



## بهینه‌سازی فاصله تونل‌های دوقولو در خاک‌های ماسه‌ای با رویکرد کاهش اثرات ناشی از انفجارهای سطحی

امیر رضایی باداشیانی<sup>۱</sup>؛ ابراهیم نعیمی فر<sup>۲\*</sup>؛ امید نعیمی فر<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار و هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد هشتگرد، گروه مهندسی عمران، هشتگرد، البرز، ایران

۳- استادیار و هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملارد، گروه مهندسی عمران، ملارد، تهران، ایران

### چکیده

### واژگان کلیدی

ساخت سازه‌های زیرزمینی با توانایی مقاومت در برابر حملات موشکی و هوایی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی دفاعی در مقابل تهدیدهای مستمر دشمنان کشورها و کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی، مورد توجه قرار گیرد. در راستای کاهش اثرات مخرب علاوه بر ملاحظات مربوط به مصالح به کار گرفته شده در این سازه‌ها، هندسه سازه نیز تاثیر چشمگیری بر سطح تاثیرپذیری سازه از محرک‌های بیرونی خواهد داشت. در این مقاله عملکرد سه شکل مختلف از سطح مقطع‌های متعارف تونل در طول تحریک ناشی از انفجار زیرسطحی ارزیابی می‌شود. در این راستا ضمن استفاده از تئوری‌های موجود در ادبیات فنی، به تحلیل مسئله با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود و کدنویسی پرداخته می‌شود. در ادامه با توجه به توسعه تونل‌های دوقولو در شبکه حمل و نقل شهری، به ارزیابی فاصله بهینه بین دو تونل جهت به حداقل رساندن اثرات انفجار پرداخته می‌شود. بر اساس نتایج مشاهده می‌گردد که حضور دو تونل در نزدیکی هم سبب هم‌افزایی پارامترهای مبتنی بر نیرو در لاینینگ تونل تا ۴۰ درصد می‌گردد. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که چنانچه فاصله مرکز به مرکز دو تونل بیشتر از دو برابر قطر تونل در نظر گرفته شود، اثرات ناشی از هم‌افزایی به حداقل رسیده و می‌توان دو تونل را بصورت مستقل تحلیل نمود.

انفجار  
آنالیز دینامیکی  
تفاضل محدود  
هندسه مقطع  
فاصله بهینه  
تونل دوقولو

### ۱- مقدمه

تروریستی باشد. انفجار در مترو موسکو در سال ۲۰۰۴، مترو لندن در سال ۲۰۰۵ و مترو بلاروس در سال ۲۰۱۱ نمونه‌ای از این نوع حملات بوده است. با این وجود این نوع انفجار با توجه به ملاحظات امنیتی کمتر امکان وقوع داشته و از طرفی سطح آسیب اعمالی به سازه تونل کم می‌باشد. به عنوان مثال در مطالعات صورت گرفته توسط Verma و همکاران در سال ۲۰۱۷، ملاحظه شد که انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT در داخل تونل با پوشش لاینینگ متعارف، نتوانسته است آسیب جدی در دیواره‌های تونل ایجاد کند و یا سبب خرابی آن شود. در این مطالعات، مقدار ۱۰۰ کیلوگرم TNT به عنوان حداکثر بار قابل حمل توسط تروریست در نظر گرفته شده است. در این

سازه‌های زیرزمینی از لحاظ راهبردی از اهمیت بالایی برخوردارند و علاوه بر تمامی کاربردهای معمول خود، در زمان جنگ و هنگام حملات هوایی و موشکی به‌عنوان پناهگاه برای حفظ جان انسان‌ها و حفاظت از تجهیزات مهم مورد استفاده قرار می‌گیرند. عوامل ناپایداری این فضاها زیرزمینی شامل عوامل استاتیکی همچون وزن توده خاک بالادست و عوامل دینامیکی همچون زلزله و انفجار است. سازه‌های زیرزمینی و به ویژه تونل‌ها که موضوع این مقاله می‌باشد، عموماً در دو حالت می‌تواند تحت تاثیر تحریک انفجار قرار گیرد. در حالت اول انفجار می‌تواند ناشی از حملات

\* البرز، هشتگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، تلفن: ۰۲۶-۴۴۲۱۰۱۶۵، رایانامه: L.Naeimifar@yahoo.com

در برابر انفجار پرداخته شده است.

