



## Evaluation of Changing Effects of Density and Thickness of Polyurethane as a Protective Coating on Underground Tunnels under Surface Blast

Mohsen Fazlavi<sup>1\*</sup> , AmirAbbas Asadian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Enghelab-e Eslami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>MSc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 01.04.2021

**Revised:** 02.17.2021

**Accepted:** 02.24.2021

**Keyword:**

Porous material

Surface blast

Polyurethane

Tunnel

Protective coating

**\*Corresponding Author:**

Mohsen Fazlavi

**Email:** [mfazlavi@tvu.ac.ir](mailto:mfazlavi@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

The use of polyurethane as a sacrificial coating is an important factor in reducing risks and improving the safety of structures against explosions caused by war and terrorist attacks. The parameters of polyurethane can have a positive effect on reducing damage to tunnels under the impact of surface explosions. In this paper, the effect of density and thickness of the protective cover of polyurethane (as an energy absorber) in reducing the damage caused by surface explosions on underground tunnels was studied by computer simulation with AUTODYN software. Six different foam modules with thicknesses between 60 and 150 cm, and five different types of foams with densities between 90 and 250 kg / m<sup>3</sup> and their ability to reduce the maximum pressure caused by an explosion were compared. The results of this study illustrated that by increasing the thickness of the protective cover of polyurethane, a significant decrease occurred in the amount of pressure and vertical displacement in the tunnel crown. Moreover, the findings on the effect of polyurethane density indicated that at a density of 140 kg/m<sup>3</sup>, the optimum reduction in pressure in the tunnel crown occurred.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

## بررسی تأثیر تغییر چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان بر تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر انفجار سطحی

محسن فضولی<sup>۱\*</sup>، امیرعباس اسدیان<sup>۲</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، تهران، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### چکیده

استفاده از پلی‌یورتان به‌عنوان پوشش فداشونده، موضوعی مهم در حوزه کاهش مخاطرات و افزایش ایمنی سازه‌ها در برابر انفجارهای ناشی از حملات جنگی و تروریستی است. پارامترهای رفتاری پلی‌یورتان می‌تواند تأثیرات مثبتی در راستای کاهش خسارات وارد شده به تونل‌ها تحت تأثیر انفجارهای سطحی داشته باشد. در این مقاله، تأثیر تغییر چگالی ماده و همچنین ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان (به‌عنوان جاذب انرژی) در کاهش خسارت ناشی از انفجار سطحی بر تونل‌های زیرزمینی به کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار AUTODYN بررسی شده است. ضخامت کاور فوم از ۶۰ سانتی‌متر تا ۱۵۰ سانتی‌متر و همچنین چگالی آن از ۹۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در مدل‌سازی، متغیر در نظر گرفته شد و تأثیر هر یک از آن‌ها در کاهش حداکثر فشار ناشی از انفجار در تاج تونل با هم مقایسه گردید. مشاهده شد که با افزایش ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان، مقدار فشار و تغییر مکان قائم در تاج تونل روند کاهشی خواهد داشت. همچنین در اثر تغییر چگالی پلی‌یورتان در ضخامت ۷۰ سانتی‌متر مشاهده شد که روند کاهشی فشار حاصل از انفجار در تاج تونل، در چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب به حد بهینه خود خواهد رسید.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶

### کلید واژگان:

ماده متخلخل  
انفجار سطحی  
پلی‌یورتان  
تونل  
پوشش حفاظتی

\*نویسنده مسئول: محسن فضولی

پست الکترونیکی:

[mfazlavi@tvu.ac.ir](mailto:mfazlavi@tvu.ac.ir)



## مقدمه

امروزه با گسترش حملات نظامی و تروریستی، افزایش تهدیدات به زیرساخت‌های کشور، محتمل خواهد بود. سازه‌های زیرزمینی؛ از جمله تونل‌ها نیز در برابر انفجارهای رخ داده در سطح زمین و انفجارهای زیرزمینی آسیب‌پذیر هستند. یکی از روش‌های مقابله با اثرات این حملات و کاهش آسیب‌پذیری ناشی از آنها، به‌کارگیری روش‌ها و تمهیدات پیشنهاد شده در دستورالعمل‌های پدافند غیرعامل است. بدین منظور در طول سالیان متمادی، پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا با بررسی انفجارها و تأثیرات آن‌ها بر سازه‌های زیرزمینی، به شناخت درست و دقیقی از رفتار و پاسخ این سازه‌ها در برابر انفجارها دست یابند. تمهیداتی که برای مقابله با این حوادث و کاهش خرابی‌های ناشی از آن می‌توان در نظر گرفت، به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از این تمهیدات، محاسبه بار دینامیکی ناشی از انفجار و طراحی سازه برای تحمل این بارگذاری است. از دیگر روش‌های ارائه شده می‌توان به طراحی عناصر سازه‌ای برای کاهش مقدار شتاب ناشی از انفجار که به سازه می‌رسد اشاره کرد. همچنین طراحی و در نظرگیری پوشش‌های فداشونده برای جذب انرژی ناشی از انفجار و کاهش میزان انرژی رسیده به سازه، از دیگر روش‌های مقابله با بارهای انفجاری است [۱؛ ۲].

