

## بررسی اثر انفجار بر روی سگمنت های بتنی تونل های مرزی

مجید حمزه<sup>۱</sup>، فریدون خسروی<sup>۲\*</sup>، حمید پسران بهبهانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)

(دریافت: ۹۶/۰۴/۱۰، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

### چکیده

در عصر حاضر متداول ترین روش انتقال آب، از طریق حفاری و تونل های زیرزمینی است. یکی از دلایل عمده استفاده از تونل جهت رعایت اصول و مبانی پدافند غیرعامل در خصوص حفظ منابع آب و جلوگیری از خطرات احتمالی در طول مسیر انتقال است. مقاله حاضر به بررسی اثر انفجار به روش آنالیز عددی در مسیر تونل انتقال آب پرداخته و با تغییر فواصل مواد انفجاری بارگذاری شده و همچنین تغییر ضخامت سگمنت های بتنی، میزان جابجایی و اثرات انفجار بر سگمنت بررسی می شود. بدین منظور سه نمونه سگمنت با ضخامت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی متر مدل سازی و مواد انفجاری در فواصل ۰/۵، ۱ و ۲ متری بارگذاری شد و در نهایت مقدار حداکثر جابجایی نقاط سگمنت اندازه گیری شد. نتایج حاصله نشان داد فقط با مقدار ماده ناریه ۲۰lb و برای ضخامت های ۲۰ و ۳۰ سانتی متر و با حداکثر فاصله ۰/۵ متر سگمنت دچار آسیب و شکست می گردد. همچنین نتایج نشان دادند بهینه ترین روش میرا نمودن امواج انفجار، مدفون نمودن سازه و یا خاکریزی بر روی سازه مورد نظر است.

**کلیدواژه ها:** پدافند غیرعامل، تونل انتقال آب، انفجار، شبیه سازی، بهینه یابی فاصله

## Investigation of Explosion Effects on the Border Concrete Tunnels

M. Hamzeh, F. Khosravi\*, H. P. Behbahani

Imam Hossein University

(Received: 01/07/2017; Accepted: 08/10/2017)

### Abstract

Nowadays, one of the most common methods for water transmission is through underground tunnels. Tunnels are in line with the fundamental principle of the passive defense for protection of water resources and are able to prevent any potential risks to water transmission lines. In this research, a numerical study has been employed to investigate the effects of surface explosion on the water transmission tunnels. Herein, by changing the distance of explosive materials as well as the thickness of concrete segments, response displacements and explosion effects on the concrete segments have been calculated. For this purpose, three concrete segments with the thicknesses of 0.2, 0.3 and 0.4 m were selected and subjected to the explosive materials located 0.5, 1 and 2 m away from them. The obtained results showed that the concrete segments with the thicknesses of 0.2 and 0.3 m experienced significant damage when subjected to 20 lb. explosive material at the distance of 0.5 m. It was found that burying the structures or embankments of the structures were among the best methods for damping the blast waves.

**Keywords:** Passive Defense, Water Transmission Tunnel, Explosion, Simulation, Optimization Space.

## ۱. مقدمه

تجربی برای راستی سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده که در آن یک ستون مرکب بر روی دوپایه که شبیه‌سازی سقف و کف یک طبقه از ساختمان را انجام می‌دهند، مهار گردیده است. تغییر شکل تیر I شکل میانی ستون تحت انفجار واقعی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج به دست آمده در مقایسه با تحلیل‌های نرم‌افزاری تطابق بسیار مناسب و قابل قبولی را گزارش نمود. همچنین ساعدی و همکاران [۱۳] مقاومت یک سازه پناهگاهی طراحی شده مدفون بر اساس آیین‌نامه سوئیس را با استفاده از روش عددی، بررسی کرده و پس از شبیه‌سازی و انجام تحلیل نرم‌افزاری با هایدروکد اتوداین، نتایج حاصله با آیین‌نامه مذکور مطابقت کامل داشته و صحت نتایج تحلیل نرم‌افزاری را تأیید می‌کند. نتایج به دست آمده در مطالعات قبلی همخوانی و تطابق قابل قبول شبیه‌سازی عددی و نمودارهای حاصله با آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهند [۱۱-۱۳].

در مقاله حاضر به روش آنالیز عددی مطابق با روند پیشنهادی وو و همکاران [۱۲] به بررسی اثر انفجار ناشی از میزان مواد منفجره‌ای که توسط یک انسان قابل حمل است در نقاطی از مسیر تونل انتقال آب که بیش‌ترین آسیب‌پذیری را دارد پرداخته شده است. برای این منظور یک سگمنت بتنی مدل‌سازی شده و با تغییر فواصل مواد انفجاری با سگمنت، تغییر مقدار ماده منفجره و همچنین تغییر ضخامت سگمنت‌های بتنی، اثر انفجار بر سگمنت و به طور مشخص میزان جابجایی نقطه مورد نظر بر روی سگمنت بر اثر انفجار بررسی می‌شود.

