

## Evaluation of dynamic behavior of sections of widely used urban tunnels under the scenario of explosion of different volumes of TNT in the soil depth

Mohammad Hossein Taghavi Parsa<sup>1\*</sup>, Rasool Nodeh.Farahani<sup>2</sup>

1- Phd of Civil Engineering, IHU Universit, Civil Group, Tehran, Iran

2- Phd candidate, Department of Civil Engineering, University of Babol Technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

*It is necessary to study the responses of underground tunnels to dynamic loads, especially explosive loads at different depths relative to the soil surface, due to the vital importance of these structures and the need for their greater stability compared to surface structures. This requires the analysis of the stability of this type of structures, under the influence of explosive loads, using structural dynamics. In this research, to analyze the dynamic response of the numerical model of the most used sections of tunnels, including circular, horseshoe and rectangular, under the influence of deep projectile explosion scenario with 500, 250 and 1000 kg TNT costs by Ansys LS-Dyna finite element software (ANSYNA LS-D). we will pay. In modeling, assuming the tunnels are located at a depth of 50 meters above the ground, the penetration and explosion of the projectile occurs up to 30 meters deep in the soil. In the following, we will examine the velocity of the particles at a specific point in the tunnel crown, the maximum stress created during the explosive loading time and the amount of explosive energy absorbed by the sections of the tunnels and compare each. The results show that the von Mises stress in the tunnel with a rectangular cross section is higher than other tunnels due to the concentration of stress on the sides. Also, the tunnel with a circular cross section with the highest energy absorption resulting from the explosion showed a good performance in comparison with the rectangular and horseshoe sections.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 26 September 2020

**Revise Date:** 17 October 2021

**Accept Date:** 03 November 2021

**Keywords:** Tunnel  
Explosive loading  
Finite elements  
Energy absorption  
Von Mises tension  
Intrusive projectile

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2021.250210.2254

\*Corresponding author: Mohammad Hossein Taghavi Parsa

Email address: Drmhparsa@gmail.com

## ارزیابی رفتار دینامیکی مقاطع پر کاربرد تونل‌های شهری تحت سناریو انفجار احجام متفاوتی از TNT در عمق خاک

محمدحسین تقوی پارسا<sup>۱\*</sup>، رسول نوده فراهانی<sup>۲</sup>

۱- دکتری عمران، گرایش سازه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه عمران، تهران، ایران  
۲- دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

### چکیده

بررسی پاسخ‌های تونل‌های زیرزمینی در برابر بارهای دینامیکی، خصوصاً بار انفجاری در عمق‌های مختلف نسبت به سطح خاک، به خاطر اهمیت حیاتی این سازه‌ها و لزوم پایداری بیشتر آن‌ها نسبت به سازه‌های سطحی، ضروری است. این امر به تحلیل پایداری این نوع سازه‌ها، تحت تأثیر بارهای انفجاری، با استفاده از دینامیک سازه نیاز دارد. در این تحقیق به تحلیل پاسخ دینامیکی مدل عددی مقاطع پر کاربرد تونل‌ها شامل دایروی، نعل اسبی و مستطیلی تحت تأثیر سناریو انفجار پرتابه در عمق خاک با خرج‌های ۵۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود انسیس ال اس داینا (ANSYS LS-DYNA R18.1.0) خواهیم پرداخت. در مدل‌سازی با فرض قرارگیری تونل‌ها در عمق ۵۰ متری از سطح زمین، نفوذ و انفجار پرتابه تا ۳۰ متری در عمق خاک اتفاق می‌افتد. در ادامه به بررسی سرعت ذرات در نقطه‌ای مشخص از تاج تونل، حداکثر تنش ایجاد شده در مدت‌زمان بارگذاری انفجاری و میزان جذب انرژی انفجاری توسط مقاطع تونل‌ها مورد بررسی پرداخته و به مقایسه هریک خواهیم پرداخت. نتایج نشان می‌دهد تنش فون میزس در تونل با مقطع مستطیلی به دلیل تمرکز تنش در کناره‌ها از سایر تونل‌ها بیشتر است. همچنین تونل با مقطع دایروی با بالاترین جذب انرژی حاصل انفجار عملکرد مناسبی در مقایسه با مقاطع مستطیلی و نعل اسبی از خود نشان داد.

کلمات کلیدی: تونل، بارگذاری انفجاری، اجزای محدود؛ جذب انرژی؛ تنش فون میزس، پرتابه نفوذی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2021.250210.2254">https://doi.org/10.22065/jsce.2021.250210.2254</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.250210.2254	۱۴۰۱/۴/۰۱	۱۴۰۰/۸/۱۲	۱۴۰۰/۸/۱۲	۱۴۰۰/۷/۲۵	۱۳۹۹/۷/۰۵
محمدحسین تقوی پارسا Drmhparsa@gmail.com					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی امروزه به دلیل افزایش جمعیت، کمبود فضای شهری، صرفه اقتصادی و تهدیدات نظامی به یک فضای کارا و حیاتی تبدیل شده است. مجموعه‌های زیرزمینی یکی از بهترین گزینه‌ها برای محافظت از تأسیسات نظامی و صنایع دفاعی در برابر حملات سلاح‌های نفوذی دشمن می‌باشند. از سویی این سازه‌های استراتژیک در صورت عدم رعایت اصول خاصی که غالباً در پدافند غیرعامل یافت می‌شود می‌تواند با بروز حوادثی همچون انفجار خسارات گسترده‌ای را متحمل گردد. معمولاً سازه‌های زیرزمینی که با رویکرد نظامی ساخته شده‌اند باید در یک عمق ایمن از سطح خاک ساخته شوند. عمق سازه‌های زیرزمینی باتوجه‌به تهدیدات و جنس مصالح منطقه تعیین می‌شود. علاوه بر عمق دفن ایمن، شکل مقطع سازه‌های زیرزمینی نیز یک عامل بسیار تأثیرگذار در کاهش اثرات بارهای وارده از جمله انفجار است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بروی اثرات بار انفجار بر تونل‌ها انجام شده است. مبارکی و همکاران [۱] پاسخ دینامیکی تونل با مقطع مستطیلی، دایروی، نیمه بیضوی و نعل اسبی مدفون در خاک ماسه‌ای در عمق‌های مختلف برای انفجار سطحی ۱۰۰۰ کیلوگرم بار TNT در نرم‌افزار المان محدود انسیس، بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که تونل نعل اسبی مقاومت کمتری نسبت به تخریب در مقایسه با تونل مستطیلی از خود نشان می‌دهند از طرفی تونل نیمه بیضی مقاوم‌تر از مستطیلی است. همچنین با بررسی سرعت ایجاد شده در مقطع تونل نتیجه گرفتند که سرعت ذرات تاج تونل ۵۳ درصد بیشتر از گوشه‌های تونل است که نشان می‌دهد تاج تونل نسبت به سایر نقاط وضعیت بحرانی دارد. زیمو همکاران [۲] به بررسی اثر انفجار سطحی بر رفتار پوشش تونل با استفاده از مدل‌سازی در دستگاه سانتریفیوژ پرداختند. تونل مورد بررسی دایروی بوده و به‌صورت سه‌بعدی آزمایش شد. مقدار ماده منفجره مورد استفاده در سانتریفیوژ ۲/۶ گرم بوده که با شتاب  $g1$  مورد آزمایش قرار گرفته است. در مدل آزمایش‌شده برای اندازه‌گیری کرنش از کرنش سنج‌های نصب‌شده در نقاط مختلف استفاده شد. وانگ و همکاران [۳] رفتار سازه‌های مدفون را تحت اثر انفجار سطحی بررسی کردند. ایشان خاک را به‌صورت مجزا و سه‌فازی مدل‌سازی کردند. مقدار ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرم TNT بوده و انفجار در سطح اتفاق افتاده است. در اثر انفجار سطحی خاک‌های محل انفجار به اطراف و هوا پخش می‌شود. معمولاً نمایش این حالت در مدل‌های اجزا محدود بسیار دشوار و زمان‌بر است. از این‌رو در مدل سه‌فازی خاک نمایش حالت گودال انفجار بسیار آسان‌تر و سریع‌تر است. پانتلیدز و همکاران [۴] به بررسی آزمایشگاهی اثر بار انفجار روی چهار نوع پانل بتن مسلح با ابعاد ۱/۲ متر پرداختند. ضربه ناشی از انفجار با استفاده از نمودار مثلثی ساده‌شده در نظر گرفته شده است. الگوی ترک و آسیب سازه در روش عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایش داشت. مشخص شد که پانل‌های با بتن الیافی و فولاد مسلح کننده بهترین عملکرد را دارند. اسکافیلد و همکاران [۵] با مطالعه فیزیکی و شیمیایی انفجار و لینک آن به مهندسی به رویکرد جامع برای ارزیابی مسائل انفجار دست یافتند. احتراق‌های پیچیده که به دلیل نامحدود بودن فضای انفجار و انتشار امواج در هوا و سرعت پخش نامشخص در محیط به‌سختی مدل می‌شوند، در فضای رایلی - تیلور و با کدنویسی دایان مدل‌سازی شدند و مشاهده کردند که نتایج آزمایشگاهی - تجربی با احتساب مقدار کمی خطا با حل عددی همخوانی دارد. لی و همکاران [۶] روش نظری برای پیش‌بینی رفتار تونل زیرزمینی باتوجه‌به حداکثر سرعت ذرات و توزیع تنش مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اولین بار با استفاده از قانون بقای تکانه خطی و موج پیش‌رونده در سنگ و معادلات حرکت، اثر انفجار در تونل مورد ارزیابی قرار دادند. باتوجه‌به روش  $PVV^6$  و حداکثر مقاومت کششی سنگ، ایشان توانستند ارزیابی ایمنی دقیقی نسبت به موقعیت‌های مختلف مرکز شارژ انفجار توسعه دهند. آنیربان [۷] اثر انفجار سطحی بالای تونل را در خاک ماسه‌ای نوادا با تراکم نسبی ۶۰٪ تحت دو مدل دوبعدی و سه‌بعدی مورد بررسی قرارداد و نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی به‌وسیله نرم‌افزار انسیس را با مشاهدات میدانی و تست‌های آزمایشگاهی سانتریفیوژال مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد که کرنش‌های متفاوت در نقاط مختلف تونل در حل عددی با نتایج آزمایشگاهی سانتریفیوژ ژئوتکنیکی نزدیکی قابل‌قبولی