در حال حاضر مهمترین مراجع بارگذاری انفجاری قابل دسترس عموم مهندسين، آئين نامه های ارائه شده توسط ایالات متحده امریکا نظیر TM5-1300 در زمینه بارگذاری انفجاری کلیه سازه ها و TM5-855-1 در حوزه بارگذاری انفجاری سازه های زیرزمینی و همچنین آئين-نامه بارگذاری انفجارات هسته ای ASCE حاصل تحقیقات انجمن مهندسين عمران امریکا است. از سوی دیگر با استفاده از هیدروکدها و نرم افزارهای اجزای محدود نیز می توان بارهای انفجاری وارد بر این سازه ها را محاسبه نمود. هیدروکد به نرم افزار رایانه ای اطلاق می گردد که قابلیت محاسبه تنش، کرنش و پارامترهای مربوط به امواج دینامیکی را بر حسب مکان و زمان دارا باشد. اخیراً روش های حل عددی متنوعی با توجه به نوع سیستم سازه ای به کار گرفته شده است. برای دستیابی به رفتار واقع بینانه سازه های زیرزمینی در برابر پدیده انفجار، مبنای اغلب روش های عددی در یک طراحی جامع و دقیق از سازه با توجه به فرآیند شبیه سازی چهار مرحله ای صورت می پذیرد. این چهار مرحله شامل شکل گیری چاله انفجاری، انتشار موج شوک حاصل از انفجار در خاک، اندرکنش خاک و سازه و پاسخ دینامیکی سازه است که باید هر چهار مرحله فوق در یک مدل شبیه سازی گردند.

در عمده مطالعات صورت گرفته در ادبیات فنی که بخشی از آن ارائه گردید، تونل ها بصورت منفرد مورد بررسی قرار گرفته شده است و اثرات اندرکنش تونل ها کمتر مورد توجه واقع شده است. در مطالعات صورت گرفته توسط Verma و همکاران در سال ۲۰۱۷، تونل ها بصورت دوقولو مورد بررسی قرار گرفت. با این وجود ارزیابی های صورت گرفته، بر انفجار در یک تونل و اثر آن در تونل موازی آن متمرکز شده است. در پژوهش حاضر، با بهره گیری از روش های عددی، ضمن بررسی اثر شکل تونل بر تاثیرپذیری آن از تحریک انفجار، به ارزیابی عملکرد تونل های دوقولو در مواجهه با تحریک انفجارهای سطحی پرداخته می شود.

زمینه مطالعات بیشتری با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، مدل های رفتاری مختلف و شرایط مختلف پوشش بتنی تونل صورت گرفته است (Jiang Feldgun et al., 2008) و (Papanikolaou & Kappos, 2014 و Zhou, 2012). حالت دوم، آسیب پذیری تونل بواسطه انفجارهای با منشأ واقع در سطح زمین می باشد. بیشتر مطالعات در این زمینه با استفاده از تحلیل های عددی و یا مطالعات مقیاس شده صورت پذیرفته است؛ چراکه هزینه بسیار و حفظ ایمنی، امکان مطالعات بصورت تمام مقیاس را با دشواری بسیار همراه می کند. استفاده از آزمایشات سانتریفیوژ از روش های مرسوم در ارزیابی اثر انفجار در سازه های زیر زمینی می باشد (Davies & Williams, 1992). نتایج عددی و آماری بسیاری بر اساس انجام این نوع از آزمایشات برای حالات مختلف خاک بویژه برای تاثیر انفجار سطحی بر سازه مدفون سیلندری شکل ارائه شده است (De, 2012 & De et al, 2013). مطالعات عددی صورت گرفته در این زمینه بیشتر با محوریت شرایط خاک، نوع انفجار و شرایط ساخت سازه زیرزمینی انجام شده است (Wang et al., 2005 و Lu et al., 2005).

با تکیه بر مطالعات عددی، Lue و همکاران در سال ۲۰۰۷، مشاهده نمودند که انفجار ایجاد شده بواسطه مقادیر کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله بیشتر از ۱/۵ متر از سطح تونل، نتوانسته است تاثیر مخربی بر لاینینگ برجای بگذارد. بر اساس مشاهدات Yang و همکاران در سال ۲۰۱۰ در زمینه اثر انفجار بر تونل های مترو، مشاهده شد که تونل هایی با ضخامت لاینینگ برابر ۳۵ سانتیمتر و در عمق بیش از ۷ متر در برابر انفجارهای سطحی با کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم TNT ایمن خواهند بود.

اخیراً مطالعات دقیق تری توسط Mussa و همکاران در سال ۲۰۱۷ و Wang و همکاران در سال ۲۰۱۸ صورت گرفته است. در مطالعات Mussa و همکاران، تونل با سه ضخامت لاینینگ ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتیمتر و در سه عمق ۴، ۶ و ۸ متر مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، ضخامت ۲۵ سانتیمتر بسیار آسیب پذیر، ضخامت ۵۰ سانتیمتر برای عمق ۴ متر آسیب پذیر و ضخامت ۷۵ سانتیمتر برای عمق های ۶ و ۸ متر بیش اندازه و غیر اقتصادی قلمداد گردید. در مطالعات صورت گرفته توسط Wang و همکاران، بیشتر به مقاوم سازی پوشش لاینینگ و اثرات استفاده از FRP در افزایش مقاومت پوشش

