18.6	14	34	80	0.3
2	Soft Clay	19	30	33	50	0.32
3	Soft Clay	17	31	28	35	0.35

2.2. Numerical modeling

To plot the geometry of the model, a plot of land with a size of 45*60 square meters was chosen, the length of the pile was 27 meters and its width was one meter, the tunnel's crown distance to the surface of the ground was 12.95 meters and the diameter of the tunnel was 9.16 meters. In this analysis, the effect of underground water is neglected and the plot of land is divided into 3 layers and it is assumed that the soil of all layers is the same and the clay type is soft.

For parametric studies the influence of the distance between the pile group and tunnel in the dynamic state will be investigated. Four different models with intervals D , $1.5D$, $2D$ and $2.5D$ have been used for this purpose. D is a tunnel diameter of 9.16 meters and the height of the ground to the tunnel floor is about 23 meters.

3. Results and discussion

In Fig. 1-b, which shows the effect of distance of the pile from the tunnel on the displacement of the pile group in the direction of the earthquake, we see that with increasing distance from the tunnel, the displacement tunnel of the pile group is reduced by twice the diameter, but more than twice the diameter of the tunnel (about 18.5 m) moves the pile group to a constant value and does not change. In general we conclude that the increase in distance to a certain extent reduces the displacement of the pile group, which is a tangible decrease of about 25 centimeter and will not change much during the long displacement of the pile group.

According to Fig. 1-a, the diagram which shows the effect of distance between the pile group and the tunnel on the displacement of the tunnel in the longitudinal direction above, the middle and bottom of the the tunnel. We saw that at all three points of the tunnel, the displacement in the longitudinal direction with increasing distance to twice the diameter of the tunnel (about 18.3m) is reduced, but from a distance of twice the diameter of the tunnel to two and a half times the diameter of the tunnel, the maximum amount of displacement increases at every point of the tunnel, which increases as the tunnel proceeds downwards. In general, we conclude that the longitudinal displacement of the tunnel is not continuous with increasing distance and is at its maximum in the distance to the tunnel.

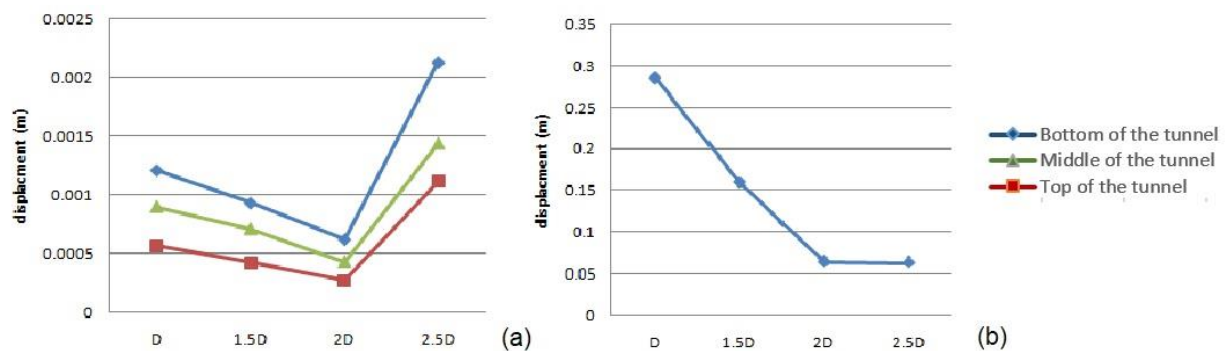


Fig 1. a) Effect of the distance between the piles and the tunnel to move the tunnel in the longitudinal direction, b) Effect of the distance between pile group and the tunnel on displacement of pile group in the direction of earthquake

4. Conclusions

The results show that the displacement of the tunnel in the upper and middle sections increases with increasing distance and then reaches a roughly constant value, but in the lower part of the tunnel, earthquake displacement, increases first with increasing distance and then decreases. The tunnel settlement decreases with increasing distance and then remains almost constant, but the pile group's settlement increases with increasing distance from the tunnel and then decreases. The displacement of the tunnel in the longitudinal direction is also reduced by increasing the distance initially to a distance of twice the diameter of the tunnel and then has a sudden increase, the maximum and minimum stress values increases at the top and the middle of the tunnel, except for lower part of the tunnel, which does not change with increasing continuous distance.

5. References

- Afifipour M, Sharifzadeh M, Shahriar K, Jamshidi H, "Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass", Shiraz metro, Iran, *Tunneling and Underground Space Technology*, 2011, 26 (2), 356-363.
- Mylonakis G, Gazetas G, "Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental", *Journal of Earthquake Engineering*, 2000, 4 (3), 277-301.