<sup>1</sup> Zimmie

<sup>2</sup> wang

<sup>3</sup> Pantelides

<sup>4</sup> Schofield

<sup>5</sup> Li u

<sup>6</sup> Peak Particle Velocity

<sup>7</sup> Anirban.

دارد و اثر انفجار در خاک را به عنوان پدیده کرنش بزرگ در خاک معرفی کردند. یانگ<sup>۸</sup> سازه را به صورت دوبعدی و خاک را به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک مدل کرده است. انفجار به صورت یک بار فشاری بر دایره‌ای به مرکز محل انفجار وارد می‌شود. یانگ سازه پناهگاه زیرزمینی را به صورت دوبعدی تحلیل کرده و نتایج تحلیل نرم‌افزاری اجزا محدود را با سیستم جرم - فنر یک درجه آزادی مقایسه کرده است. وو<sup>۹</sup> و همکاران [۹] اثر شوک زمین در انفجارهای سطحی را بر روی پاسخ و آسیب سازه بررسی کرده‌اند وزن TNT، ۱۰۰۰ کیلوگرم فرض شده و سازه در فاصله مقیاس‌های متفاوت شبیه‌سازی شده است. در فاصله مقیاس شده بزرگ، اثر شوک زمین و اثر هوایی انفجار سطحی به صورت مجزا از همدیگر عمل می‌کنند و می‌توانند به صورت جداگانه تحلیل شوند. استیونسن<sup>۱۰</sup> [۱۰] در سال ۱۹۹۱ به بررسی سازه‌های بتن مسلح قوسی شکل مدفون در خاک پرداخته است. در این تحقیقات ابتدا یک روش ترکیبی عددی برای شبیه‌سازی سازه‌های مدفون در خاک پیشنهاد شد. سپس نتایج حاصل از کاربرد این روش با آزمایش‌های بزرگ مقیاس مقایسه گردیده است چاندر<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۱] با کمک شبیه‌سازی عددی اثر و اهمیت تعدادی از پارامترهای مهم خاک را در تنش‌های ایجاد شده در تونل مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در سال ۲۰۱۷ به بررسی پاسخ دینامیکی مقطع دایره‌ای با فرض اندرکنش بین جداره بتنی تونل و خاک تحت اثر انفجار پرداخته‌اند. در نتایج این تحقیق، ضخامت مناسب برای تونل با مقطع دایروی تعیین گردیده است [۱۳] در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی به بررسی اثر انفجار در تونل‌های مدفون در خاک اشباع که اثر انفجار آن روی تونل‌ها در اعماق مختلف پرداخته شده است که در نتایج این تحقیق تأثیر خاک اشباع تحت انفجار مشخص شده است. [۱۴]. در ادامه بررسی‌ها در سال ۲۰۱۹ به مقایسه حداکثر تنش ایجاد شده در دو مقطع تونل دایره‌ای و مستطیلی تحت اثر فشارهای وارد بر جداره‌ها پرداخته شده است [۱۵]. همچنین در سال ۲۰۲۰ به بررسی پاسخ تونل واقع شده در سنگ تحت اثر انفجار پرداخته که به بررسی جزئیات و میزان خرابی حاصل از آن دست خواهد یافت. [۱۶] در سال ۲۰۱۹ به بررسی میزان خسارات وارد بر جداره بیرونی تونل‌ها تحت اثر انفجار پرداخته شده است در این تحقیق به بررسی جداره‌های تونل با مقاطع پرکاربردی همچون مستطیلی و دایروی توجه شده است. [۱۸] در ادامه به بررسی پاسخ دینامیکی مقاطع مستطیلی، دایروی و نعل اسبی در عمق ۵۰ متری از سطح زمین تحت انفجار پرتابه نفوذی با خرج انفجاری ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در عمق ۳۰ متری از سطح زمین پرداخته می‌شود که تا به امروز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق شامل، بررسی سرعت ذرات تاج تونل، حداکثر تنش ایجاد شده در مدت زمان بارگذاری و میزان جذب انرژی تونل‌ها مورد بررسی پرداخته و با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

## ۲- پدیده انفجار

در اثر وقوع انفجار امواج ناشی از فشار انفجار در محیط منتشر می‌شود. اگر این انفجار داخل خاک صورت پذیرد امواج از طریق محیط خاک به سازه اصلی منتقل شده و باعث ایجاد تغییر شکل‌های دینامیکی در محیط خاک و سازه مدفون در آن خواهد شد. تأثیر انفجار در خاک به مشخصات خاک، نوع سنگ‌ها موجود و ضرایب چسبندگی خاک بستگی دارد. در مدل‌سازی‌های عددی جهت شبیه‌سازی اثر موج انفجار از نمودار فشار زمان استفاده می‌شود. باتوجه به اینکه در انفجارهای داخل خاک اثر کاهندگی موج فشار بسیار ناچیز است لذا از نمودار ساده شده مطابق شکل ۱ استفاده می‌شود.

<sup>8</sup> Yang

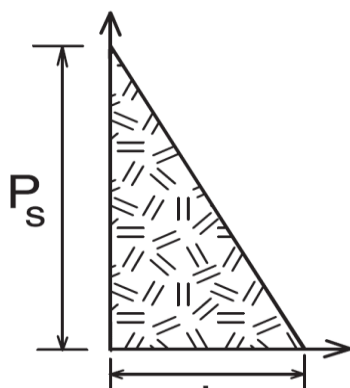
<sup>9</sup> Wu C

<sup>1</sup> Stevens

<sup>1</sup> Chandra

0

1



شکل ۱: نمودار ساده شده فشار-زمان بار انفجار [4].

در شکل بالا  $P_s$  حداکثر فشار در محیط خاک برحسب پاسکال و  $t_d$  مدت زمان تداوم موج فشار برحسب ثانیه هستند. حداکثر فشار در محیط خاک از رابطه ۱ به دست می آید.

$$P_s = \rho c u \quad (1)$$

که در آن  $u$  حداکثر سرعت ذره‌ای خاک برحسب متر بر ثانیه و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود،  $\rho$  چگالی خاک به کیلوگرم بر مترمکعب و  $C$  سرعت موج بارگذاری است.

$$u = 48.8 f_c \left( \frac{2.52R}{w^{1/3}} \right)^{-n} \quad (2)$$

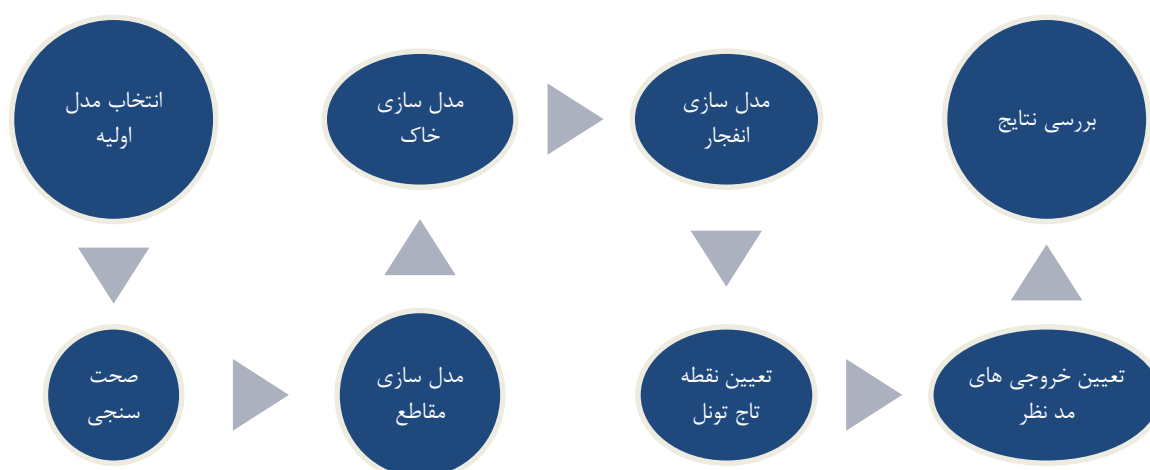
در رابطه بالا  $n$  ضریب تضعیف خاک و  $f_c$  ضریب جفت‌شدگی خاک است.  $w$  وزن ماده منفجره TNT برحسب کیلوگرم و  $R$  فاصله از مرکز انفجار است. برای محاسبه مدت زمان تداوم موج انفجار از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

$$t_d = \frac{2i_{so}}{P_{so}} \quad (3)$$

که در آن  $P_o$  فشار حداکثر حاصل از موج انفجار و اندازه  $i_{so}$  اندازه حرکت حداکثر است. باتوجه به روابط ارائه شده در بالا می‌توان نمودار فشار-زمان حاصل از موج انفجار را به دست آورد.

