

## ارزیابی عمق دفن تونل و هندسه مقطع بر کاهش آثار تخریبی ناشی از انفجارهای سطحی

هادی حسینی نسب<sup>۱</sup>، سید مجتبی موحدی فر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، علوم و تحقیقات خراسان رضوی، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

۲- استادیار، گروه عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

(دریافت: ۹۶/۰۸/۰۹، پذیرش: ۹۷/۱۲/۰۲)

### چکیده

سازه‌های زیرزمینی و از جمله تونل‌ها که امروزه جزو راهبردی‌ترین سازه‌ها برای هر کشوری محسوب می‌شوند و به‌عنوان یک هدف بالقوه برای سلاح‌های دشمن مطرح‌اند. لذا ایمن‌سازی این سازه‌ها و مطالعات مربوط به آن باید در درجه بالایی از توجه قرار گیرد. در این تحقیق، پدیده انفجار در سطح زمین و اثر موج ناشی از آن بر روی تونل‌ها، که مهم‌ترین سازه‌های مدفون محسوب می‌شوند، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN بررسی شده است. ابتدا پدیده گسترش موج انفجار در خاک در یک محیط سه‌بعدی و با هندسه کامل شبیه‌سازی شده و پس از اطمینان از صحت نتایج، اثر عمق دفن تونل و در ادامه اثر تغییر هندسه مقطع در کاهش آثار مخرب انفجار بر روی تونل در محیط دوبعدی ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزایش عمق دفن تونل و نیز استفاده از مقاطعی مانند دایره، نعل اسبی، بیضی و شبه بیضی عمودی و تخم‌مرغی در کاهش آثار مخرب انفجار بر تونل مدفون مؤثرند.

**کلیدواژه‌ها:** انفجار سطحی، تونل، ایمن‌سازی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، AUTODYN

## Evaluation of Tunnel Burial Depth and Section Geometry on Decreasing Destructive Effects of Surface Blast

H. Hosseini Nassab, S. M. Movahedifar\*

Islamic Azad University, Neyshabur  
(Received: 31/10/2017; Accepted: 21/02/2019)

### Abstract

Underground structures, especially tunnels, are among the most strategic structures for all countries, and they are a potential target of enemy weapons. Therefore, the safety of these structures and the related studies are of the great importance. In the present study, the explosion phenomenon at the surface of the ground and the effect of its wave on the tunnels which are the most important buried structures is investigated by using nonlinear dynamic analysis by ANSYS-AUTODYN software. The effect of the blast wave propagation in soil was simulated with a full geometry in a 3D environment and after ensuring the accuracy of the results, the effect of the tunnel burial depth and the geometry of the cross section in reducing the destructive effects of the explosion on the tunnel were evaluated in a 2D environment. The results indicate that increasing the depth of the buried tunnel and also using sections such as circle, horseshoe, vertical ellipse and egg shape are effective in reducing the destructive effects of the explosion on buried tunnels.

**Keywords:** Tunnel, Surface Explosion, Dynamic Nonlinear Analysis, Autodyn

\*Corresponding Author E-mail: Movahedi\_far@yahoo.ca

## ۱. مقدمه

گروهش [۶] نیز به تحلیل دینامیکی سه‌بعدی تونل‌های زیرزمینی با مقطع دایره‌ای تحت یک انفجار درونی پرداخته و با تغییر پارامترهای ضخامت جداره تونل، وزن خرج انفجاری و زاویه گسیختگی خاک نتیجه گرفتند با افزایش مقدار خرج TNT، و یا با کاهش ضخامت جداره تونل و یا کاهش زاویه گسیختگی خاک، مقدار تغییر شکل تونل و خاک اطراف آن افزایش می‌یابد.

در ایران نیز صفا و همکارش [۷] در سال ۱۳۹۴ با کار بر روی موج گیرها و استفاده از نرم‌افزار AUTODYN (که به دلیل محیط گرافیکی بسیار عالی، کاربری آسان و یکپارچگی که در محیط‌های پیش‌پردازش و پس پردازش دارد یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها، در زمینه مسائل نرخ کرنش بالا و انفجار است [۸])، اثر مسیرهای انحرافی در تونل را در مقابل انفجارهای خارج از تونل بررسی کردند و با تغییر مقدار و فاصله خرج انفجاری از دهانه تونل، به یک فاصله بهینه برای اجرای موج‌گیر از دهانه تونل دست یافتند. لذا با توجه به این مطالعات در ادامه فعالیت‌های خود در این مقاله را تشریح خواهیم کرد.

## ۲. شرح مدل‌سازی مواد

**هوا:** در این مقاله هوا به صورت گاز ایده‌آل تعریف شده و بنابراین، رابطه آن به شکل زیر خواهد بود [۹].

$$P = (\gamma - 1) \rho e \quad (۱)$$

که در آن،  $\gamma$  نسبت ضرایب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت به حجم ثابت با فرمول

$$\gamma = C_p / C_v \quad (۲)$$

است که مقدار آن در فشارهای کم برابر با ۱/۴ خواهد بود و در فشارها و دماهای بالا نیز به واسطه یونیزه شدن و تجزیه گاز، مقدار آن بیشتر از این مقدار نخواهد شد. همچنین  $\rho$  مقدار چگالی برحسب  $\text{kg/m}^3$  است [۱۰].  $P$  فشار برحسب پاسکال،  $e$  نیز انرژی درونی اولیه برحسب  $(\text{kJ/kg})$  است که حاصل ضرب گرمای ویژه در حجم ثابت  $C_v$ ، در دمای گاز  $T$  (برحسب کلوین) است [۱۱]. بر اساس مرجع نام‌برده در کتابخانه نرم‌افزار، دانسته اولیه هوا  $۱/۲۲۵ \text{ (kg/m}^3)$ ، دمای مرجع  $۲۸۸/۲ \text{ (K)}$ ، دمای ویژه در حجم ثابت  $۷۱۷/۶ \text{ (J/kg.K)}$  و دمای ویژه در فشار ثابت  $۱۰۰۴/۶۴ \text{ (J/kg.K)}$  در نظر گرفته شده است [۱۲] که در نتیجه مقدار  $\gamma$  برابر با  $۱/۴$  و مقدار  $e$  هم  $۲۰۶۸۱۲ \text{ (kJ/kg)}$  محاسبه خواهد شد. از آنجایی که هوا نوعی گاز است و هیچ مقاومتی در برابر تنش‌های برشی یا فشارهای منفی ندارد پس نیاز به تعریف روابط مقاومت یا شکست برای آن نیست [۱۳].

