

بررسی اثر انفجار در تونل‌های دوقلو بر روی لاینینگ تونل دچار سانحه و تونل مجاور با اشکال مختلف

وحید بابادی عکاشه^{۱*}؛ ابوالقاسم مظفری^۲؛ کاظم برخورداری^۳؛ علی اکبر حبیبی^۴؛ سعید خسروی^۵

۱- مربی؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، دهقان، ایران

۲- مربی؛ دانشکده‌ی پدافند غیرعامل، عمران، دانشگاه امام حسین(ع)، ایران

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه یزد، ایران

۴- کارشناس ارشد؛ دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه یزد، ایران

۵- کارشناس ارشد؛ دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۰۵/۲۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.5081.1292

واژگان کلیدی	چکیده
مقاطع تونل	یکی از خطرات قابل پیش‌بینی که در سال‌های اخیر توسط گروهک‌های تروریستی ایجاد شده است، ضربه زدن به سیستم حمل و نقل مانند انفجار در شبکه‌های مترو و تونل‌های شهری می‌باشد. بنابراین ایمن‌سازی آنها به لحاظ سازه‌ای، باید در اولویت مهندسیین طراح و مدیران شهری قرار گیرد. علاوه بر آن، در سال‌های اخیر استفاده از تونل‌های دوقلو با توجه به پایداری بیشتر و سهولت اجرا مورد استقبال مهندسیین طراح قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی رفتار تونل‌های دوقلو، در مقابل موج انفجار با مقطع‌های مختلف به صورت شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار تفاضل محدود <i>FLAC</i> پرداخته شده است. در نهایت نتایج حاصل از این تحلیل‌های عددی که شامل بررسی نیروی محوری، لنگر خمشی به‌وجود آمده در کل سازه نگهدارنده تونل‌ها می‌باشد، با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تونل‌های با مقطع نعل اسبی عملکرد مناسب‌تری نسبت به مقطع مستطیلی خواهند داشت.

۱- مقدمه

حمل و نقل بسیاری از شهرها از جمله مادرید در ۲۰۰۵، لندن در ۲۰۰۵، مسکو در ۲۰۰۴ و ۲۰۱۰، مینسک در ۲۰۱۱ را با موفقیت انجام دهند که نتیجه آن مرگ انسان‌های بی‌گناه و آسیب‌های شدید به سازه‌ها بوده است. در صورت غفلت و نپرداختن به این مقوله، هزینه‌های سنگین و تلفات جبران ناپذیری به بار خواهد آمد. از این‌رو محققین بسیاری تلاش کرده‌اند تا با ارائه تمهیدات مناسب در امر ساخت و ساز از خسارت‌های ناشی از انفجار بکاهند. برای رسیدن به این هدف روش‌های متفاوتی وجود دارد. مطابق روش معمول می‌توان سازه را متناسب با نیروهای دینامیکی ناشی از انفجار با مقاومت و با سختی لازم طراحی و اجرا نمود، همچنین می‌توان با استفاده از روش‌ها و عناصر مناسب از رسیدن بخشی

وقوع جنگ، صدمات و آسیب‌های انسانی و مادی سنگینی برای هر کشور در پی دارد که می‌توان با بکارگیری تمهیدات و شیوه‌های پدافند غیرعامل قبل از وقوع جنگ، باعث کاهش آسیب‌های احتمالی شد. علاوه بر این، حملات تروریستی با استفاده از مواد منفجره در سال‌های اخیر سامانه‌های حمل و نقل عمومی را هدف قرار داده‌اند. در آمریکا، اداره امنیت کشور (*DHS*) و اداره تحقیق فدرال (*FBI*) از دو نقشه برای حمله به سامانه‌ی متروی شهر نیویورک با استفاده از مواد منفجره پرده برداشته‌اند. در خارج از ایالات متحده، تروریست‌ها توانسته‌اند در دهه گذشته حملات بمب‌گذاری در سامانه‌های

* اصفهان؛ دهقان؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران؛ کدپستی: ۸۶۱۸۹۱۶۸۸۹؛ شماره‌ی تلفن: ۰۹۱۳۲۲۰۴۶۸۵؛ رایانامه: yahid.akashe1988@gmail.com

بار دینامیکی ناشی از انفجار سطحی بر سازه زیرزمینی را مورد بررسی قرار داد (Lu, et al., 2005). ناگی و همکارانش به بررسی اثر عمق قرارگیری ماده منفجره بر سازه مدفون پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش عمق قرارگیری ماده منفجره (کاهش فاصله مواد منفجره تا سازه مدفون) میزان تخریب افزایش می‌یابد (Nagy, et al., 2009). صادق آذر و همکارانش با استفاده از برنامه ANSYS-AUTODYN، به ارزیابی پاسخ سازه‌های بتن مسلح مدفون تحت تأثیر انفجار سطحی پرداختند و درباره شکل‌گیری چاله انفجاری و نحوه انتشار موج انفجار در خاک مطالعاتی انجام دادند (Sadegh azar, et al., 2009). قائمی فرآیند تحلیل دینامیکی انتشار امواج فشاری ناشی از برخورد موشک و نفوذ آن در محیط پیوسته و ناپیوسته را با استفاده از روش تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار داد. با مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و محاسبات عددی انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزارهای FLAC (محیط پیوسته) و UDEC (محیط ناپیوسته) مشخص گردید که بین نتایج حاصل از روش تحلیلی و نرم افزار FLAC تطابق بهتری وجود دارد. همچنین آن‌ها اظهار داشتند که محیط‌های ناپیوسته می‌تواند مدل‌های مناسب‌تری برای فضاهای زیرزمینی باشد (Ghaemi, 2011).

لیو با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به تحلیل پاسخ غیرخطی تونل تحت بارگذاری انفجار مدفون پرداخت. نتایج نشان داد که سختی خاک تأثیر چشمگیری بر روی تنش‌های به وجود آمده در پوشش تونل و خرابی آن دارد. اگر تونل در خاک نرم قرار داشته باشد، تنش‌های به وجود آمده در پوشش تونل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر اگر مقدار انفجار ناچیز باشد، تأثیر ناچیزی بر روی تنش‌های به وجود آمده در پوشش تونل دارد. در رابطه با عمق قرارگیری ماده منفجره، نیز نتایج نشان داد در حالتی که عمق قرارگیری کم است، تنش‌های به وجود آمده در پوشش زیاد می‌شود و سبب افزایش تخریب می‌گردد (Liu, 2009).