## ۳- مدل سازی عددی

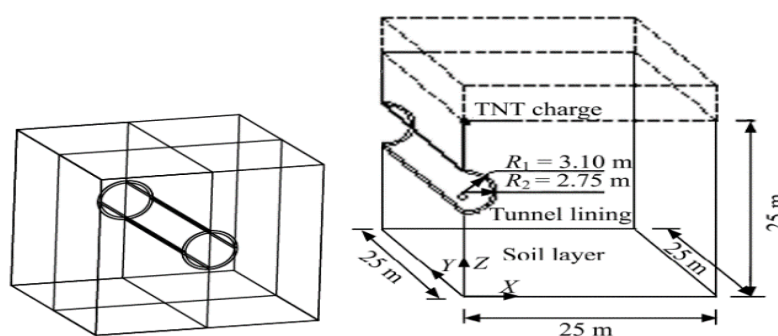
جهت مدل سازی انفجار و بررسی تأثیر آن بر تونل مدفون از نرم افزار ANSYS/LS-DAYA [۱۸] ورژن R11.1.0 استفاده شده است. ابتدا نرم افزار فوق توسط یک مقاله معتبر صحت سنجی شده سپس در بخش بعدی نتایج مدل های اصلی آورده می شود. مراحل گردش کار در دیاگرام شکل ۲ تعیین گردیده است.



شکل ۲: دیاگرام مراحل مدل سازی در این پژوهش

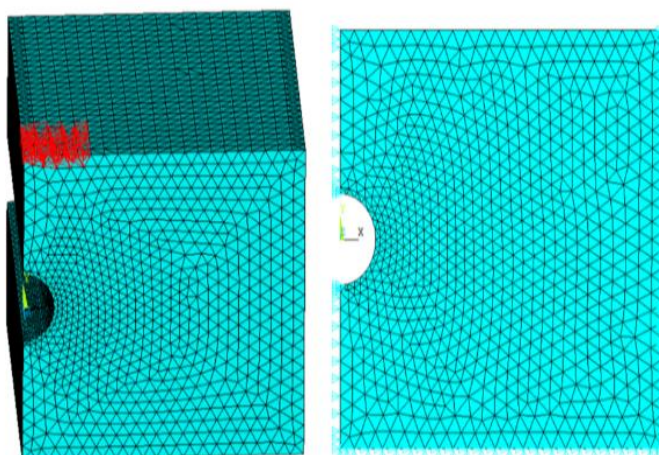
## ۳-۱- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی نرم افزار طبق مقاله یوبینگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] مدل سازی گردید. در شکل ۳ مدل تونل مدفون در خاک نشان داده شده است. در مدل انتخاب شده فاصله نقطه قرارگیری ماده انفجاری تا محدوده خاک در نظر گرفته شده برای مدل سازی ۲۵ متر خواهد بود و همچنین مشخصات جداره تونل در شکل آورده شده است.



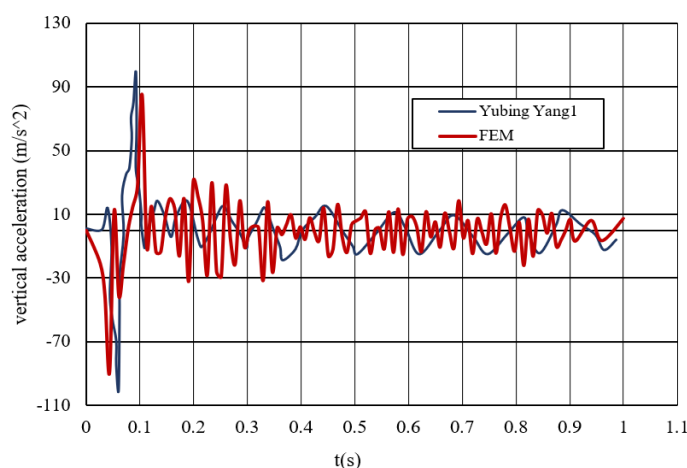
شکل ۳: هندسه کلی (شکل چپ) و یک چهارم هندسه متقارن (شکل راست) [۱۹].

برای سهولت مدل سازی و کاهش زمان تحلیل یک چهارم تونل مدل سازی شده است. در همین راستا از جابه جایی های انتقالی عمود بر صفحات (XZ) و (YZ) جلوگیری شده است [۲۰]. در این پژوهش برای مدل سازی هندسه مقطع از المان های پر کاربرد ۸ گره ای Soild183 استفاده شده است و به منظور جلوگیری از گسیختگی المان تحت تغییر شکل های بزرگ، آنالیز در فضای لاگرانژی - اویلری انجام خواهد شد که سائز المان ها برای مش بندی و تعیین شرایط مرزی ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ مدل اجزا محدودی با شرایط مرزی نشان داده شده است. در شکل محل قرارگیری خرج انفجاری در مقدارهای مختلف مشخص شده است. عواملی چون خاک اطراف جزئی از شرایط مرزی در این تحلیل خواهند بود که در ادامه به بررسی هر یک از این پارامترها خواهیم پرداخت.



شکل ۴: مدل اجزا محدود مقاله صحت سنجی و شرایط مرزی آن.

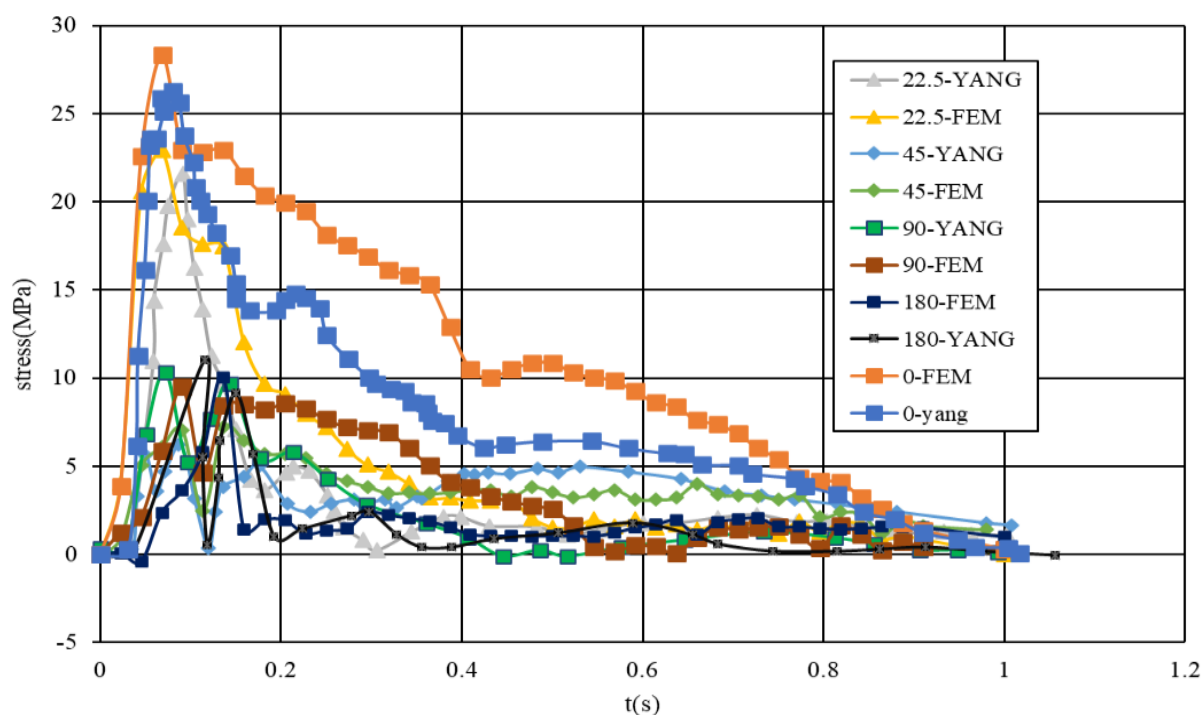
مقدار ماده منفجره ۲۵۰ کیلوگرم TNT است که به صورت نمودار فشار - زمان در مدت زمان ۰/۱ ثانیه به سازه اعمال می شود. نتایج مدل سازی به صورت نمودار شتاب زمان تاج تونل و تنش های نقاط مختلف تونل باهم مقایسه شدند. در شکل ۵ که نتایج حاصل از تحقیقات پیشین یکی از پروژه های مطالعاتی و اجرایی معتبر خواهد بود، به مقایسه نتایج شتاب در تاج تونل، در نرم افزار اجزا محدود انسیس و مقاله مرجع انتخابی پرداخته شده است.