## ۲. روش تحقیق

## ۲-۱. مطالعات و مشخصات نرم‌افزاری

حل مسائل انفجار آزاد و یا انفجار همراه با ترکش، در کل به صورت بارهای دینامیکی شدید که از ضربه یا انفجار ناشی شده و در مدت چند میکروثانیه به وقوع می‌پیوندد مشخص می‌شوند [۱۴]. بنابراین، در شبیه‌سازی‌های عددی، انتشار موج را باید بتوان به خوبی شبیه‌سازی نمود. مسئله مکانیک پیوسته عمومی مورد استفاده برای شبیه‌سازی چنین پدیده‌هایی بر اساس معادلات موازنه جرم، اندازه حرکت و انرژی در واکنش‌هایی است که رفتار مواد را تشریح می‌کنند. با توجه به این که معادلات دارای مشتقات پاره‌ای غیرخطی است، راه‌حل‌های تحلیلی اغلب قابل استفاده نیستند؛ زیرا ورودی‌ها و مقادیر اولیه مسئله بسیار پیچیده هستند. تکنیک‌های عددی تنها روش‌هایی هستند که برای دستیابی به راه‌حل‌های کامل در دسترس هستند.

مباحث دینامیکی با نرخ بسیار بالا، از جمله مسائلی هستند که به شدت غیرخطی بوده و حتی با پیشرفت‌های امروزی بشر نیز رسیدن نتایج به حد انطباق بر واقعیت به راحتی امکان‌پذیر

در عصر حاضر بهترین روش انتقال آب، از طریق حفاری و تونل‌های زیرزمینی است. یکی از دلایل عمده استفاده از تونل جهت رعایت اصول و مبانی پدافند غیرعامل در خصوص حفظ منابع آب و جلوگیری از خطرات احتمالی در طول مسیر انتقال است. رفتار تونل‌ها در برابر بارهای انفجاری موضوع مهمی در مهندسی پدافند غیرعامل است. اهمیت و کاربرد تونل‌ها در بحث پدافند غیرعامل به دلیل رخدادهای عمدی یا اتفاقی (غیرعمدی) که بر روی ساختمان‌ها و سازه‌های مهم در سرتاسر دنیا اتفاق افتاد، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود اختصاص داده است.

سازه‌های زیرزمینی از قبیل تونل‌ها ممکن است از داخل یا خارج در معرض انفجار قرار گیرند. تحقیقات زیادی بر روی رفتار سازه‌های زیرزمینی در معرض انفجار داخلی صورت گرفته است [۱-۴]. از آنجاکه احتمال انفجار داخلی در تونل‌های انتقال آب کم است، پژوهش بر روی تأثیر انفجار در سطح بر روی تونل‌ها مطلوب‌تر است. همچنین، به دلیل وجود برخی تونل‌های انتقال در نقاط مرزی، و به دلیل احتمال بالای انجام حملات تروریستی در این مناطق، بررسی تأثیر انفجار مواد منفجره‌ای که توسط یک شخص می‌تواند حمل گردد بر رفتار تونل‌های انتقال آب ضروری به نظر می‌رسد که مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته است.

مطالعات صورت گرفته در زمینه تأثیر انفجار بر روی سازه‌ها به یکی از روش‌های آزمایشگاهی [۵-۸]، میدانی [۹ و ۱۰] یا عددی صورت گرفته‌اند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، با چالش‌های بزرگی از قبیل پرهزینه بودن، نیازمندی به تجهیزات و امکانات پیچیده و خاص و مشکلات زیست‌محیطی روبه‌رو هستند. از این رو مناسب‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش مدل‌سازی و تحلیل اثرات انفجار بر سازه‌ها حل مسائل انفجار به کمک شبیه‌سازی‌های عددی است. کاتایاما و همکاران [۱۱] در مطالعه خود به بررسی اثر انفجار تماسی یک خرج استوانه‌ای بر روی پاسخ دینامیکی یک دال بتنی مسلح از هایدروکد اتوداین برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده نمود. جهت مدل‌سازی بتن و ماده منفجره از حل گر لاگرانژی و در مورد اعضای تقویت‌کننده از المان‌های تیر استفاده شده است. نتایج، نشان‌دهنده همخوانی و تطابق قابل قبول تحلیل نرم‌افزاری و نمودارهای حاصله، با آزمایش‌های تجربی انجام شده و تصاویر موجود هستند. وو و همکاران [۱۲] اثر نسبت جرمی ماده منفجره بر روی ظرفیت باقیمانده فشاری ستون مرکب تحت بارگذاری انفجاری تماسی را به روش عددی با استفاده از هایدروکد اتوداین مورد مطالعه قرار دادند. یک آزمایش

در معادله فوق  $E$  انرژی داخلی در واحد حجم،  $V$  حجم ماده انفجاری مورد استفاده و  $A$ ،  $B$ ،  $R_1$ ،  $R_2$  و  $\omega$  ثابت‌های تجربی استخراج شده برای انفجار هستند [۱۵]. همچنین پارامترهای استفاده شده در نرم‌افزار برای ماده منفجره TNT بر طبق جدول (۱) است [۱۶].