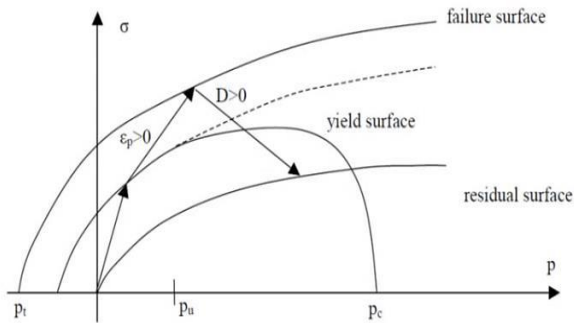
سازه‌های زیرزمینی و از جمله تونل‌ها یکی از ضروری‌ترین نیازهای جوامع امروزی بوده که به‌طور کلی به خاطر نقش واسط و میراگر خاک، نسبت به سازه‌های سطحی از آسیب‌پذیری کمتری برخوردارند. اما شناخت رفتار سازه‌های مدفون به خاطر پیچیدگی در شناخت رفتار خاک و نیز بررسی ارتباط سازه با خاک دارای چالش‌ها و دشواری‌های خاصی است که روند طراحی، مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی این سازه‌ها را تحت تأثیر خود قرار داده است. به‌علاوه امروزه با افزایش روزافزون حملات تروریستی و تجهیز عوامل آن‌ها به انواع سلاح‌های سنگین و انفجاری ضرورت بحث ایمن‌سازی سازه‌های مدفون و از جمله تونل‌ها در مقابل بارهای انفجاری بیش‌ازپیش مطرح شده است. اما از آنجاکه مطالعات تجربی مربوط به مباحث انفجار و تونل، بسیار پرهزینه و با محدودیت‌های زیادی همراه است، در این تحقیق بر آنیم تا با مدل کردن یک تونل در نرم‌افزار اجزا محدود AUTODYN، حالات مختلفی از شرایط واقعی را شبیه‌سازی نموده و پیشنهادهایی برای توسعه ایمن‌سازی تونل‌ها داشته باشیم.

در خصوص مباحث مربوط به این مقاله یعنی انفجار، گسترش موج انفجار در خاک و ارزیابی رفتار تونل در مواجهه با بار انفجاری، در سال ۲۰۱۲ لئو لاین و همکارش [۱] با استفاده از نرم‌افزار AUYODYN نشان دادند که فشار و چگالی خاک، هر دو در مقدار سرعت حرکت موج در خاک مؤثرند. در سال ۲۰۱۵ مبارکی و همکارش [۲] با مدل کردن مقطع باکسی شکل تونل کوبه (Kobe) و محیط خاک و هوای پیرامون آن تحت انفجار سطحی، جابجایی‌ها و فشار را در سه نقطه از مقطع بررسی کرده و نتیجه می‌گیرند که بیشترین جابجایی مربوط به سقف تونل و زیر محل انفجار است. در سال ۲۰۰۹ نقی و همکارانش [۳] با مدل کردن یک تونل مستطیلی تحت انفجارهای سطحی و مدفون به بررسی شرایط پاسخ بحرانی‌ترین قسمت تونل (سقف آن) در برابر تغییر عمق ماده منفجره پرداخته و اثر افزایشی مقدار خاک روی خرج انفجاری را با مقایسه دوبه‌دو حالت‌های انفجار سطحی و انفجار مدفون بررسی کردند. لو و همکاران [۴-۵] در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ به مقایسه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی سازه‌های مدفون در مقابل انفجار و تحلیل پاسخ آن پرداخته و برای مدل‌سازی در مناطقی از هندسه که دچار تغییر شکل‌های زیاد است از مدل ذرات و در سایر قسمت‌ها از محیط لاگرانژ کمک گرفته و در پایان بیان می‌کنند که مدل‌های دوبعدی نتایج قابل قبولی برای تحلیل‌های انفجاری خواهند داشت. تیواری و

زیادی دارد استفاده شده که با مشخصه‌هایی از قبیل سختی کرنشی، سختی فشاری، سخت شدگی نرخ کرنش، سه ثابت وابسته (محصول سه تنش اصلی، سطح شکست، حد الاستیک و مقاومت باقی‌مانده) و شاخص آسیب و نرم شدگی ترک قابل‌بیان است [۱۸]. و در آن رابطه بین تنش با کرنش  $\epsilon$ ، نرخ کرنش، انرژی داخلی  $E$  و شاخص خسارت  $D$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

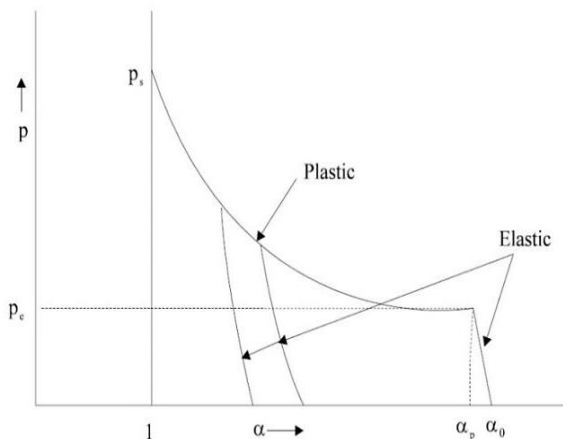
$$\sigma_{ij} = f(\epsilon_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, E, D) \quad (۴)$$

در شکل (۲) مدل RHT به صورت تنش تسلیم در برابر فشار دیده می‌شود که در آن فشار به صورت میانگین حاصل از سه تنش اصلی تعریف می‌شود.



شکل ۲. مدل RHT بتن به صورت تنش تسلیم در برابر فشار [۱۹]

اما شکل (۳) رابطه بین فشار و تخلخل مواد معروف به معادله  $P-\alpha$  را نشان می‌دهد که برای بیان حالت بتن در نرم‌افزار استفاده شده است.