سازه‌های مقاوم در برابر انفجار ارتش آمریکا در سال ۱۹۸۶ (US. Dept. of Army) بهره گرفته شد. بر این اساس، فشار انفجار مطابق رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$P = P_0 \times e^{-\frac{t}{t_a}}$$

$$P_0 = \rho C V_r^{max}$$

$P_0$  فشار بیشینه انفجار بر حسب پاسکال و  $t$  زمانی است که در آن فشار ناشی از انفجار محاسبه می‌گردد (بر حسب ثانیه).  $t_a$  زمان رسیدن موج انفجار به نقطه مورد بررسی بوده و معادل  $R/C$  است.  $R$  شعاع مه‌ماسوره،  $C$  سرعت لرزه‌ای بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.  $\rho$  وزن مخصوص خاک بر حسب  $kg/m^3$  و  $V_r^{max}$  حداکثر سرعت ذره‌ای خاک بر حسب  $m/s$  می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_r^{max} = 4.8 f_c \left( \frac{2.52 R}{W^{\frac{1}{3}}} \right)^{-n}$$

در رابطه فوق،  $f_c$  ضریب جفت‌شدگی می‌باشد که از جدول (۱) بدست می‌آید.  $R$  شعاع حفره ماسوره،  $W$  وزن  $TNT$  و  $n$  ضریب تضعیف موج می‌باشد که برای خاک‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- برآورد ضریب  $f_c$  بر اساس وزن  $TNT$

$\frac{H}{W^{0.33}} \left( \frac{ft}{lb^{0.33}} \right)$	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶
$f_c$	۰/۴	۰/۶	۰/۷	۰/۸
$\frac{H}{W^{0.33}} \left( \frac{ft}{lb^{0.33}} \right)$	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴
$f_c$	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۹۷	۱/۰

جدول ۲- ضرایب تضعیف چند نمونه خاک

نوع خاک	ضریب تضعیف ( $n$ )	$C(ft/s)$
رس کاملاً اشباع	۱/۵	>۵۰۰۰
رس نیمه اشباع و سیلت	۲/۵	۵۰۰۰
ماسه خیلی متراکم (خشک یا مرطوب)	۲/۵	۱۸۰۰
ماسه متراکم (خشک یا مرطوب)	۲/۷۵	۱۶۰۰
ماسه سست (خشک یا مرطوب)	۳	۱۰۰۰
ماسه خیلی سست (خشک یا مرطوب)	۳/۲۵	۶۰۰

بر اساس روابط ارائه شده، مقدار  $P$  برابر ۶۷ مگاپاسکال برآورد گردید و بر مبنای مطالعات *Chein* و *Gui* در سال ۲۰۰۶، فشار انفجار مطابق نمودار شکل (۲) بر محیط حفره ماسوره

## ۲- مولفه‌های ساختاری مسئله:

تحلیل پارامترهای مسئله در قالب بررسی سه مولفه "انفجار"، "خاک" و "سازه زیرزمینی" صورت می‌پذیرد. مولفه‌های ذکر شده دارای بیشترین وزن در پاسخ مسئله بوده و در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- انفجار

برای نزدیکی نتایج به شرایط واقعی، انفجار لحاظ شده در این پژوهش، بر اساس بمب نفوذگر *MK82* (*Mark82*) یا *Gp5000* شبیه‌سازی گردید. در ادامه به توضیح مشخصات این بمب و محاسبه فشار ناشی از انفجار پرداخته می‌شود.

#### ۲-۱-۱- مشخصات بمب

بمب‌های سری *MK82* با وزن اسمی ۲۲۷ کیلوگرم (۵۰۰ پوند) سلاح‌هایی غیر هدایت‌شونده، با قابلیت حمل و رها سازی توسط هواپیماهای مختلف و یکی از پرکاربردترین انواع بمب‌ها در جهان هستند (شکل ۱).



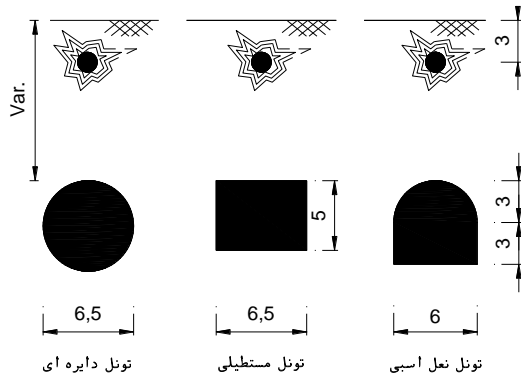
شکل ۱- تصویری از بمب *MK82*

این بمب برای استفاده‌های گوناگون دچار تغییراتی می‌گردد و انواع متفاوتی از آن در ارتش کشورهای مختلف استفاده می‌شود. بمب‌های *MK82* دارای ۸۷ کیلوگرم ماده منفجره *Tritonal* یا *Minol* هستند. میانگین ضریب تبدیل به *TNT* این دو ماده منفجره ۱،۲۶ است. بنابراین این بمب‌ها دارای ماده منفجره‌های معادل با ۱۱۰ کیلوگرم *TNT* هستند. مقدار نفوذ این بمب در خاک بستگی به نوع خاک و ارتفاع پرتاب آن از سطح زمین دارد. با توجه به در نظر گرفتن خاک ماسه‌ای در محیط انفجار و با فرض پرتاب بمب از ارتفاع ۲۷۵۰ متری (۹۰۰۰ فوت)، عمق نفوذ این بمب معادل ۳ متر محاسبه می‌گردد (*Stipe, J. G., 1946*).