جدول ۱. پارامترهای ماده انفجاری TNT

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$v_D$ (m/s)	$P_{cut}$ (MPa)	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)
۱۶۳۰	۶۹۳۰	$۲/۱ \times ۱۰^۴$	$۳/۷۳۸ \times ۱۰^۵$	$۳/۷۴۷ \times ۱۰^۳$
$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_0$	$E_0$ (MPa)
۴/۱۵	۰/۹	۰/۳۵	۱	۶۰۰۰

## ۲-۲. تحلیل نرم‌افزاری نمونه‌ها

مطالعه مورد نظر بر اساس انفجار بر روی سگمنت‌هایی با ابعاد مشخصات متعارف انجام گرفته است. سگمنت‌های مورد مطالعه می‌توانست از بتن‌های یابی، بتن‌های با دانه‌بندی و مواد افزودنی خاص و ... انجام گیرد ولی به علت واقعی بودن و کاربردی بودن نتایج و عمومیت داشتن استفاده از بتن‌ها و مصالح معمولی، از مشخصات سگمنت‌های کارگاهی که در پروژه تونل بهشت‌آباد با مصالح و بتن معمولی با مقاومت فشاری ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و آرماتورهای نمره ۸ و با جزییات ذیل استفاده شده، نمونه‌ها مدل‌سازی گردید.

خصوصیات پوشش از قبیل ضخامت، مقاومت مواد و الگوی سیستم‌های تقویت پوشش و پارامترهای مربوط به طرح اختلاط بتن رویه بررسی شده و در مورد دوام بتن، کاهش سایش بتن خوردگی آرماتورها تصمیم‌گیری شده است. ضخامت پوشش بتنی در مطالعات اولیه پروژه ۳۵ سانتیمتر و برای حصول به سرعت نصب و آب‌بندی، عرض سگمنت‌ها ۱ متر اختیار شده است. مقاومت مشخصه استاندارد بتن  $۳۵۰ \text{ Kg/cm}^2$  و مقاومت تسلیم آرماتورها  $F_y=4000 \text{ Kg/cm}^2$  فرض شده است.

در مرجع آیین‌نامه ارتش امریکا حداقل تسلیحات هر قطعه از سگمنت با توجه به شرایط مختلف اجرایی و بارهای وارد شونده بر آن از زمان ساخت تا نصب حدود ۰/۰۰۱ سطح مقطع در جهت طولی و ۰/۰۰۳۶ سطح مقطع در جهت محیطی توصیه شده است [۱۷].

در بخش اول سگمنت مدل‌سازی شده بدون هیچ‌گونه پوشش خارجی و در هوای آزاد در نظر گرفته می‌شود. در اغلب ورودی و خروجی تونل‌ها، چند متری از دهانه‌ها را به صورت تونل مصنوعی و بدون پوشش (خاک) احداث می‌نمایند و یا خاک‌ریزی صورت گرفته بدون دقت و با شیب ملایم تا بخشی از طول تونل مصنوعی ادامه می‌یابد که مقصود از بخش‌های بدون پوشش، قرار دادن

نیست. بنابراین برای شبیه‌سازی این دسته از مسائل، نرم‌افزارهای ویژه‌ای تدارک دیده شده‌اند که بنام هایدروکد<sup>۱</sup> خوانده می‌شوند [۱۳]. تفاوت اصلی این نرم‌افزارها، قابلیت ویژه آن‌ها در شبیه‌سازی مسائلی است که در آن‌ها مواد (حتی جامدات) به دلیل شدت بارهای وارده به صورت سیال رفتار می‌کنند و یکی از دلایل نام‌گذاری این نرم‌افزارها نیز همین پدیده است.