شکل ۵: مقایسه نمودارهای شتاب - زمان تاج تونل

بیشترین مقدار شتاب در مقاله مرجع ۹۹/۶۷ و در تحلیل ۸۶/۲ متر بر مجذور ثانیه است. نمودارها همبستگی خوبی دارند و هر دو نمودار بعد از ۰/۱ ثانیه از بیشینه مقدار افت کرده اند. میزان اختلاف ۱۳ درصد است که با توجه به ساده سازی مدل خاک این مقدار اختلاف می تواند قابل قبول باشد. یکی دیگر از نمودارهای مهم و قابل بحث در مقاله مرجع نمودار تنش - زمان است که در شکل ۵ مقادیر آن با نتایج مدل عددی انسیس مقایسه شده است. در این نمودار تنش ۵ نقطه مختلف که به ترتیب با افق ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه می سازند بررسی

شده است. در جهت سادگی مدل‌سازی و کاهش زمان به دلیل زیاد بودن مدل‌های انتخابی در این تحقیق از پارامتر اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظر شده است همچنین این مورد در مقاله مرجع نیز مورد بررسی قرار نگرفته است.

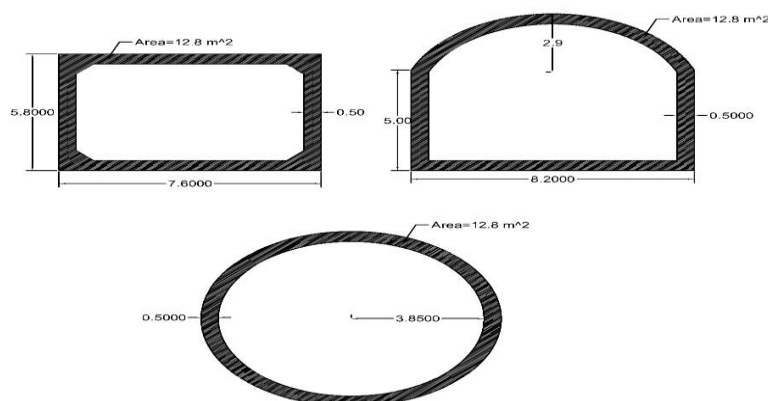


شکل ۶: مقایسه نمودارهای تنش در پنج نقطه تعیین شده از مقاطع دایروی و نعل اسبی و مستطیلی.

باتوجه به نتایج به دست آمده بیش‌ترین مقدار اختلاف مربوط به نقطه‌ای می‌باشد که با افق زاویه ۴۵ درجه می‌سازد و میزان این اختلاف ۱۲/۵ درصد است در سایر اختلاف نتایج پژوهش با نتایج مقاله مرجع زیر ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین در جاهایی که میزان تنش ایجاد شده بیشتر است اختلاف بین مدل مقاله مرجع و مدل‌سازی عددی پژوهش میزان کمتری دارد.

### ۳-۲- مدل‌سازی پژوهش

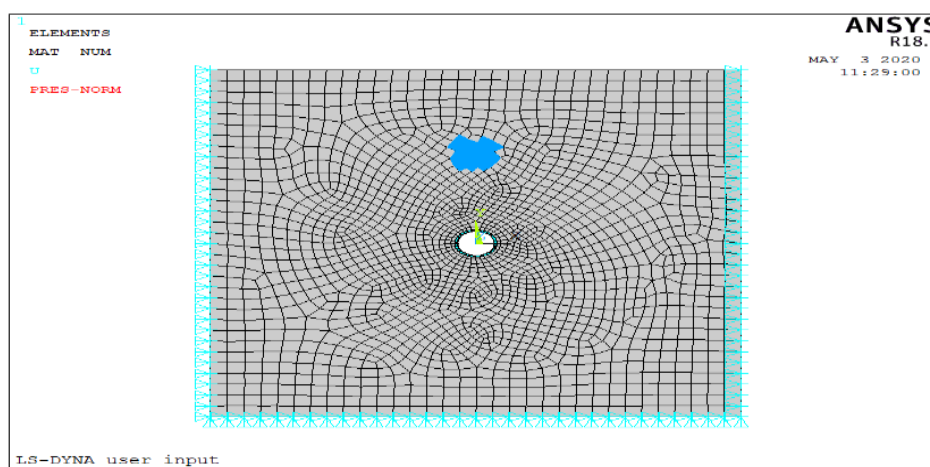
در این تحقیق، جهت مدل‌سازی عددی و بررسی اثر انفجار بر تونل با شکل مقطع مختلف از مشخصات سه نوع مقطع با مساحت سطح مقطع یکسان استفاده شده است. به عبارتی مقطع هر سه تونل به‌گونه‌ای انتخاب شده است که حجم بتن‌ریزی یکسانی داشته باشند. در شکل ۷ هندسه مقاطع آورده شده است.



شکل ۷: هندسه و اندازه مقاطع مدل‌سازی.



با فرض پرتاب موشک نفوذی GBU27 میزان نفوذ در خاک معمولی حدود ۳۰ متر تخمین زده شد [۲۱]. با معیار قراردادن عدم فروریزش تونل‌ها با استفاده از روش سعی و خطا عمق امن دفن تونل زیر ماده منفجره ۲۰ متر به دست آمده است. از این رو ارتفاع خاک بالای تونل ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. آب زیرزمینی در عمق نسبتاً زیادی نسبت به محور تونل قرار دارد و به همین دلیل در مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود. ضخامت تونل‌ها ۵۰ سانتی‌متر و مساحت مقطع ۱۲/۸ در نظر گرفته شده است. خاک اطراف تونل ۵۰ متر و عمق تونل نیز ۱۵ متر است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، قسمت تحتانی تونل در هر سه جهت مقید شده است ولی مرزی بین خاک و هوا آزاد است. صفحات موازی با طول تونل در دو سمت فقط در راستای حرکت عرضی مقید شده‌اند. در این مدل‌ها فرض شده است که ماده منفجره بعد از نفوذ در خاک در عمق ۳۰ متری از سطح زمین منفجر می‌شود. دلیل این فرض بررسی پرتابه‌های نفوذی رایج جهت آسیب‌رسانی به سازه‌های زیرزمینی با حداکثر میزان نفوذ بوده است. فاصله محل انفجار تا تاج تونل ۲۰ متر فرض شده است.



شکل ۸: شرایط مرزی تونل دایروی.

در مجموع ۹ مدل به وسیله نرم‌افزار انسیس ساخته شده است که در ابتدا سه مدل با مقدار ماده منفجره ۲۵۰ کیلوگرم و در ادامه ۶ مدل دیگر با مقدار ماده منفجره ۲۵۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ساخته شده که در کلیه این مدل‌ها، خصوصیات بتن و خاک یکسان فرض شده است.

### ۳-۲-۱- مشخصات مصالح

برای قسمت رفتار فشاری بتن و همچنین میزان بازشدگی و تنش‌های خردشدگی بتن مطابق جدول ۱ از مدل مواد بتن انسیس استفاده می‌کنیم. نوع مدل انتخابی برای بتن در نرم‌افزار از نوع *concret damage plastic* انتخاب شده است تا بتوان از نهایت ظرفیت بتن در مدل‌سازی استفاده گردد.

جدول ۱: پارامترهای بتن مصرفی تونل در بارگذاری انفجار.

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	تنش گسیختگی (MPa)	کرنش گسیختگی	درصد میلگرد
۲۵۰۰	۳۵۰۰۰	۵۰	۳۵	۰/۰۰۲	۱/۹

در هر قطعه سگمنت ۱۰۰ کیلوگرم میلگرد استفاده می‌شود. حجم هر قطعه سگمنت استفاده شده در مدل‌سازی ۱/۵ مترمکعب است.

باتوجه به مقدار میلگرد بکار رفته در حجم قطعه سگمنت درصد حجمی میلگرد ۱/۹ درصد خواهد شد. خاک محیط اطراف یکسان فرض می‌شد. همچنین خواص مکانیکی و فیزیکی خاک به صورت خاک طبیعی بدون تراکم مدل شد. مشخصات فنی خاک اطراف مقاطع تونل در نظر گرفته شده در جدول ۲ آورده شده است که با مشخصات خاک مقاله مرجع در جهت یکسان سازی نتایج حاصله انتخاب شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی خاک اطراف مقاطع تونل.