لیو در تکمیل مطالعات قبلی خود عواملی همچون اندرکنش بین خاک و سازه، تراکم‌پذیری خاک و شکنندگی پوشش تونل را مورد بررسی قرار داد. نتایج در رابطه با اندرکنش بین خاک و تونل نشان داد که تأثیر چندانی بر میزان آسیب ندارد. دلیل این امر آسیب‌پذیری پوشش تونل

از انرژی انفجار به سازه جلوگیری کرد. از دیگر تمهیداتی که برای کاهش تأثیر انفجار بر فضاهای امن زیرزمینی می‌توان اندیشید، انتخاب عمق بهینه مناسب با ابعاد آن سازه، مقدار ماده منفجره، خصوصیات ژئوتکنیکی محل و شکل مقطع تونل می‌باشد. شکل مقطع تونل‌ها یکی از عوامل مؤثر در طراحی آن‌ها می‌باشد. با طراحی شکل مقطع مناسب، می‌توان تنش‌های بوجود آمده در لاینینگ تونل را که ناشی از بارهای وارده می‌باشد، به حداقل رساند و در طراحی و اجرای آن از لحاظ اقتصادی صرفه‌جویی بسیاری داشت. از سویی، امروزه با توجه به رشد روز افزون جمعیت و نیاز به راه‌های دسترسی بیشتر، تونل و فضاهای زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. به همین دلیل، در این پژوهش سعی بر آن شده است که دو تونل در مجاورت هم مدلسازی شوند و متفاوت بودن اشکال مقطع تونل در میزان تأثیر انفجار ناشی از مواد منفجره روی تونل دچار حادثه و تونل مجاورش مورد ارزیابی قرار گیرد. برای مشخصات تونل، از نشریه 161 راه و ترابری که تونل نیایش تقریباً بر اساس آن ساخته شده است، استفاده می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

استیونز با ترکیب روش اجزای محدود و تفاضل محدود تأثیر انفجار سطحی بر تونل را مورد ارزیابی قرار داد و با نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی، که توسط اسمیت و دالریوا انجام شده بود، مقایسه کرد. مشاهده شد که نتایج عددی و آزمایشگاهی نزدیکی خوبی با هم دارند (Entezari Zarech, 2012). یانگ با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS پاسخ سازه زیرزمینی تحت اثر بار ناشی از انفجار سطحی را در برابر افزایش عمق سازه و اندازه‌ی آن بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که هرچه سازه در عمق بیشتری ساخته شود، پایداری بیشتری خواهد داشت (Yang, 1997). گویی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC، اثر انفجار سطحی را بر تونلی که در زیر فرودگاهی در تایوان ساخته شده بود مورد بررسی قرار داد و تأثیر میرایی خاک، شدت بار دینامیکی و گودال ناشی از انفجار را ارزیابی کرد. نتایج مدلسازی نشان داد که شدت انفجار از عوامل مؤثر در افزایش لنگر خمشی و تنش وارد بر تونل می‌باشد و میرایی خاک اثر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ تونل نخواهد داشت (Gui & Chien, 2004). لو با استفاده از AUTODYN به صورت دو بعدی و سه بعدی اثر

تونل مجاور در نزدیکی تونلی که دچار سانحه انفجار شده است، به وجود می‌آید. با افزایش فاصله بین دو تونل حداکثر میزان تنش شعاعی کاهش می‌یابد (Li, et al., 2006). تیان و لی با استفاده از برنامه ABAQUS پاسخ دینامیکی ساختمان چند طبقه تحت تأثیر انفجار در یکی از دو تونل که در مجاورت هم قرار دارند را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه فرض شده است که ساختمان با و بدون میراگر در بین خاک و ساختمان باشد. نتایج نشان داد تونلی که در بین سازه و تونل حادثه دیده، قرار گرفته نقش بسیار مهمی بر انتشار و میرایی امواج انفجار دارد (Tian & Li, 2008).

۳- انفجار

۳-۱- امواج ناشی از انفجار

در زمان انفجار واکنش شیمیایی در مدت زمان بسیار کم، مقدار زیادی گاز تولید می‌کند. این گازها به شدت منبسط شده و هوای جلوی خود را به اطراف می‌رانند. در نتیجه یک لایه از هوای فشرده در جلوی این گازها تشکیل می‌شود، که به سمت خارج از محیط گسترده می‌شود. این لایه بیشترین انرژی ناشی از انفجار را در خود دارد. به این انرژی موج انفجار می‌گویند. با دور شدن از منبع انفجار شدت و قدرت موج کاهش می‌یابد. موج حاصل از انفجار دارای دو فاز است. در فاز اول که به فاز مثبت و یا فاز فشاری موسوم است، فشار انفجار از فشار پیرامونی بیشتر است، پس از فاز مثبت و با گذر زمان، فشار انفجار به حد فشار اتمسفر کاهش یافته و سپس فاز منفی با ایجاد مکش آغاز می‌شود.

در شکل ۱ موج حاصل از انفجار نشان داده شده است. سطح زیر نمودار فاز مثبت و منفی یکسان است به همین دلیل تنها فاز مثبت مورد توجه قرار می‌گیرد و فاز منفی به جز مواردی که انفجار در آب صورت می‌گیرد و باعث ایجاد مکش می‌گردد، اهمیت چندانی ندارد. معمولاً برای سهولت پالس انفجار را به صورت نمایی یا مثلثی و صرفاً در محدوده مثبت در نظر می‌گیرند و از فاز منفی که تأثیر کمی در بازتاب بیشینه‌ی سازه دارد، صرف‌نظر می‌شود.

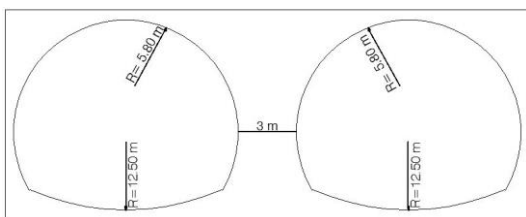
است که اساساً تابع محدودیت‌های ایجاد شده توسط زمین برای پوشش تونل در هنگام انفجار می‌باشد. شکست پوشش تونل عمدتاً بلافاصله بعد از انفجار اتفاق می‌افتد، ولی پیشرفت آسیب ممکن است در مدت زمان ارتعاشات ناشی از انفجار ادامه پیدا کند. در خصوص تأثیر تراکم پذیری خاک نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تغییر شکل برشی در خاک هنگامی اتفاق می‌افتد که خاک بسیار تراکم پذیر باشد، ولی هنگامی که مدول بالک خاک به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ است، تغییر شکل برشی تقریباً ثابت است. گسترش و دوره پیشرفت آسیب به شکنندگی پوشش تونل و تراکم‌پذیری خاک مرتبط می‌شود. آسیب وارده به پوشش تونل به خاطر حباب تنش کششی در راستای شعاعی و به دنبال آن خمش کششی در جهت طولی ایجاد می‌شود. شکنندگی زیاد پوشش تونل سبب سهولت در متلاشی شدن و تشدید آسیب می‌شود (Liu, 2012).