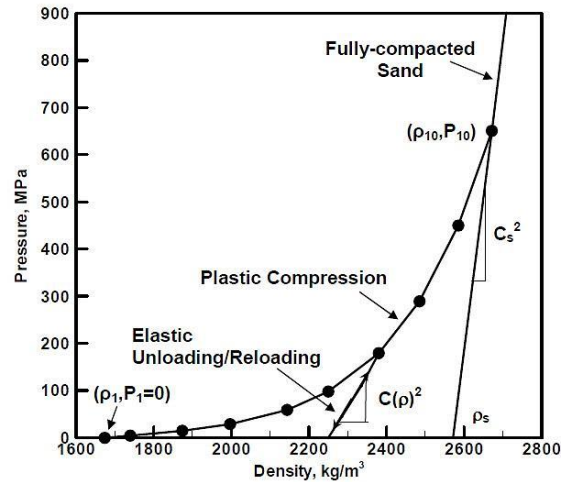


شکل ۳. فشار و تخلخل مواد معروف به معادله  $P-\alpha$  [۱۹]

در این نمودار،  $\alpha$  بیانگر میزان تخلخل ماده بوده و به صورت تابعی از حجم بیان می‌شود بنابراین:

$$\alpha = V/V_s \quad (۵)$$

**خاک:** معادله حالت تراکمی که توسط لین و ساندویک<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۱ ارائه شد متکی بر آزمایش آزمون سه محوری است که با منحنی تراکم پلاستیک که همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود نتیجه تابع چندجمله‌ای فشار-چگالی است توصیف می‌شود [۱۴].



شکل ۱. رابطه بین چگالی و فشار در خاک معروف به نمودار ده تکه‌ای مورد استفاده در AUTODYN [۱۴]

این معادله حالت که برای مواد متخلخل مانند خاک کاربرد فراوان دارد شکل خاصی از معادله حالت مای-گرانیشن است که ترم دوم آن حذف شده است.

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (۳)$$

در معادله (۳)،  $P$  فشار (مجموع فشار منفذی و مؤثر) در اسکلت خاک برحسب پاسکال،  $\rho$  چگالی فعلی خاک برحسب  $\text{kg/m}^3$  پارامتر گاما گرانیشن بر حسب  $\text{N.m/J}$  چگالی انرژی داخلی برحسب  $\text{J/kg}$  و زیرنویس  $H$  به معنای مرجع شوک هوگونیوت سطح است که یک کمیت قابل‌محاسبه و مبتنی بر معادله‌ای است که فرایند شوک را با استفاده از خواص ترمودینامیکی نشان می‌دهد [۱۵].

بتن: بتنی که به خوبی مخلوط و ویبره شده باشد، تا قبل از لحظه شکست رفتاری ایزوتروپیک از خود نشان می‌دهد [۱۶]. همچنین رفتار بتن تحت بارهای دینامیکی و ضربه‌ای تحت یک فرایند پیچیده غیرخطی بوده و با رفتار آن تحت بارهای استاتیکی کاملاً متفاوت است [۱۷].

در این تحقیق از مدل RHT (Reidel-Thoma-Hiermaier) که برای توصیف مواد ترد مثل بتن تحت بارهای دینامیکی کاربرد

<sup>۱</sup>Laine and Sandvik

$$p = A \times \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) \times e^{(-R_1 V)} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) \times e^{(-R_2 V)} + \frac{w}{V} E \quad (۶)$$

در معادله (۶)،  $A$  و  $B$  و  $R_1$  و  $R_2$  و  $w$  ثابت‌های وابسته به ماده منفجره بوده که از طریق آزمایش‌های تجربی قابل استخراج‌اند،  $E$  انرژی به ازای واحد حجم برحسب مگا بار و  $V$  حجم محصولات حاصل از فرآیند انفجار به حجم اولیه ماده منفجره و یا چگالی آن‌ها است [۲۱] که مقدار حجم اولیه و حجم محصولات حاصل از انفجار در لحظه اول انفجار باهم برابر است. مشخصات مربوط به ماده منفجره استاندارد TNT با چگالی  $1/63$  گرم بر سانتی‌متر مکعب مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) موجود است.

جدول ۲. مهم‌ترین مشخصات ماده منفجره و فولاد استفاده شده

فولاد			
مقدار	نماد	واحد	شرح
---	<i>Shock</i>	---	معادله حالت
---	$\rho_R$	$g/Cm^3$	چگالی مرجع
---	<i>Johnson cook</i>	---	مدل مقاومت
۸۱٫۸	$E_T$	$GPa$	مدول برشی
۰٫۳۵	$F_y$	$GPa$	تنش تسلیم
۱۸۱۱	$T$	$K$	دمای ذوب

ماده منفجره

مقدار	نماد	واحد	شرح
---	<i>JWL</i>	---	معادله حالت
۱٫۶۳	$\rho_R$	$g/Cm^3$	چگالی مرجع
۳۷۳٫۷۷	$A$	$GPa$	پارامتر $A$
۳٫۷۴۷۱	$B$	$GPa$	پارامتر $B$
۴٫۱۵	$R_1$	---	پارامتر $R_1$
۰٫۹	$R_2$	---	پارامتر $R_2$
۰٫۳۵	$W$	---	پارامتر $W$

### ۳. مدل توزیع موج انفجار در خاک

پس از عمل کردن چاشنی، خرج‌های انفجاری به سرعت به توده گازی بسیار داغ، پرفشار و متراکم که منشأ قدرتمندی از امواج در محیط می‌شوند تبدیل شده و به سرعت در خاک گسترش می‌یابند [۲۲] و همان‌طور که می‌دانیم تنش‌های ناشی از انفجار

که در آن،  $V$ ، حجم مشخص از ماده متخلخل و  $V_s$ ، حجم مشخص بخش جامد ماده (بدون فضای خالی) است. مزیت مدل  $P-\alpha$  نسبت به سایر مدل‌ها در این است که این مدل علاوه بر بیان رفتار مصالح ترد متخلخل در تنش‌های کم، برای بیان رفتار آن در تنش‌های بالا نیز بسیار مناسب عمل می‌کند. بنابراین طیف وسیعی از محدوده تنش‌ها و مصالح را تنها به کمک یک فرمول بیان می‌کند. لازم به ذکر است که در شرایط فشردگی کامل  $\alpha = 1$  خواهد بود [۱۹]. سایر مشخصات برای بتن در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مهم‌ترین مشخصات بتن استفاده شده