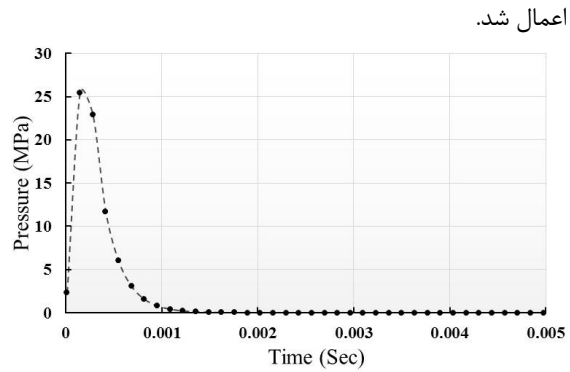
#### ۲-۱-۲- فشار انفجار بمب

به منظور محاسبه فشار انفجار از روابط ارائه شده در آیین‌نامه

بهینه سازی فاصله تونل های دوقولو در خاک های ماسه ای با رویکرد کاهش اثرات ناشی از انفجارهای سطحی



شکل ۳- مقاطع تونل های مورد بررسی در این پژوهش



اعمال شد.

## ۲-۲- خاک

در مدل سازی در نظر گرفته شده، بر اساس توصیه آیین نامه های طراحی سازه های مقاوم در برابر انفجار، خاک محدوده تونل از نوع ماسه ای لحاظ گردید. بر اساس آیین نامه ها، برخی ویژگی های مصالح ماسه ای مانند داشتن فضاهای خالی زیاد و چگالی نسبی پایین مانع از انتشار موج های انفجار می گردد. همچنین خاک های ماسه ای مقاومت بالاتری در برابر نفوذ بمب های نفوذگر ایجاد می کنند. مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) قابل مشاهده می باشد.

### جدول ۳- مشخصات مکانیک خاک در شبیه سازی

مدول ارتجاعی	ضریب ضریب	زاویه چسبندگی	دانسیتته خشک
MPa	-	deg	Kg/m <sup>3</sup>
۸۰	۰/۳	۳۲	۱۸۰۰
		KPa	
		۳	

## ۲-۳- سازه زیرزمینی

سازه زیرزمینی مورد بررسی در این پژوهش، تونل مهندسی با سه مقطع دایره ای، مستطیلی و نعل اسبی و با مشخصات نشان داده شده در شکل (۳) می باشد. سه نوع تونل اشاره شده در دو حالت تک و دوقولو مورد ارزیابی قرار می گیرد. جنس پوشش تونل از بتن و مشخصات ارائه شده در جدول (۴) در مدل سازی آن به کار گرفته شده است. به منظور مقایسه پذیر بودن نتایج، مساحت سطح مقطع تونل ها مشابه لحاظ شده است.

### جدول ۴- مشخصات مکانیکی پوشش تونل

مدول ارتجاعی	مقاومت فشاری	وزن مخصوص
GPa	MPa	Kg/m <sup>3</sup>
۲۷/۴	۳۰	۲۴۰۰

## ۲-۴- سایر جزئیات مدلسازی

به منظور مدلسازی نرم افزار *FLAC ver7* به کار گرفته شد. در این نرم افزار جهت رسیدن به دقت بالا در مدلسازی، در کلیه مراحل مدلسازی از زبان برنامه نویسی *fish* بهره گرفته شد. مدلسازی محیط خاکی با استفاده از المان های پیوسته و مدل سازی پوشش تونل با بهره گیری از المان های تیر برنامه ریزی گردید. المان های تیر از نوع دو گرهی و با سه درجه آزادی در هر گره می باشند و علاوه بر تحمل نیروی محوری و برشی، قابلیت تحمل لنگر خمشی را نیز دارند. با توجه به حفر تونل در محیط خاکی نیاز به مدل سازی عناصر واسطه بین پوشش تونل و خاک می باشد. مقادیر سختی مربوط به سطح مشترک بر اساس مقادیر ماکزیمم مدول برشی و بالک و بعد کمینه زون مجاور به دست آمد. میرایی مصالح از نوع میرایی رایلی انتخاب گردید. نسبت میرایی برای خاک برابر ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته شد که در فرکانس غالب مدل اعمال می شود. بعد از اختصاص میرایی به مصالح، برای مدل کردن شرایط بی نهایت در محیط و جهت به حداقل رساندن انعکاس امواج، برای مرزهای جانبی و تحتانی مدل شرایط مرزی میدان آزاد اختصاص داده شد.