فلگان و همکارانش تأثیر انفجار در یک تونل روی تونل مجاور و همچنین روی سطح زمین را مورد ارزیابی قرار دادند. تونل‌های انتخابی مستطیلی و پارامترهای متغیر فاصله بین تونل‌ها، مقدار جرم و موقعیت قرارگیری ماده منفجره بود. در این مطالعه تأثیر تونل دوم (که در آن انفجار صورت نمی‌گیرد) بر پاسخ سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که موقعیت قرارگیری ماده منفجره بر بیشترین مقدار سرعت و جابجایی عمودی تأثیر گذار است و نبود تونل دوم سبب کاهش مقدار جابجایی شد (Feldgun, et al., 2013). چوی و همکارانش به صورت سه بعدی با استفاده از برنامه AUTODYN، تونل را تحت انفجار درونی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای متغیر وزن ماده منفجره، اندازه و شکل تونل، فاصله بین نقطه انفجار تا دیواره تونل و انواع مختلف زمین اطراف تونل در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج، افزایش مقدار ماده منفجره و کاهش اندازه قطر تونل، سبب افزایش چشمگیری در حداکثر فشار وارده به تونل می‌شود (Choi, et al., 2006).

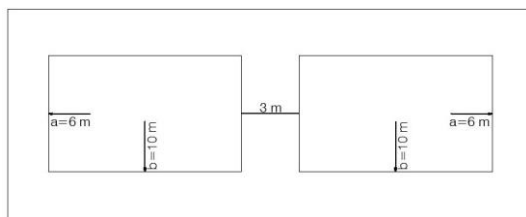
لی و همکارانش پایداری یک تونل تحت تأثیر انفجار در تونل مجاور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات نشان داد که ارتعاشات به وجود آمده در تونل به میزان شدت بار وارده ناشی از انفجار بسیار حساس می‌باشد. همچنین بیشترین تنش شعاعی در دیوار

۴- مقاطع انتخابی تونل

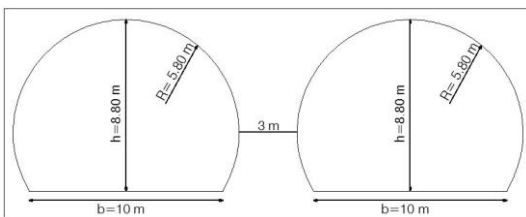
با توجه به ازدحام جمعیت موجود در شهر تهران، گرایش به سمت استفاده از تونل‌های دوقلو افزایش یافته است. ابعاد تونل بر اساس نشریه ۱۶۱ راه و ترابری اتخاذ شد و از یک مستطیل هادی ۶×۱۰ استفاده گردید و مقطع تونل به گونه‌ای انتخاب شد که این مستطیل هادی را در بر بگیرد. برای تونل‌ها مقاطع مستطیلی، دایره‌ای و نعل اسبی در نظر گرفته شده که در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.



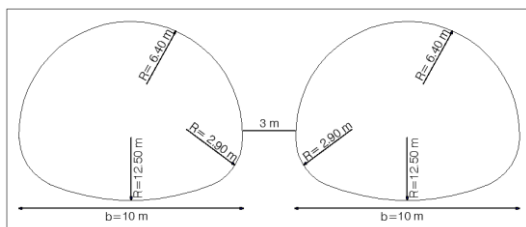
شکل ۲- مقطع اولیه



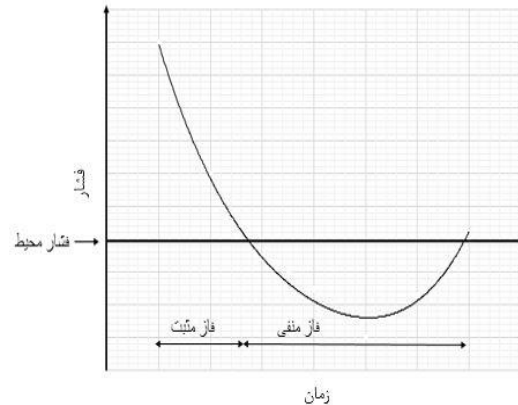
شکل ۳- مقطع پیشنهادی اول



شکل ۴- مقطع پیشنهادی دوم



شکل ۵- مقطع پیشنهادی سوم



شکل ۱- تغییرات فشار - زمان

۲-۳ پارامترهای موج انفجار

پارامترهای جبهه موج انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. حل تحلیلی این پارامترها ابتدا توسط Rankine و Hugoniot برای توصیف شوک‌ها در گاز ایده‌آل بیان شد این معادلات برای سرعت جبهه موج انفجار U_s و حداکثر فشار دینامیکی q_s به صورت زیر بیان می‌شود (Vahedi, 2007):

$$U_s = \sqrt{\frac{6P_s + 7P_o}{7P_o}} a_o \quad (1)$$

$$q_s = \frac{5P_s^2}{2(P_s + 7P_o)} \quad (2)$$

p_s اضافه فشار استاتیکی، p_o فشار اتمسفر و a_o سرعت صوت در هوا در فشار اتمسفر می‌باشد. Brode برای بدست آوردن اضافه فشار استاتیکی در یک انفجار کروی، معادلات زیر را ارائه داده است:

$$p_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (3) \quad (p_s > 10 \text{ bar})$$

$$p_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (0.1 < p_s < 10 \text{ bar})$$

$$Z = R/W^{1/3} \quad (4)$$

که R فاصله واقعی از مرکز ماده منفجره تا نقطه مورد نظر و W جرم خرج انفجاری TNT معادل بر حسب کیلوگرم می‌باشد. استفاده از Z این امکان را می‌دهد که بیان خلاصه و مؤثری از موج انفجاری برای محدوده وسیعی از حالات داشته باشیم.

است.

جدول ۱- مشخصات خاک

پارامترهای خاک	ρ Kg/m ³	E MPa	C KPa	ϕ درجه
GP-GM	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۰	۲۸

جدول ۲- مشخصات لاینینگ بتنی

ρ Kg/m ³	t m	ν	I m ⁴	A m ²	E GPa
۲۴۰۰	۰٫۷	۰٫۳	۰٫۲۸۵۸	۰٫۷	۲۸

۲-۵- تحلیل استاتیکی

برای ایجاد شرایط مرزی مناسب در تحلیل استاتیکی، مرزها فقط در جهت محور عمود بر آن وجه ثابت شده و اجازه حرکت داده نمی‌شود و در جهت دیگر اجازه حرکت دارند. سپس شرایط اولیه اعمال و اجازه داده می‌شود تا مدل به تعادل اولیه برسد. در شکل ۶ نمودار نیروی نامتعادل کننده‌ی حداکثر و به تعادل رسیدن مدل نشان داده شده است. بعد از تحلیل اولیه و رسیدن مدل به تعادل، جابجایی‌ها صفر و حفاری تونل-ها اعمال می‌شود. در شکل ۷ نمای پس از اعمال حفاری و پایان تحلیل استاتیکی نشان داده شده است.