مقدار	واحد- نوع	شرح
---	$P-\alpha$	معادله حالت
۲٫۷۵	$g/Cm^3$	چگالی مرجع
۲٫۱۴	$g/Cm^3$	چگالی متخلخل
۳۵٫۲۷	$GPa$	مدول بالک
---	<i>RHT Concrete</i>	مدول گسیختگی
---	<i>RHT Concrete</i>	مدل مقاومت
۱۶٫۷	$GPa$	مدول برشی
۰٫۳۵	$GPa$	مقاومت فشاری
۰٫۰۱	---	مقاومت کششی

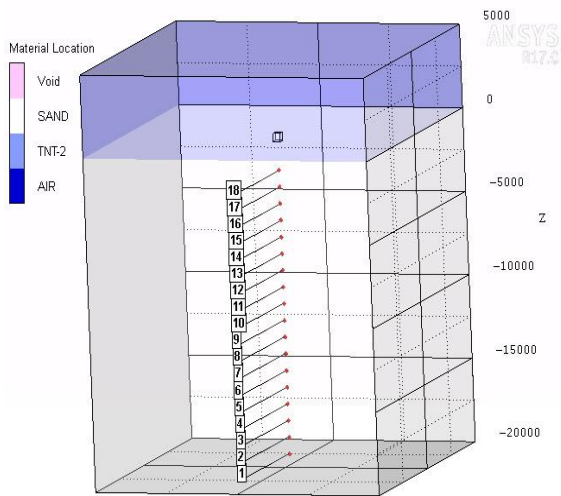
**فولاد:** از فولاد برای مدل کردن مسلح‌کننده‌ها در سازه بتنی

استفاده می‌شود و برای توصیف رفتار فولاد از معادله حالت خطی استفاده

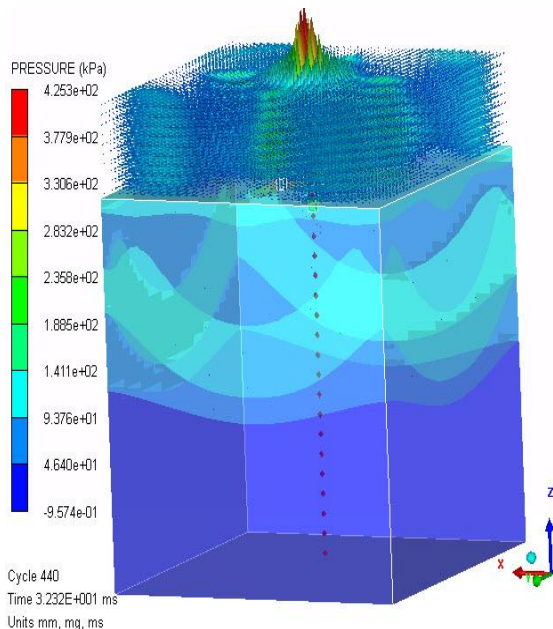
شده است. این معادله توصیف‌کننده رفتار خطی بین کرنش حجمی و فشار در فولاد است که به وسیله مدول بالک ( $K$ ) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. جهت تعریف رفتار مقاومتی فولاد از مدل جانسون-کوک استفاده شده است که با لحاظ کردن اثرات سختی، نرخ کرنش و درجه حرارت، کاربرد فراوان و موفقیت در شبیه‌سازی مسائل مربوط به ضربه و انفجار دارد. برای شبیه‌سازی شکست هم از مدل شکست ناشی از کرنش پلاستیک استفاده می‌شود. پارامترهای معادله حالت و مدل مقاومت و شکست برای فولاد مصرفی در جدول (۲) ارائه شده است [۱۵].

**ماده منفجره:** معادله حالت  $JWL$  که در زیر آمده است

مهم‌ترین معادله حالت برای مواد منفجره است که برای مدل کردن انواع مواد منفجره کاربرد فراوانی دارد.  $JWL$  یک مدل اساساً فیزیکی است که به کمک قانون ترمودینامیک، مواد منفجره شیمیایی را مدل می‌کند [۲۰].



شکل ۴. هندسه مدل گسترش موج انفجار در خاک و موقعیت سنجه‌ها



شکل ۵. توزیع تنش در میانه تحلیل در هندسه مدل گسترش موج

در این هندسه محیط خاک به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  متر از مصالح ماسه با مدل حالت تراکمی و مدل مقاومت Mo Granular، در کنار مدل گسیختگی Hydro (P min) مدل شده است. هوا نیز به صورت گاز ایده آل به ابعاد  $20 \times 20 \times 5$  متر مدل شده و در نهایت حجم ماده منفجره معادل  $203/75$  کیلوگرم از مصالح TNT با چگالی  $1630$  کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب شده است. که اطلاعات کامل این مصالح در جدول (۲) آمده و نوع مدل‌های استفاده شده نیز پیش‌تر تشریح شده‌اند.

این مدل از نوع سه‌بعدی کامل بوده و خاک، هوا و ماده منفجره در محیط اویلر یکپارچه مدل‌سازی شده‌اند که ارتباطات اویلری- اویلری ماده منفجره، هوا و خاک با یکدیگر با یکپارچه‌سازی محیط اویلری برای نرم‌افزار مفهوم خواهد شد. در

در زیر زمین چه به لحاظ شدت بار و چه به لحاظ مدت آن به مراتب بزرگ‌تر از تنش‌های ناشی از انفجار در هوا هستند [۲۳]. همچنین هر بارگذاری ناشی از موج انفجار در سطح توسط سه پارامتر شکل موج، حداکثر اضافه فشار  $P_{SO}$  و زمان دوام  $td$  تعیین می‌شود که در این میان حداکثر اضافه فشار  $P_{SO}$  از بقیه دارای اهمیت بالاتری است و یکی از راه‌های پیش‌بینی شدت این موج در نقاط مختلف خاک از طریق فرمول نیمه تجربی زیر که در آیین‌نامه محافظت در برابر انفجار آمریکا TM5-855-1 آمده است صورت می‌گیرد.