### ۳- تحلیل‌های رفتاری و پارامتریک:

بر مبنای مولفه‌های ساختاری ذکر شده، مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC* و کد نویسی با زبان برنامه‌نویس *FISH* انجام گردید. مطالعات رفتاری بر روی چگونگی توزیع مقادیر نیرو و پارامترهای مبتنی بر نیرو در پوشش تونل در بخشی از پژوهش انجام شد و در ادامه، مطالعات پارامتریک با محوریت ارزیابی فاصله تونل‌های دو قولو و عمق آنها بر تاثیرپذیری پوشش تونل از تحریک انفجار صورت پذیرفت. در جدول (۵)، پارامترهای متغییر در تحلیل پارامتریک و در شکل (۴)، نمونه‌ای از مدل عددی ساخته شده پس از اعمال بار انفجار نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای متغییر در تحلیل پارامتریک

پارامتر مورد بررسی	تغییرات پارامتر در مسئله
فاصله تونل‌ها	۴، ۱ و ۷ (متر)
عمق تونل‌ها	۱۴، ۷ و ۲۱ (متر)
شکل تونل‌ها	دایره، مستطیل، نعل اسبی

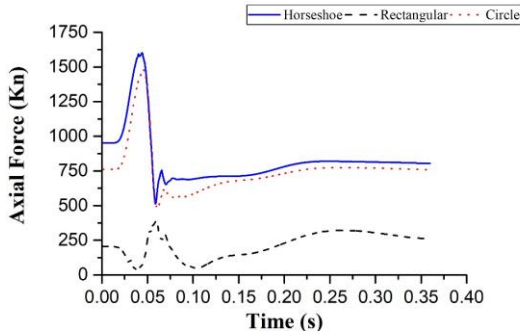


شکل ۴- نواحی تسلیم شده پس از وقوع انفجار

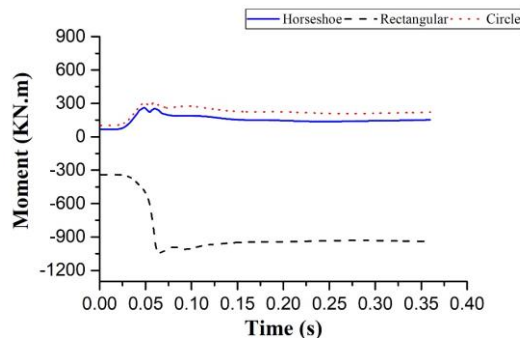
### ۳-۱- تاریخچه پارامترهای مبتنی بر نیرو در

#### پوشش تونل

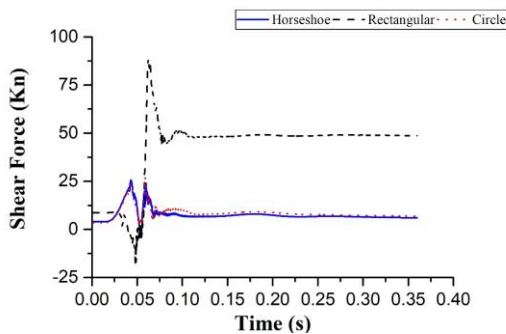
در طول تحریک انفجار مطابق شکل (۲)، پوشش تونل مقادیر مختلف نیرو را تجربه خواهد کرد. شکل مقطع تونل نقش بسزایی در توزیع و مقادیر ایجاد شده در پوشش تونل ایفا می‌کند. در ادامه در قالب شکل‌های (۵)، (۶) و (۷)، به ترتیب چگونگی تغییرات نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در بحرانی‌ترین نقطه پوشش تونل (مقادیر حداکثر)، نشان داده شده است. در سه شکل ذکر شده، تونل به صورت منفرد در عمق ۷ متر بوده و هندسه مسئله مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات نیروی محوری حداکثر در پوشش تونل



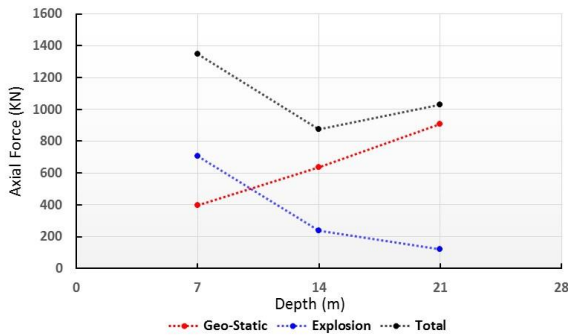
شکل ۶- تغییرات لنگر خمشی حداکثر در پوشش تونل



