

## بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع تونل در عملکرد لایه نگهدارنده تحت اثر بارگذاری انفجار خارجی

حسین انتظاری زارچ<sup>۱</sup>، قاسم دهقانی اشکذری<sup>۲</sup>، کاظم برخوردار باغفی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه یزد، ۲- استادیار دانشکده آمایش و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه یزد  
(دریافت: ۹۲/۰۳/۰۷، پذیرش: ۹۲/۳/۲۱)

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش تفاضل محدود به بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع تونل و فاصله نسبی ماده منفجره در عملکرد لایه نگهدارنده تونل تحت اثر بارگذاری انفجار خارجی سطحی پرداخته شده است. تونل‌های مدل‌سازی شده دارای سه مقطع مستطیلی، نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای می‌باشند که طراحی ابعاد آن‌ها بر اساس ضوابط موجود در آیین‌نامه شماره ۱۶۱ ایران (طرح هندسی راه‌ها) صورت گرفته است. برای بررسی تأثیر فاصله نسبی ماده منفجره، مرکز انفجار در روی سطح زمین در فواصل افقی مختلف نسبت به مرکز تاج تمامی تونل‌ها قرار داده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هنگام رویداد انفجار سطحی، عملکرد تونل‌های نعل‌اسبی نسبت به دو شکل مقطع دیگر مناسب‌تر می‌باشد. همچنین در مورد تمامی تونل‌ها افزایش فاصله افقی مرکز انفجار از مرکز تاج تونل باعث شده است که حداکثر جابه‌جایی قائم به وجود آمده در مرکز تاج تونل، کاهش و مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و تنش عمودی به وجود آمده در لایه نگهدارنده تونل‌ها، ابتدا به میزان اندکی افزایش و سپس کاهش یابند.

**کلید واژه‌ها:** بارگذاری انفجار، شکل مقطع تونل، روش تفاضل محدود، تحلیل دینامیکی.

## Investigation of the Effects of Tunnel Cross-Section Geometry on the Performance of the Lining Structure Subjected to External Blast Loading

H. Entezari Zarch, Gh. Dehghani Ashkezari, K. Barkhordari Bafghi\*

Department of Civil Engineering, University of Yazd

(Received: 28/05/2013; Accepted: 11/06/2014)

### Abstract

*In this study, the effects of tunnel cross-section geometry and relative position of the explosives on the performance of the lining structure subjected to external blast loading have been investigated using finite difference method. The cross-section geometry of the modeled tunnels considered as rectangular, horseshoe and semicircle and designed based on the regulation proposed in the Iranian code No. 161(Geometric Design of Roads). To evaluate the effect of the explosive relative distance, the blast center on the ground surface was assumed at different distances relative to the center of tunnel crown. The results indicated that under the surface blast, the performance of the horseshoe cross-section tunnels was more suitable than the others. Furthermore, for the all cross-section types, the increase of blast center distance relative to the center of tunnel crown resulted in a reduction in the maximum vertical displacement of the center of tunnel crown. This was observed together with an initial increase and then reduction in the maximum values of axial force, bending moment and normal stress in the lining of tunnels.*

**Keywords:** Blast Loading, Cross-Section of Tunnel, Finite Difference Method, Dynamic Analysis.

\* Corresponding Author Email: kbarkhordari@yazd.ac.ir

## ۱. مقدمه

بلکه معمولاً بارگذاری انفجار به وسیله یک تاریخچه زمانی فشار یا سرعت اعمال شده بر مرز مدل، ساده‌سازی می‌شود [۷]. از آن جمله می‌توان به مطالعات یانگ اشاره کرد. یانگ پاسخ سازه زیرزمینی را تحت اثر بار انفجار سطحی در برابر افزایش عمق سازه و اندازه آن را بررسی کرد [۸]. همچنین گویی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به مطالعه تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده، میرایی خاک و شدت بار انفجاری بر روی تونل‌ها پرداخت [۹]. لیو به تحلیل پاسخ غیرخطی تونل‌های زیرزمینی تحت بارگذاری انفجار پرداخت [۱۰]. اسماعیلی و فلاح‌زاده در سال ۱۳۸۸ به مطالعه عددی پدیده انتشار امواج فشاری ناشی از انفجار در خاک و اثر آن بر تونل زیرزمینی خط ۷ متروی تهران پرداختند [۱۱].

ناگی و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر عمق قرارگیری ماده منفجره در انفجار مدفون و همچنین تأثیر انفجار سطحی بر روی سازه‌های مدفون پرداختند [۱۲ و ۱۳]. میرزینی و هاشمی در سال ۱۳۸۹ با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به بررسی تأثیر انفجار پرتابه‌ها بر تونل‌های مترو در خاک‌های درشت‌دانه پرداختند [۱۴].

در روش جدانشده کامل هر سه مرحله اشاره شده در یک مدل در نظر گرفته می‌شوند. اخیراً تعدادی شبیه‌سازی عددی به این روش صورت پذیرفته است. برای مثال ونگ و لو خاک نزدیک محل انفجار را با استفاده از روش SPH و سازه و خاک دور از محل انفجار را با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی کردند [۱۵]. صادق‌آذر و همکاران به وسیله برنامه‌های ANSYS-AUTODYN به ارزیابی پاسخ سازه‌های بتن مسلح مدفون تحت اثر انفجار سطحی پرداختند. آن‌ها از مدل عددی جدانشده کاملی برای شبیه‌سازی رفتار سازه بتن مسلح مدفون تحت اثر بار انفجاری استفاده نمودند [۷].

در این پژوهش با شبیه‌سازی دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC به مقایسه رفتار تونل‌های با شکل مقطع مستطیلی، نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای تحت اثر بارهای ناشی از انفجار سطحی پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در دسته روش‌های جدانشده غیرکامل می‌باشند، زیرا بارهای ناشی از انفجار در سطح زمین به وسیله تاریخچه‌های زمانی فشار اعمال شده بر مرز مدل، ساده‌سازی شده‌اند.