جرم مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیک (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	مدول برشی (MPa)	ضریب چسبندگی (kPa)
۱۸۰۰	۲۰۰	۳۳	۱/۲	۳۰

خاک محیط اطراف تونل همگن فرض شد. همچنین خواص مکانیکی و فیزیکی خاک در حالت بدون تراکم مدل شده است. مدل رفتاری خاک احاطه کننده اطراف مقاطع تونل در نظر گرفته شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مدل رفتاری خاک محاط کننده اطراف مقاطع تونل

نوع پارامتر	مقدار پارامتر	ردیف
DENS	۱۸۰۰	۱
EX	2E+009	۲
NUXY	0.4	۳
TANGENT MODULUS	1E+008	۴

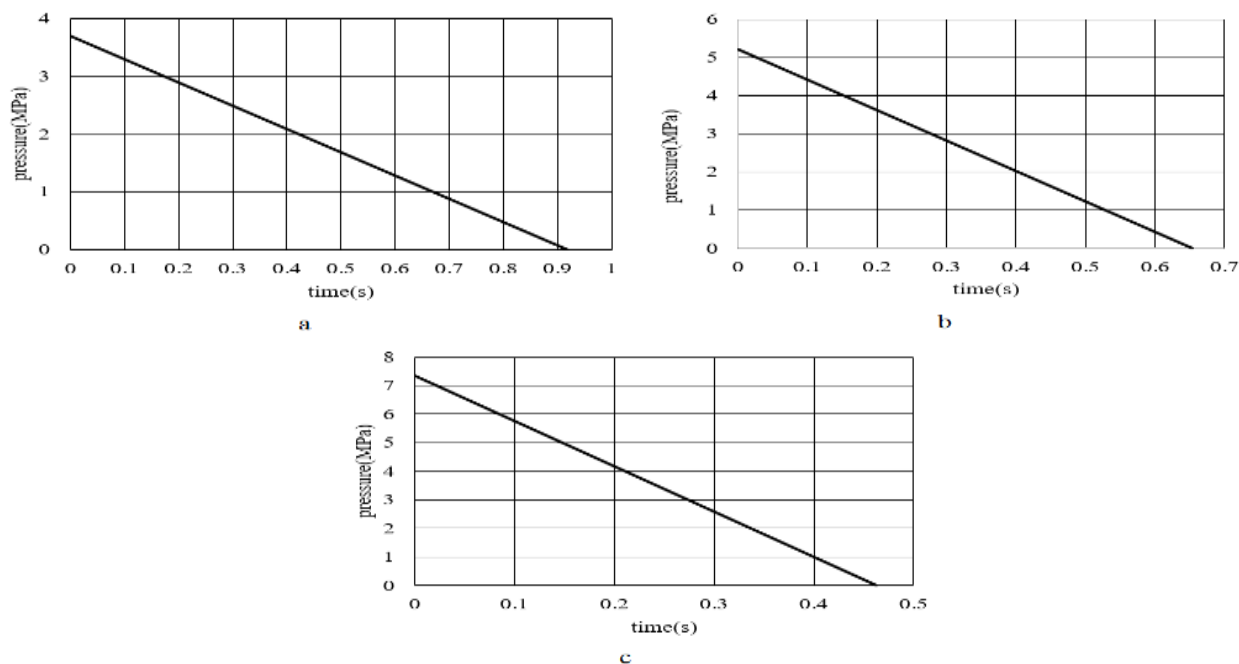
### ۳-۲-۲- مشخصات ماده منفجره و نمودار فشار - زمان

جهت بررسی پاسخ تونل‌های مدفون در برابر بار انفجار از سه خرج ۵۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT به منظور شبیه سازی موج انفجار استفاده می‌شود. در بخش دوم پارامترهای مؤثر در تعیین نمودار فشار - زمان موج انفجار بررسی شد. مطابق روابط ارائه شده در بخش دوم پارامترهای مؤثر در تعیین بار انفجار برای هر سه خرج در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: پارامترهای بارگذاری انفجار برای سه خرج مختلف.

میزان ماده منفجره (kg)	n	f <sub>c</sub>	c (m/s)	U (m/s)	Po (MPa)	t <sub>d</sub> (s)
۲۵۰	۱/۵	۰/۴	۱۲۶/۵	۲/۰۵	۳/۷	۰/۹۱
۵۰۰	۱/۵	۰/۴	۱۲۶/۵	۲/۸	۵/۲۱	۰/۶۵
۱۰۰۰	۱/۵	۰/۴	۱۲۶/۵	۴/۰۸	۷/۳۵	۰/۴۶

باتوجه به نتایج به دست آمده از جدول ۴ برای TNT های مختلف نمودار فشار زمان رسم می‌شود. در شکل ۹ نمودارهای فشار- زمان سه خرج مختلف نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار فشار - زمان (a) TNT=250 و (b) TNT=500 و (c) TNT=1000

قسمت منفی نمودار فشار - زمان به علت پدیده مکش در محیط اطراف انفجار، ایجاد می‌شود و مقادیر بسیار اندکی دارد. با توجه به اینکه فشار منفی اغلب در محیط هوا اتفاق می‌افتد لذا در مسائل این پژوهش به دلیل اینکه انفجار داخل خاک است می‌توان از قسمت‌های منفی صرف نظر کرد. این نمودارها به صورت ماتریس‌های زمان و فشار مطابق جدول ۵ به نرم‌افزار انسیس معرفی می‌شوند.

جدول ۵: مشخصات مراحل اعمال پارامتر فشار - زمان معادل با ۲۵۰ کیلوگرم TNT

ب) ماتریس زمان

STEP	TIME
۱	۰
۲	۰,۱
۳	۰,۲
۴	۰,۳
۵	۰,۴
۶	۰,۵
۷	۰,۶
۸	۰,۷
۹	۰,۸
۱۰	۰,۹۱

الف) ماتریس فشار

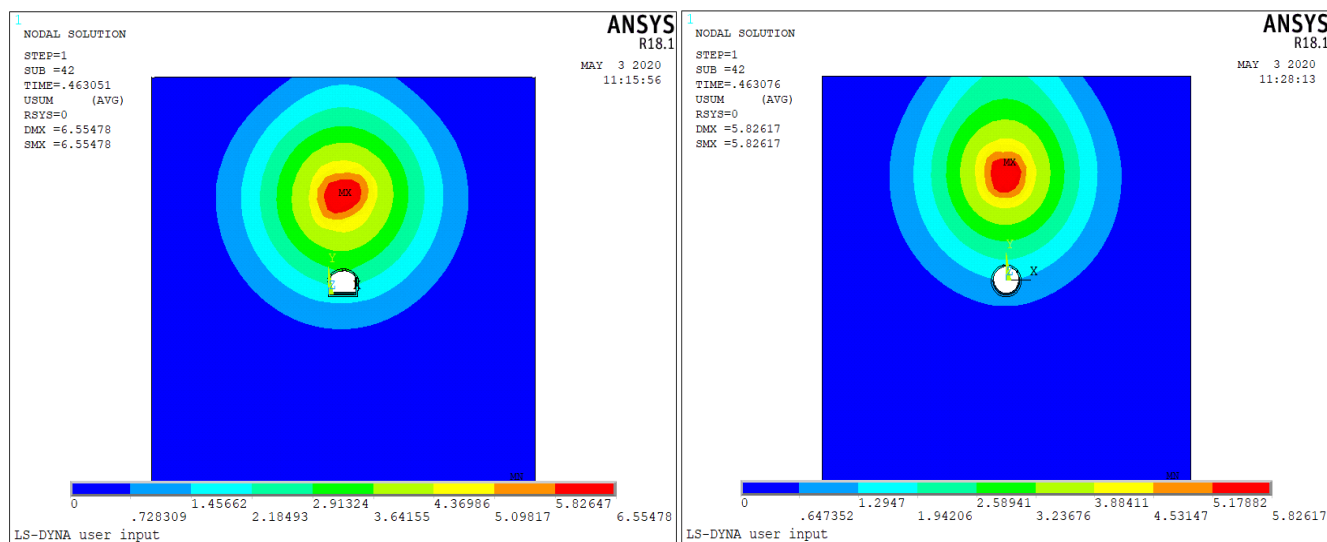
STEP	PRESSURE
۱	-۳۷۰۲۹۰
۲	-۳۳۰۱۱۰
۳	-۲۸۹۷۳۲۰
۴	-۲۴۹۴۵۳۰
۵	-۲۰۹۱۷۴۰
۶	-۱۶۸۸۹۵۰
۷	-۱۲۸۶۱۶۰
۸	-۸۸۳۳۷۰
۹	-۴۸۰۵۸۰
۱۰	۰

## ۴- نتایج تحلیل عددی

نتایج تحلیل به صورت نمودار جابه‌جایی، نمودار شتاب زمان، نمودار سرعت زمان و نمودار تنش زمان به دست آمده است. نتایج نمودار جابه‌جایی در آخرین لحظه زمان تحلیل نمایش داده می‌شود. ولی سایر خروجی‌ها وابسته به زمان نمایش داده می‌شود. در انتها میزان جذب انرژی مقاطع نیز ترسیم شده است.