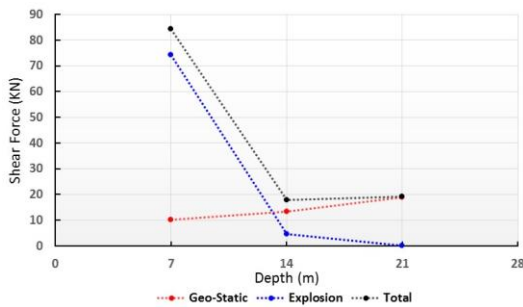
شکل ۷- نیروی برشی حداکثر در پوشش تونل

عرض از مبدأ سه نمودار بیانگر مقادیر نیروها و لنگرهای موجود در پوشش تونل تحت سربار استاتیکی (وزن خاک)، پیش از تحریک انفجار می‌باشد. مطابق شکل ۵، مشاهده می‌گردد که در تونل‌های مستطیلی، نیروی محوری اولیه کمتر از دو تونل دیگر بوده و از طرف دیگر در طول انفجار نیز، تغییرات نیروی محوری از دو حالت دیگر تونل کمتر می‌باشد. مطابق شکل ملاحظه می‌گردد که نیروی محوری در زمان تحریک انفجار، تغییر علامت می‌دهد و پوشش تونل، نیروی محوری کششی را تحت بار انفجار تجربه می‌کند؛ با این وجود بواسطه نیروی فشاری استاتیکی اولیه، هیچ قسمتی از مقطع تحت

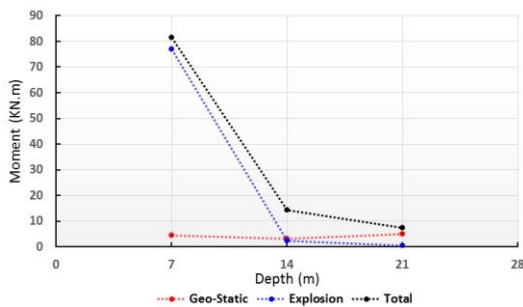
نیروهایی که پوشش تونل تجربه می کند، از دو ترم منتج می شود. ترم اول، نیروهای حاصل از وزن خاک بالادست تونل (نیروهای ژئواستاتیک) و ترم دوم نیروهای حاصل از تحریک انفجار می باشد. در شکل های (۹) الی (۱۱)، به ترتیب تفکیک نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در بحرانی ترین نقطه پوشش تونل (مقادیر حداکثر) برای تونل دایره ای با هندسه شکل (۸- $b$ ) و برای سه عمق ۷، ۱۴ و ۲۱ متر نشان داده شده است.



شکل ۹- تفکیک نیروی محوری حداکثر در پوشش تونل



شکل ۱۰- تفکیک نیروی برشی حداکثر در پوشش تونل

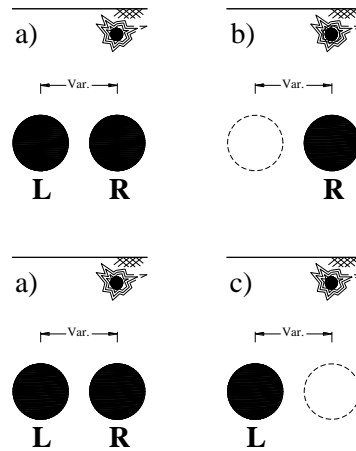


شکل ۱۱- تفکیک لنگر خمشی حداکثر در پوشش تونل

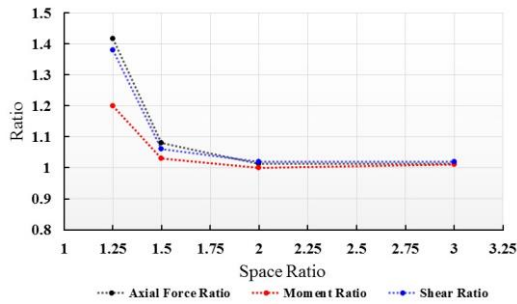
شرایط مورد بررسی در این پژوهش، تحت نیروی کششی قرار نمی گیرد. بر خلاف نیروی محوری، لنگر خمشی اولیه و تغییرات لنگر خمشی در طول تحریک، در مقطع مستطیلی نسبت به دو مقطع دیگر بیشتر می باشد (شکل ۶). مطابق شکل (۷)، در طول تحریک انفجار، تاثیر پذیری مقطع مستطیلی در نیروی برشی نیز از دو مقطع دیگر چشمگیرتر است. از نکات قابل تامل دیگر در شکل (۶)، ایجاد نیروی برشی پسماند در مقطع مستطیلی پس از اتمام تحریک انفجار می باشد. مطابق شکل، پس از اتمام تحریک انفجار بر خلاف دو مقطع دیگر، نیروی برشی از مقادیر ژئواستاتیک اولیه فاصله داشته و لذا پس از انفجار تنش های برشی پسماند ناشی از انفجار در لاینینگ باقی خواهند ماند.