۲-۶- مدلسازی دینامیکی

تحلیل دینامیکی در هر نرم‌افزار پس از تحلیل استاتیکی انجام می‌شود، بنابراین دیگر امکان تغییر شبکه هندسی مدل وجود ندارد و در نتیجه از همان مدل هندسی استفاده می‌شود. اگرچه پارامترهای دینامیکی تقریباً ۱/۵ برابر پارامترهای استاتیکی می‌باشند، اما در این تحلیل بخاطر عدم شناخت و وجود اطلاعات آزمایشگاهی از همان پارامترهای استاتیکی استفاده شده است و در نتیجه پاسخ‌ها محافظه‌کارانه خواهند بود. مقدار ماده‌ی منفجره (TNT)، ۱۰۰ کیلوگرم و زمان انفجار ۰٫۰۳ ثانیه می‌باشد. میرایی نیز نوع رایلی و با ضریب میرایی ۴ درصد در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار *FLAC* برای مسائلی با سرعت حداکثر زیاد و زمان کوتاه مانند انفجار، رابطه‌ی لایزمر و کولمیر، به شبکه مش بندی بسیار ریز و گام زمانی کوچک منجر می‌شود که زمان محاسبات را به مقدار

مقطع اولیه، تونل دو قلوبی می‌باشد که از دایره‌هایی با شعاع‌های ۱۲٫۵ و ۵٫۸ متر تشکیل شده است و تقریباً نزدیک به ابعاد تونل نیایش می‌باشد. تونل پیشنهادی اول، تونل دوقلوی مستطیلی با عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۶ متر و مقطع پیشنهادی دوم، تونل دوقلو نعل اسبی که از قسمتی از یک دایره با شعاع ۵٫۸ متر و یک خط ۱۰ متری که همان عرض مستطیل محاط می‌باشد، تشکیل شده است و در نهایت مقطع پیشنهادی سوم، یک تونل دوقلو است که متشکل از قسمت-هایی از دایره‌هایی به شعاع ۱۲٫۵، ۶٫۴ و ۲٫۹ متر می‌باشد. در کلیه مقاطع پیشنهادی فاصله بین دو تونل ۳ متر انتخاب شده است.

۵- مدلسازی استاتیکی

تحلیل استاتیکی در نرم‌افزار با مدلسازی هندسی شروع می‌شود. در تحلیل استاتیکی، مدل می‌تواند با ابعاد مختلف تحلیل شود، ولی ابعاد بهینه مدل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که توزیع تنش‌های القائی ناشی از حفر تونل درمرزهای مدل با تنش اولیه قبل از حفر برابر شود. حداقل اندازه ابعاد مدل سه برابر قطر است. همچنین برای اینکه انتشار موج در مدل به طور صحیح صورت بگیرد، باید شبکه‌بندی مدل هندسی رابطه لایزمر و کولمیر را ارضا کند (*Entezari Zarech, 2012*). لایزمر و کولمیر نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج، اندازه بزرگترین ابعاد المان، Δl باید کوچکتر از $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{8}$ طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد، به عبارتی باید رابطه‌ی (۵) برقرار باشد:

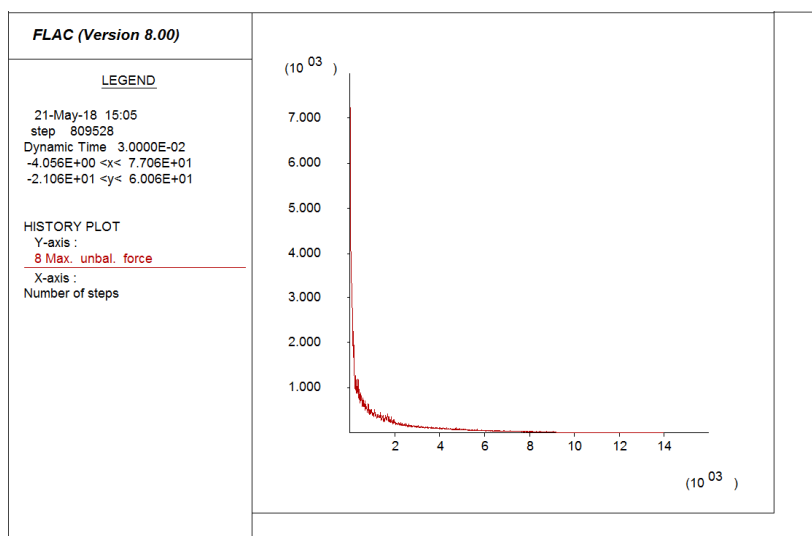
$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (5)$$

۱-۵- مشخصات و رفتار مصالح

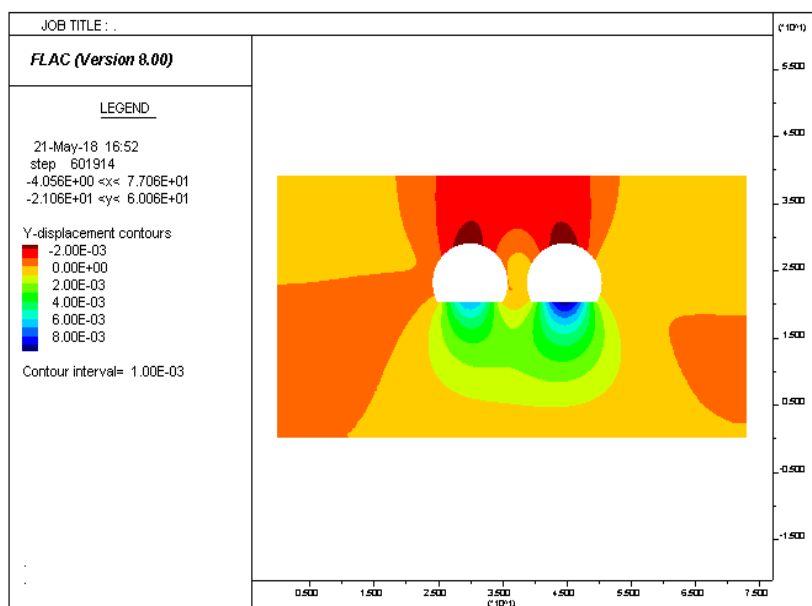
بعد از ایجاد مدل هندسی، باید مشخصات لایه‌های خاک موجود در محدوده‌ی مدلسازی، تخصیص داده شود. با توجه به جدول ۱ پارامترهای مکانیکی خاک به مدل اعمال شد (پارامترهای ذکر شده با توجه به مطالعات ژئوتکنیک مربوط به ساختگاه تونل نیایش است). در این پژوهش مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک، مدل موهر-کولمب می‌باشد. مشخصات مربوط به لاینینگ تونل نیز در جدول ۲ ارائه شده