بررسی مطالعات منتشر شده در زمینه اثر انفجار بر روی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی نشان می‌دهد که در زمینه بررسی تأثیر شکل مقطع تونل بر عملکرد سازه نگهدارنده آن در هنگام انفجار تحقیقاتی صورت نگرفته است یا نتایج آن در دسترس نمی‌باشد. این در حالی است که شکل سازه و زاویه بین راستای انتشار موج و سطحی از سازه که در مقابل موج انفجار می‌باشد، بر میزان تقویت و انعکاس امواج حاصل از انفجار تأثیر می‌گذارد و انتخاب شکل مقطع مناسب برای سازه می‌تواند در کاهش میزان فشارهای وارد بر سازه در اثر

پاسخ سازه‌های زیرزمینی در برابر بارهای انفجاری موضوع مهمی در مهندسی پدافند غیرعامل است. مطالعات انجام گرفته در این زمینه را می‌توان به سه دسته: مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی دسته‌بندی نمود. با توجه به اینکه آزمایش‌های مربوط به پدیده انفجار مستلزم صرف هزینه‌های زیادی می‌باشند و نیازمند امکانات و تجهیزات خاصی هستند، در این زمینه مطالعات آزمایشگاهی کمتری صورت گرفته است. در سال‌های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۹، اسمیت و دالریوا آزمایش‌هایی را بر روی قوس‌های بتنی مدفون در خاک تحت اثر بار انفجار سطحی انجام داده‌اند [۱] و [۲]. بلانچت، اهنو و دی به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ به مطالعه اثر بارهای انفجار سطحی بر روی سازه‌های زیرزمینی پرداختند [۳-۵].

انجام مطالعات میدانی در زمینه اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی علاوه بر صرف هزینه‌های زیاد، عوارض دیگری چون آلودگی‌های زیست محیطی را نیز به دنبال دارد که انجام آن‌ها را با محدودیت‌هایی روبه‌رو کرده است. مطالعات میدانی انجام گرفته در این زمینه محدود است و از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های انجام شده توسط ایشیکاوا که در سال ۲۰۰۶ برای بررسی رفتار سه نوع تونل مستقیم، شاخه‌ای و شبکه‌ای انجام گرفته بود، اشاره نمود [۶].

به علت محدودیت‌های زیاد انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، شبیه‌سازی‌های عددی مناسب‌ترین گزینه مورد پذیرش می‌باشند. از طرفی دیگر به علت آنکه پروسه فیزیکی انفجار و انتشار امواج ناشی از آن خیلی پیچیده می‌باشد، شبیه‌سازی کامل و صحیح این پدیده نیازمند مدل‌های پیچیده و صحیح برای بررسی بارگذاری و پاسخ‌های مواد می‌باشد. روند شبیه‌سازی پروسه انفجار و اثر آن بر روی سازه‌ها را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم‌بندی کرد:

- پروسه انفجار و شکل‌گیری گودال ناشی از آن
- انتشار امواج ناشی از انفجار
- پاسخ سازه

بر اساس همین سه مرحله، روش‌های عددی را می‌توان به سه دسته جداشده، جدانشده غیرکامل و جدانشده کامل طبقه‌بندی کرد. در روش جداشده ابتدا تاریخچه تنش‌های صحرائی محاسبه شده و سپس این تنش‌ها به عنوان شرایط مرزی بر سازه اعمال می‌شوند و در نهایت پاسخ سازه به دست می‌آید. در این روش اندرکنش بین خاک و سازه به صورت واقعی در نظر گرفته نمی‌شود [۷]. تحلیل‌های متعددی با استفاده از این رویه صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعه یانگ اشاره نمود [۸].

در روش جدانشده غیرکامل، دو مرحله اول و یا دو مرحله دوم با هم ترکیب می‌شوند و سه مرحله فوق به دو مرحله کاهش می‌یابد که مهم‌ترین آن‌ها روش‌های تفاضل محدود، اجزا محدود و روش‌های هیبریدی می‌باشند. این روش‌ها پروسه انفجار را در بر نمی‌گیرند،

برای سامانه نگهداری تونل‌ها از پوشش بتنی با ضخامت ۰/۳ متر استفاده شده است که مشخصات آن در جدول (۲) قابل مشاهده است. برای مدل‌سازی رفتار سطح مشترک خاک و نگهدارنده بتنی، چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به این سطح از روابط (۱ و ۲) محاسبه شده است:

$$C = \frac{2}{3} C_{soil} \quad (1)$$

$$\tan \phi = \frac{2}{3} \tan \phi_{soil} \quad (2)$$

که در آن،  $C_{soil}$  و  $\phi_{soil}$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند.

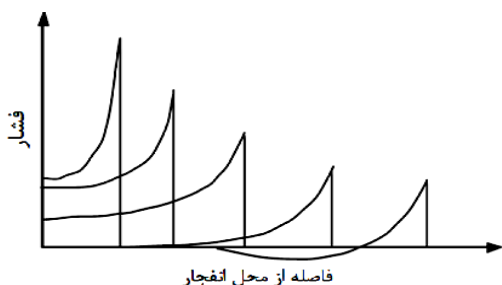
جدول ۲. مشخصات پوشش بتنی تونل‌ها

جرم مخصوص ( $kg/m^3$ )	۲۴۰۰
مقاومت فشاری ( $N/m^2$ )	۲۸
مدول الاستیسیته (MPa)	۲۷۴۰۰
ضریب پواسون	۰/۱۷
ضخامت (m)	۰/۳

معمولاً برای خاک‌ها مقدار میرایی بین ۰/۲ تا ۰/۵٪ در نظر گرفته می‌شود که در این مدل‌سازی‌ها مقدار میرایی ۰/۵٪ در نظر گرفته شده است.

#### ۴. مشخصات انفجار و بارهای ناشی از آن

در هنگام رویداد انفجار، واکنش شیمیایی در مدت زمان بسیار کم، مقدار عظیمی از گازها را 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 ایجاد می‌شود که به سمت خارج از محیط گسترده می‌شود. بدین ترتیب موج انفجار ایجاد و در هوا منتشر می‌گردد. همانند شکل (۲) با دور شدن از منبع انفجار مقدار بیش فشار و ضربه موج کاهش می‌یابد.



شکل ۲. افت فشار نسبت به فاصله از محل انفجار

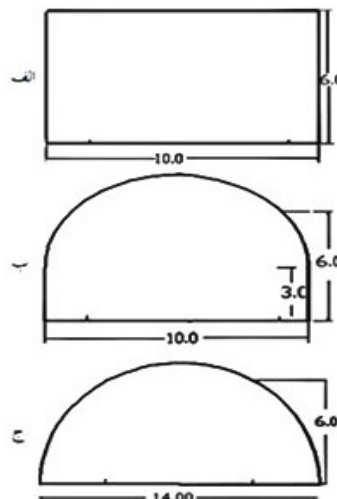
موج حاصل از انفجار دارای دو فاز است. در فاز اول که به فاز مثبت یا فاز فشاری موسوم است، فشار انفجار از فشار پیرامونی

انفجار تأثیر قابل توجهی داشته باشد. همچنین شکل سازه در توزیع نیروها و لنگرهای داخلی مؤثر می‌باشد. به همین علت انجام پژوهش در ارتباط با موضوع مقاله حاضر ضرورت می‌یابد.