کاربردهای ویژه این بسته‌های نرم‌افزاری باعث شده تا میان مهندسين از شهرت بالایی برخوردار باشند. از جمله کاربردهای گسترده این نرم‌افزارها در صنایع نظامی، طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار و برخورد، سازه‌های نیروگاهی، پالایشگاه‌ها، صنایع هوافضا و غیره است. از جمله هایدروکدهای شناخته‌شده و پرکاربرد، نرم‌افزار AUTODYN است که به دلیل توانایی بسیار خوب در حل مسائل پیچیده و نیز دلایل و ویژگی‌های ذیل، انتخاب و در این مقاله از آن استفاده گردیده است:

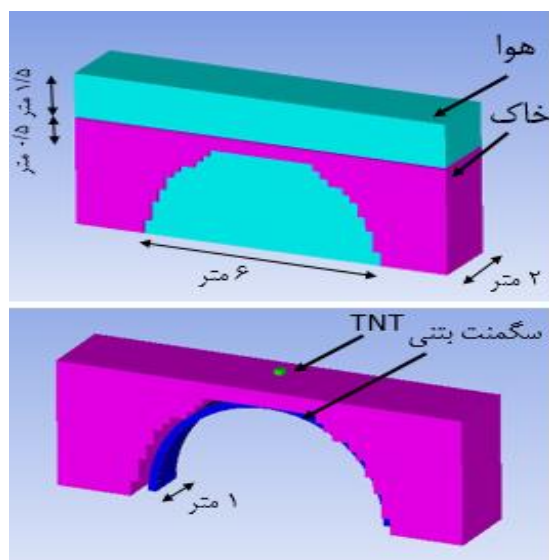
۱- توانایی این نرم‌افزار جهت تحلیل کلیه مسائل به صورت تک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی، که این توانایی جهت تحلیل مسائلی که دارای تقارن بوده و حجم زیادی را در تحلیل نرم‌افزاری توسط پردازنده سیستم نیاز دارد، کاربرد ویژه‌ای دارد به گونه‌ای که در مدل‌سازی نمونه می‌توان بجای تحلیل سه‌بعدی، مسئله را تبدیل به دوبعدی و یا در صورت لزوم و امکان آن‌ها به تک‌بعدی تبدیل و نتایج مطلوب را به صورت سه‌بعدی دریافت نمود. به جهت روشن شدن میزان کارایی این قابلیت می‌توان گفت، برای رسیدن به دقت مورد نظر در یک مدل تک‌بعدی با ۱۰۰۰ المان یک‌بعدی، در صورت استفاده از مدل سه‌بعدی همان مسئله لازم است از حدود یک میلیارد المان سه‌بعدی استفاده نماییم.

۲- استفاده هم‌زمان از تحلیل‌گرهای مختلف از جمله دیدگاه لاگرانژی و دیدگاه اویلری در حل مسائل، توانایی این نرم‌افزار را در شبیه‌سازی مسائل مختلف با مواد و مصالح متنوع بالا برده و بر قابلیت‌ها و مزیت‌های این نرم‌افزار افزوده است [۱۳].

در خصوص محاسبات اثر انفجار (بارگذاری انفجاری) بهترین فرمولی که به صورت گسترده استفاده شده و به بهترین شیوه می‌تواند انرژی شیمیایی را در طول انفجار معادل‌سازی و توصیف نماید، معادله‌ای معروف به Jones-Wilkens-Lee (JWL) است، که در نرم‌افزار اتوداین نیز مدل‌سازی انفجاری توسط همین رابطه مدل‌سازی و تحلیل انجام می‌گیرد:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R1V} \right) e^{-R1V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R2V} \right) e^{-R2V} + \frac{\omega E}{V}$$

<sup>1</sup> Hydrocode



شکل ۲. مدل سازی انجام شده در نرم افزار

در این مرحله بایستی مش بندی قطعات را انجام دهیم تا نرم افزار بتواند با دقت مناسب به انجام تحلیل بپردازد. نحوه انتخاب اندازه مش بندی به سه عامل اساسی بستگی دارد:

الف) حجم و اندازه مدل ب) میزان دقت مورد نیاز تحلیل ج) توان سیستم پردازشگر

معمولاً هرچه ابعاد مدل بزرگ تر باشد ابعاد مش بندی نیز بزرگ تر خواهد بود و هر چه کوچک تر، ابعاد مش نیز کوچک تر بایستی در نظر گرفته شود ضمن اینکه در موضوعات تحقیقی میزان دقت متوسط مد نظر است و به دلیل این که ابعاد بیش تر باعث کاهش دقت شده و ابعاد کوچک تر حجم تحلیل را بالا برده و نیاز به سیستم و پردازشگرهای ویژه و خاص دارد، به طور منطقی ابعاد مش بندی را در موضوعات تحقیقی و آزمایشی در حدود ۲۰٪ بعد نمونه در نظر می گیرند.

بنابراین ابعاد مش بندی به اندازه ۲۰٪ هر بعد نمونه در نظر گرفته شد. همچنین نمونه های ۲ و ۳ نیز با ویژگی های عنوان شده فوق و طبق مشخصات جدول (۲) مدل سازی شدند.