می‌باشد. محل انفجار در مرکز تونل فرض می‌شود. برای تعیین حداکثر بار وارده به تونل از دستورالعمل معیارهای یکپارچه‌ی ساختمان‌ها (*UFC*) استفاده شد (*UFC, 2014*). بر این اساس تونل سازه‌ای با دو دیواره و یک سقف در نظر گرفته شد و با توجه به اینکه انفجار در مرکز تونل می‌باشد مقدار حداکثر بار وارده به تونل برابر با ۲٫۵ *MPa* به دست آمد.

قابل توجهی افزایش می‌دهد. در چنین مواردی بیشترین نیرو در فرکانس‌های پایین وجود دارد. لذا فرکانسی وجود دارد که با حذف فرکانس‌های بالاتر از آن، بدون اینکه نتایج تحت تأثیر قرار بگیرند، می‌توان از شبکه مش‌بندی درشت‌تری استفاده کرد (*Itasca consulting group Inc. 2016*). در این پژوهش مقدار این فرکانس، که از نمودار دامنه‌ی فوریه‌ی موج ورودی در مقابل فرکانس تعیین می‌شود، برابر 1000 Hz



شکل ۶- نمودار نیروی نامتعادل کننده و به تعادل رسیدن مدل



شکل ۷- کانتور جابجایی در انتهای تحلیل استاتیکی

۶-۱- شرایط مرزی در تحلیل دینامیکی

برای مدل کردن محیط نیمه بی‌نهایت در مدل محدود، می‌توان شرایط مرزی را به گونه‌ای ایجاد کرد که موج، بعد از برخورد به مرز جذب شود و اجازه بازگشت مجدد به مدل را نداشته باشد. در این تحلیل از مرزهای ویسکوز (جاذب) برای ایجاد این شرایط استفاده می‌شود. این مرزها به صورت میراگرهایی هستند که به گره‌های مرزی متصل می‌شوند.

فاصله‌ی مرزهای مدل باید به گونه‌ای باشد تا بتوان حرکت حوزه آزاد زمین را، که بدون توجه به وجود تونل در فاصله‌های دور اتفاق می‌افتد، ایجاد کرد. بنابراین در نرم‌افزار *FLAC* توصیه شده است که برای مرزهای کناری از مرزهای حوزه آزاد (*Freefield boundary*) استفاده شود. این مرزها شبکه‌ای علاوه بر شبکه اصلی هستند که به وسیله میراگرهایی (همانند مرز جاذب) به مرزهای قائم متصل شده‌اند و حرکت آنها تحت تأثیر وجود تونل و موج‌های منتشر شده از تونل نمی‌باشد و فقط براساس پارامترهای دینامیکی ورودی مساله ارتعاش خواهند کرد. بنابراین مرز حوزه آزاد به مرزهای قائم و مرز جاذب به مرز تحتانی اعمال می‌شود.

۶-۲- تأثیر انفجار بر روی نیروهای داخلی بر روی

تاج تونل‌ها

با توجه به چهار حالت مختلف برای مقاطع تونل‌های دو قلو و اعمال بار ثابت بر روی این تونل‌ها که در عمق یکسانی قرار گرفته‌اند، انفجار باعث ایجاد نیروهای داخلی مختلفی در لاینینگ هر دو تونل می‌شود. در شکل‌های ۸ الی ۱۱ و در جداول ۳ و ۴ میزان نیروی محوری و تنش برای نقطه شاهد در تاج هر دو تونل نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل‌ها و همچنین در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار نیروی محوری در تاج تونل، برای تونلی که انفجار در آن رخ می‌دهد و تونل مجاور آن، برای تونل‌های مقطع سوم است که به ترتیب برابر با ۵۲۶۰ کیلو نیوتن و ۱۱۴۰ کیلو نیوتن می‌باشد. در صورتی که میزان تنش حاصل از این نیروها به ازای متر طول لاینینگ محاسبه گردد، ملاحظه می‌شود که این مقادیر با مقاومت فشاری بتن (در صورتی که ۲۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد) فاصله زیادی خواهد داشت. در جدول ۴ میزان تنش حاصل از نیروی محوری محاسبه شده است. نسبت تنش حاصله از نیروی محوری به مقاومت فشاری (۲۵۰۰۰ کیلو پاسکال) هر مقطع، بسته به نوع مقطع در تاج تونل دچار سانحه بین ۰/۰۳-۰/۰۴ و در تاج تونل مجاور بین ۰/۰۷-۰/۰۴ خواهد بود