#### ۲. ابعاد تونل‌ها

برای بررسی تأثیر شکل مقطع تونل ابتدا باید ابعاد مقاطع مختلف را بر اساس پاسخ‌گویی به یک نیاز خاص طراحی نمود. در این پژوهش ابعاد این مقاطع بر اساس ضوابط موجود در آیین‌نامه وزارت راه و شهرسازی برای طراحی راه‌های دو طرفه انتخاب شده است. مطابق ضوابط موجود در آیین‌نامه، عرض مورد نیاز برای تونل‌های با دیواره مقعر در جاده‌های ۲ طرفه، ۱۰ متر و برای حالتی که دیواره تونل قائم باشد، ۱۰/۳۰ متر می‌باشد. در این پژوهش برای تمامی تونل‌ها عرض ۱۰ متر در نظر گرفته شده است.

این آیین‌نامه حداقل ارتفاع مورد نیاز از سطح سواره‌رو تا تأسیسات تونل مانند روشنایی و سامانه‌های تهویه را ۵/۲ متر تعیین نموده است [۱۶]. بر این اساس در تمامی مقاطع، ارتفاع از لبه‌های سطح سواره‌رو تا پوشش تونل، ۶ متر در نظر گرفته شده است. بر اساس این ملاحظات، ابعاد هر یک از مقاطع به صورت شکل (۱) انتخاب گردیده است.



شکل ۱. ابعاد تونل‌ها (الف) مستطیلی، (ب) نعل‌اسبی و (ج) نیم‌دایره‌ای

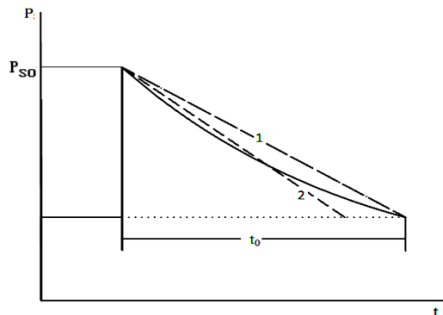
#### ۳. ویژگی‌های مصالح

مشخصات مربوط به خاک محیط اطراف تونل‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک

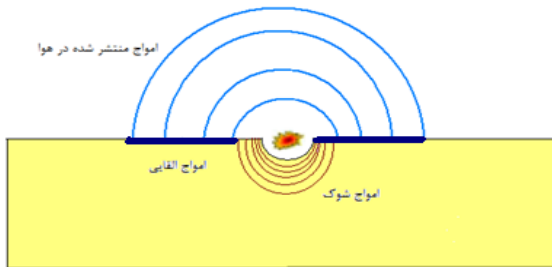
جرم مخصوص ( $kg/m^3$ )	۱۸۰۰
ضریب پواسون	۰/۳
مدول الاستیسیته (MPa)	۸۰
چسبندگی (kPa)	۳۰
زاویه اصطکاک داخلی	۳۲

به صورت امواج با جبهه نیم‌کروی در هوا منتشر می‌گردد. همچنین باید توجه داشت که امواج نیم‌کروی منتشر شده در هوا نیز بر روی سطح زمین فشار وارد می‌کنند (امواج القایی) [۱۹].



شکل ۵. منحنی‌های بیش‌فشار- زمان موج انفجار: حالت‌های واقعی، برابری ضربه، محافظه کارانه [۱۸]

در اکثر پژوهش‌هایی که در گذشته در زمینه بررسی اثر انفجار سطحی انجام شده، فقط فشارهای وارده به دیواره گودال (اثر امواج شوک) در نظر گرفته شده و اثر امواج القایی نادیده گرفته شده است. اما در این پژوهش اثر توأم امواج شوک و القایی در نظر گرفته شده و علاوه بر اینکه در پژوهش‌های قبلی به اثر شکل مقطع پرداخته نشده است، این نحوه بارگذاری نیز یکی از تفاوت‌های این پژوهش با پژوهش‌های قبلی انجام گرفته در زمینه اثر انفجار سطحی بر روی تونل‌ها و فضاهاى زیرزمینی می‌باشد.



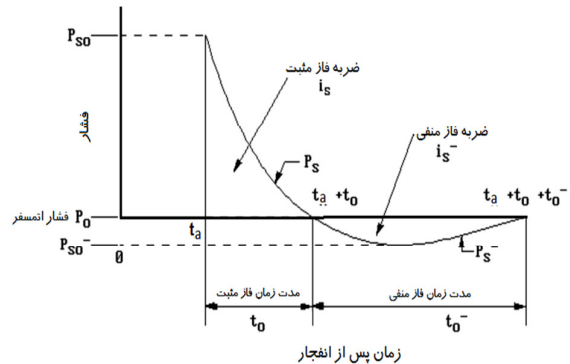
شکل ۶. امواج منتشر شده در اثر انفجار روی سطح زمین

حداکثر بیش‌فشار در میدان آزاد زمین (وارده به دیواره گودال انفجار) بر حسب کیلوپاسگال از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$P_{so} = 0.0488 f_c \rho_s C \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\rho_s$  چگالی خاک بر حسب  $(kg/m^3)$  و  $C$  سرعت موج بارگذاری بر حسب  $(m/s)$  می‌باشد که در ادامه تعریف شده‌اند.  $W$  جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم و  $R$  فاصله تا محل انفجار بر حسب متر می‌باشد.  $f_c$  ضریب وابستگی یا تأثیر عمق می‌باشد و به عمق انفجار (فاصله مرکز ماده منفجره تا سطح) و نیز محیطی که در آن انفجار رخ می‌دهد، وابسته می‌باشد و از نمودار شکل (۷) محاسبه می‌گردد.  $n$  ضریب کاهندگی می‌باشد و نحوه محاسبه آن در ادامه توضیح داده می‌شود.