$$V_0 = 48.768f \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{(-n)} \quad (7)$$

$$P_0 = 22620.59 \rho_c V_0 \quad (8)$$

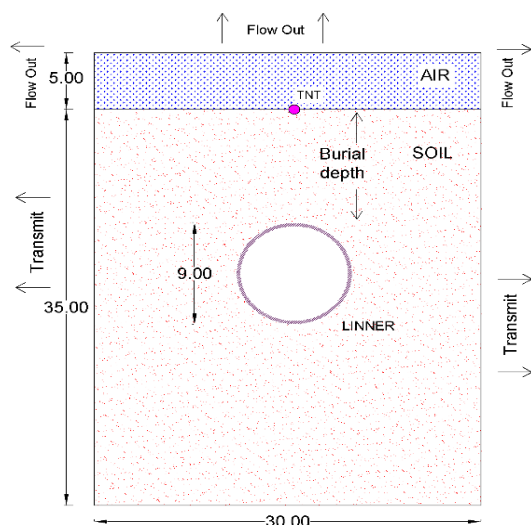
در این فرمول‌ها که به‌نوعی در مقررات ملی ساختمان ایران نیز آمده است [۲۴]،  $P_0$  حداکثر اضافه فشار انفجار در میدان آزاد برحسب پاسکال،  $R$  فاصله هدف (فاصله مرکزجرمی خرج تا هدف) برحسب متر،  $V_0$  حداکثر سرعت انتشار موج انفجار در خاک برحسب متر بر ثانیه و  $f$  ضریب اتصال محیط واسط با خرج انفجاری است که با استفاده از عمق مقیاس شده برای محیط‌های خاک، بتن و هوا از مرجع [۲۳] قابل استخراج است. البته مقدار این ضریب برای هوا مقدار ثابت  $1/4$  و در اینجا با توجه به انفجار سطحی،  $0/4$  خواهد بود.  $\rho_c$  مقاومت صوتی برحسب پاسکال بر متر بر ثانیه،  $W$  وزن خرج انفجاری برحسب کیلوگرم،  $n$  ضریب کاهش (ضریب میراگری خاک) که با توجه به نوع خاک در نظر گرفته شده یعنی تیپ ۵ مرجع [۲۳]، مقدار آن  $2/75$  خواهد بود که همه این مقادیر در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳. مقادیر استفاده شده در مدل توزیع موج انفجار در خاک

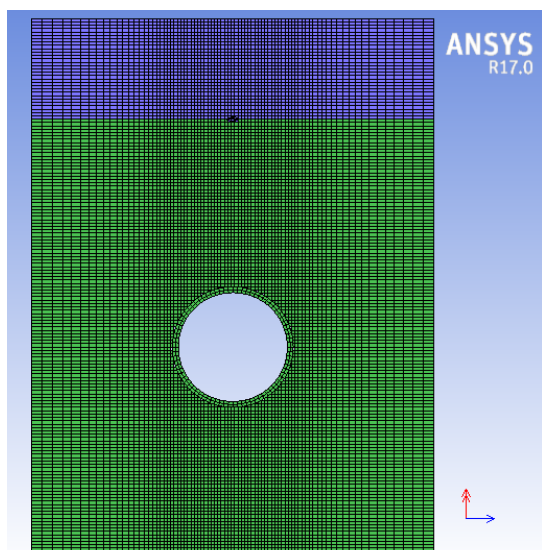
پارامتر	مقدار	واحد
فاصله خرج تا هدف (R)	۱-۱۸	m
ضریب اتصال (f)	۰/۴	---
مقاومت صوتی ( $\rho_c$ )	۴/۹۷۷	Pa.s/m
وزن خرج انفجاری (W)	۲۰۳/۸	Kg
ضریب کاهش (n)	۲/۷۵	---

### ۳-۱. مدل هندسی

برای بررسی توزیع موج انفجار در خاک از هندسه سه‌بعدی در محیط اویلری استفاده می‌شود. شکل‌های (۴-۵) نمایی از هندسه سه‌بعدی را نشان می‌دهند که در آن ماده منفجره، خاک و هوا در محیط اویلری شبیه‌سازی شده و حس‌گرهایی جهت ثبت تاریخچه فشار در نقاط مختلف محیط خاک (در فواصل یک تا ۱۸ متر دقیقاً زیر خرج انفجاری) قرار داده شده‌اند.



شکل ۷. هندسه مدل استفاده‌شده در بررسی عمق دفن تونل



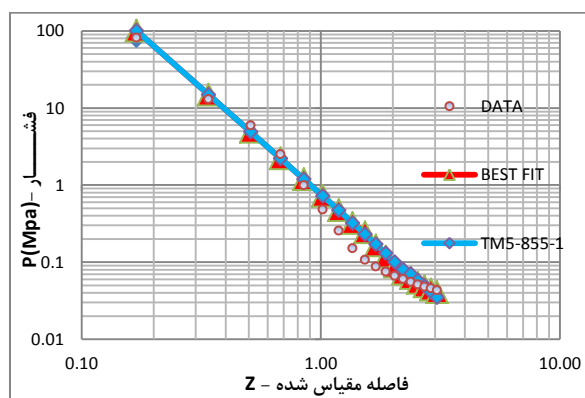
شکل ۸. مش بندی محیط استفاده‌شده در بررسی عمق دفن تونل

جدول ۴. حداکثر فشار ثبت‌شده برای بحرانی‌ترین نقطه مقطع در فواصل مختلف از مرکز انفجار

فاصله تونل تا خرج (m)	حداکثر فشار (Mpa)
۵	۲۶/۸
۱۰	۱۶/۳۵
۱۵	۱۳/۳
۲۰	۱۲/۳۲

اعداد ارائه شده در جدول (۴) مقدار حداکثر فشار در نقطه بالای تونل (۹۰ درجه) دقیقاً زیر بار انفجاری (که بحرانی‌ترین نقطه در این نوع بارگذاری از نظر موقعیت هست) را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که خاک به خاطر ساختار متخلخل، یک جاذب انرژی امواج انفجار خوب است، با افزایش عمق اندازه‌گیری، کاهش بیشتر انرژی امواج را شاهد خواهیم بود که همان‌طور که قبلاً

مرزهای هندسه، برای مرزهای محیط هوا با خارج مدل، شرایط مرزی جریان مواد و برای مرزهای محیط خاک با فضای خارج مدل از شرط مرزی انتقال انرژی استفاده‌شده. این شرط‌های مرزی اجازه جریان مواد و انتقال انرژی را بدون ایجاد اثرات سو بر سایر موارد فراهم می‌سازند. چاشنی انفجاری نیز به صورت نقطه‌ای و در بالای خرج انفجاری تعریف شده است (این کار به خاطر تمرکز بیشتر موج انفجار بر روی محیط خاک است، اتفاقی که در واقعیت نیز شاهد آن هستیم). پس از اتمام تحلیل نتایج، نمودار حاصل از حداکثر اضافه فشار ثبت‌شده توسط حس‌گرها با نتایج حاصل از معادله (۸) که برگرفته از آیین‌نامه TM5-855-1 است مقایسه شد که همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود از انطباق خوبی برخوردار است (کمتر از ۵ درصد).