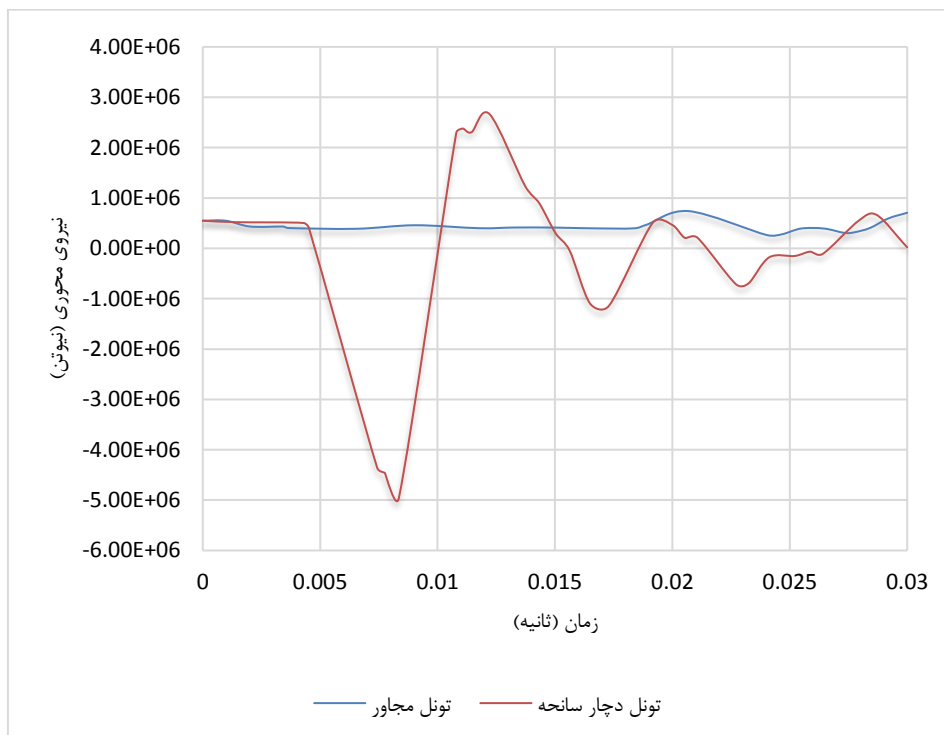


شکل ۸- نمودار نیروی محوری-زمان در مقطع اولیه

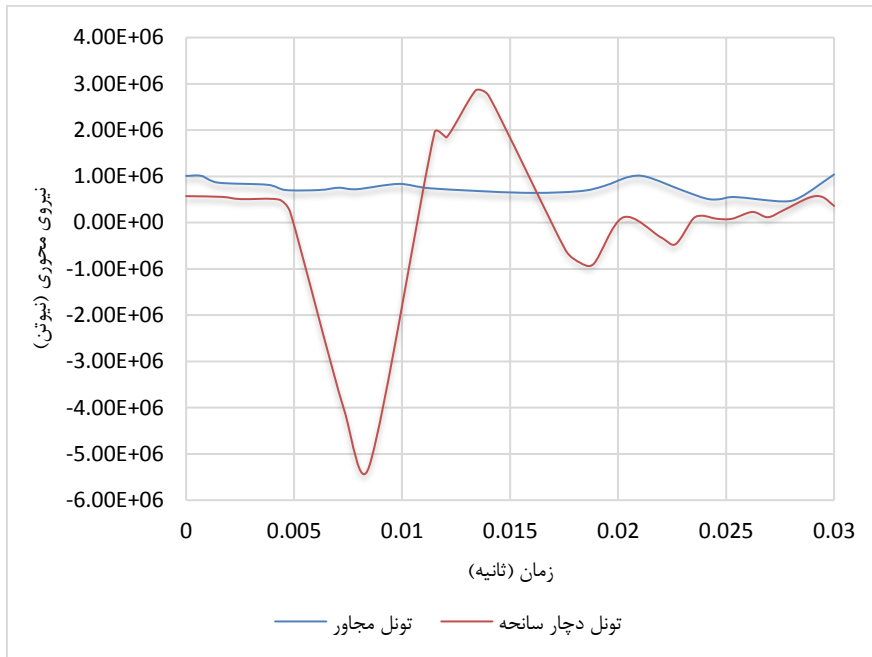
بررسی اثر انفجار در تونل‌های دوقلو بر روی لاینینگ تونل دچار سانحه و تونل مجاور با اشکال مختلف: ص ۳۳-۴۷



شکل ۹- نمودار نیروی محوری-زمان در مقطع پیشنهادی اول



شکل ۱۰- نمودار نیروی محوری-زمان در مقطع پیشنهادی دوم



شکل ۱۱- نمودار نیروی محوری-زمان در مقطع پیشنهادی سوم

۳-۶- تأثیر انفجار بر روی لنگر خمشی بر روی

تاج تونل‌ها

با توجه به چهار حالت مختلف برای مقاطع تونل‌های دوقلو و اعمال بار ثابت بر روی این تونل‌ها که در عمق یکسانی قرار گرفته است، انفجار باعث ایجاد لنگرهای مختلف در لاینینگ هر دو تونل می‌شود که در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ میزان لنگر خمشی برای نقطه شاهد در تاج هر دو تونل نشان داده شده است.

به ازای مقاومت فشاری ۲۵۰۰۰ کیلو پاسکال با استفاده از روابط موجود در کتاب مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (Department Road and Urban, 2013) لنگر ترک خوردگی ۲۴۵ کیلو نیوتن-متر به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که لنگرهای ایجاد شده در مقاطع مختلف بر خلاف تنش ایجاد شده بر اثر نیروی محوری تأثیر چشمگیری در تاج تونل ایجاد خواهند کرد به گونه‌ای که انفجار می‌تواند در تونل دچار سانحه، متناسب با شکل مقطع، ۴۰۷-۲/۱۲ برابر و در تونل مجاور ۳/۹۸-۱/۱۱ برابر لنگر ترک خوردگی، ایجاد لنگر کند. بنابراین با توجه به تأثیر قابل ملاحظه‌ای که انفجار بر روی لنگر خمشی تاج تونل دارد، ارزیابی عملکرد شکل مقطع

جدول ۳- میزان نیرو در تاج مقاطع

نیروی محوری وارده بر نگهدارنده (کیلو نیوتن)

مقطع تونل	تونل دچار سانحه	تونل مجاور
مقطع اولیه	۴۸۳۰	۷۸۰
پیشنهادی اول	۷۶۰	۱۰۵۰
پیشنهادی دوم	۴۹۴۰	۷۵۰
پیشنهادی سوم	۵۲۶۰	۱۱۴۰

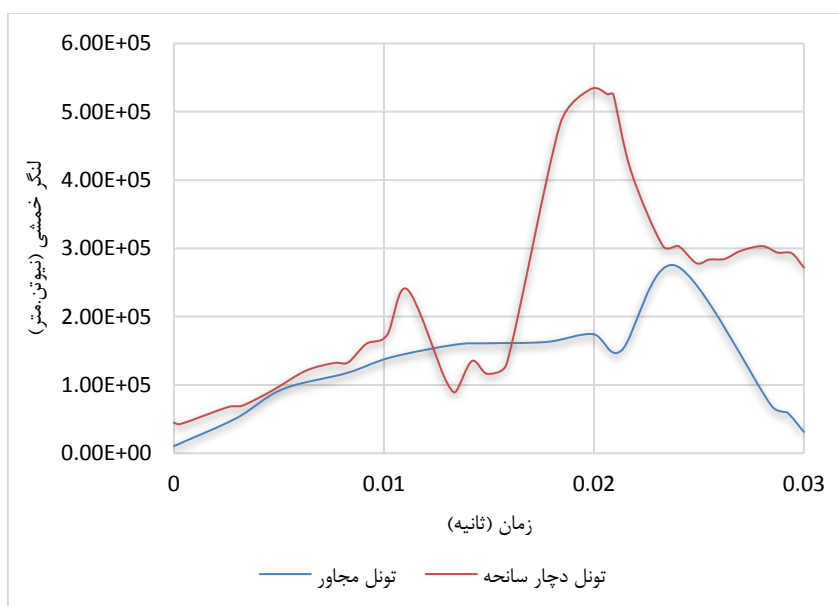
جدول ۴- میزان تنش در تاج مقاطع

تنش وارده بر نگهدارنده (کیلو نیوتن بر متر مربع)