مهندسان ارتش ایالات متحده آمریکا تأثیرات ارتعاشات انفجاری بر سازه‌های زیرزمینی را در سال‌های ۱۹۴۸ الی ۱۹۵۲ با تمرکز بر تأثیر انفجار بر تونل‌ها بررسی کردند که در آن، تعدادی آزمایش در مقیاس انفجار واقعی نزدیک به خطوط تونل غیرپوشیده، بررسی گردید و از نتایج آن در پژوهش‌های محققان دیگر برای صحت‌سنجی مدل‌های نرم‌افزاری استفاده شد [۳]. در سال ۲۰۰۳، ونگ و لی، مدلی سه فازی برای تعریف خاک در نرم‌افزار ارائه کردند که توانایی مدل‌سازی انفجار و انتشار موج انفجاری در خاک را دارد. در ادامه همین پژوهش، یک مدل عددی دوگانه برای مدل‌سازی تونل قرار گرفته در خاک ارائه شد. در این مدل، از روش ترکیبی SPH-FEM استفاده شد که در آن، از روش SPH برای مدل‌سازی انفجار و خاک نزدیک محل انفجار استفاده شد؛ درحالی‌که از روش FEM برای مدل‌سازی خاک دورتر از محل انفجار و مدل‌سازی تونل جهت بررسی پایداری تونل در برابر انفجار استفاده گردید و نتیجه نهایی، همگرایی خوبی بین محاسبات عددی و مدل‌سازی در مقیاس واقعی را نشان داد [۴]. در سال ۲۰۰۶، چیسمن و همکارانش با در نظرگیری آنالیز دوگانه اویلر-لاگرانژ رفتار تونل قرار گرفته در خاک ماسه‌ای اشباع را بررسی کردند. در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی با نتایج مدل‌سازی عددی، مقایسه شده است [۵]. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ یک شبیه‌سازی عددی را برای بررسی پاسخ تونل مترو در شانگهای تحت تأثیر بار انفجاری با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA انجام دادند. آن‌ها از روش ALE استفاده کردند که در آن از مش‌بندی اویلری برای مدل‌سازی هوا، خاک و ماده منفجره و مش‌بندی لاگرانژی برای مدل‌سازی تونل استفاده شده بود. گره‌های ادغام شده برای هر دو بخش، سبب انتقال تنش بین خاک و سازه می‌شود [۶]. ده و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ تحقیقات گسترده خود را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-AUTODYN بر روی لوله‌های مدفون دارای کاور حفاظتی تحت تأثیر انفجار انجام دادند و با مقایسه خروجی نرم‌افزار با نتایج حاصل از آزمایش سانتریفیوژ به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از نرم‌افزار، به واقعیت بسیار نزدیک و قابل قبول است [۷؛ ۸]. تعدادی از محققان از جمله داوید، ویلیامز، ده، کوتر و وایت تاکنون موفق به انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ برای مدل‌سازی و بررسی تأثیرات انفجار بر تونل‌ها شدند. از آنجاکه که دستیابی به اطلاعات قابل اعتماد آزمایش میدانی در مقیاس واقعی، دشوار و سخت است؛ استفاده از آزمایش سانتریفیوژ به‌صورت مقیاس شده در علوم مهندسی مورد توجه است. آن‌ها با بررسی این تأثیرات در تونل‌های دفن شده در خاک خشک و تونل‌های دارای پوشش حفاظتی، نتایج مهم و کاربردی به‌دست آوردند و اطلاعات عددی درباره تأثیرات انفجار بر تونل‌های دفن شده ارائه کردند. البته با توجه به متغیر بودن میدان گرانشی در داخل دستگاه،

<sup>1</sup> Arbitrary Lagrangian Eulerian

مدل سانتریفیوژ به مدل‌های کوچک‌تر محدود می‌شود که ممکن است برای پیش‌بینی رفتار و پاسخ اتصالات پیچی در خطوط تونل دفن شده مناسب نباشد [۸].

با انجام واکنش شیمیایی و ایجاد موج انفجار در ماده منفجره، حجم قابل توجه از گاز با فشار بالا (تا ۳۰۰ کیلو بار) و دمای زیاد (۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه سلیسیوس) تولید شده و حجم وسیعی را اشغال می‌کند که با تشکیل لایه هوای فشرده، جبهه موج انفجاری به وجود می‌آید. مقدار این فشار که با فاصله گرفتن از مرکز انفجار تقلیل می‌یابد، از روابط و گراف‌های متعدد ارائه شده در مراجع مختلف قابل محاسبه است. رابطه (۱) برای محاسبه فشار Ps (بر حسب کیلو پاسکال) ناشی از انفجار w کیلوگرم ماده TNT در فاصله R متری از مرکز ماده منفجره است [۹؛ ۱۰].

$$\text{Log}_{10}[\text{Log}_{10}P_s] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.4644 \quad (1)$$

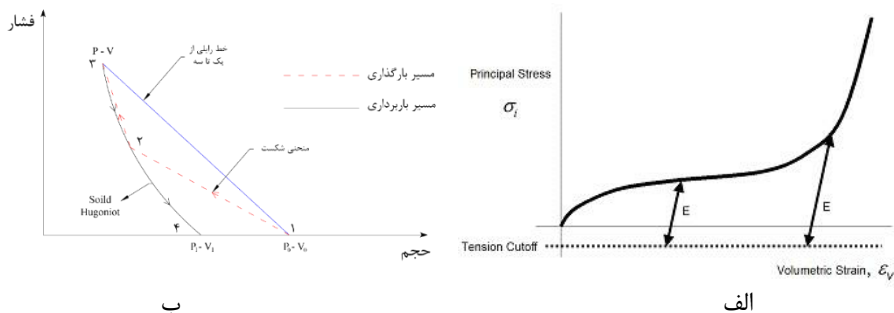
$$X = \text{Log}_{10}(Z)$$

که در آن، Z مطابق رابطه (۲) فاصله مقیاس شده انفجار است.

$$Z = R/W^{1/3} \quad (2)$$

### رفتار دینامیکی مواد متخلخل

در مواد متخلخل، حجم ظاهری اولیه ماده، از حجم اولیه نظیر حالت دانسیته کامل (بدون تخلخل) بیشتر است. چنانچه ماده متخلخل مذکور، تحت فشار و تراکم قرار گیرد، رفتار آن مطابق با نمودار شکل ۱ است. در مسیر تراکم از نقطه یک تا دو، حفرات موجود در ماده متخلخل به‌طور کامل فروریخته و بسته می‌شوند. اگر پس از بسته شدن حفرات (نقطه دو)، همچنان بر فشار وارده افزوده گردد، ماده متخلخل شبیه به یک ماده جامد بدون تخلخل رفتار نموده و شاخه بارگذاری از نقطه ۲ به نقطه ۳ ادامه می‌یابد. پس از برداشته شدن بار، مسیر بازگشت منحنی همانند ماده بدون تخلخل است و حجم و فشار ماده از حالت P-V در نقطه ۳ به حالت P<sub>1</sub>-V<sub>1</sub> در نقطه ۴ می‌رسد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد ماده متخلخل پس از برداشته شدن بار، حجمی کمتر از حجم اولیه خواهد داشت. در شکل ۱ علاوه بر نمودار رفتار ماده متخلخل که به ترتیب از نقاط ۱ تا ۳ است و در انتها به نقطه ۴ می‌رسد، خط رایلی نیز که نقطه یک را به سه متصل می‌کند رسم شده است. مساحت زیر این خط، نشان‌دهنده انرژی صرف شده برای رساندن ماده متخلخل از وضعیت یک به سه است [۱۱-۱۴].