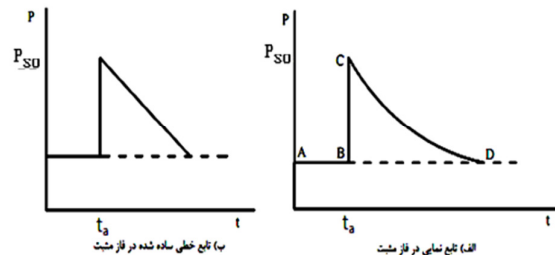
بیشتر است، پس از فاز مثبت و با گذر زمان فشار انفجار به حد فشار اتمسفر ( $P_0$ ) کاهش یافته و سپس فاز منفی با ایجاد مکش آغاز می‌شود. در شکل (۳)، موج حاصل از انفجار نشان داده شده است، در این شکل  $P_{so}$  مقدار حداکثر بیش‌فشار و  $P_{so}^-$  حداقل فشاری است که ذرات احساس می‌کنند. زمان رسیدن موج انفجار به نقطه مورد نظر و  $t_0$  مدت تداوم فاز مثبت موج انفجار می‌باشد [۱۷].



شکل ۳. تغییرات بیش‌فشار- زمان در میدان آزاد [۱۷]

معمولاً برای سهولت، پالس انفجار به شکل نمایی یا مثلثی در نظر گرفته می‌شود و برای طراحی اعضای سازه‌ای از فاز منفی صرف نظر می‌شود (شکل ۴).

در اکثر تحقیقات انجام شده، سازه‌ها تحت نمودار بیش‌فشار ساده شده بارگذاری شده‌اند و نتایج نشان می‌دهند که برای بسیاری از اهداف محاسباتی تقریب‌های فوق رضایت‌بخش می‌باشند. هنگامی که روش و رویکردی محتاطانه برای تاریخچه فشار مورد نظر باشد، می‌توان همانند شکل (۵) برای تبدیل تابع نمایی به شکل مثلثی ساده از خط ۱ استفاده نمود. در روشی دیگر برای اینکه مقدار ضربه در دو حالت برابر باشد از خط ۲ استفاده می‌شود به گونه‌ای که سطح زیر منحنی‌های نمایی و خطی با هم مساوی باشند [۱۸].



شکل ۴. نمودار بیش‌فشار- زمان ساده شده [۱۸]

در این پژوهش فرض شده است که ماده منفجره TNT و جرم آن ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد. همچنین این مقدار ماده منفجره بر روی سطح زمین قرار دارد و انفجار روی سطح زمین رخ می‌دهد (شکل ۶).

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، هنگامی که انفجار سطحی رخ می‌دهد بخشی از انرژی ناشی از انفجار از طریق امواج شوک به دیواره گودال در زمین منتقل می‌شود و بخشی دیگر

زمان رسیدن موج به دیواره گودال  $t_a$  از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$t_a = \frac{R}{c_s} \quad (۶)$$

که در این رابطه  $R$  فاصله از مرکز انفجار بر حسب متر است و  $c_s$  سرعت لرزه‌ای خاک بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. مدت زمان تداوم اضافه فشار با فرض تاریخچه زمانی مثلی از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$t_0 = 2 \frac{I_s}{P_{s0}} \quad (۷)$$

که در این رابطه،  $I_s$  ضربه در میدان آزاد زمین (رابطه ۸) و  $P_{s0}$  حداکثر بیش فشار در میدان آزاد زمین (رابطه ۳) می‌باشد [۱۸].

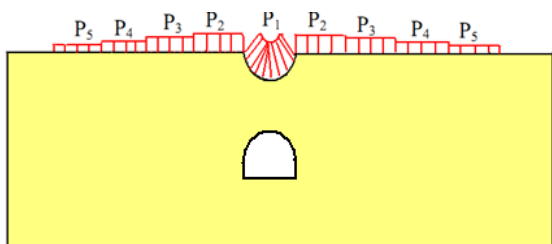
$$I_s = 0.019 f_c \rho_s W^{1/3} \frac{C}{c_s} \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{1-n} \quad (۸)$$

مدت زمان رسیدن مقدار فشار از صفر تا مقدار بیشینه آن، بسیار اندک می‌باشد. با فرض تاریخچه زمانی مثلی، معمولاً این مدت زمان، ۱۰٪ مدت زمان تداوم اضافه فشار در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه تاریخچه‌های فشار ناشی از امواج القایی که به سطح زمین اعمال می‌شوند، فرض شده است که این تاریخچه‌ها در کل مساحت هر نوار دایروی از سطح زمین به عرض ۵ متر در اطراف گودال انفجار یکنواخت می‌باشد (همانند شکل ۸) و برای محاسبه آن‌ها از شکل (۹) استفاده شده است.

با محاسبه فاصله مقیاس شده  $Z$  از رابطه (۹) پارامترهای مربوط به تاریخچه فشار از شکل (۹) به دست می‌آیند.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (۹)$$



شکل ۸. فشارهای اعمال شده در اثر انفجار روی سطح زمین

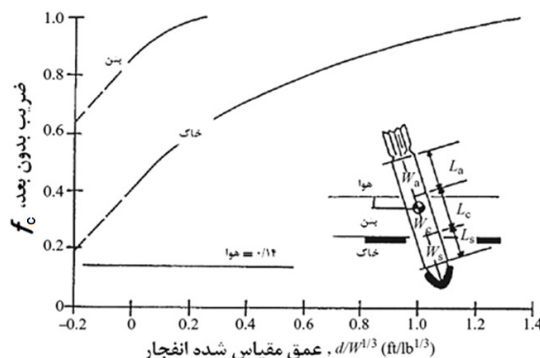
در رابطه (۹)،  $R$  فاصله انفجار تا محل (بر حسب متر) و  $W$  جرم معادل ماده منفجره (بر حسب کیلوگرم) می‌باشد. فاصله  $R$  برای هر نوار دایروی، برابر فاصله خط مرکزی آن نوار (شعاع دایره‌ای که از وسط عرض نوار می‌گذرد) تا مرکز ماده منفجره در نظر گرفته شده است.

پارامترهایی که از منحنی‌های شکل (۹) برآورد می‌شوند، عبارتند از:

$$\frac{t_0}{W^{1/3}}: \text{مدت تداوم فاز مثبت مقیاس شده بر حسب } \left( \frac{ms}{lb^{1/3}} \right)$$

$$P_{s0}: \text{حداکثر بیش فشار برخوردی فاز مثبت بر حسب (psi)}$$

$$\frac{t_a}{W^{1/3}}: \text{زمان رسیدن موج انفجار مقیاس شده بر حسب } \left( \frac{ms}{lb^{1/3}} \right)$$



شکل ۷. ضریب  $f_c$  نسبت به عمق مقیاس شده انفجار [۱۸]

سرعت موج بارگذاری  $C$  تابعی از سرعت لرزه‌ای  $C_s$  و حداکثر سرعت ذره  $V_0$  است. در فاصله‌های کوتاه، به دلیل زیاد بودن سرعت ذرات، سرعت موج بارگذاری نیز زیاد می‌باشد و با افزایش فاصله این مقدار به حداقل مقدار خود که سرعت لرزه‌ای  $C_s$  می‌باشد، کاهش می‌یابد. برای انواع خاک‌ها،  $C$  را می‌توان از جدول (۳) محاسبه نمود.