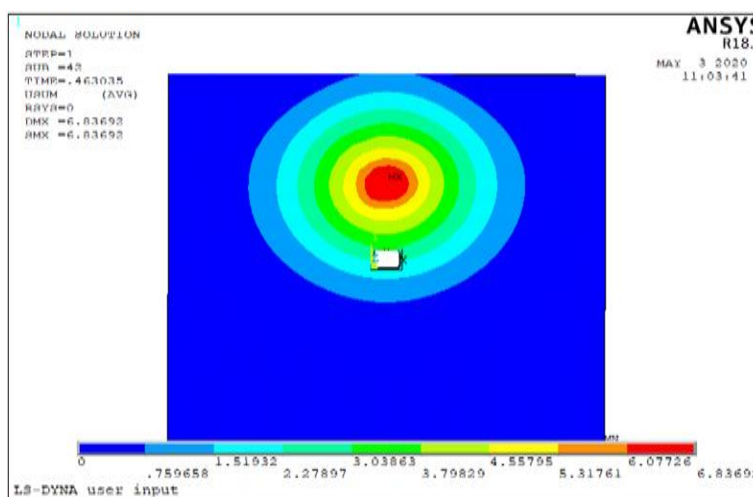
## ۴-۱- نمودار حداکثر جابه‌جایی

در شکل ۱۰ نمودارهای جابه‌جایی تونل نعل اسبی و دایروی و مستطیلی در زمان‌های مختلف آورده شده است. انفجار در عمق ۳۰ متری خاک انجام پذیرفته است. موج‌های انفجار هم به سمت پایین و هم به سمت بالای تونل منتشر شده است. سرعت این انتشار اغلب به میزان ماده منفجره و جنس خاک بستگی دارد. با بررسی دقیق‌تر شکل‌های زیر می‌توان به اهمیت میزان فاصله خرج انفجاری از مقطع تونل پی برد به طوری که هر چه نزدیک به تونل مدفون باشد درصد تخریب و همچنین میزان انتشار موج حاصل از خرج انفجاری بیشتر خواهد بود.



(ب) نعل اسبی

(الف) دایروی



(ج) مستطیلی

شکل ۱۰- نمودار حداکثر فشار وارد بر خاک در تاج تونل با مقاطع: (الف) دایروی (ب) نعل اسبی (ج) مستطیلی

همان‌طور که در شکل مشخص است امواج انفجار به شکل کره در محیط پخش می‌شوند و با گذشت زمان محیط بیشتری از خاک را احاطه می‌کنند به طوری که بعد از حدود  $0.4$  ثانیه موج انفجار به سطح مقطع تونل می‌رسد. در زمان  $t=0.08s$  شعاع موج انفجار  $5/5$  متر است و به فاصله  $14/5$  متری تاج تونل رسیده است. در لحظه  $t=0.2s$  شعاع موج انفجار  $13$  متر و در انتهای زمان انفجار حدود  $28$  متر شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده از شکل‌های بالا نتیجه می‌شود که بیش‌ترین جابه‌جایی مربوط به تونل مربعی است. کمترین جابه‌جایی هم در تونل دایروی رخ داده است. تونل نعل اسبی هم بعد از تونل دایروی کمترین جابه‌جایی را دارد.

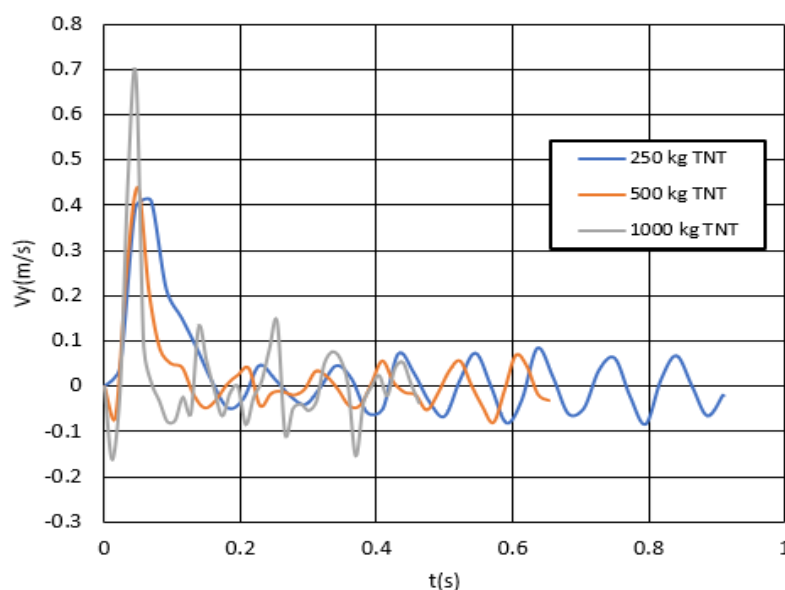
جدول ۶- مقادیر حداکثر فشار وارد بر خاک اطراف تونل در مقاطع انتخابی

ردیف	نوع مقطع	مقدار مواد منفجره (kg)	مقدار حداکثر فشار خاک در تاج تونل (mpa)
۱	دایروی	۱۰۰۰	۳٫۸
۲	نعل اسبی		۵٫۱
۳	مستطیلی		۷٫۳

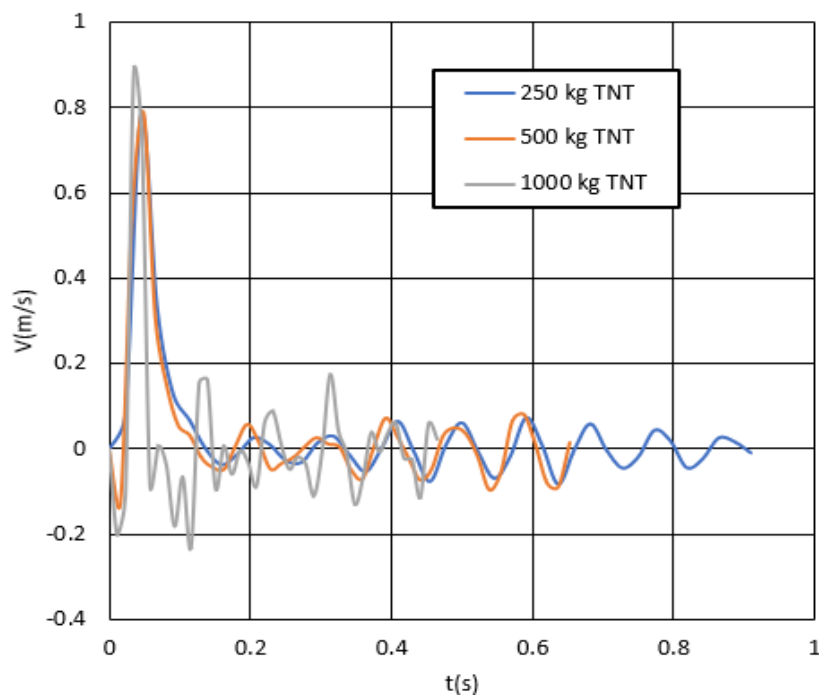
باتوجه به جدول ۶ که نشان‌دهنده بیشترین میزان فشار وارد بر خاک اطراف تونل تحت مقدار حداکثر مواد منفجره را نمایش می‌دهد می‌توان دریافت که حداکثر فشار وارد بر خاک اطراف تونل در مقطع مستطیلی رخ داده است و نیز کمترین تنش برای مقطع دایروی است که نشان‌دهنده برتری مقطع دایروی در پایداری در برابر انفجار خواهد بود و در جهت بهبود سایر مقاطع متعارف تونل در برابر انفجار پیشنهاد می‌گردد تا با استفاده از الیاف فولادی و بتن‌های پر مقاومت در ساخت تونل‌ها به کاهش ماکزیمم فشار وارد بر خاک اطراف تونل کمک بسزایی خواهد کرد.