شکل ۱. الف) رفتار مصالح متخلخل تحت تراکم دینامیکی [۱۱] ب) نمودار تنش-کرنش حجمی مدل رفتاری

Crushable Foam [۱۵]

در همین راستا، معادله حالت تخلخل - فوم شکست پذیر<sup>۱</sup> برای مدل سازی رفتار خردشدگی فومها تحت تأثیر بارهای ضربه ای (غیرمتناوب) به کار می رود. نمودار تنش - کرنش حجمی این مدل رفتاری در شکل ۱ نشان داده شده است.

این مدل با الاستیسیته ایزوتروپیک استفاده می شود و حالت الاستیک افزایشده، تابعی از فشار و تنش انحرافی وارده به مدل است و نحوه محاسبه هر کدام از آن ها به ترتیب در روابط (۳) و (۴) ارائه شده است. همچنین برای محاسبه کرنش حجمی، از رابطه (۵) استفاده می شود.

$$P^{n+1} = P^n + K \varepsilon_v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (۳)$$

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^n + 2G(\varepsilon_{ij}^{n+1/2} - \delta_{ij} \varepsilon_v^{n+1/2}) \Delta t^{n+1/2} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_v^{n+1/2} = \left(\frac{\dot{V}}{V}\right)^{n+1/2} \quad (۵)$$

در رابطه (۴)،  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کروئکر است. در کرنش حجمی، مقدار تنش های اصلی حاصل شده با مقادیر تنش های مجاز مقایسه می شود. اگر مقدار تنش اصلی، از مقدار تنش مجاز، بیشتر باشد، مقدار تنش اصلی به تنش مجاز کاهش می یابد. منحنی فشردگی این مدل رفتاری می تواند به صورت نمودار چندتکه ای تنش - کرنش حجمی، ارائه شود و کرنش حجمی به صورت نسبت لگاریتم طبیعی نرخ حجمی ماده تعریف شود [۱۵].

### مدل سازی انفجار در نرم افزارهای عددی

روش های مختلفی برای مدل سازی انفجار در نرم افزار اتوداین<sup>۲</sup> وجود دارد که در ادامه به معرفی مهم ترین آن ها پرداخته شده است. پس از معرفی هر کدام از این روش ها، یک مدل مبنا که تمام خصوصیات آن یکسان است و تنها روش های مدل سازی انفجار در آن فرق کند مدل شده است تا با استفاده از آن و مقایسه نتایج حاصل از آن بتوان انتخاب درستی از روش مدل سازی انفجار در این مقاله داشت.

#### ۱) مدل سازی انفجار با استفاده از شرط مرزی انفجار سطحی<sup>۳</sup>

این شرط مرزی می تواند برای مدل سازی بارهای فشاری ناشی از انفجار بر روی سازه ها اعمال شود. از این روش برای مدل سازی انفجارهای سطحی و اعمال اثر ناشی از انفجار سطحی بر سازه های قرار گرفته روی سطح زمین استفاده می شود و در این گونه از انفجارها، انتقال امواج فشاری از طریق هوا انجام می شود [۱۶].

#### ۲) مدل سازی انفجار با استفاده از تحلیلگر اویلر

مدل سازی انفجار در اتوداین با استفاده از روش تحلیلگر اویلر، طی دو مرحله انجام می شود: گام اول شامل انبساط و گسترش انفجار در حالت یک بعدی دارای تقارن محوری است و تا زمان رسیدن به سطح منعکس کننده موج ادامه می یابد. سپس خروجی تحلیل یک بعدی به مدل دو یا سه بعدی منتقل می شود [۱۶].

<sup>1</sup> Porosity – Crushable Foam

<sup>2</sup> AUTODYN

<sup>3</sup> Analytical Blast

### ۳) مدل‌سازی انفجار با استفاده از روش کوپل SPH - FEM

روش مدل‌سازی کوپل SPH-FEM یک روش بدون مش است و مزیت اصلی این روش نداشتن نیاز به یک شبکه‌بندی عددی برای محاسبه اجزای موجود در فضا است. این راه‌حل مفید برای زمانی که از مش‌بندی لاگرانژ برای شبیه‌سازی رفتار خاک در مقابل انفجار استفاده می‌شود کاربرد دارد. در این روش، مصالح و مواد به ذرات جامد متصل هستند. برخلاف روش‌های بر پایه مش‌بندی از قبیل لاگرانژ و اوپلر که بین گره‌های مدل اتصال ایجاد می‌کند تا مشتقات فضایی شکل بگیرد، روش SPH از تعدادی اجزای دانه‌ای منفصل تشکیل شده است که براساس یک روش تصادفی توزیع شده‌اند. در این روش، هیچ فرضی برای ارتباط ذره مورد نظر با ذرات مجاورش در نظر گرفته نمی‌شود. مواد و مشخصات این ذرات؛ از قبیل جرم، سرعت، موقعیت مواد و سایر مشخصات دیگر را برای معادلات ثابت حمل می‌کنند [۱۶].

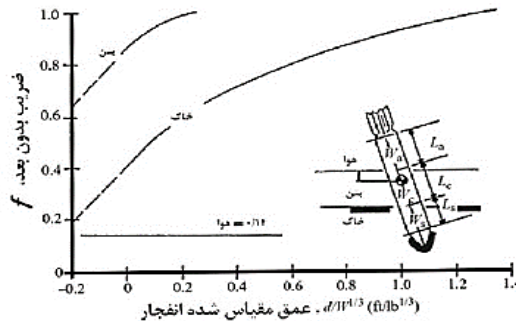
### ۴) مدل‌سازی انفجار به صورت اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری

در روش مدل‌سازی انفجار به صورت اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری، بار فشاری ناشی از انفجار به وسیله رابطه (۶) محاسبه می‌گردد و مقدار این فشار به صورت مستقیم به دیوار گودال ناشی از انفجار که شعاع آن طبق رابطه (۷) پیشنهاد شده محاسبه می‌شود، اعمال می‌گردد [۱۴].

$$P_0 = 0.0488 f_c \rho_s c \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (6)$$

$$R_{vd} = \overline{K_{vd}} \times R_w \quad (7)$$

در رابطه (۶)،  $\rho_s$  چگالی خاک بر حسب  $(\text{kg/m}^3)$  و  $c$  سرعت موج بارگذاری بر حسب  $(\text{m/s})$  است که مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است.  $W$  وزن ماده منفجره بر حسب  $(\text{kgf})$  و  $R$  فاصله تا محل انفجار بر حسب  $(\text{m})$  است.  $f_c$  تأثیر عمق است که تابعی از عمق انفجار از سطح زمین  $(d)$  می‌باشد و از شکل ۲ به دست می‌آید [۱۷].  $n$  ضریب کاهش است و در جدول ۲ مقادیر آن ارائه شده است.