جدول ۲. تعداد و مشخصات نمونه های مورد تحلیل

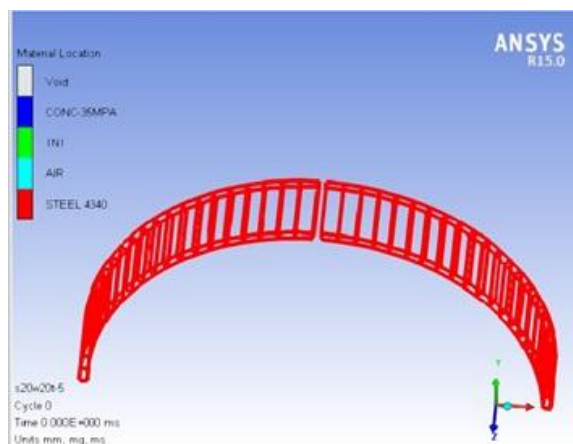
نمونه	عرض سگمنت (m)	قطر خارجی (m)	ضخامت سگمنت (m)
۱	۱	۳	۰/۲
۲	۱	۳	۰/۳
۳	۱	۳	۰/۴

نمونه های مذکور در جدول فوق مشابه بوده و دارای سه ضخامت متفاوت است. این نمونه ها با مقادیر 5 lb، 10 lb و 20 lb ماده منفجره TNT و در فواصل ۰/۵ متری، ۱ متری و ۲ متری از سطح خارجی سگمنت، مورد انفجار و تحلیل نرم افزاری قرار گرفت و نتایج و خروجی آن ها بررسی شد. همچنین برای معرفی

ماده منفجره و انفجار در این بخش از خاک شیب دار کنار تونل مصنوعی است و در بخش دوم نمونه مورد نظر با ۰/۵ متر خاک ریزی بر روی سگمنت مدل می گردد. که در خصوص مدل نمودن مصالح خاکی در اطراف سگمنت بتنی، با توجه به اینکه خاک بایستی با دیدگاه اولیری مدل می شد لذا توانایی مدل آن به صورت منحنی (اطراف سگمنت) امکان پذیر نبود. برای رفع این مشکل دو راه حل وجود داشت اول آنکه مدل سازی توسط دیگر نرم افزارهای بسته نرم افزاری ANSYS انجام و سپس به محیط اتوداین منتقل گردد و دوم اینکه با تقریب نسبتاً خوب و قابل قبولی، از شکست های چندضلعی اطراف منحنی سگمنت استفاده شود [۱۳]، که در این پژوهش از روش دوم استفاده گردید.

### ۳-۲. مدل سازی نمونه ها

مدل سازی نمونه ۱، شامل یک قطعه بتنی نیم دایره (که توسط نرم افزار، شبیه سازی و به صورت دایره کامل در نظر گرفته می شود) به قطر خارجی ۳ متر، ضخامت ۲۰ سانتی متر، عرض ۱ متر و همچنین دارای شبکه های آرماتور طولی و عرضی (خاموت) به قطر ۸ میلی متر مطابق شکل (۱) است که در آن آرماتورهای داخل سگمنت مدل سازی شده در نرم افزار مشخص گردیده است.

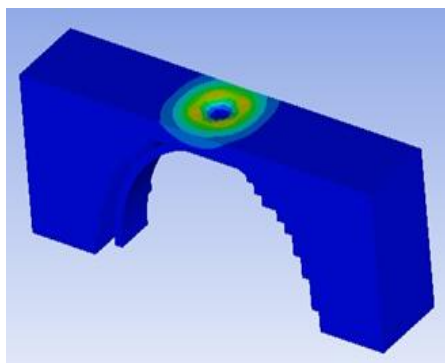


شکل ۱. آرماتوربندی نمونه سگمنت در نرم افزار

در عمل به خاطر اینکه سگمنت های بتنی به صورت قطعات بتنی پیش ساخته در تونل مورد بهره برداری قرار می گیرند، در مدل سازی نرم افزاری نیز در چهار گوشه دایره، (محل ساعت های ۳، ۶، ۹، ۱۲) قطعات بتنی و شبکه آرماتور از یکدیگر جدا و مستقل تعریف و مدل سازی گردیدند. این حالت به دلیل مفصل بودن قطعات بتنی سگمنت در نظر گرفته شده و در واقع نمونه تحلیلی، یک دایره کامل متشکل از چهار قطعه سگمنت را شامل می شود. پس از تکمیل مدل سازی آرماتورها و بتن سگمنت، خاک و هوا و ماده انفجاری مطابق شکل (۲) پیرامون سگمنت قرار داده شد.

#### ۲-۴. صحت‌سنجی

در شکل (۴) قابل مشاهده است که در مدل‌سازی انجام‌شده موج‌های انفجاری به صورت نیم کروی در خاک منتشر شده‌اند که منجر به ایجاد حفره بر روی پوشش خاکی سگمنت بتنی می‌گردد.