### ۳-۲- توزیع پارامترهای مبتنی بر نیرو در پوشش تونل

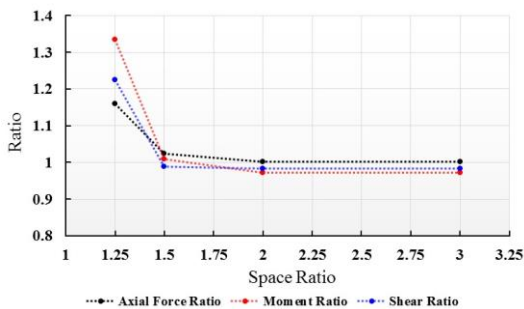
پیش از ارزیابی اثر فاصله تونل های دوقولو بر تاثیرپذیری آن از تحریک انفجار که موضوع اصلی پژوهش حاضر می باشد، در این بخش به ارزیابی چگونگی توزیع پارامترهای مبتنی بر نیرو در مقطع دایره ای در طول تحریک انفجار پرداخته می شود. چگونگی توزیع پارامترها در سایر مقاطع در پژوهش های دیگر قابل بررسی است. در شکل (۸)، شرایط هندسی مسئله در دو حالت تونل تکی و تونل دوقولو ترسیم شده است. در شکل (a)، مدل سازی تونل بصورت دوقولو در نظر گرفته می شود و در شکل های (b) و (c)، تونل های تکی در دو موقعیت متناظر با تونل سمت چپ و تونل سمت راست برای مدل سازی در نظر گرفته می شوند.



شکل ۸- موقعیت تونل ها در مدل سازی عددی



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر پارامترهای مبتنی بر نیرو در تونل R در مقایسه با تونل دوقولو



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر پارامترهای مبتنی بر نیرو در تونل L در مقایسه با تونل دوقولو

در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با قرارگیری تونل‌ها در مجاورت یکدیگر، مقادیر پارامترهای مبتنی بر نیرو تا ۴۰ درصد نسبت به حالت تونل تک افزایش می‌یابد. با فاصله گرفتن دو تونل از یکدیگر به میزان ۲ برابر قطر هر یک از تونل‌ها، اثرات اندرکنش دو تونل بر یکدیگر ناچیز می‌شود. ازینرو می‌توان فاصله به میزان ۲ برابر قطر تونل را فاصله تاثیر و حد اندرکنش دو تونل در برابر بارگذاری انفجار دانست. نتایج مشابهی در شکل (۱۳) قابل مشاهده می‌باشد. با مقایسه دو شکل ملاحظه می‌گردد که حضور تونل L، سبب افزایش بیشتری در مقادیر نیروی محوری در تونل R شده است؛ حال آنکه حضور تونل R، تاثیر بیشتری بر مقادیر لنگر خمشی موجود در تونل L داشته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، اثر شکل تونل بر تاثیرپذیری آن از تحریک انفجار پرداخته شد. همچنین تاثیرپذیری تونل‌های با مقطع دایره‌ای در حالت دوقولو از تحریک انفجار مورد بررسی قرار

مطابق نتایج ملاحظه می‌گردد که در عمق ۷ متر، تاثیرپذیری پوشش تونل از تحریک انفجار (ترم دوم) بسیار چشمگیرتر از اعماق ۱۴ و ۲۱ متر می‌باشد. نتایج مشابهی توسط  $De$  در سال ۲۰۱۲ و  $De$  و همکاران در سال ۲۰۱۳ بدست آمده است. مطابق نتایج، با افزایش عمق، افت ایجاد شده در مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی در مقایسه با نیروی محوری به مراتب بیشتر است. بر اساس نتایج ملاحظه می‌شود که در تونل‌های با مقطع دایره‌ای، پیش از انفجار، نیروی محوری ناشی از شرایط ژئواستاتیک، مقادیر تعیین کننده‌ای دارد. با این وجود، پس از انفجار، مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی در مقایسه با مقادیر ناشی از شرایط ژئواستاتیک چشمگیر خواهد بود. از دیگر موارد قابل بررسی در شکل (۹)، کاهش مجموع مقادیر نیروی محوری کل با افزایش عمق به ۱۴ متر و سپس افزایش مجدد نیروی محوری کل با افزایش عمق به ۲۱ متر می‌باشد. در عمق ۷ متر، عامل افزایش نیروی محوری، تحریک انفجار و در عمق ۲۱ متر، عامل افزایش نیرو، وزن خاک بالادست تونل می‌باشد.

با مشخص شدن سهم تحریک انفجار در مقادیر نیروهای داخلی موجود در پوشش تونل تکی، در ادامه به مقایسه تاثیرپذیری پوشش تونل در حالت دوقولو نسبت به حالت تکی در طول انفجار پرداخته می‌شود. بدین منظور در دو حالت شرایط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در حالت اول، مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در تونل R در شکل ۸-  $a$  و تونل R در شکل ۸-  $b$  مورد مقایسه قرار گرفته و در حالت دوم، مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در تونل L در شکل ۸-  $a$  و تونل L در شکل ۸-  $c$  مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این شکل‌ها، محور قائم بیانگر نسبت پارامترهای مبتنی بر نیرو (شامل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی) در حالت تونل دوقولو به حالت تونل تکی می‌باشد و محور افقی برابر با نسبت فاصله مرکز به مرکز دو تونل به قطر تونل تکی لحاظ شده است. هدف ازین مقایسه، بررسی تاثیر حضور تونل مجاور بر کاهش و یا افزایش مقادیر پارامترهای مبتنی بر نیرو نسبت به تونل تکی می‌باشد. نتایج حالت اول در شکل (۱۲) و نتایج حالت دوم در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

بهینه سازی فاصله تونل های دوقولو در خاک های ماسه ای با رویکرد کاهش اثرات ناشی از انفجارهای سطحی

گرفت. مهمترین نتایج به شرح زیر می باشد.