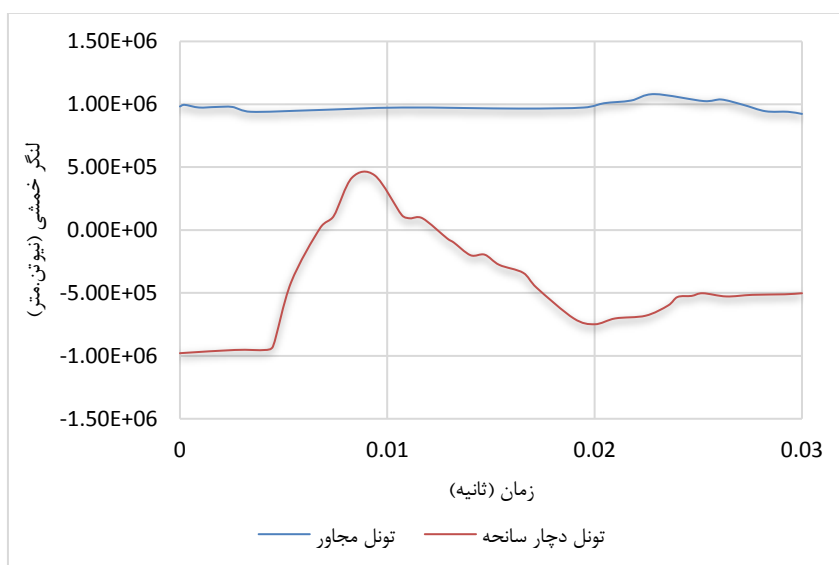
مقطع تونل	تونل دچار سانحه	تونل مجاور
مقطع اولیه	۶۹۰۰	۱۱۱۴
پیشنهادی اول	۱۰۸۶	۱۵۰۰
پیشنهادی دوم	۷۰۵۷	۱۰۷۱
پیشنهادی سوم	۷۵۱۴	۱۶۲۹

در تونل مجاور تونل دچار سانحه در مقطع پیشنهادی دوم به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است و بنابراین عملکرد این مقطع بهتر از عملکرد سایر مقاطع خواهد بود. البته با استفاده از نمودارهای اثر توأم لنگر خمشی-نیروی محوری ارائه شده در کتاب سازه‌های بتن آرمه دکتر مستوفی نژاد (*Mostofi Nejad, 2005*) نیز بررسی پایداری صورت گرفت که نتایج مشابهی به دست آمد

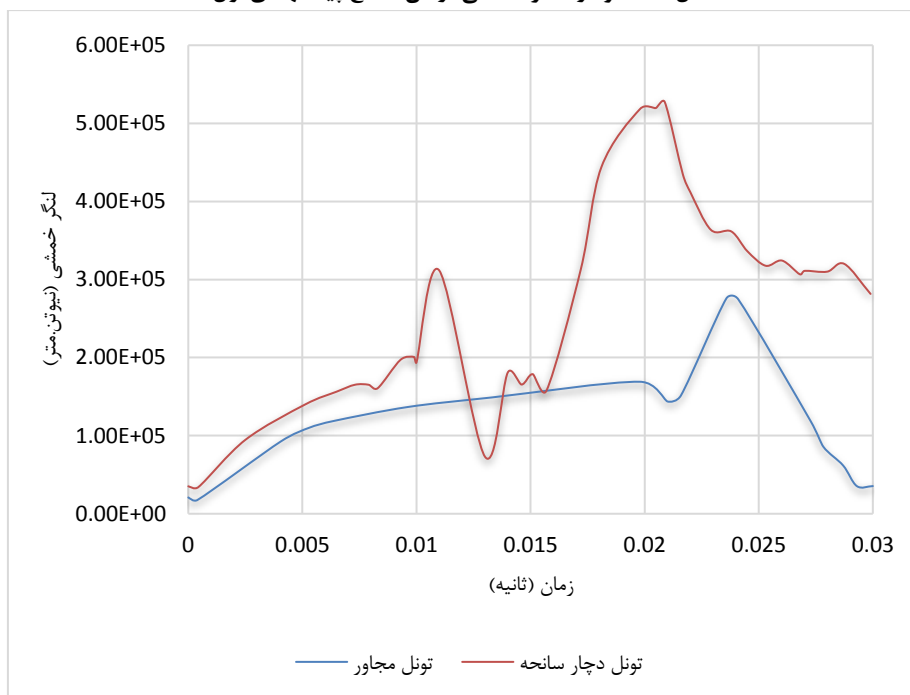
تونل در برابر انفجار، بر مبنای بررسی میزان لنگر خمشی ایجاد شده، انجام پذیرفت. همانطور که در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ و نیز جدول ۵ ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار لنگر خمشی در تاج تونل دچار سانحه در مقطع مستطیلی با حدود ۹۹۸ کیلونیوتن-متر و در تونل مجاور در مقطع مستطیلی با حدود ۹۷۷ کیلونیوتن-متر می‌باشد. میزان لنگر ایجاد شده در تونل دچار سانحه در مقطع اولیه، پیشنهادی دوم و پیشنهادی سوم تقریباً به هم نزدیک می‌باشد ولی این میزان



شکل ۱۲- نمودار لنگر خمشی-زمان مقطع اولیه



شکل ۱۳- نمودار لنگر خمشی-زمان مقطع پیشنهادی اول



شکل ۱۴- نمودار لنگر خمشی-زمان مقطع پیشنهادی دوم



شکل ۱۵- نمودار لنگر خمشی-زمان مقطع پیشنهادی سوم

از سه نوع دایره (با سه شعاع قوس) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

بیشترین مقدار نیروی محوری در تاج تونل در تونل دچار سانحه انفجار و تونل مجاور، در مقطع نعل اسبی با دایره-هایی به شعاع ۱۲٫۵، ۶٫۴ و ۲٫۹ متر (پیشنهادی سوم) ایجاد می‌شود.

بیشترین مقدار لنگر خمشی در تاج تونل در تونل دچار سانحه و تونل مجاور در مقطع مستطیلی ایجاد خواهد شد. با توجه به اینکه مقادیر لنگر حاصل از انفجار مقادیر قابل ملاحظه‌ای است و از طرفی میزان تنش حاصل از نیروی محوری ناشی از انفجار اختلاف زیادی با مقاومت فشاری بتن دارد، بررسی لنگر خمشی مبنای ارزیابی قرار گرفت و بدین ترتیب مقطع تونل‌های مستطیل شکل بیشترین تغییرات مقادیر لنگر خمشی را در طی انفجار تحمل خواهد کرد و مقطع پیشنهادی دوم با توجه به کمترین تغییرات مقادیر لنگر خمشی پایداری بیشتری خواهد داشت.