شکل ۴. مکانیسم گسترش موج انفجار و تنش‌های ایجاد شده در پوشش خاکی

همچنین تخمین میزان بیشینه فشار انفجار ( $P_s$ ) در محیط خاکی بر اساس آیین‌نامه TM5-1300 [۱۹] در زیر آورده شده است.

$$P_s = (10.7/Z^3) - 1$$

$$Z = R/W^{1/3}$$

که در آن،  $Z$  پارامتری با عنوان فاصله مقیاس شده،  $R$  فاصله از محل انفجار و  $W$  وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم است. جدول (۳) مقادیر بیشینه فشار بر اساس سه فاصله ۰٫۵، ۱ و ۲ متر و میزان ماده انفجاری ۵، ۱۰ و ۲۰ پوند توسط فرمول فوق به دست آمده و با نتایج عددی نرم‌افزار مقایسه می‌گردد. مشاهده می‌شود که هر دو نتیجه با درصد مناسب و قابل قبولی به یکدیگر نزدیک هستند و صحت نتایج خروجی نرم‌افزار را تأیید می‌نماید.

جدول ۳. مقایسه فشار بیشینه به دست آمده از مدل‌سازی نرم‌افزار و آیین‌نامه TM5-1300

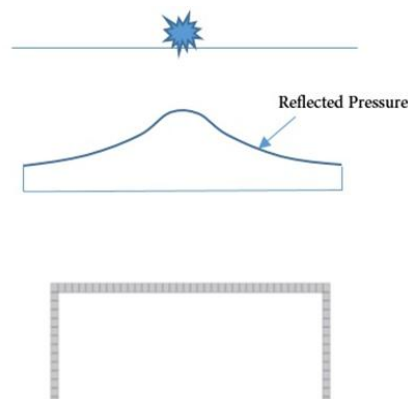
W (kg)	R (m)	Z	$P_s$	
			TM5-1300	AUTODYN
۲/۲۷	۰/۵	۰/۳۸	۱۹۳/۲۳	۲۰۰/۰۳
۴/۵۴	۰/۵	۰/۳۰	۳۸۷/۴۷	۳۹۸/۳۵
۹/۰۸	۰/۵	۰/۲۴	۷۷۵/۹۳	۷۸۶/۴۲
۲/۲۷	۱	۰/۷۶۱	۲۳/۲۸	۲۶/۱۶
۴/۵۴	۱	۰/۶۰۴۰	۴۷/۵۶	۵۲/۱۷
۹/۰۸	۱	۰/۴۷۹۴	۹۶/۱۲	۱۰۳/۲۴
۲/۲۷	۲	۰/۹۹۴۸	۲/۹۶	۳/۵۹
۴/۵۴	۲	۰/۹۷۳۶	۷/۰۳	۸/۳۲
۹/۰۸	۲	۰/۹۵۸۷	۱۱/۱۴	۱۲/۸۵

مشخصات هوا از پیش‌فرض برنامه، Ideal Gas انتخاب شد و مشخصات خاک نیز بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار، ماسه فشرده (Sand Compaction) فرض گردید.

در تحقیق حاضر اثرات انفجار احتمالی بر قطعات سگمنت بتنی و نیز بهینه‌ترین راه کاهش اثرات انفجار بر روی این سگمنت‌ها که در تونل‌ها و به ویژه تونل‌های انتقال آب مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. جهت رسیدن به این هدف، طبیعتاً بایستی به این سؤال پاسخ داد که سگمنت‌های بتنی با ضخامت‌های مختلف تا چه حد آسیب‌پذیر بوده و حداقل میزان مواد ناریه که می‌تواند به یک سگمنت بتنی آسیب جدی وارد نماید چه مقدار است. بایستی توجه داشت که با توجه به اینکه تونل‌ها معمولاً در زیرزمین احداث می‌گردند، آسیب‌پذیرترین نقاط آن‌ها دهانه‌های ورودی و خروجی هستند و بایستی تحقیق را متمرکز بر این نقاط نمود.

همچنین لازم به ذکر است مبنای انجام تحلیل‌ها حداکثر مقدار ماده منفجره قابل حمل توسط یک شخص (با توجه به حملات تروریستی) مد نظر قرار گرفته و سگمنت تونل در حالت اول بدون هیچ‌گونه پوشش و در فضای آزاد (به طور مشخص در دهانه‌های ورودی و خروجی تونل) و در حالت دوم با مقدار ۰/۵ متر خاک‌ریزی بر روی سگمنت در نظر گرفته شد. در خصوص محل قرارگیری ماده منفجره ذکر این نکته ضروری است که به طور منطقی مواد انفجاری در هر قسمت اطراف سگمنت می‌تواند در نظر گرفته شود و به ویژه در کنار سگمنت و روی زمین، ولی به دلیل دایره‌ای بودن سگمنت و به خاطر سهولت و مقارن بودن، مواد منفجره در بالای سگمنت و در راستای محور  $y$  طراحی و مدل‌سازی گردید (شکل ۲).

