

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

حسین انتظاری زارچ^۱، قاسم دهقانی اشکذری^۲، کاظم برخوردار بافقی^{۳*}

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.

کلیدواژه‌ها: 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، ساده سازی می شود [۷]. از آن جمله می توان به مطالعات بانگ اشاره کرد. بانگ 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 نرم افزار تفاضل محدود FLAC به مطالعه تأثیر ویژگی های خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زهکشی نشده، میرایی خاک و شدت بار انفجاری بر روی تونل ها پرداخت [۹]. لیو به تحلیل پاسخ غیرخطی تونل های زیرزمینی تحت بارگذاری انفجار پرداخت [۱۰]. اسماعیلی و فلاح زاده 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 سال های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر عمق قرارگیری ماده منفجره در انفجار مدفون و همچنین تأثیر انفجار سطحی بر روی سازه های مدفون پرداختند [۱۲ و ۱۳]. میرزینلی و هاشمی در سال ۱۳۸۹ با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC به بررسی تأثیر انفجار پرتابه ها بر تونل های مترو در خاک های درشت دانه پرداختند [۱۴].

در روش جدانشده کامل هر سه مرحله اشاره شده در یک مدل در نظر گرفته می شوند. اخیراً تعدادی شبیه سازی 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 مدل سازی کردند [۱۵]. صادق آذر و همکاران به وسیله برنامه های ANSYS-AUTODYN به ارزیابی پاسخ سازه های بتن مسلح مدفون تحت اثر انفجار سطحی پرداختند. آن ها از مدل عددی جدانشده کاملی برای شبیه سازی رفتار سازه بتن مسلح مدفون تحت اثر بار انفجاری استفاده نمودند [۷].

در این پژوهش با شبیه سازی دو بعدی با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC به مقایسه رفتار تونل های با شکل مقطع مستطیلی، نعل اسبی و نیم دایره ای تحت اثر بارهای ناشی از انفجار سطحی پرداخته شده است. شبیه سازی های انجام گرفته در دسته روش های جدانشده غیر کامل می باشند، زیرا بارهای ناشی از انفجار در سطح زمین به وسیله تاریخچه های زمانی فشار اعمال شده بر مرز مدل، ساده سازی شده اند.

بررسی مطالعات منتشر شده در زمینه اثر انفجار بر روی تونل ها و فضاهای زیرزمینی نشان می دهد 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 نمی باشد. این در حالی است که شکل سازه و زاویه بین راستای انتشار موج و سطحی از سازه که در مقابل موج انفجار می باشد، بر میزان تقویت و انعکاس امواج حاصل از انفجار تأثیر می گذارد و انتخاب شکل مقطع مناسب برای سازه می تواند در کاهش میزان فشارهای وارد بر سازه بر اثر

پاسخ سازه های زیرزمینی در برابر بارهای انفجاری موضوع مهمی در مهندسی پدافند غیرعامل است. مطالعات انجام گرفته در این زمینه را می توان به سه دسته: مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات میدانی و شبیه سازی های عددی دسته بندی نمود. با توجه به اینکه آزمایش های مربوط به پدیده انفجار مستلزم صرف هزینه های زیادی می باشند و نیازمند امکانات و تجهیزات خاصی هستند، در این زمینه مطالعات آزمایشگاهی کمتری صورت گرفته است. در سال های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۹، اسمیت و دالریوا آزمایش هایی را بر روی قوس های بتنی مدفون در خاک تحت اثر بار انفجار سطحی انجام داده اند [۱ و ۲]. بلانچت، اهنو و دی به ترتیب در سال های ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ به مطالعه اثر بارهای انفجار سطحی بر روی سازه های زیرزمینی پرداختند [۳-۵].

انجام مطالعات میدانی در زمینه اثر انفجار بر سازه های زیرزمینی علاوه بر صرف هزینه های زیاد، عوارض دیگری چون آلودگی های زیست محیطی را نیز به دنبال دارد که انجام آن ها را با محدودیت هایی روبه رو کرده است. مطالعات میدانی انجام گرفته در این زمینه محدود است و از آن جمله می توان به آزمایش های انجام شده توسط ایشیکاوا که در سال ۲۰۰۶ برای بررسی رفتار سه نوع تونل مستقیم، شاخه ای و شبکه ای انجام گرفته بود، اشاره نمود [۶].