جدول ۳. مقادیر  $C$  برای انواع خاک‌ها [۱۸]

نوع خاک	$C$
رس فوق اشباع	$C = c_s$
رس اشباع	$C = 0.6c_s + \left( \frac{n+1}{n-2} \right) V_0 > c_s$
ماسه	$C = c_s + \left( \frac{n+1}{n-2} \right) V_0$

سرعت لرزه‌ای  $C_s$  را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) محاسبه نمود:

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (۴)$$

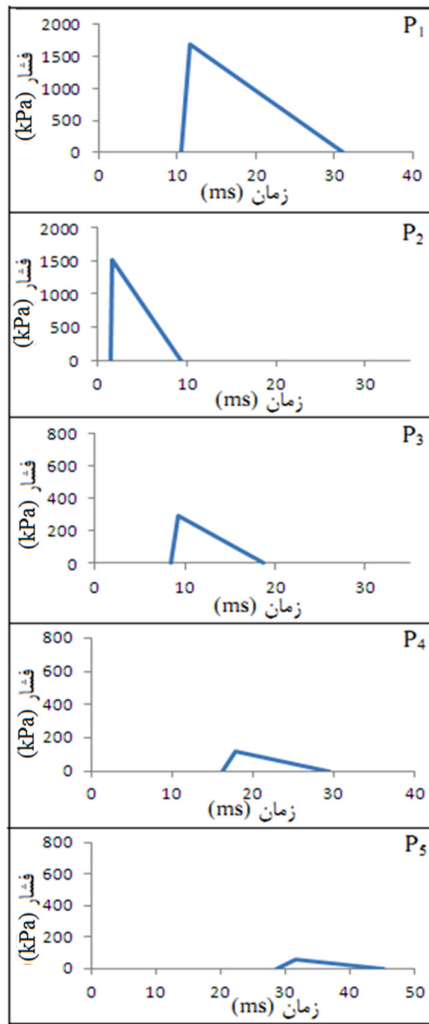
که در آن،  $E$  مدول الاستیسیته خاک است. حداکثر سرعت ذره ( $V_0$ ) نیز برحسب  $m/s$  از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$V_0 = 48.8 f_c \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (۵)$$

ضریب کاهندگی  $n$  یا اثر خاک در میرا نمودن انرژی موج انفجار را می‌توان از طریق آزمایش فشاری تک‌محوری غیر محصور به دست آورد. ضریب کاهندگی  $n$  چند نمونه از خاک‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. ضریب کاهندگی ( $n$ ) چند نوع خاک [۱۸]

نوع خاک	ضریب کاهندگی ( $n$ )
رس اشباع	۱/۵
رس نیمه اشباع و سیلت	۲/۵
ماسه خیلی متراکم (خشک یا مرطوب)	۲/۵
ماسه متراکم (خشک یا مرطوب)	۲/۷۵
ماسه سست (خشک یا مرطوب)	۳
ماسه خیلی سست (خشک یا مرطوب)	۳/۲۵



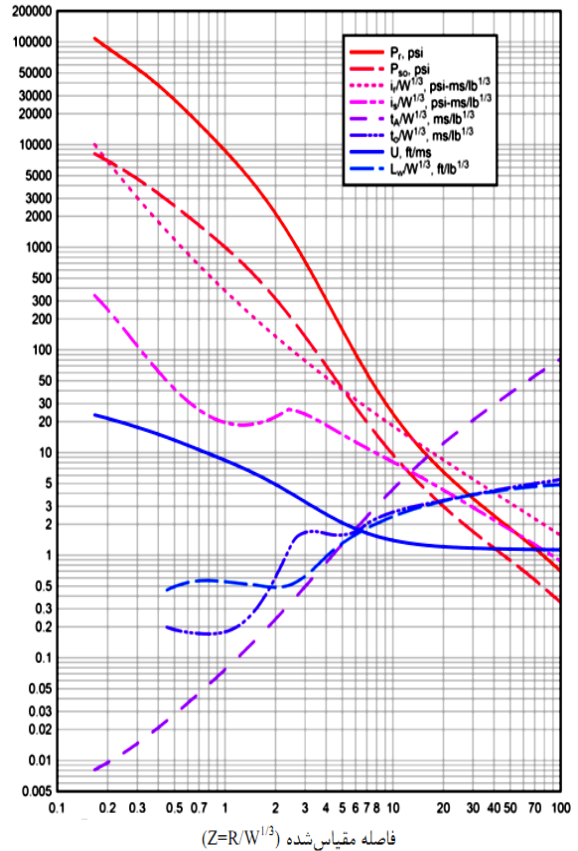
شکل ۱۰. تاریخچه‌های فشار اعمال شده به نوارهای دایروی از سطح زمین به عرض ۵ متر در اطراف گودال انفجار

۶. شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی و تحلیل عددی از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC استفاده شده است. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار ابتدا با انجام تحلیل حساسیت، ابعاد محیط نیمه بی‌نهایت خاک در مدل به گونه‌ای انتخاب شد که رفتار مرزهای مدل به لحاظ انعکاس امواج (میرایی تشعشعی) و سختی، کمترین تأثیر را در نتایج داشته باشد. بر این اساس و با توجه به تغییر محل مرکز انفجار در سطح زمین که به وسیله زاویه قرارگیری مرکز انفجار (θ) در شکل (۱۱) نشان داده شده است، عرض‌های متفاوتی برای مدل‌ها تعیین گردید. عرض مدل‌ها حداقل ۱۲۰ متر (برای حالتی که زاویه قرارگیری مرکز انفجار صفر درجه می‌باشد) و حداکثر ۱۸۰ متر (برای حالتی که زاویه قرارگیری مرکز انفجار ۷۵ درجه می‌باشد) انتخاب شده است. همچنین ارتفاع مدل‌ها نیز با توجه به عمق قرارگیری و ابعاد تونل‌ها، ۵۰ متر انتخاب گردیده است. برای جلوگیری از انعکاس امواج از