شکل ۲. ضریب  $f_c$  نسبت به عمق مقیاس شده انفجار [۱۷]

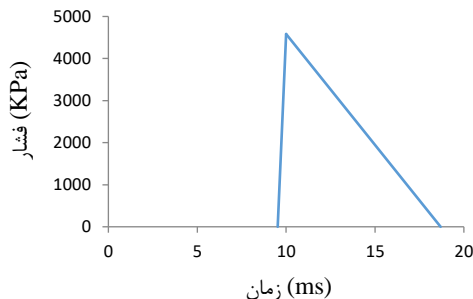
جدول ۱. مقادیر C برای انواع خاکها [۱۷]

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

جدول ۲. مقادیر ضریب کاهندگی n برای انواع خاکها [۱۷]

ضریب کاهندگی (n)	نوع خاک
1.5	رس اشباع
2.5	رس نیمه اشباع و سیلت
2.5	ماسه غیرمتراکم (خشک یا مرطوب)
2.75	ماسه متراکم (خشک یا مرطوب)
3	ماسه سست (خشک یا مرطوب)
3.25	ماسه خیلی سست (خشک یا مرطوب)

در این مقاله، مدل سازی انفجار با استفاده از روش اعمال مستقیم بارگذاری انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده و نمودار تاریخچه زمانی فشار تولید شده ناشی از این انفجار در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین با استفاده از رابطه ۷ مقدار قطر گودال برابر ۶/۰۳ متر به دست آمده است.



شکل ۳. نمودار فشار- زمان ناشی از انفجار ۱۰۰ کیلوگرم TNT

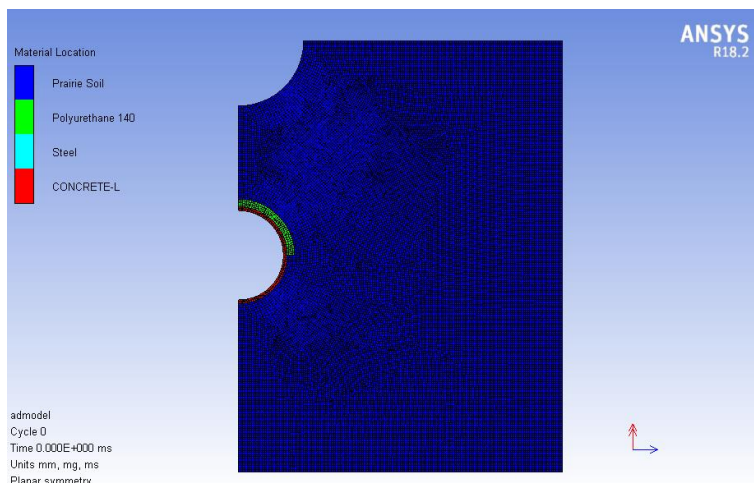
### تعریف مدل عددی انفجار و مصالح خاک و تونل در نرم افزار Autodin

به منظور بررسی تأثیرات چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان بر تونل تحت تأثیر انفجار سطحی معادل ۱۰۰ کیلوگرم TNT، ۱۱ مدل به صورت دو بعدی (به دلیل شرایط کرنش مسطح) مدل سازی شده است. یکی از این مدل ها با ضخامت ۷۰ سانتی متر و چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته شده است. برای ۱۰ مدل دیگر، سعی شده که پارامترها ثابت فرض شود و تنها یکی از پارامترهای اصلی که شامل ضخامت و یا چگالی پلی یورتان است تغییر کند، تا تأثیر آن پارامتر بر روی رفتار تونل در برابر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گیرد. در جدول ۳ نام مدل ها و مشخصات دقیق آن ها ارائه شده است.

تونل مورد بررسی دارای قطر داخلی ۱۰ متر و ضخامت پوششی بتنی ۳۵ سانتی متر است که کاربری‌های متفاوت مهندسی همانند تونل‌های راه، راه‌آهن، مترو و آب‌رسان می‌تواند داشته باشد. مطابق شکل ۴ این تونل در عمق ۱۵ متری از سطح زمین قرار دارد و یک لایه پوشش محافظی پلی یورتان به ضخامت مختلف ۰/۶ تا ۱/۵ متر در نیمه بالایی تونل را احاطه کرده است. اطراف و بالای پوشش محافظتی تونل به‌وسیله خاک آبرفتی احاطه شده و مشخصات دقیق خاک و سایر مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی تأثیرات انفجار روی تونل در حالت‌های مختلف، سنجه‌هایی برای ثبت فشار در قسمت تاج تونل و دیواره کناری تونل و همچنین بررسی صحت انتشار امواج انفجاری در محیط خاک تعبیه شده است. برای مرزهای تماسی خاک با محیط بی‌نهایت، شرط مرزی Transmit و برای محور تقارن عمودی مدل، شرط مرزی Symmetry لحاظ شده است.