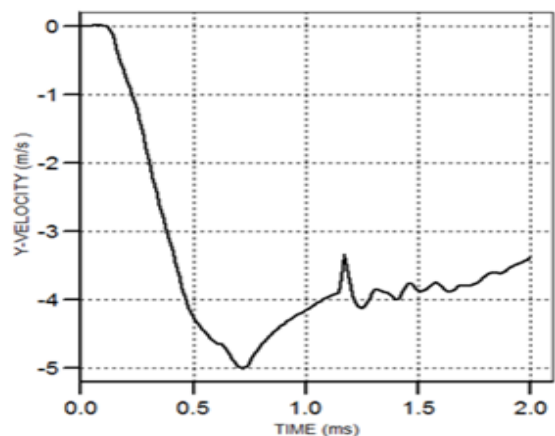
در شکل (۳) مکانیسم گسترش موج انفجار نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نقاط بحرانی در زیر مرکز انفجار قرار دارند که معمولاً در مطالعات این نقاط مورد بررسی قرار می‌گیرند. [۱۸] با افزایش فاصله نسبت به نقطه زیر مرکز انفجار اثر امواج کاهش می‌یابد.



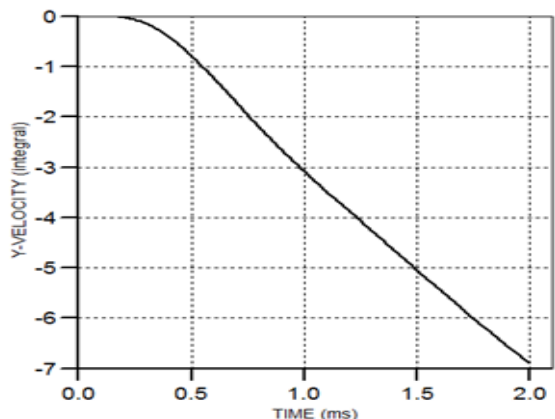
شکل ۳. مکانیسم گسترش موج در زیر مرکز انفجار

## ۳. نتایج و بحث

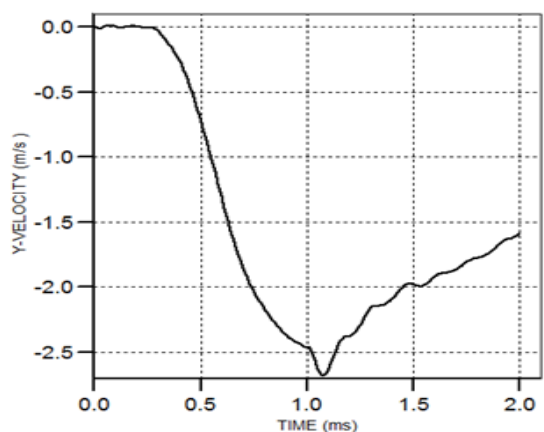
در شکل های (۸) و (۹) نیز میزان سرعت و جابجایی نقطه ۳ نشان داده شده ولی به دلیل افزایش فاصله انفجار، مقدار سرعت و جابجایی به طور محسوسی کاهش یافته است. در ادامه مواد انفجاری را در فاصله ۲ متری در نظر گرفته، سرعت حرکت و میزان جابجایی در واحد زمان محل مورد نظر را مطابق شکل های (۱۰) و (۱۱) استخراج می نماییم.



شکل ۶. سرعت حرکت نقطه ۳ در واحد زمان با قرارگیری مواد ناربه در فاصله ۰/۵ متر

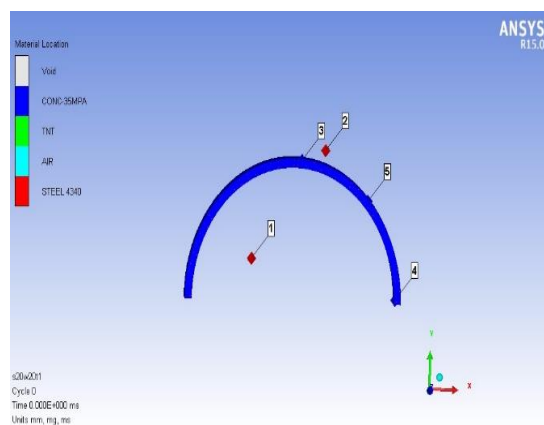


شکل ۷. جابجایی نقطه ۳ با قرارگیری مواد ناربه در فاصله ۰/۵ متر



شکل ۸. سرعت حرکت نقطه ۳ در واحد زمان با قرارگیری مواد ناربه در فاصله ۱ متر

جهت بررسی و دریافت نتایج بهتر، ۷ عدد سنجش گر (Gauge) در محل های مختلف بالا، زیر و داخل سگمنت قرار داده شد تا تاریخچه کلیه اتفاقات و شرایط و رفتار مواد را در طول مدت انفجار ثبت و ارائه کند. شکل (۵) محل قرارگیری سنجش گر ها را نشان می دهد.