#### ۴-۲- نمودارهای سرعت - زمان موج انتشار یافته حاصل از انفجار

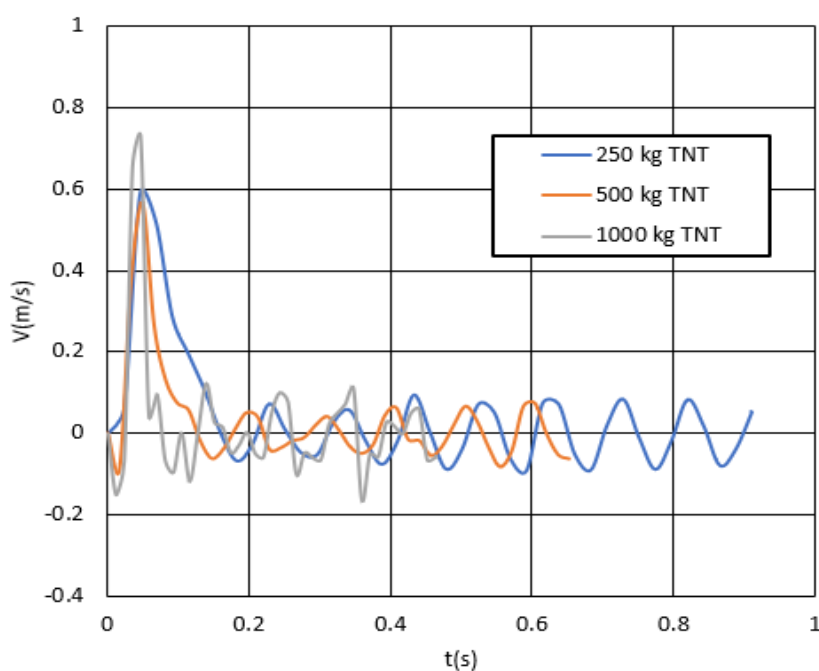
در شکل ۱۰ نمودار سرعت - زمان تاج تونل مقاطع دایروی، مستطیلی و نعل اسبی به‌ازای خرج‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT نشان داده شده است.



الف) نمودار سرعت-زمان تاج تونل در مقطع دایره ای



ب) نمودار سرعت-زمان تاج تونل در مقطع مستطیلی



ج) نمودار سرعت-زمان تاج تونل در مقطع نعل اسبی

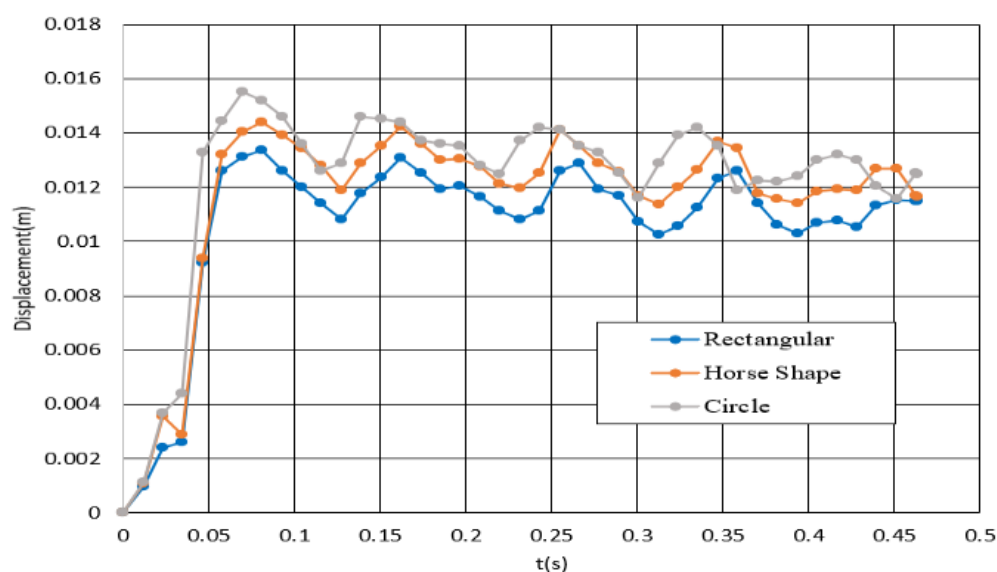
شکل ۱: نمودار سرعت - زمان تاج تونل در مقاطع دایروی، مستطیلی و نعل اسبی

باتوجه به نتایج به دست آمده بیشترین سرعت ایجاد شده در تاج تونل در لحظه  $0/1$  ثانیه است. سرعت ذرات خاک به ترتیب در مدل مربعی نعل اسبی و دایروی بیشترین مقدار است. با افزایش مقدار ماده منفجره تغییرات سرعت در تونل دایروی از سایر تونلها بیشتر است.

کمترین تغییر سرعت نیز در تونل مربعی مشاهده می‌شود. بعد از  $0.2$  ثانیه سرعت ذرات به شدت افت کرده و به یک حالت پایدار می‌رسد. علت این امر هندسه مقطع تونل خواهد بود که میزان شدت افت سرعت در آن بیشتر از سایر مقاطع خواهد بود. سرعت در دو مقطع نعل اسبی و مستطیلی تا حدی شبیه به هم خواهد بود علت این امر را نیز شباهت این دو مقطع می‌توان ذکر کرد.

#### ۳-۴- مقایسه حداکثر جابه‌جایی ایجادشده در مقاطع

به‌منظور بررسی عملکرد مقاطع در برابر بار انفجار حداکثر پاسخ آن‌ها در مقابل انفجار باید سنجیده شود. برای این منظور در این قسمت به بررسی حداکثر جابه‌جایی مقاطع در طول مدت اعمال بار انفجار پرداخته می‌شود. در شکل ۱۱ حداکثر جابه‌جایی مقاطع به‌ازای  $1000$  کیلوگرم TNT در زمان‌های مختلف اعمال بار نشان داده شده است.

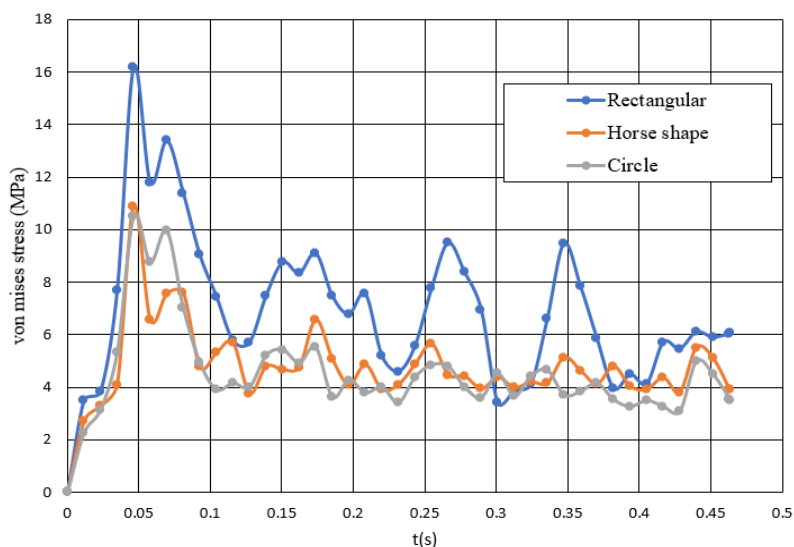


شکل ۱۲: حداکثر جابه‌جایی مقاطع دایروی، مستطیلی و نعل اسبی به‌ازای  $TNT=1000$ .

همان‌طور که مشخص است بیش‌ترین جابه‌جایی مربوط به مقطع دایره‌ای و کمترین جابه‌جایی نیز مربوط به مقطع مربعی است. بیش‌ترین جابه‌جایی در تونل‌های دایروی و نعل اسبی در محل تاج تونل و تونل مربعی نزدیکی‌های محل اتصال پایه‌ها به سقف اتفاق افتاد. حداکثر جابه‌جایی در هر سه مدل در نزدیکی زمان  $t=0.07$  ثانیه رخ داده است. مساحت زیر نمودار جابه‌جایی زمان سرعت ذرات تونل را نشان می‌دهد. از این حداکثر سرعت ایجاد شده در تونل دایروی بیشتر از سایر تونل‌ها است. علت آن که حداکثر سرعت جابه‌جایی در بین مقاطع مدل‌سازی مربوط به مقطع دایروی است هندسه یکنواخت و توضیح تنش یکسان در تمامی قسمت‌های مقطع بوده که در سایر مقاطع کمتر دیده می‌شود.

#### ۴-۴- حداکثر تنش وارد بر مقطع تونل تحت اثر انفجار

در شکل ۱۲ حداکثر تنش ایجادشده در شکل مقطع در زمان‌های مختلف ترسیم و به هم متصل شده‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده مقطع مستطیلی به علت وجود آمدن تمرکز تنش در گوشه‌ها در مقایسه با مقاطع دیگر تنش بیشتری دارد.