به علت محدودیت های زیاد انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، شبیه سازی های عددی مناسب ترین گزینه مورد پذیرش می باشند. از طرفی دیگر به علت آنکه پروسه فیزیکی انفجار و انتشار امواج ناشی از آن خیلی پیچیده می باشد، شبیه سازی کامل و صحیح این پدیده نیازمند مدل های پیچیده و صحیح برای بررسی بارگذاری و پاسخ های مواد می باشد. روند شبیه سازی پروسه انفجار و اثر آن بر روی سازه ها را می توان به سه مرحله زیر تقسیم بندی کرد:

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

بر اساس همین سه مرحله، روش های عددی را می توان به سه دسته جدا شده، جدانشده غیر کامل و جدانشده کامل طبقه بندی کرد. در روش جدا شده ابتدا تاریخچه تنش های صحرائی محاسبه شده و سپس این تنش ها به عنوان شرایط مرزی بر سازه اعمال می شوند و در نهایت پاسخ سازه به دست می آید. در این روش اندرکنش بین خاک و سازه به صورت واقعی در نظر گرفته نمی شود [۷]. تحلیل های متعددی با استفاده از این رویه صورت پذیرفته است که از آن جمله می توان به مطالعه بانگ اشاره نمود [۸].

در روش جدانشده غیر کامل، دو مرحله اول و یا دو مرحله دوم با هم ترکیب می شوند و سه مرحله فوق به دو مرحله کاهش می یابد که مهم ترین آن ها روش های تفاضل محدود، اجزا محدود و روش های هیبریدی می باشند. این روش ها پروسه انفجار را در بر نمی گیرند،

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 ϕ_{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 بیش‌فشار و ضربه موج کاهش می‌یابد.



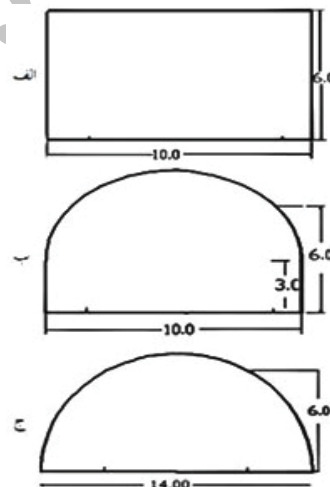
شکل ۲. افت فشار نسبت به فاصله از محل انفجار

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 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 این 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

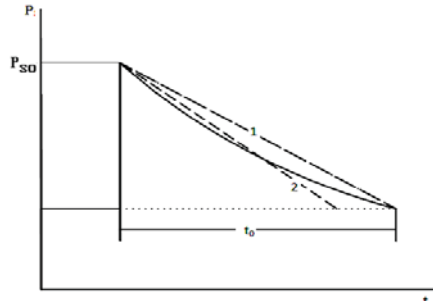
۳. ویژگی‌های مصالح

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

جدول ۱. مشخصات خاک

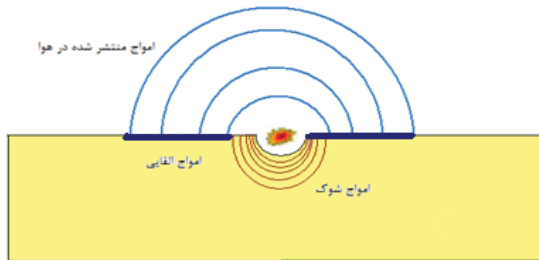
جرم مخصوص (kg/m^3)	۱۸۰۰
ضریب پواسون	۰/۳
مدول الاستیسیته (MPa)	۸۰
چسبندگی (kPa)	۳۰
زاویه اصطکاک داخلی	۳۲

به صورت امواج با جبهه نیم کروی در هوا منتشر می گردد. همچنین باید توجه داشت که امواج نیم کروی منتشر شده در هوا نیز بر روی سطح زمین فشار وارد می کنند (امواج القایی) [۱۹].