Z: فاصله مقیاس شده بر حسب  $(\frac{ft}{lb^{1/3}})$

تاریخچه‌های زمانی فشار اعمال شده به دیواره گودال و همچنین نوارهای اطراف آن در سطح زمین در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹. پارامترهای موج حاصل از انفجار سطحی TNT به شکل نیم‌کروی [۱۷]

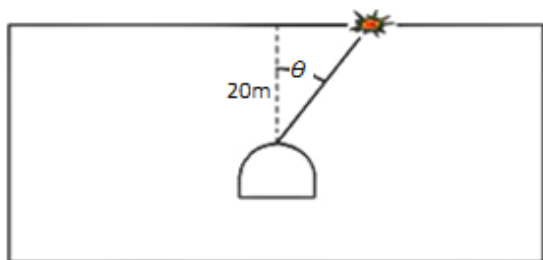
۵. تخمین هندسه گودال سطحی

سازوکار شکل‌گیری گودال پیچیده می‌باشد و این به علت غیرهمگن بودن، طبیعت غیرخطی، تغییر ویژگی‌های مکانیکی و مرکب بودن خاک از سه فاز جامد، مایع و گاز می‌باشد. برای محاسبه قطر گودال ناشی از انفجار روابط مختلفی توسط افرادی همانند کینی و گراهام، امبروسینی و لوسیونی ارائه شده است [۲۰-۲۲]. در این مطالعه قطر گودال از رابطه (۱۰) که توسط کینی و گراهام ارائه شده، محاسبه شده است [۲۰].

$$D = 0.8W^{1/3} \tag{10}$$

در این رابطه، D قطر گودال بر حسب متر و W وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم می‌باشد. براساس رابطه (۱۰) قطر گودال ناشی از انفجار ۳/۷ متر محاسبه شده است.

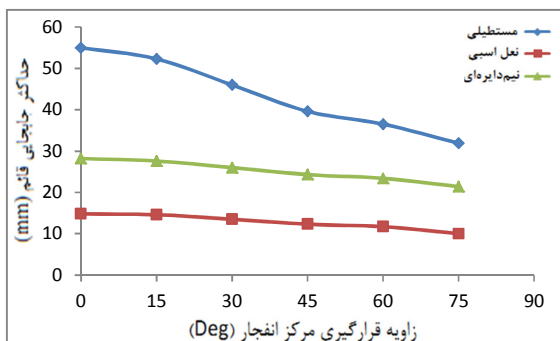
مستطیلی اتفاق افتاده است. باید توجه داشت که میزان جابه‌جایی‌های قائم، در حدود چندین سانتی‌متر است که این مقادیر در تونل‌های مستطیلی قابل توجه می‌باشند. یک عامل بیشتر بودن میزان جابه‌جایی‌ها در تونل مستطیلی، بیشتر بودن تقویت موج ناشی از انعکاس از سقف تونل مستطیلی به دلیل تخت بودن آن و نزدیک‌تر بودن به حالت انعکاس نرمال در نقاط بیشتری از سقف می‌باشد. منظور از انعکاس نرمال موج حالتی است که راستای انتشار موج، بر سطح سازه در نقطه مورد نظر عمود باشد. عامل دیگر، تفاوت نحوه توزیع نیروهای داخلی در این سه نوع شکل مقطع می‌باشد. به طوری که رفتار سقف تونل در تونل مستطیلی بیشتر به صورت خمشی است، در حالی که توزیع نیروهای داخلی در تونل‌های نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای از حالت خمشی به سمت نیروهای محوری سوق پیدا می‌کند.



شکل ۱۱. زاویه قرارگیری ماده منفجره نسبت به تونل

همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد که افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره باعث کاهش میزان حداکثر جابه‌جایی‌های قائم شده است، که علت آن، افزایش فاصله ماده منفجره از مرکز تاج تونل و در نتیجه میرا شدن بخشی از انرژی موج و نیز دور شدن از حالت انعکاس نرمال موج می‌باشد (شکل ۱۲).

میزان حداکثر نیروی محوری به وجود آمده در سامانه نگهداری تونل‌های نیم‌دایره‌ای و نعل‌اسبی تقریباً برابر بوده و از تونل مستطیلی بیشتر می‌باشد. افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره ابتدا باعث اندکی افزایش و سپس کاهش حداکثر نیروی محوری در سامانه نگهداری تونل‌ها می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۲. نمودار حداکثر جابه‌جایی قائم - زاویه قرارگیری مرکز انفجار

مرزهای جاذب انرژی موج استفاده شده است. مطابق شکل (۱۱) فاصله از سطح زمین تا مرکز تاج همه تونل‌ها ۲۰ متر در نظر گرفته شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شده است. چون هدف از این تحقیق مقایسه عملکرد چند نوع تونل و نه ارزیابی عملکرد یا خسارت آن‌ها بوده است، مصالح سازه نگهدارنده به صورت خطی مدل شده است و میزان تغییرشکل‌ها و نیروهای داخلی (نیروهای محوری و لنگر خمشی) و تنش عمودی سازه به عنوان معیار مقایسه در نظر گرفته شده است.

## ۷. صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها

در این پژوهش برای اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی به کار رفته، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌هایی که بدین منظور انجام شده با نتایج حاصل از روابط تجربی مقایسه گردیده است. در این شبیه‌سازی‌ها محدوده‌ای از خاک که در بالای آن انفجار رخ می‌دهد در نظر گرفته شده و سپس مقادیر فشار در چند نقطه به فواصل مختلف از محل انفجار استخراج و با مقادیر فشار محاسبه شده از رابطه (۳) مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و رابطه (۳) حدود ۶٪ تا ۸٪ اختلاف دارند. یکی از دلایل این اختلاف در نظر گرفتن ضریب کاهشگویی (n) یکسان بدون توجه به زاویه اصطکاک و چسبندگی دقیق خاک می‌باشد.