جدول ۳. نام مدل‌ها و مشخصات پارامترهای مربوط به آن‌ها

توضیحات	چگالی پلی یورتان (kgf/cm <sup>3</sup> )	ضخامت پلی یورتان (m)	نام مدل
مدل مینا	140	0.7	A-01
	140	0.6	A-02
مدل‌های ضخامت متغیر پلی یورتان	140	0.8	A-03
	140	0.9	A-04
	140	1.0	A-05
	140	1.5	A-06
مدل‌های چگالی متغیر پلی یورتان	90	0.7	A-07
	175	0.7	A-08
	220	0.7	A-09
	250	0.7	A-10

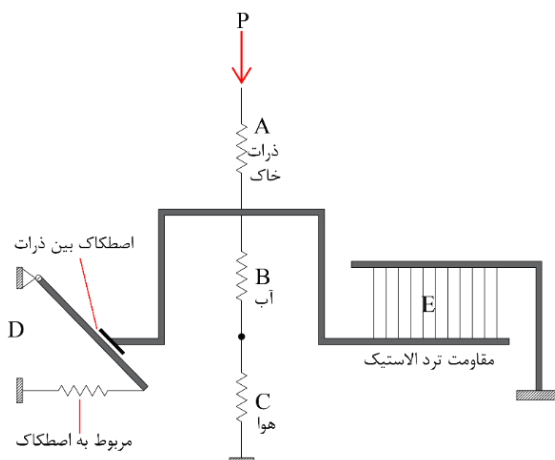


شکل ۴. مدل مینا با ضخامت پوشش ۰/۷ متر

فضای اطراف تونل به‌وسیله خاک آبرفتی احاطه شده است و از آنجایی که خاک یک محیط سه فازی شامل دانه‌های خاک، آب و هواست، لازم است که در مدل‌سازی آن در نرم‌افزار، پارامترهای مربوط به سه جز اصلی ذکر شده تعریف



شود. در این پژوهش، روش ارائه شده توسط هنریچ مورد استفاده قرار گرفته است و بر اساس ساختار خاک، یک مدل توسط کنداور ارائه شده که مطابق شکل ۵ است [۱۸]



شکل ۵. مدل ریاضی برای نمایش مدل سه فازی خاک [۱۸]

ذرات خاک به عنوان اسکلت بدنه خاک به صورت بلوک در نظر گرفته می شود. فضای بین ذرات خاک به وسیله آب و هوا پر شده است. مابین گوشه های بلوک ها، مقاومت الاستیک ترد وجود دارد. پس از بارگذاری، تغییر شکل متوسط کلی به همراه کاهش فضای خالی رخ می دهد. همان طور که در شکل ۵ مشخص است المان های A و B و C نشان دهنده تغییر شکل ثانویه در خاک هستند. در حالی که المان های D و E تغییر شکل اولیه در نمونه خاک را نشان می دهند. بر این اساس یک مدل برای خاک به صورت موج شوک تهیه می شود که در جدول ۴ نتایج آن ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای ورودی به نرم افزار جهت تعریف خاک آبرفتی

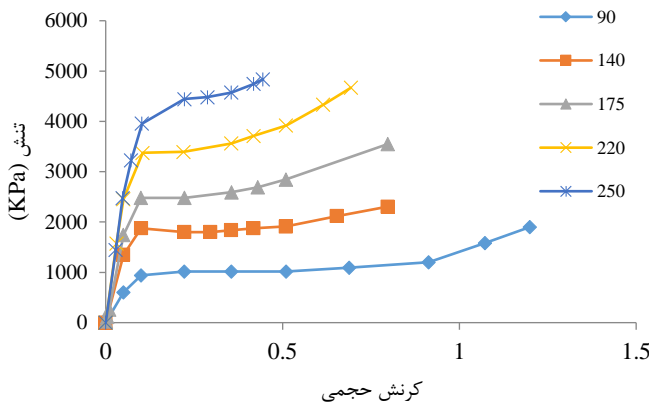
چگالی خاک $\rho$	۱/۶۷۴ gr/cm <sup>3</sup>
چگالی ویژه دانه های جامد Gs	۲/۶۴۰
معادله حالت EOS	Compaction
مدل مقاومتی Strength Model	MO Granular
معیار خرابی Failure Criteria	Hydro-Tensile Criteria Hydro tensile limit (KPa)=- 1

برای مدل سازی ماده فولاد از معادله حالت خطی و معادله مقاومت جانسون- کوک استفاده شده است و برای مدل سازی بتن از معادله حالت  $P-\alpha$  و معادله مقاومت و شکست RHT<sup>۱</sup> استفاده شده است. پارامترهای معادله حالت پی آلفا و معادله مقاومت و شکست RHT برای بتن ۳۹/۵ مگا پاسکال از کتابخانه مواد نرم افزار اتوداین قابل استخراج

<sup>۱</sup> The Riedel-Hiermaier-Thoma

است [۱۵]. برای مدل‌سازی پلی یورتان از نتایج آزمایش توپچی نژاد و اندامی استفاده شده [۱۱؛ ۱۹] و پارامترهای اصلی و نمودارهای مربوط به معرفی این ماده به نرم‌افزار در جدول ۵ و شکل ۶ ارائه شده است. جدول ۵. مقادیر ورودی به نرم‌افزار برای تعریف مدل ماده پلی یورتان [۱۱؛ ۱۹]

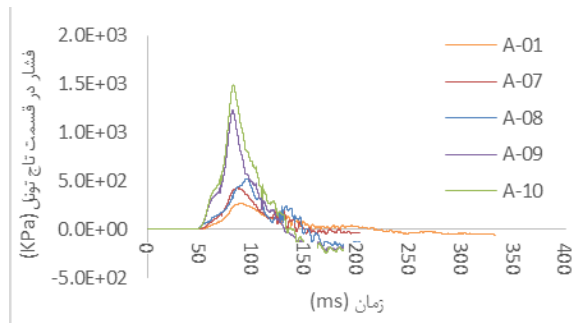
چگالی پلی یورتان $\rho$	$0.175 - 0.14 - 0.09 \text{ gr/cm}^3$
معادله حالت EOS	Crushable Foam
معیار Erosion	Geometric Strain Erosion Strain = 0.76



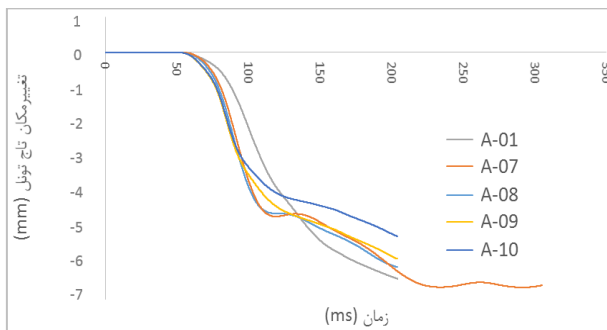
شکل ۶. نمودارهای تنش - کرنش حجمی برای فوم‌های پلی یورتان [۱۱؛ ۱۹]