شکل ۵. منحنی های بیش فشار- زمان موج انفجار: حالت های واقعی، برابری ضربه، محافظه کارانه [۱۸]

در اکثر پژوهش هایی 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 پژوهش های قبلی به اثر شکل مقطع پرداخته نشده است، این نحوه بارگذاری نیز یکی از تفاوت های این پژوهش با پژوهش های قبلی انجام گرفته در زمینه اثر انفجار سطحی بر روی تونل ها و فضاهای زیرزمینی می باشد.



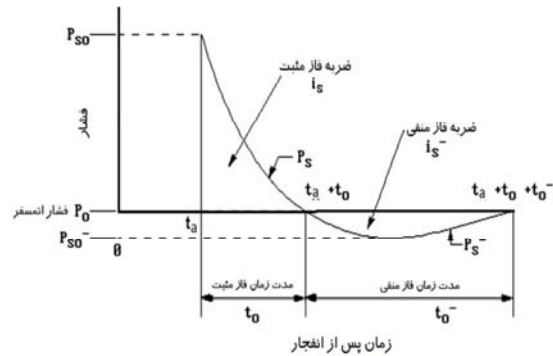
شکل ۶. امواج منتشر شده در اثر انفجار روی سطح زمین

حداکثر بیش فشار در میدان آزاد زمین (وارده به دیواره گودال انفجار) بر حسب کیلو پاسگال از رابطه (۳) محاسبه می شود [۱۸]:

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

در رابطه فوق، ρ_s چگالی خاک بر حسب (kg/m^3) و C سرعت موج بارگذاری بر حسب (m/s) می باشد که در ادامه تعریف شده اند. W جرم ماده منفجره بر حسب کیلوگرم و R فاصله تا محل انفجار بر حسب متر می باشد. f_c ضریب وابستگی یا تأثیر عمق می باشد و به عمق انفجار (فاصله مرکز ماده منفجره تا سطح) و نیز محیطی که در آن انفجار رخ می دهد، وابسته می باشد و از نمودار شکل (۷) محاسبه می گردد. n ضریب کاهش دگی می باشد و نحوه محاسبه آن در ادامه توضیح داده می شود.

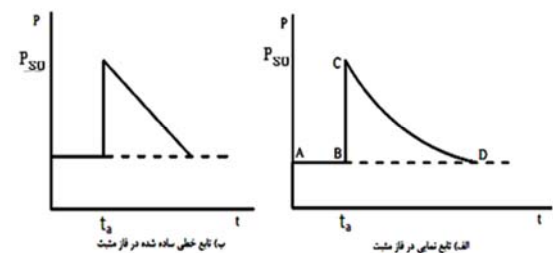
بیشتر است، پس از فاز مثبت و با گذر زمان فشار انفجار به حد فشار اتمسفر (P_0) کاهش یافته و سپس فاز منفی با ایجاد مکش آغاز می شود. در شکل (۳)، موج حاصل از انفجار نشان داده شده است، در این شکل P_{SO} مقدار حداکثر بیش فشار و P_{SO}^- حداقل فشاری است که ذرات احساس می کنند. t_a زمان رسیدن موج انفجار به نقطه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



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

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

در اکثر تحقیقات انجام شده، سازه ها تحت نمودار بیش فشار ساده شده بارگذاری شده اند و نتایج نشان می دهند که برای بسیاری از اهداف محاسباتی تقریب های فوق رضایت بخش می باشند. هنگامی که روش و رویکردی محتاطانه برای تاریخچه فشار مورد نظر باشد، می توان 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 می شود به گونه ای که سطح زیر منحنی های نمایی و خطی با هم مساوی باشند [۱۸].