۱. در طول انفجار، لاینینگ تونل نیروی محوری کششی را تحت بار انفجار تجربه می کند؛ با این وجود در تونل های شهری با عمق متعارف بواسطه نیروی فشاری ژئواستاتیکی اولیه، به کشش افتادن مقطع چندان محتمل نمی باشد.

۲. تاثیر پذیری مقطع مستطیلی از انفجار در پارامترهای لنگر خمشی و نیروی برشی به مراتب بیشتر از دو مقطع دیگر مورد مقایسه می باشد. با این وجود در خصوص نیروی محوری، عکس این مطلب صادق می باشد.

۳. در محدوده پژوهش انجام شده ملاحظه شد که مجموع مقادیر نیروی محوری کل با افزایش عمق به ۱۴ متر کاهش یافته و سپس با افزایش عمق به ۲۱ متر افزایش می یابد. در عمق ۷ متر، عامل افزایش نیروی محوری، تحریک انفجار و در عمق ۲۱ متر، عامل افزایش نیرو، وزن خاک بالادست تونل می باشد.

۴. در محدوده پژوهش انجام شده ملاحظه شد که با قرارگیری تونل ها در مجاورت یکدیگر، مقادیر پارامترهای مبتنی بر نیرو تا ۴۰ درصد نسبت به حالت تونل تک افزایش می یابد. با فاصله گرفتن دو تونل از یکدیگر به میزان ۲ برابر قطر هر یک از تونل ها، اثرات اندرکنش دو تونل بر یکدیگر ناچیز می شود. ازینرو می توان فاصله به میزان ۲ برابر قطر تونل را فاصله تاثیر و حد اندرکنش دو تونل در برابر بارگذاری انفجار دانست.



- Verma, A. K., Jha, M. K., Mantrala, S., & Sitharam, T. G. (2017). Numerical Simulation of Explosion in Twin Tunnel System. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 1953-1966.
- Feldgun, V. R., Kochetkov, A. V., Karinski, Y. S., & Yankelevsky, D. Z. (2008). Internal blast loading in a buried lined tunnel. *International Journal of Impact Engineering*, 35(3), 172-183.
- Jiang, N., & Zhou, C. (2012). Blasting vibration safety criterion for a tunnel liner structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 52-57.
- Papanikolaou, V. K., & Kappos, A. J. (2014). Practical nonlinear analysis of unreinforced concrete tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 127-140.
- Davies, M. C. R., & Williams, A. J. (1992). Centrifuge modelling the protection of buried structures subjected to blast loading. In *Structures Under Shock and Impact II: Proceedings of the Second International Conference, held in Portsmouth, UK, 16th-18th June, 1992* (pp. 663-674). Thomas Telford Publishing.
- De, A. (2012). Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 43, 72-79.
- De, A., Morgante, A. N., & Zimmie, T. F. (2013). Mitigation of blast effects on underground structure using compressible porous foam barriers. In *Poromechanics V: Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics* (pp. 971-980).
- Wang, Z., Lu, Y., Hao, H., & Chong, K. (2005). A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. *Computers & Structures*, 83(4-5), 339-356.
- Lu, Y., Wang, Z., & 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*, 25(4), 275-288.
- Luo, K. S., Wang, Y., Zhang, Y. T., & Huang L. K. (2007). Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 6, 022.
- Mussa, M. H., Mutalib, A. A., Hamid, R., Naidu, S. R., Radzi, N. A. M., & Abedini, M. (2017). Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 66, 64-76.
- Wang, P., Jiang, M., Zhou, J., Wang, B., Feng, J., Chen, H., ... & Jin, F. (2018). Spalling in concrete arches subjected to shock wave and CFRP strengthening effect. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 74, 10-19.
- Stipe, J.G. (1946). Terminal ballistics of soil, effects of impacts and explosions, Summary Technical Report of Division 2, NDCE, Vol. 1, Washington.
- United States. Dept. of the Army. (1986). *Fundamentals of protective design for conventional weapons*. Headquarters, Department of the Army.
- Gui, M. W., & Chien, M. C. (2006). Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(2), 227-248.
- محمدحسین تقوی و صفا پیمان، " تحلیل و بررسی بارگذاری انفجاری سازه‌های زیرزمینی بتن مسلح تحت اثر انفجار مدفون " نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۱، سال ۱۳۹۸، صفحات ۳ تا ۱۸