شکل ۶. مقایسه نتایج تحلیل آیین‌نامه آمریکا TM5-855-1

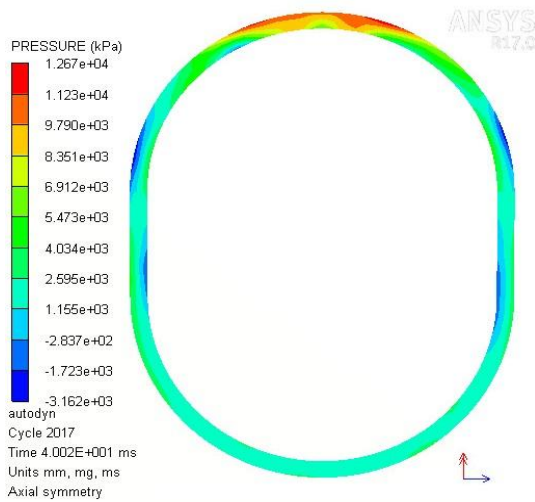
#### ۴. بررسی اثر عمق دفن تونل

از آنجایی‌که خاک مصالحی تراکم پذیر است و در تحلیل صورت گرفته در مرحله صحت سنجی نیز اثر میراگری آن در مواجهه با امواج انفجار مشاهده شد، دور از ذهن نبود که در گام اول خود خاک به‌عنوان کاهنده انرژی امواج مطرح باشد. لذا با تهیه مدلی دوبعدی مانند آنچه در شکل (۷) مشاهده می‌شود به بررسی عمق دفن تونل پرداخته‌ایم. همچنین شکل (۸) نیز نمایی از مش بندی مدل را نمایش می‌دهد. در این مدل تونل در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری مدل و اثر موج انفجار بر تونل بررسی شد. در اینجا مقطع تونل به‌صورت دایره‌ای (که امروزه بیشتر مرسوم است) با دولایه شبکه‌بندی با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر که آن‌هم امروزه مرسوم‌تر است به‌صورت مقطع معادل و تحت اثر ۲۰۵ کیلوگرم خرج انفجاری TNT قرار گرفته است. همچنین از آنجایی‌که در آن از تقارن محوری کمک گرفته‌شده پس در پایین مدل نیاز به هیچ شرط مرزی نیست. نتایج مربوط به این قسمت هم در جدول (۴) آمده است. سایر مشخصات هندسه مدل و مصالح مانند قسمت توزیع موج انفجار در خاک است.

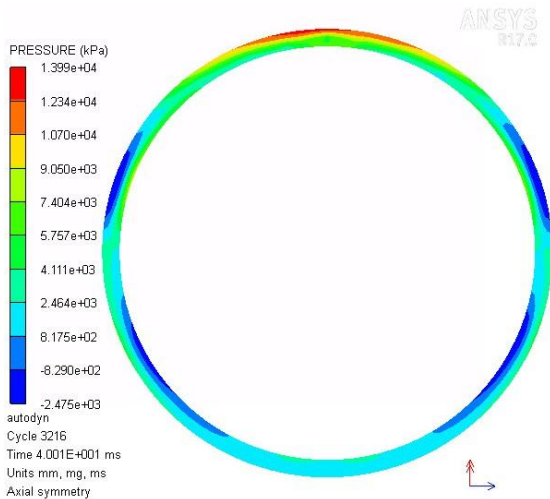
جدول ۵. حداکثر فشار وارد بر پوسته تونل

مقطع	حداکثر فشار MPa
پنج ضلعی	۱۰/۱
تخم مرغی	۱۴/۹
بیضی عمودی	۱۵/۳
دایره‌ای	۱۵/۴
نعل اسبی	۱۵/۷
شبه بیضی عمودی	۱۵/۹
بیضی افقی	۱۵/۹
شبه بیضی افقی	۱۶/۳
جعبه‌ای	۱۸/۴

باید توجه داشت که در مقاطع مختلف وضعیت امواج بازتابی متفاوت است و گاهی این امواج با امواج مستقیم ترکیب می‌شوند و در نتیجه مقدار باری که بر نقاط مختلف هر مقطع وارد می‌شود با مقاطع دیگر متفاوت خواهد بود.



شکل ۱۰. توزیع فشار در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه در مقطع شبه بیضی عمودی



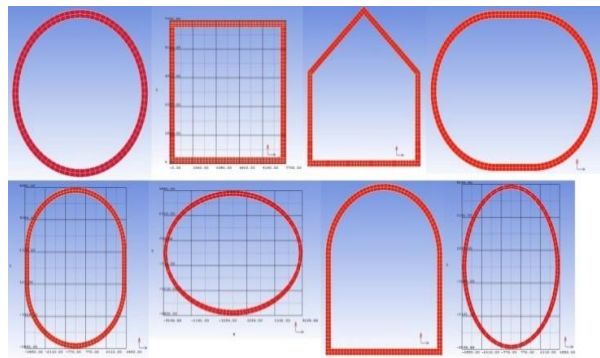
شکل ۱۱. توزیع فشار در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه در مقطع دایره

بیان شد مقدار این کاهش (کاهش انرژی امواج در عمق) در خاک‌های مختلف با فاکتور ضریب کاهش در آیین‌نامه آمریکا (TM5) بیان شده است.