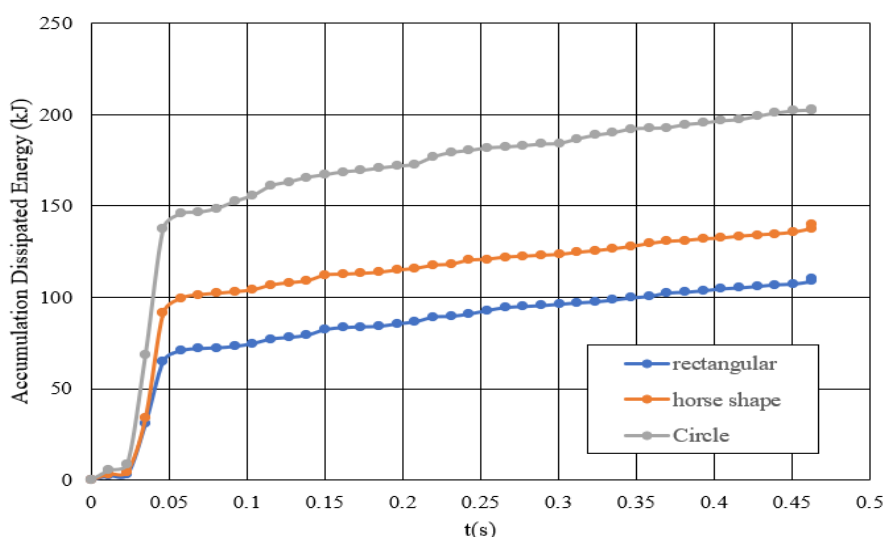


شکل ۱۲: حداکثر تنش وون مایسز مقاطع به ازای TNT=1000.

مقطع مستطیلی در کل زمان بارگذاری تنش بیشتری نسبت به مقطع مستطیلی و نعل اسبی داشته است. همچنین طبق نتایج شکل ۱۲ تنش‌های ایجاد شده در مقطع نعل اسبی و دایره‌ای تقریباً یکسان است. در تونل مستطیلی تمرکز تنش در گوشه‌هاست در حالی در تونل دایروی و نعل اسبی به علت خاصیت قوسی مقاطع تنش‌ها در کل قسمت دایروی پخش می‌شوند و تمرکز تنش در مقطع ایجاد نمی‌شود.

#### ۴-۵- مقایسه جذب انرژی مقاطع

برای محاسبه انرژی جذب شده توسط مقاطع از انرژی جذب شده توسط هر المان استفاده می‌کنیم. بعد از به دست آوردن انرژی جذب شده هر المان انرژی کل مقطع را به دست می‌آوریم. در شکل ۱۳ انرژی جذب شده تجمعی هر مقطع نشان داده شده است. کل بار انفجار طی ۲۰ مرحله به سازه وارد می‌شود. ابتدا برای هر مرحله انرژی جذب شده محاسبه شده سپس با مرحله قبلی جذب می‌شود. در نتیجه در آخرین گام کل انرژی جذب شده توسط مقطع نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۳: مقایسه انرژی‌های جذب شده توسط مقاطع.



همان‌طور که درشکه بالا مشخص است در ابتدا انرژی جذب‌شده در مقاطع تقریباً یکسان است ولی در ادامه مقطع دایروی و نعل اسبی با اختلاف زیاد از مقطع مستطیلی فاصله گرفته‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده از جدول فوق تونل دایره‌ای ۸۲ درصد نسبت به تونل مربعی و ۴۴ درصد نسبت به تونل نعل اسبی جذب انرژی بیشتری دارد که این امر نشان از برتری مقطع دایروی نسبت به سایر مقاطع در جذب انرژی حاصل از انفجار خواهد بود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سه نوع تونل دایروی، مستطیلی و نعل اسبی تحت بارهای انفجار مختلف ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در نرم‌افزار ANSYS/LS DAYAN R18.1.0 مدل‌سازی و تحلیل شدند. تونل‌های در عمق ۵۰ متری سطح زمین قرار داشتند و ماده منفجره با فرض نفوذ پرتابه به داخل خاک و انفجار در عمق ۳۰ متری زمین به‌صورت نمودار فشار زمان مدل‌سازی شدند. بعد از تحلیل مدل‌ها نتایج زیر به دست آمدند.

۱- به ازای خرج‌های مختلفی از مواد منفجره سرعت ایجادشده در ذرات تاج تونل در مقطع دایروی بیش‌ترین مقدار است. همچنین با دوبرابر شدن میزان خرج، سرعت ذرات در مقطع دایروی، نعل اسبی و مستطیلی به ترتیب ۷۲ درصد، ۴۰ درصد و ۱۴ درصد افزایش یافته است.

۲- با توجه به بررسی صورت گرفته می‌توان گفت که خرابی تونل‌های دایروی و نعل اسبی درست از مرکز تاج تونل شروع شده و به اطراف گسترش می‌یابد ولی در تونل مستطیلی خرابی از گوشه گسترش یافته و به وسط سازه منتقل می‌شود.

۳- در مقاطع دایروی و نعل اسبی از ظرفیت کل مقطع استفاده می‌شود درحالی‌که در مقطع مستطیلی تمرکز تنش در گوشه‌ها وجود دارد.

۴- حداکثر تنش ایجاد شده در تونل مستطیلی حدود ۴۰ درصد بیشتر از تونل نعل اسبی و دایروی است. علت این امر وجود تمرکز تنش در گوشه در تونل مستطیلی است. همچنین تونل‌های دایروی و نعل اسبی در مدل زمان بارگذاری تنش حداکثر تقریباً یکسانی دارند که این امر به علت قوسی شکل بودن و پخش شدن تنش‌ها در قسمت فوقانی هر دو تونل می‌باشد.

۵- با استفاده از انرژی هر المان مجموع انرژی جذب‌شده توسط کل مقطع محاسبه و ترسیم شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده انرژی کل جذب‌شده تونل دایره‌ای ۸۲ درصد نسبت به تونل مستطیلی و ۴۴ درصد نسبت به تونل نعل اسبی بیشتر است. این امر نشان می‌دهد که در مواقع انفجار تونل دایروی جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر مقاطع دارد.

## مراجع

- [1] Mobaraki B, Vaghefi M. Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015 Mar 1; 47:114-22.
- [2] De A, Zimmie TF. Centrifuge modeling of surface blast effects on underground structures. *Geotechnical Testing Journal*. 2020 Sep;30(5):427-31.
- [3] Wang Z, Lu Y, Hao H, Chong K. A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. *Computers & Structures*. 2005 Jan 1;83(4-5):339-56.
- [4] Pantelides CP, Garfield TT, Richins WD, Larson TK, Blakeley JE. Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests. *Engineering structures*. 2021 Oct 1; 76:24-33.
- [5] Cullis IG, Schofield J, Whitby A. Assessment of blast loading effects—Types of explosion and loading effects. *International journal of pressure vessels and piping*. 2020 Sep 1;87(9):493-503.
- [6] Li JC, Li HB, Ma GW, Zhou YX. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. *Tunneling and underground space technology*. 2013 Apr 1; 35:227-34.
- [7] De, Anirban. "Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil." *Computers and Geotechnics* 43 (2020): 72-79.
- [8] Yang Z. Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings. *Finite Elements in Analysis and design*. 1997 Jan 16;24(3):113-32.
- [9] Wu C, Hao H. Numerical simulation of structural response and damage to simultaneous ground shock and air blast loads. *International journal of impact engineering*. 2007 Mar 1;34(3):556-72.
- [10] Stevens DJ, Krauthammer T. Analysis of blast-loaded, buried RC arch response. I: numerical approach. *Journal of Structural Engineering*. 1991 Jan;117(1):197-212.
- [11] D. J. Stevens, T. Krauthammer, and D. Chandra, "Analysis of Blast-Loaded, Buried RC Arch Response. Part II: Application. *Journal of Structural Engineering*., vol. 117, no. 1, pp. 213–234, Jan. 1991.
- [12] M. W. Gui and M. C. Chien, "Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport – a parametric study," *Geotechnical Testing Journal*., no. 1, pp. 227– 248, 2006.
- [13] Tiwari, R., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2017). Dynamic analysis of tunnel in soil subjected to internal blast loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1491-1512.
- [14] Liu, H., & Nezili, S. (2016). Centrifuge modeling of underground tunnel in saturated soil subjected to internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), 06015001.
- [15] Kristoffersen, M., Minoretti, A., & Børvik, T. (2019). On the internal blast loading of submerged floating tunnels in concrete with circular and rectangular cross-sections. *Engineering failure analysis*, 103, 462-480.
- [16] Zaid, M., & Sadique, M. R. (2020). The response of rock tunnel when subjected to blast loading: Finite element analysis. *Engineering Reports*, e12293.
- [17] Chaudhary, R. K., Mishra, S., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2019). Vulnerability analysis of tunnel linings under blast loading. *International journal of protective structures*, 10(1), 73-94.
- [18] ANSYS/LS-DAYAN® Academic Research, Release 18.0, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [19] Yang, Yubing, Xiongyao Xie, and Rulu Wang. "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion." *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering* 2.4 (2010): 373-384
- [20] Wei, X. Y., Z. Y. Zhao, and J. Gu. "Numerical simulations of rock mass damage induced by underground explosion." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46.7 (2009): 1206-1213.
- [21] Bolonkin, Alexander, and Shmuel Neumann. "New self-propelled penetration bomb." *International Journal of Advanced Engineering Applications* 2.5 (2011): 9-105.