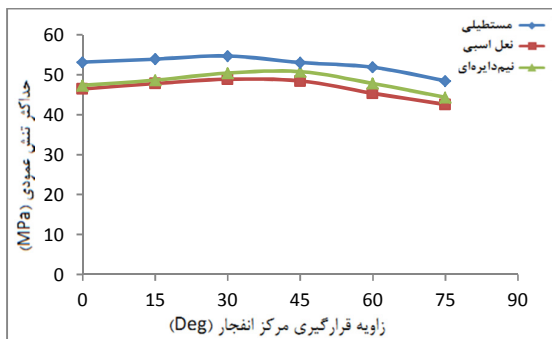
جدول ۵. نتایج حاصل از صحت‌سنجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار

شماره	۱	۲	۳
فاصله از محل انفجار (m)	۱۰	۱۵	۲۰
فشار اندازه‌گیری شده از نرم‌افزار (kPa)	۱۹۰/۳	۶۲/۷	۲۷/۹
فشار محاسبه شده از رابطه (۳) (kPa)	۱۷۸/۵	۵۸/۱۲	۲۶/۳۵
میزان اختلاف نتایج شبیه‌سازی و رابطه (۳)	۶/۶٪	۷/۸	۵/۹

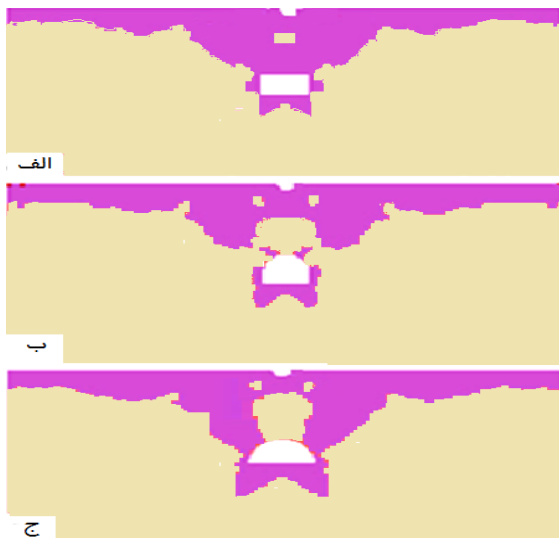
## ۸. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی

همان‌طور که در گذشته نیز بیان شد، برای بررسی تأثیر شکل مقطع تونل بر عملکرد آن تحت اثر بار انفجار سطحی، سه مقطع مستطیلی، نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به احتمال تغییر رفتار تونل‌های با شکل مقطع‌های مختلف، هنگامی که زاویه برخورد امواج ناشی از انفجار نسبت به سطح جداره بیرونی تونل تغییر می‌کند، مطابق شکل (۱۱) مرکز انفجار در زوایای مختلف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) نسبت به محور گذرنده از مرکز تاج تونل‌ها در نظر گرفته شده است.

بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که میزان حداکثر جابه‌جایی قائم به وجود آمده در مرکز تاج تونل‌های نعل‌اسبی کمتر از تونل‌های مستطیلی و نیم‌دایره‌ای می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان جابه‌جایی‌ها در تونل



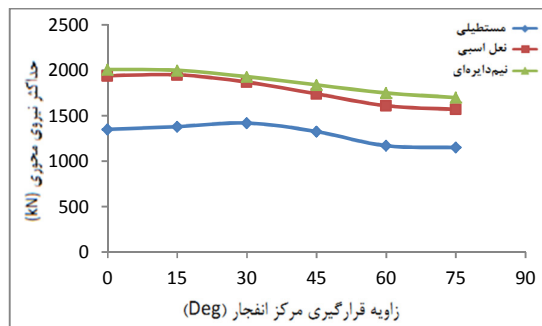
شکل ۱۵. نمودار حداکثر تنش عمودی - زاویه قرارگیری مرکز انفجار



شکل ۱۶. وضعیت نواحی تسلیم شده، در محیط خاک اطراف تونل‌ها پس از انفجار. الف) تونل با مقطع مستطیلی، ب) تونل با مقطع نعل اسبی و ج) تونل با مقطع نیم دایره ای

### ۹. نتیجه گیری

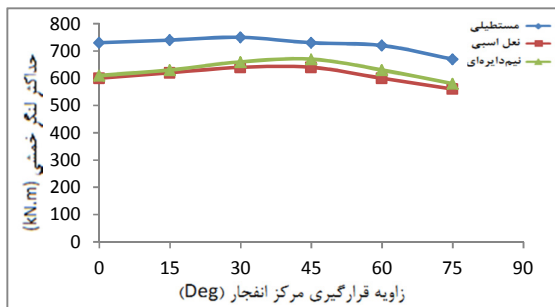
نتایج بررسی های انجام گرفته نشان می دهند که حداکثر جابه جایی قائم در تاج تونل نعل اسبی از دو مقطع دیگر کمتر می باشد و بیشترین مقدار جابه جایی در تونل مستطیلی افتاده است. مقادیر حداکثر نیروی محوری و لنگر خمشی در تونل مستطیلی نسبت به دو مقطع دیگر به ترتیب کمتر و بیشتر می باشند. این مقادیر در تونل های نعل اسبی و نیم دایره ای تقریباً برابر هستند. همچنین مقدار حداکثر تنش عمودی در تونل مستطیلی از دو مقطع دیگر بیشتر می باشد و کمترین میزان تنش عمودی در مقطع نعل اسبی اتفاق افتاده است. بنابراین از لحاظ تنش های داخلی، تونل های مقاطع نعل اسبی و نیم دایره ای عملکرد بهتری را نسبت به تونل های با مقاطع مستطیلی دارا می باشند. از طرف دیگر، ناحیه خاکی تسلیم شده در اطراف تونل های نعل اسبی، کمترین میزان را دارد و این در حالی است که بیشترین میزان ناحیه تسلیم شدگی در اطراف تونل های مستطیلی به وجود آمده است. برای تمامی تونل ها افزایش زاویه قرارگیری مرکز انفجار باعث شده است که حداکثر جابه جایی قائم کاهش یابد. این در حالی است که عواملی چون



شکل ۱۳. نمودار حداکثر نیروی محوری - زاویه قرارگیری مرکز انفجار

میزان حداکثر لنگر خمشی در تونل های نعل اسبی و نیم دایره ای تقریباً برابر می باشد و از تونل های مستطیلی کمتر می باشد. افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره ابتدا باعث اندکی افزایش و سپس کاهش حداکثر لنگر خمشی در سامانه نگهداری تونل ها می شود (شکل ۱۴). در شکل (۱۵) نمودار حداکثر تنش های عمودی (ناشی از لنگر خمشی و نیروی محوری) به وجود آمده در سامانه نگهداری تونل ها نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود بیشترین و کمترین مقدار تنش عمودی به ترتیب در تونل های مستطیلی و نعل اسبی اتفاق افتاده است. مقادیر حداکثر تنش های عمودی در تونل های نعل اسبی و نیم دایره ای اختلاف اندکی دارند. همچنین نحوه تغییر حداکثر تنش عمودی با تغییر زاویه قرارگیری ماده منفجره همانند لنگر خمشی و نیروی محوری می باشد و با افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره، حداکثر تنش عمودی ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش می یابد. علت این نحوه تغییر نیروی محوری، لنگر خمشی و حداکثر تنش عمودی با تغییر زاویه قرارگیری ماده منفجره این است که تغییر مکان ماده منفجره موجب تغییر شدت و نحوه توزیع بار انفجار وارد بر سازه می شود و بنابراین مقادیر حداکثر تنش های داخلی به وجود آمده در سازه نگهداری تونل ها و مکان این مقادیر حداکثر را تغییر می دهد.