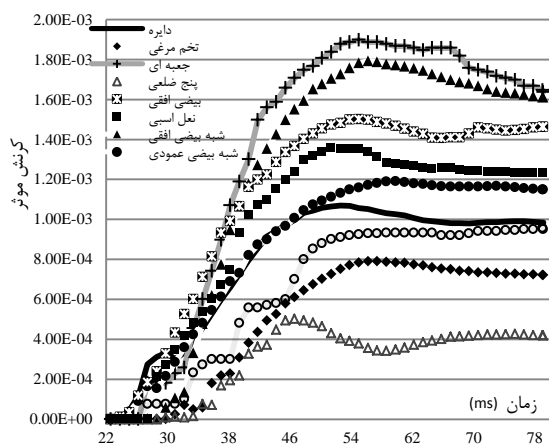
### ۵. بررسی اثر هندسه مقطع تونل

در این قسمت با ثابت گرفتن کلیه متغیرها و ساخت مدلی مانند مراحل قبل، تنها مقطع تونل و شکل سطح مقطع آن به منظور دستیابی به مقطع مناسب‌تر بررسی شده است. در شکل (۹) برخی مقاطع بررسی شده شامل: دایره، شبه بیضی افقی، شبه بیضی عمودی، بیضی افقی، بیضی عمودی، باکسی شکل، نعل اسبی و پنج‌ضلعی آمده است. که بر اساس سطح مقطع درونی ۵۴/۱ مترمربع مقطع دایره‌ای که در سازه‌های شهری کاربرد زیادی دارد معادل‌سازی شده‌اند و در کلیه مقاطع از دو ردیف مش‌بندی در مقاطع تونل با ضخامت ۳۵ سانتی‌متر استفاده شده و کلیه مقاطع همان‌طور که قبلاً هم گفته شد تحت اثر ۲۰۵ کیلوگرم خراج انفجاری TNT قرار گرفته و فاصله بالاترین نقطه همه مقاطع تا مرکز خراج انفجاری ۱۰ متر است. نتایج این تحلیل‌ها هم در جدول (۵) آمده است. یکی از موارد قابل‌ذکر در این بخش، مقاطع پنج‌ضلعی، بیضی و تخم‌مرغی شکل است که به دلیل نبودن در هندسه‌های پایه نرم‌افزارهای مختلف از این دست، ابتدا بخش‌های مختلف هر هندسه به صورت مجزا و گره به گره ساخته و در پایان با در کنار هم قرار دادن و متصل کردن آن‌ها، هندسه موردنظر ساخته شده است. مقطع تخم‌مرغی از این نظر مهم است که در مقاطع قنوات به‌عنوان سازه‌هایی تونلی شکل و در برخی تونل‌های دست‌ساز و غارها دیده می‌شود.

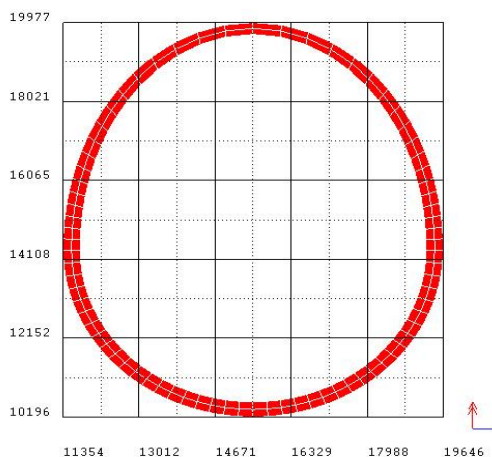
در شکل‌های (۱۰-۱۱) توزیع فشار در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه در مقطع شبه بیضی عمودی و دایره و در شکل‌های (۱۲-۱۳) نیز هندسه، مش‌بندی و توزیع فشار در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه در مقطع تخم‌مرغی را مشاهده می‌کنید. در جدول (۵) حداکثر فشار وارد بر جداره تونل در مقاطع مختلف آمده است.



شکل ۹. برخی از انواع مقاطع بررسی شده



شکل ۱۴. زمان-کرنش مؤثر در مقاطع مختلف



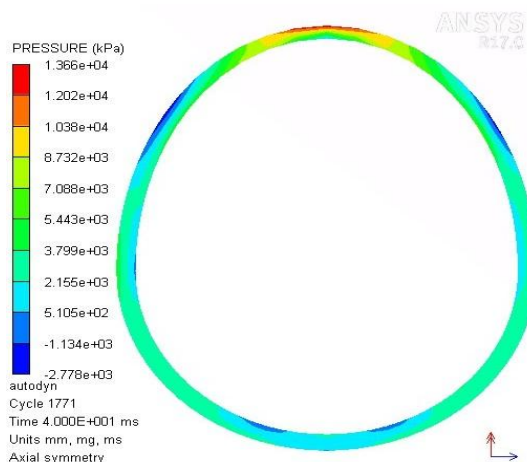
شکل ۱۲. هندسه و مش بندی مقطع تخم‌مرغی

جدول ۶. حداکثر کرنش مؤثر در نزدیک‌ترین نقطه تونل به انفجار

کرنش مؤثر	مقطع
۰/۰۰۰۵۴	پنج‌ضلعی
۰/۰۰۰۷۹	تخم‌مرغی
۰/۰۰۰۹۵۷	بیضی عمودی
۰/۰۰۱۰۷	دایره‌ای
۰/۰۰۱۱۶	نعل اسبی
۰/۰۰۱۱۹	شبه بیضی عمودی
۰/۰۰۱۵	بیضی افقی
۰/۰۰۱۸	شبه بیضی افقی
۰/۰۰۲۰۳۶	جعبه‌ای

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با مدل‌سازی سازه تونل و محیط خاک، هوا و ماده منفجره شرایط واقعی یک انفجار سطحی در نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN شبیه‌سازی و متغیرهایی نظیر عمق دفن تونل و شکل سطح مقطع آن مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که هرچه فاصله تونل مدفون تا خرج انفجاری کمتر باشد، مقدار فشار بیشتری به نقطه‌ای از مقطع که کمترین فاصله را با مرکز خرج انفجاری دارد خواهد رسید و با افزایش این فاصله مقدار فشار حداکثر کاهش می‌یابد. لذا یکی از بهترین راهکارها برای محافظت از تونل‌ها در مقابل انفجارهای سطحی، افزایش عمق اجرای آن‌هاست. از طرف دیگر، پنج‌ضلعی، تخم‌مرغی و بیضی عمودی دارای بهترین عملکرد و مقطع جعبه‌ای شکل بدترین عملکرد در کاهش آثار انفجار بر مقطع تونل را دارند. البته علت استفاده عمده از مقطع دایره‌ای به خاطر سادگی اجرا و عملکرد یکسان آن نسبت به هر موقعیت خرج انفجاری و نیز رواج استفاده از دستگاه‌های حفار گردشی است. با بررسی مقاطع بیضی و شبه بیضی عمودی و افقی، به نظر می‌رسد با افزایش ارتفاع مقطع تونل نسبت به عرض آن، عملکرد مقطع در مقابل این نوع بارگذاری انفجاری افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳. توزیع فشار در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه در مقطع تخم‌مرغی

در جدول (۶) و شکل (۱۴) نتایج مقاطع مختلف در کنار هم، بررسی شده و بر اساس کمترین اثر بار انفجار بر روی مقطع آن‌ها، رده‌بندی شده‌اند.