### بررسی تأثیرات تغییر پارامترهای پلی یورتان

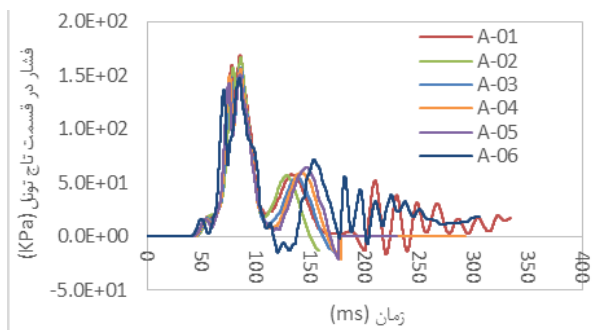
به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت و همچنین تأثیر چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان بر رفتار تونل زیرزمینی تحت تأثیر انفجار سطحی، نمودارهای تاریخچه زمانی فشار و تاریخچه زمانی تغییرمکان قائم تاج تونل از نرم‌افزار استخراج شده و در شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۱ موقعیت قرارگیری سنج‌ها نشان داده شده است.



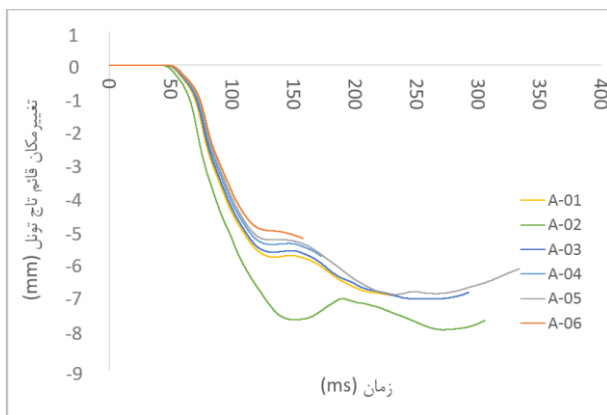
شکل ۷. نمودار فشار - زمان تاج تونل در حالت چگالی متغیر پلی یورتان (نتایج سنج شماره ۴)



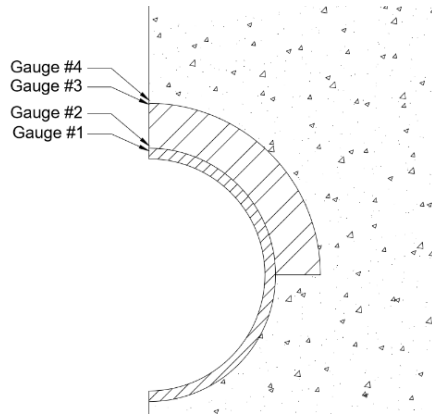
شکل ۸. نمودار تغییر مکان- زمان تاج تونل در حالت چگالی متغیر پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۴)



شکل ۹. نمودار فشار- زمان تاج تونل در حالت تغییر ضخامت پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۱)



شکل ۱۰. نمودار تغییر مکان- زمان تاج تونل در حالت تغییر ضخامت پلی یورتان (نتایج سنجه شماره ۱)

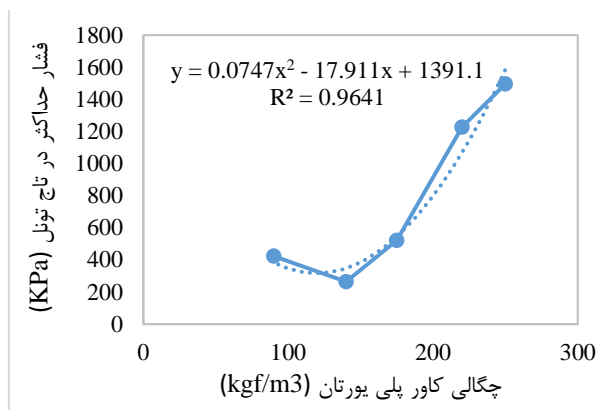


شکل ۱۱. موقعیت قرارگیری سنجه‌های تاج تونل

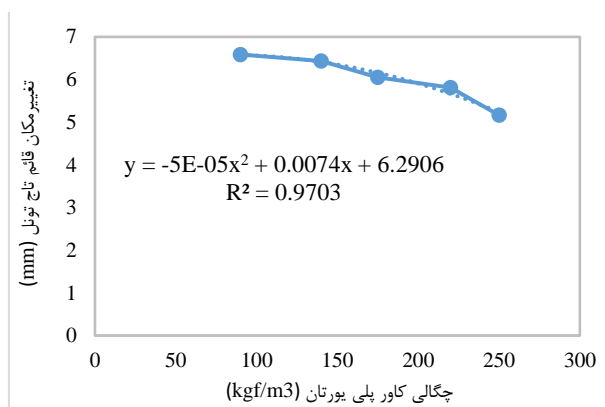
### تأثیر تغییر چگالی پلی یورتان در فشار و تغییر شکل تونل

بیشینه فشار حاصل از انفجار در سنجه شماره ۱ در مدل‌های مینا و ۷ تا ۱۰ در نمودار شکل ۱۲ ارائه شده است. در بررسی تأثیر چگالی پلی یورتان، شکل ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش چگالی فوم پلی یورتان، میزان تغییر شکل قائم، کرنش و همچنین فشار وارد شده به قسمت تاج تونل کاهش می‌یابد. اما این کاهش تا چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب ادامه دارد و با افزایش چگالی فوم از ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، افزایش تغییر مکان قائم، کرنش و همچنین افزایش فشار در قسمت تاج تونل مشاهده می‌شود. علت این امر، افزایش تعداد حفرات موجود در فوم با کاهش چگالی است. با افزایش تعداد حفرات، انرژی بیشتری در فروریختن دیواره حفرات مستهلک کرد. در چگالی‌های کمتر از ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب با وجود افزایش کمی مقدار حفرات به دلیل کاهش چگالی، رفتار فوم و عملکرد آن در کاهش بیشینه فشار، دچار ضعف می‌گردد و کاهش چگالی، تأثیری بر کاهش بیشینه فشار بر تونل ندارد. علت این تغییر رفتار فوم را می‌توان ضعیف شدن مشخصات مکانیکی فوم (مدل الاستیسیته-تنش فروریختگی) در اثر کاهش بیش از حد چگالی دانست.