شکل ۴. نمودار بیش فشار- زمان ساده شده [۱۸]

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

همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، هنگامی که انفجار سطحی رخ می دهد بخشی از انرژی ناشی از انفجار از طریق امواج شوک به دیواره گودال در زمین منتقل می شود و بخشی دیگر

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

$$t_a = \frac{R}{c_s} \quad (6)$$

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:

$$t_0 = 2 \frac{I_s}{P_{so}} \quad (7)$$

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

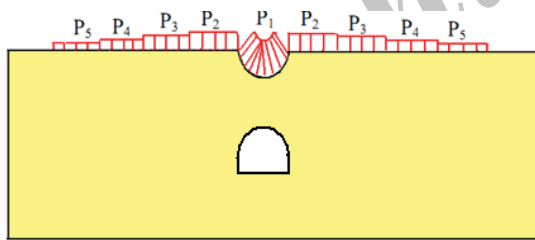
$$I_s = 0.019 f_c \rho_s W^{1/3} \frac{C}{c_s} \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{1-n} \quad (8)$$

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.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (9)$$



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

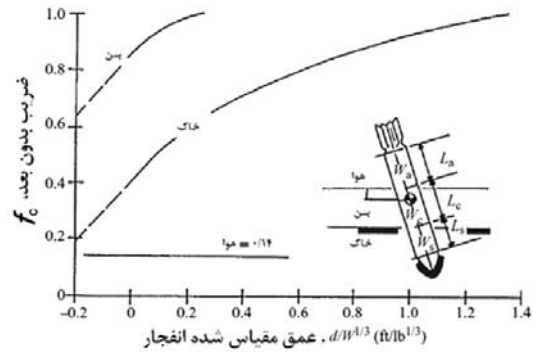
در رابطه (۹)، R فاصله انفجار تا محل (بر حسب متر) و W جرم معادل ماده منفجره (بر حسب کیلوگرم) می‌باشد. فاصله R برای هر نوار دایروی، برابر فاصله خط مرکزی آن نوار (شعاع دایره‌ای که از وسط عرض نوار می‌گذرد) تا مرکز ماده منفجره در نظر گرفته شده است.

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

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

$$P_{so}: \text{حداکثر بیش‌فشار برخوردی فاز مثبت بر حسب (psi)}$$

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



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:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4)$$

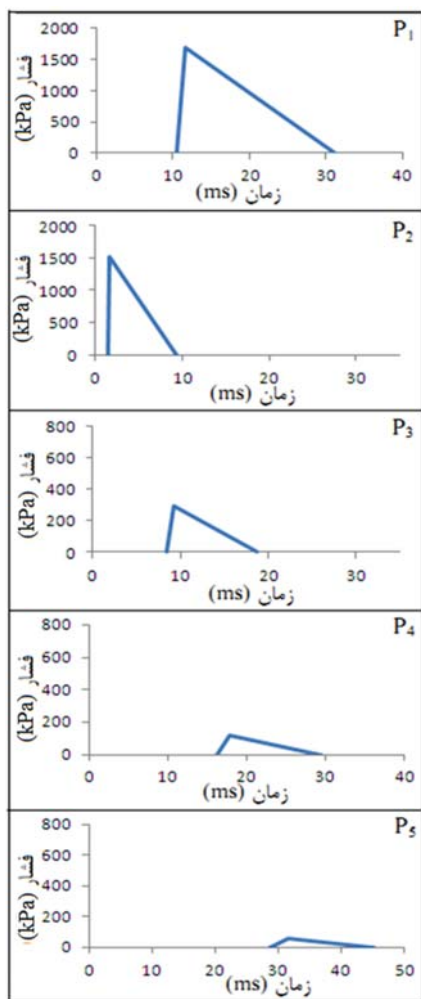
که در آن، E مدول الاستیسیته خاک است. حداکثر سرعت ذره (V_0) نیز برحسب m/s از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$V_0 = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (5)$$