در خصوص علت نتایج جدول (۶) باید گفت از آنجاکه انفجار به صورت نقطه‌ای صورت گرفته و امواج انفجار به صورت شعاعی از مرکز انفجار توزیع می‌شوند، مقطع پنج‌ضلعی به خاطر فرم تیز و موج شکنی که در جبهه موج دارد باعث شکست موج شده و کمترین مقدار اثر را از موج و بار آن در بالاترین نقطه‌اش دریافت می‌کند پس از آن نیز مقاطعی که سقف گنبدی شکلی دارند زاویه کمتری با جبهه حرکتی موج داشته و کمترین اثر را از امواج دریافت می‌کنند. در حالی که مقاطعی مانند جعبه‌ای و مقاطع افقی بیشترین زاویه را با جبهه حرکتی موج دارند و اثر بیشتری را از بار انفجار دریافت می‌کنند. همین اثر را برای فاز منفی موج انفجار و در کف تونل نیز می‌توان در نظر گرفت. نکته‌ای که لازم به ذکر است این است که این رده‌بندی بر اساس موقعیت بارگذاری ذکر شده در شرح مدل، به دست آمده و ممکن است با جابجایی محل انفجار اثر مقاطع مختلف متفاوت باشد.



## ۷. مراجع ها

- [12] Rogers, G. F. C.; Mayhew, Y. R. "Thermodynamic and transport Properties of Fluids – SI Units"; Blackwell Publishing Ltd 2004.
- [13] Pandurangan, B. "Development, Parametrization and Validation of Dynamic Material Model for Soil and Transparent Armor Glass"; All Dessertation. 2009, 382, 156-175.
- [14] Laine, L.; Sandvik, A. "Derivation Of Mechanical Properties For Sand"; the 4<sup>th</sup> Asia-pacific conference on Shock and Impact Loads on Structures, SILOS, CI-Premier LTD. 2001, 361-367.
- [15] Gholizade, A.; Rajabi, M. "Securing The Buried Concrete Structure Against Blast Loading"; Passive Defense Sci. & Tech. 2013, 3, 167-179 (In Persian).
- [16] "Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159"; U.S. Department Of Transportation Federal Highway Administration, No. FHWA-HRT-05-062, May 2007.
- [17] Lu, Y.; Wang, Z. "Charactrization of Structural Effects from Above-Ground Explosion Using Coupled Numerical Simulation"; Comput. Struct. 2006, 84, 1729-1742.
- [18] Brannon, R. M.; Leelavanichkul, S. "Survey of Four Damage Modeles For Concrete"; SANDIA Report, Sandia National Laboratories for the United States Department of Energy's National Nuclear Administration. 2009, 5544.
- [19] "Autodyn V. 6.1, Theory Manual, Revision 4.3"; Ansys Inc., 2005.
- [20] Vannucci, P.; Masi, F.; Stefanou, I. "A Study on the Simulation of Blast Actions on a Monument Structures"; HAL Archives, February 2017.
- [21] Lee, E.; Finger, M.; Collins, W. "JWL Equation of State Coefficients for High Explosions"; Lawrence Livermore Laboratory, University of California, Prepared for U.S. Atomic Energy Comission, No. UCID-16189, 1973.
- [22] "Structures To Resist The Effects of Accidental Explosions"; Unified Facilities Criteria UFC 3-340-02, Department of Defense, USA, 2008.
- [23] "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons"; Technical Manual TM5-855-1, Department of the Army, USA, 1986.
- [24] "National Construction Standards Preparation and Promotion Office"; Draft of 21<sup>st</sup> Topic in National Standards of Construction, "Passive Defence", Iran Ministry of Buildin and House, 2010 (In Persian).
- [1] Laine, L.; Larsen, O. P. "Implementation of Equation of State for Dry Sand in Autodyn"; Proceedings of 83<sup>rd</sup> Shock and Vibration Symposium, Shock and Vibration Exchange, 2012.
- [2] Mobaraki, B.; Vaghefi, M. "Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion"; Tunn. Undergr. Sp Tech. 2015, 47, 114-122.
- [3] Nagy, N. M.; Eltehawy, E. A.; Elhanafy, H. M.; Eldesouky, A. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; 13<sup>th</sup> International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, 2009.
- [4] Lu, Y.; Wang, Z.; Karen, C. "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.
- [5] Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H.; Chong, K. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast"; Comput. Struct. 2005, 83, 339-356.
- [6] Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. "Dynamic Analysis of Underground Tunnels Subjected to Internal Blast Loading"; 11<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics, 5<sup>th</sup> European Conference on Computational Mechanics and 6<sup>th</sup> European Conference on Computational Fluid Dynamics.
- [7] Safa, P.; Tahmasbzade, M. "Effect of Blast Wave Trap in Tunnels With 90 Degrees Bend on Reduction of Pressure Produced by an Explosion Outside the Tunnel"; Advanced Defense Sci. & Technol. 2015, 3, 201-210 (In Persian).
- [8] "Ansys Autodyn, User Manual, Release 15"; November 2013.
- [9] Mohammed, A. Y.; Rafika, N. R.; Nurzaman, M. N.; Ariffin, I.; Muhamad, A. Y.; Ng, C. P. "Simulation of Reinforced Concrete Blast Wall Subjected to Air Blast Loading"; J. Asian Scientific Res. 2014, 4, 522-533.
- [10] Zakrisson, B. "Numerical and Exprimental Studies of Blast Loading"; Licentiate Thesis, Lulea University of Technology.
- [11] Pan, Z.; Yuansheng, C.; Jun, L. "Numerical Analysis of Dynamic Response of Corrugated Core Sandwich Panel Subjected to near Field Air Blast Loading"; Shock Vib. 2014, 180674, 110-120.