شکل ۱۳، نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی قائم ایجاد شده در قسمت تاج در برابر تغییر چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان را نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش چگالی پوشش پلی یورتان، کاهش نسبتاً خطی تغییر مکان ایجاد شده در تاج تونل مشاهده می‌شود. علت این موضوع را می‌توان در افزایش صلبیت خمشی و مقاومت در برابر شکست فوم‌های پلی یورتان با افزایش چگالی آن‌ها دانست.



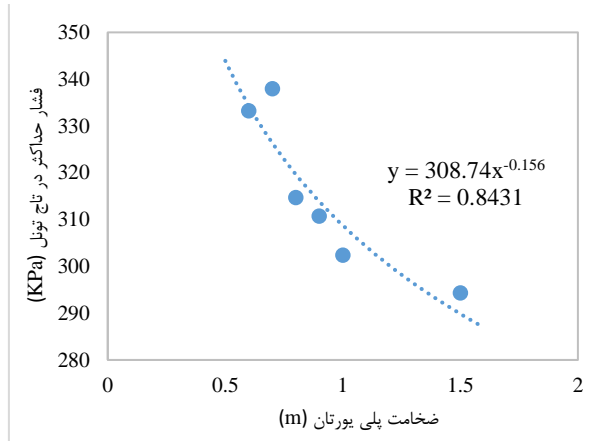
شکل ۱۲. نمودار حداکثر فشار تاج تونل در برابر تغییرات چگالی پوشش پلی یورتان



شکل ۱۳. نمودار حداکثر تغییر مکان قائم تاج تونل در برابر تغییرات چگالی پوشش پلی یورتان

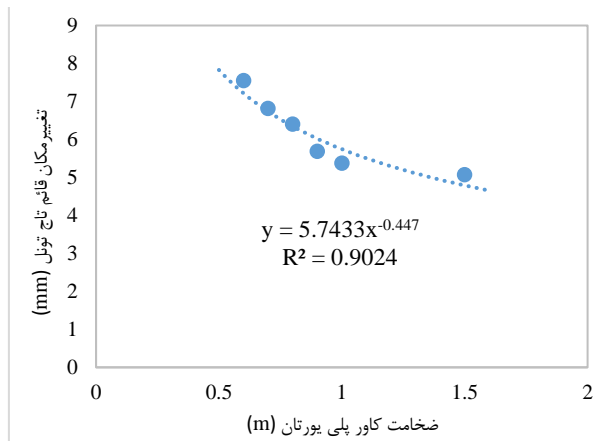
### تأثیر تغییر ضخامت پلی یورتان در فشار و تغییر شکل تونل

در شکل ۱۴، نمودار تغییرات حداکثر فشار اندازه‌گیری شده در قسمت تاج تونل در برابر تغییر ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در مدل‌های ۱ تا ۶ که ضخامت پوشش در آن‌ها متغیر است، افزایش ضخامت پوشش حفاظتی، باعث کاهش فشار انفجاری وارد شده به تونل می‌شود اما روند کاهش فشار با ضخامت تابعی خطی نیست. از طرفی با توجه به نمودار شکل ۱۵ که مربوط به حداکثر جابه‌جایی قائم تونل نسبت به ضخامت پوشش است، مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت پوشش پلی یورتان، باعث کاهش تغییر مکان قائم قسمت تاج تونل در برابر بار انفجاری می‌شود. با توجه به اختلاف تراز بالای پوشش حفاظتی در مدل‌های ۱ تا ۶ نسبت به همدیگر، از فشار اندازه‌گیری شده در پشت لایه فوم به‌عنوان معیاری برای سنجش توانایی فوم در جذب انرژی توسط مکانیزم فشاری آن و همچنین مقدار نیروی منتقل شده به جداره تونل استفاده شده است.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر فشار تاج تونل در برابر تغییرات ضخامت پوشش پلی یورتان

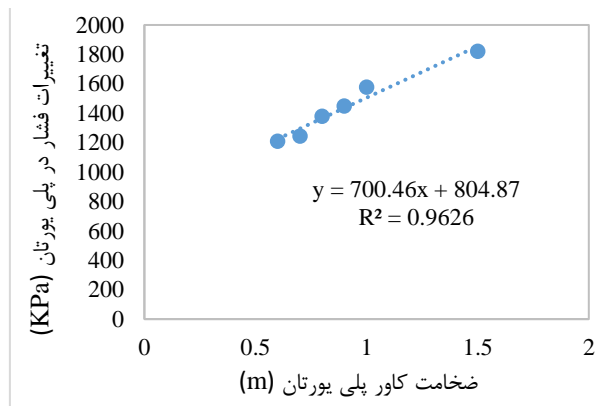
جدول ۶ درصد اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در سنجه‌های ۱ و ۴ (بیرون فوم و روی تونل) را در ضخامت‌های مختلف پلی یورتان نشان می‌دهد. با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که در حالتی که ضخامت پوشش پلی یورتان برابر ۱/۵ متر است، فشار انفجار در بالای تونل کاهش ۸۶/۰۹ درصدی نسبت به خاک بالای پلی یورتان و قبل از ورود پالس انفجاری به محیط پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. با بررسی درصد تغییرات فشار انفجاری در پلی یورتان با ضخامت‌های مختلف، مشاهده شده است که این تغییرات به‌صورت تقریباً خطی به ضخامت مدل وابسته می‌باشد که در شکل ۱۶ و مقادیر آن در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۵. نمودار حداکثر جابه‌جایی قائم تاج تونل در برابر تغییرات ضخامت پوشش پلی یورتان

جدول ۶. فشار در سنجه‌های ۱ و ۴ در حالت ضخامت متغیر پلی یورتان

نام مدل	ضخامت PU m	فشار در گیج #1 KPa	فشار در گیج #4 KPa	درصد اختلاف
A-02	0.6	353.6	1562.9	77.39
A-01	0.7	338.0	1581.9	78.63
A-03	0.8	314.7	1695.3	81.44
A-04	0.9	310.7	1760.2	82.35
A-05	1.0	302.4	1879.7	83.91
A-06	1.5	294.3	2115.4	86.09