بررسی ها نشان می دهند که ناحیه خاکی تسلیم شده در اطراف تونل های نعل اسبی، کمترین میزان را دارد و این در حالی است که بیشترین میزان ناحیه تسلیم شدگی در اطراف تونل های مستطیلی به وجود آمده است (شکل ۱۶). علت این پدیده انعکاس و تقویت بیشتر موج در تونل های با مقطع مستطیلی در اثر برخورد به سطوح تخت آن می باشد که منجر به تقویت موج منتشر شده در محیط خاک می شود.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر لنگر خمشی - زاویه قرارگیری مرکز انفجار



- [8] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; *Finite Elem. Anal. Des.* 1997, 24, 113-132.
- [9] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport – A Parametric Study"; *Geotech. Geolog. Eng.* 2004, 24, 227-248.
- [10] Liu, H. "Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading"; Department of Civil Eng., The City College of New York/CUNY, New York; 2009, NY 10031 USA.
- [11] Esmaeili, M.; Falahzadeh, P. "Behavior of Underground Structures under Explosion Loads (Case Study - Tehran Metro)"; In Proc. of the 8th. Int. Conf. on Tunnel 2009, 344-353 (In Persian).
- [12] Nagy, N. M.; Eltehawy, E. A.; Elhanafy, H. M.; Eldesouky, A. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; 13th Int. Conf. on Aerospace Sci. & Aviation Tech.; 2009, ASAT- 13, Egypt.
- [13] Nagy, N. M.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modeling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; *Geomech. Eng. J.* 2010, 2, 1-18.
- [14] Hashemi, H. R.; Mirzeynali, S. H. "Effect of Projectile Explosion on the Metro Tunnels in the Coarse Soil with Finite Difference Software FLAC (Case Study: Karaj Metro Tunnel)"; Technical Report, Univ. of Maleke Ashtar, Tehran, 2009 (In Persian).
- [15] Lu, Y.; Wang, Zh.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2005, 25, 275-288.
- [16] Management and Planning Organization Islamic Republic of Iran- Road & Transportation Ministry. "Geometric Design of Roads"; Code No. 161, 1996 (In Persian).
- [17] Unified Facilities Criteria (UFC) "Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions"; UFC 3-340-02; 2008.
- [18] Smith, P. D.; Hetherington, J. G. "Blast and Ballistic Loading of Structures"; Butterworth-Heinemann, 1994.
- [19] Brill, A.; Me-Bar, Y.; Sadot, O.; Ben-Dor, G. "A Method for Measuring the Impulse on Structural Foundations Due to a Blast Wave"; *Int. J. Impact Eng.* 2012, 49, 214-221.
- [20] Kinney, G. F.; Graham K. J. "Explosive Shocks in Air"; Springer -Verlag, Berlin 1985.
- [21] Ambrosini, D.; Luccioni, B.; Danesi, R. "Craters Produced by Explosions on the Soil Surface"; *Mechanical Computational* 2003, 22, 678-692.
- [22] Luccioni, B.; Ambrosini, D. "Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface"; *Mechanical Computational* 2004, 23, 571-590.

حداکثر لنگر خمشی، نیروی محوری و تنش عمودی با افزایش زاویه قرارگیری مرکز انفجار ابتدا به میزان اندکی افزایش و سپس کاهش می‌یابند. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی زوایای قرارگیری ماده منفجره، عملکرد تونل‌های مستطیلی مناسب نمی‌باشد. همچنین اگرچه مقادیر حداکثر لنگر خمشی، نیروی محوری و تنش عمودی در تونل‌های نیم‌دایره‌ای با نعل‌اسبی تقریباً برابر می‌باشد، اما میزان جابه‌جایی قائم، ناحیه خاکی تسلیم شده و مساحت حفاری در تونل‌های نعل‌اسبی از تونل‌های نیم‌دایره‌ای کمتر است و می‌توان بیان کرد که مناسب‌ترین مقطع، مقطع نعل‌اسبی می‌باشد. در ادامه، پیشنهاد می‌شود با انجام تحقیقات مشابه این تحقیق، تأثیر نوع خاک و نیز استفاده از مدل‌های رفتاری دیگر مصالح در شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد که تحقیقات مشابه تحت تأثیر انفجارهای مدفون نیز انجام شود. بررسی موضوع این تحقیق به روش آزمایشگاهی و میدانی نیز از ارزش بالایی برخوردار خواهد بود.

## ۱۰. مراجع

- [1] Smith, J. L.; Betz, J. F.; Baird, G. T. "Kachina Test Series: Dynamic Arch Test Three (DAT-3) Analysis Report"; Final Report, AFWL-TR-85-36, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland AFB; 1986.
- [2] Dallriva, F. D. "Data Report for FY86 Dynamic Shallow Buried Arch Test"; U.S.A.E, Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1989.
- [3] Blanchat, T. K. "Development of Explosive Event Scale Model Testing Capability at Sandia's Large Scale Centrifuge Facility"; Sandia National Laboratories, 1998.
- [4] Ohno, T. "Study on Structural Response to Explosion of Explosives and Blast Resistance Design"; National Defence Academy of Japan; 2008.
- [5] De, A.; Zimmie, T. F.; Abdoun, T.; Tessari, A. "Physical Modeling of Explosive Effects on Tunnels"; *Geotech. Test J.* 2010, 30, 427-431.
- [6] Ishikawa, N.; Beppu, M. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 34, 1535-1545.
- [7] Sadeghazar, M.; Atarnezhad, R.; Khosravi, A. "Evaluating the Response of Buried Reinforced Concrete Structures Under Surface Burst Explosion Using Numerical Simulations"; In Proc. of the Int. Conf. on Structures - Earthquake – Geotech. 2010, 212-222 (In Persian).