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



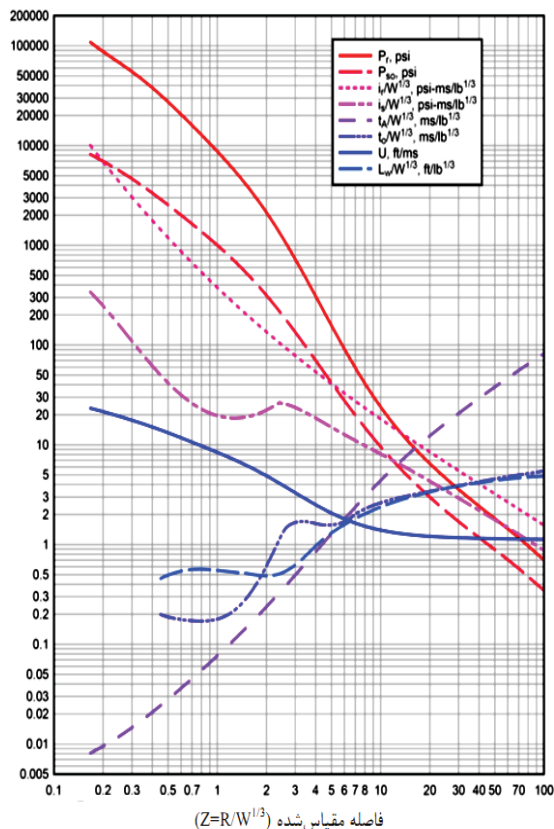
شکل ۱۰. تاریخچه‌های فشار اعمال شده به نوارهای دایروی از سطح زمین به عرض ۵ متر در اطراف گودال انفجار

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]

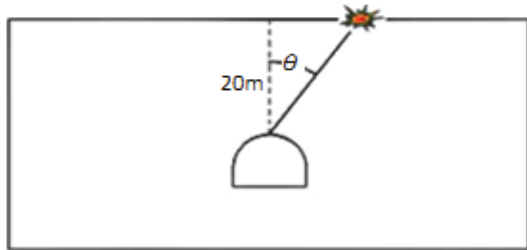
۵. تخمین هندسه گودال سطحی

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].

$$D = 0.8W^{1/3} \quad (10)$$

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.

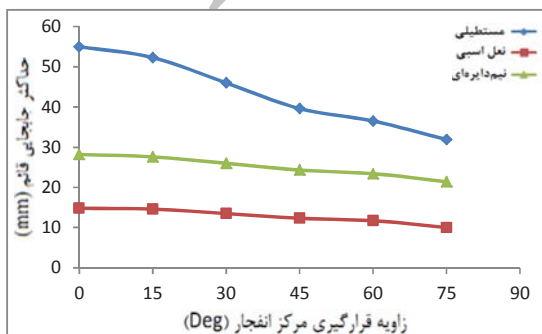
مستطیلی اتفاق افتاده است. باید توجه داشت که میزان جابه‌جایی‌های قائم، در حدود چندین سانتی‌متر است که این مقادیر در تونل‌های مستطیلی قابل توجه می‌باشند. یک عامل بیشتر بودن میزان جابه‌جایی‌ها در تونل مستطیلی، بیشتر بودن تقویت موج ناشی از انعکاس از سقف تونل مستطیلی به دلیل تخت بودن آن و نزدیک‌تر بودن به 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 کاهندگی (n) یکسان بدون توجه به زاویه اصطکاک و چسبندگی دقیق خاک می‌باشد.

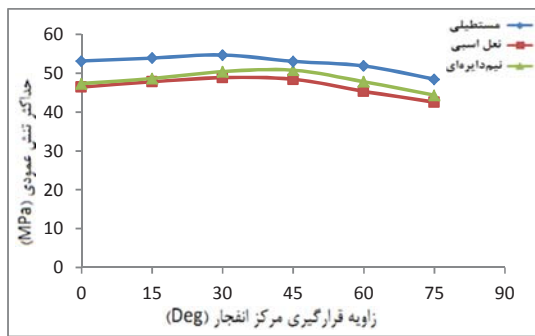
جدول ۵. نتایج حاصل از صحت‌سنجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار

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

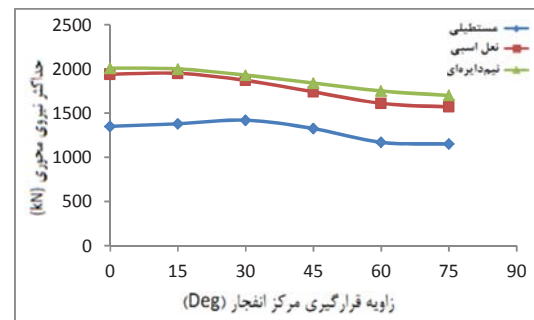
۸. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی

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 ۱۴. نمودار حداکثر نیروی محوری - زاویه قرارگیری مرکز انفجار



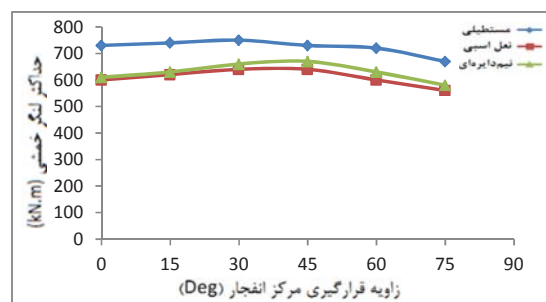
شکل ۱۶. وضعیت نواحی تسلیم شده، در محیط خاک اطراف تونل‌ها پس از انفجار. الف) تونل با مقطع مستطیلی، ب) تونل با مقطع نعل‌اسبی و ج) تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای

۹. نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند که حداکثر جابه‌جایی قائم در تاج تونل نعل‌اسبی از دو مقطع دیگر کمتر می‌باشد و بیشترین مقدار جابه‌جایی 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 می‌باشند. این مقادیر در تونل‌های نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای تقریباً برابر هستند. همچنین مقدار حداکثر تنش عمودی در تونل مستطیلی از دو مقطع دیگر بیشتر می‌باشد و کمترین میزان تنش عمودی در مقطع نعل‌اسبی اتفاق افتاده است. بنابراین از لحاظ تنش‌های داخلی، تونل‌های با مقاطع نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای عملکرد بهتری را نسبت به تونل‌های با مقاطع مستطیلی دارا می‌باشند. از طرف دیگر، ناحیه خاکی تسلیم شده در اطراف تونل‌های نعل‌اسبی، کمترین میزان را دارد و این در حالی است که بیشترین میزان ناحیه تسلیم شدگی در اطراف تونل‌های مستطیلی به وجود آمده است. برای تمامی تونل‌ها افزایش زاویه قرارگیری مرکز انفجار باعث شده است که حداکثر جابه‌جایی قائم کاهش یابد. این در حالی است که عواملی چون

میزان حداکثر لنگر خمشی در تونل‌های نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای تقریباً برابر می‌باشد و از تونل‌های مستطیلی کمتر می‌باشد. افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره ابتدا باعث اندکی افزایش و سپس کاهش حداکثر لنگر خمشی در سامانه نگهداری تونل‌ها می‌شود (شکل ۱۴). در شکل (۱۵) نمودار حداکثر تنش‌های عمودی (ناشی از لنگر خمشی و نیروی محوری) به وجود آمده در سامانه نگهداری تونل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین مقدار تنش عمودی به ترتیب در تونل‌های مستطیلی و نعل‌اسبی اتفاق افتاده است. مقادیر حداکثر تنش‌های عمودی در تونل‌های نعل‌اسبی و نیم‌دایره‌ای اختلاف اندکی دارند. همچنین نحوه تغییر حداکثر تنش عمودی با تغییر زاویه قرارگیری ماده منفجره همانند لنگر خمشی و نیروی محوری می‌باشد و با افزایش زاویه قرارگیری ماده منفجره، حداکثر تنش عمودی ابتدا اندکی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. 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 می‌شود و بنابراین مقادیر حداکثر تنش‌های داخلی به وجود آمده در سازه نگهداری تونل‌ها و مکان این مقادیر را تغییر می‌دهد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که ناحیه خاکی تسلیم شده در اطراف تونل‌های نعل‌اسبی، کمترین میزان را دارد و این در حالی است که بیشترین میزان ناحیه تسلیم‌شدگی در اطراف تونل‌های مستطیلی به وجود آمده است (شکل ۱۶). علت این پدیده انعکاس و تقویت بیشتر موج در تونل‌های با مقطع مستطیلی در اثر برخورد به سطوح تخت آن می‌باشد که منجر به تقویت موج منتشر شده در محیط خاک می‌شود.



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

- 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**
- [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] Esmaili, 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 Criterias (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.
- [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.; Atamezhad, 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).