شکل ۱۶. نمودار تغییر فشار در سنجه‌های ۱ و ۴ نسبت به ضخامت پلی یورتان

### نتیجه‌گیری

- در این مقاله، تأثیرات چگالی و ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان در تونل‌های زیرزمینی تحت تأثیر انفجار، بررسی شد و نتایج زیر پس از بررسی اطلاعات حاصل از تحلیل نرم‌افزاری به دست آمد:
- افزایش ضخامت پوشش حفاظتی پلی‌یورتان، تأثیر به‌سزایی در کاهش مقدار فشار وارد شده به تاج تونل و کاهش تغییر مکان قائم تاج تونل می‌شود و این مسئله به دلیل افزایش صلبیت خمشی پوشش و افزایش میزان جذب انرژی آن و جلوگیری از وارد شدن فشار اصلی ناشی از انفجار به تاج تونل است؛ به‌گونه‌ای که در حالتی که ضخامت پوشش حفاظتی پلی یورتان برابر ۱/۵ متر است، کاهش ۸۶ درصدی مقدار فشار وارد شده به تاج تونل مشاهده شد که رابطه‌ای نسبتاً خطی تغییرات فشار با ضخامت‌های مختلف پلی یورتان برقرار است.
  - چگالی پوشش پلی یورتان، یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار در کاهش مقدار فشار وارده به تاج تونل تحت تأثیر انفجار است. با بررسی مقدار فشار حداکثر در تاج تونل مشاهده شده است که با کاهش چگالی تا ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین کاهش فشار در تاج تونل رخ داده است و کاهش بیشتر چگالی، تأثیری بر کاهش فشار بیشینه بر تونل ندارد. از طرفی باید توجه داشت که تغییر مکان قائم تاج تونل با کاهش چگالی پلی یورتان افزایش یافته است اما در محدوده چگالی‌های ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، این روند افزایشی، ثابت می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده چگالی ۱۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار فشار در تاج تونل و مقدار تغییر مکان قائم تاج تونل در محدوده قابل قبولی و بهینه برای

استفاده خواهد بود و می توان این محدوده چگالی را به عنوان حالت بهینه برای چگالی پوشش حفاظتی پلی یورتان در نظر گرفت.

## References

- [1] Endo, K., Kitagawa, K., & Yasuhara, M. (2009, June 22-25 ). *Diffusion Effect of Blast Pressure in Porous Complex Media*. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas. <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-3569>
- [2] Lee, M., Wang, GM., Sung, PH., Chang, WL., Lee, YL., & Lin, K. (1986). The attenuation of shock waves in PU foam and its application. In *Shock Waves in Condensed Matter*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2207-8\\_101](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2207-8_101)
- [3] Hall, W. J., Newmark, Nathan Mortimore & , & , Hendron, A. J. (1974). *Classification, Engineering Properties and Field Exploration of Soils, Intact Rock and in Situ Rock Masses*. U.S. Atomic Energy Commission. <https://books.google.com/books?id=ai9IAQAAMAAJ>
- [4] Lee, W. Y. (2006). *Numerical Modeling of Blast-Induced Liquefaction* [Doctor of Philosophy, Brigham Young]. Provo, Utah, United States. [https://scholarsarchive.byu.edu/etd?utm\\_source=scholarsarchive.byu.edu%2Fetd%2F524&utm\\_medium=PDF&utm\\_campaign=PDFCoverPages](https://scholarsarchive.byu.edu/etd?utm_source=scholarsarchive.byu.edu%2Fetd%2F524&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages)
- [5] Cheeseman, B. A., Wolf, S., Yen, C. F., & Skaggs, R. (2006). Blast simulation of explosives buried in saturated sand. *Fragblast*, 10(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1080/13855140500432045>
- [6] Yang, Y., Xie, X., & Wang, R. (2010). Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(4), 373-384. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2.010.00373>
- [7] De, A. (2012). Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 43, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.0.2.007>
- [8] De, A., Morgante, A. N., & Zimmie, T. F. (2016). Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.06.008>
- [9] Lezgi, M., Izadifard, Ramazan Ali., & Lashgari, Mohammad Reza. (2017). Evaluation Of Nonlinear Response Of Reinforced Concrete Frames Designed According To Earthquake Codes And Subjected To Blast Loading. *Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology* 8(3 ), 201-212. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=572971>
- [10] Izadifard, R. A., & Foroutan, M. (2010). Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34(1), 25-42. <https://doi.org/10.3906/muh-0911-39>
- [11] Andami, M. (2016). *The Performance of high density polyurethane foams in blast damage mitigation* [MSc Thesis, Razi University]. Kermanshah, Iran.
- [12] Boey, C. W. (2009). *Investigation of shock wave attenuation in porous materials* [Masters, Naval Postgraduate School]. Monterey, California. <https://hdl.handle.net/10945/4386>
- [13] Herrmann, W. (1969). Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials. *Journal of Applied Physics*, 40(6) .<https://doi.org/10.1063/1.1658021>



- [14] Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)
- [15] Hallquist, J. O. (2007). *LS-DYNA keyword user's manual*. L. S. T. Corporation. [https://pdfhall.com/ls-dyna-version-970-keyword-users-manual-ftp-directory-listing\\_5b2e78c0097c4731608b458b.html](https://pdfhall.com/ls-dyna-version-970-keyword-users-manual-ftp-directory-listing_5b2e78c0097c4731608b458b.html)
- [16] 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. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.014>
- [17] Code, I. N. B. (2008). *Passive defense* (part 21) .
- [18] Henrych, J., & Major, R. (1979). *The dynamics of explosion and its use*. Elsevier Amsterdam. [https://books.google.com/books/about/The\\_Dynamics\\_of\\_Explosion\\_and\\_Its\\_Use.html?id=yeRdswEACAAJ](https://books.google.com/books/about/The_Dynamics_of_Explosion_and_Its_Use.html?id=yeRdswEACAAJ)
- [19] Andami, M. H., & Toopchi Nezhad, H. (2018) .The Performance Of Rigid Polyurethane Foams In Damage Mitigation Of Structures Due To The Impact Of A Supersonic Projectile. *Mechanical Engineering Sharif (Sharif: Mechanical Engineering)*, 34-3(2 ), 133-140. <https://www.sid.ir/en/Journal/ViewPaper.aspx?ID=822650>