جدول ۵- میزان لنگر در تاج مقاطع

لنگر خمشی (کیلو نیوتن.متر)		
مقطع تونل	تونل دچار سانحه	تونل مجاور
مقطع اولیه	۵۳۸	۷۸۰
پیشنهادی اول	۹۹۸	۹۷۷
پیشنهادی دوم	۵۲۳	۲۷۴
پیشنهادی سوم	۵۲۱	۵۷۹

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار تونل‌های دو قلو، با اشکال متفاوت، در برابر انفجارهای احتمالی مانند عملیات تروریستی و یا سوانح دیگر، مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا، تغییرات نیروی محوری و گشتاور خمشی تونل‌های دوقلو با شکل‌های مستطیلی، نعل اسبی متشکل از یک دایره و یک خط به عنوان کف تونل، نعل اسبی متشکل از دو نوع دایره و در نهایت نعل اسبی متشکل

۸- مراجع

- Choi, S., Wang, J., Munfakh, G & Dwyre, E. (2006). 3D Nonlinear Blast Model Analysis for Underground Structures. GeoCongress, ASCE.
- Department Road and Urban. (2013). Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings.
- Entezari Zarech H. (2012). Numerical Study of Effect of Explosion on Subway Tunnels MSc. Thesis, Yazd University.
- Feldgun, V., Karinski, Y., Yankelevsky, D. (2013). The Effect of an Explosion in a Tunnel on a Neighboring Buried Structure. Tunnelling and Underground Space Technology 44, 42-55.
- Gui, M.W., & Chien, M.C. (2004). Blast-resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan airport – a Parametric Study. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 24: pp. 227-248.
- Ghaemi, M. (2011). Study of Wave Attenuation in Rock MSc. Thesis, Islamic Azad University Bafgh.
- Itasca consulting group Inc. (2016). FLAC user manual. Version 8.
- Lu, Y., Wang, Zh., Chong, K. (2005). A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 25, pp. 275-288.
- Liu, H. (2009). Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading”, Department of Civil Engineering, The City College of NewYork, USA.
- Liu, H. (2012). Soil-Structure Interaction and Failure of Cast-Iron Subway Tunnels Subjected to Medium

- Internal Blast Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, , ASCE .Vol. 26, No. 5, 691-701.
- Li, J., Li, H., Ma, G., Zhou, Y. (2013). Assessment of Underground Tunnel Stability to Adjacent Tunnel Explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology* 35, 227–234.
- Mostofi Nejad, D. (2005). *Reinforced Concrete Structures*. Arkan Danesh, Tehran.
- Nagy, N., Eltehawy, E., Elhanavy, H., Eldesouky, A. (2009). Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures. 13th International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology, ASAT 13, Cairo, Egypt.
- Sadegh azar M, atarnezad R, Khosravi A. (2009). Assessment of Response of Buried Reinforced Concrete Structure under Blast load by Numerical Modelling. First Earthquake Geotechnical National Conference, Mazandaran.
- Tian, L., & Li, Z. (2008). Dynamic Response Analysis of a Building Structure Subjected to Ground Shock from a Tunnel Explosion. *International Journal of Impact Engineering* 35, 1164 – 1178.
- Unified facilities criteria (UFC). (2014). Structures to resist the effect of accidental explosions. U.S army corps of engineers.
- Vahedi, j. (2007). An Overview of the Methods of Estimating the Explosive Charges and the Effects of Loading on the Properties of Materials. National Civil Engineering Students Conference, Semnan University..
- Yang, Z., (1997). Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.24, Issue 3, pp.113-132.

Analysis of the Effects of Explosions in Twin Tunnels on Lining of Accident Tunnel and Adjacent Tunnel with Different Shapes

V. Babadi Akashe^{1*}; A. Mozafari²; K. Barkhordari³; A.A Habibi⁴; S. Khosravi⁵

1-Instructor, Department of Civil Engineering,,Dehaghan Branch, Islamic Azad University, Dehaghan, Iran

2-Instructor, Department of Civil Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

3-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Iran

4-Master of Science, Department of Civil Engineering, Yazd University, Iran

5-Master of Science, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

Received: 27 Nov 2016; Accepted: 19 Aug 2018

DOI: 10.22044/tuse.2018.5081.1292

Keywords

Tunnel Sections
Dynamic Analysis
Twin Tunnels
Explosion

Extended Abstract

Summary

Consequently, horse-shoe tunnels have better performance. Recently, public places and underground transport facilities such as subways and urban transport tunnels and routes have been the targets of terrorists. In this regard, there have been reports about explosion in these tunnels. Twin tunnels are built because of their structural strength and ease of construction. In this study, the behavior of tunnels with different cross-sectional geometries was examined numerically using the FLAC software under the impact of explosive forces. Thus, the performance of twin tunnels with three different shapes under internal explosion was studied in this research work. The results suggest that the twin tunnels with horseshoe cross section compared to rectangular cross section have better performance.

Introduction

Sadegh azar et.al. (2009) studied the impact of surface explosions on tunnels in different conditions. Ghaemi (2011) explained the effect of emission of missile compressive waves and their impact in continuous and discontinuous environment. Liu (2012) presented the nonlinear response of tunnels buried under explosive loading. Lee (2006) studied the stability of a tunnel, which was adjacent to an exploded tunnel. Tian (2008) studied the dynamic response of multi-story buildings affected by explosion in one of the twin tunnels. The effect of cross-sectional shape of twin tunnels that have not been investigated in these studies, is examined in this paper.

Methodology and Approaches

The shapes of twin tunnels were adopted from the code 161 of Ministry of Road and Urban Development. In this study, four types of twin tunnels have been considered. The primary section of the twin tunnels is the combination of 2 circles with the radii of 12.5 and 5.8 m in each tunnel. The first suggested section for the twin tunnels has a rectangular shape with 10 m width and 6 m height in each tunnel. The second section for the twin tunnels is in the form of a circle with the radius of 12.5 m and a line with the length of 10 m in each tunnel. The third section of the studied twin tunnels is a combination of 3 circles with the radii of 12.5, 6.4 and 2.9 m in each tunnel. The FLAC software was used for this study. In this study, Mohr-Coulomb failure criteria for soil was considered.

Results and Conclusions

Bending moments and axial force in the crown of the damaged tunnel and adjacent tunnel were obtained

for four different cross-sectional shapes. The results showed that the stress caused by the detonation was much lower than the compressive strength of concrete, while bending moments are high. Therefore, when an explosion occurs, rectangular tunnels have poorer performance compared to horseshoe tunnels. Among the tunnels with horseshoe section, the second section shows a good performance against explosion.