شکل ۵. محل قرارگیری سنجش گر های ثبت تاریخچه

## ۳-۱. تأثیر انفجار بر سگمنت بدون پوشش خارجی

در این قسمت نتایج حاصل از تأثیر مقادیر مختلف مواد ناربه بر نمونه های اشاره شده در بخش قبلی در حالتی که فاقد هر گونه پوشش خارجی باشند و در فواصل مختلف ارائه و ارزیابی می شود.

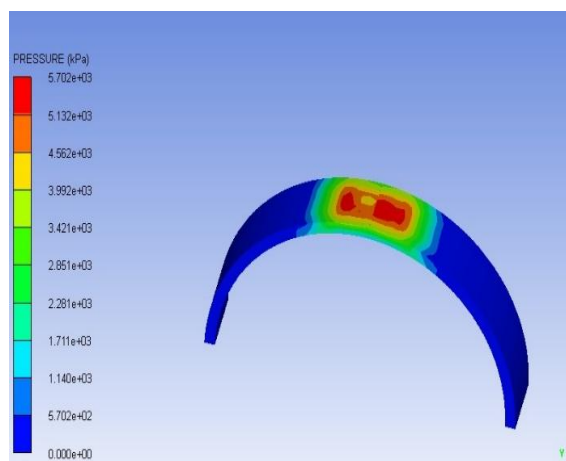
ابتدا برای نمونه ۱ و مقدار مواد منفجره ۲۰ پوند در فاصله ۰/۵ متر مدل سازی را انجام و پس از تحلیل، منحنی تاریخچه سرعت حرکت نقطه ۳ پس از انفجار و در جهت محور  $y$  (y-velocity-time) استخراج شده و در شکل (۶) آورده شده است

این شکل نشان می دهد در مدت زمان ۰/۷ میلی ثانیه پس از انفجار نقطه ۳ تحت فشار موج انفجار با سرعتی افزایش یافته به سمت پایین حرکت می کند. سپس انتگرال سطح زیر منحنی نمودار زمان-سرعت در شکل (۶) را که نشانگر میزان جابجایی نقطه ۳ است، استخراج و مقدار حداکثر آن مطابق شکل (۷) ثبت شد.

شکل (۷) میزان جابجایی نقطه ۳ از زمان انفجار تا ۲ میلی ثانیه پس از انفجار را نشان می دهد که این مقدار با گذر زمان سیر افزایشی داشته است. در مرحله بعدی، مقدار ۲۰ پوند مواد منفجره را در فاصله ۱ متری نمونه ۱ (به ضخامت ۲۰ سانتی متر) قرار داده و نمودارهای سرعت و میزان جابجایی نقطه ۳ در واحد زمان به ترتیب مطابق با شکل های (۸) و (۹) به دست آمد.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند با توجه به افزایش فاصله انفجار، زمان رسیدن موج انفجار به سگمنت با تأخیر حدود ۰/۷ میلی‌ثانیه همراه بوده و افزایش سرعت و جابجایی نقطه ۳ از این زمان شروع می‌گردد.

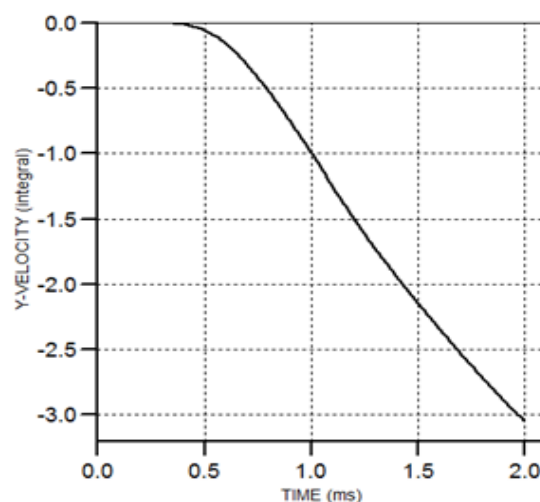
در هر یک از نمونه‌ها پس از انفجار و انتشار موج انفجار و برخورد آن با سگمنت، در اولین مرحله برخورد موج با سطح فوقانی سگمنت باعث افزایش فشار در این نقطه گردیده و سپس این افزایش فشار که در اثر موج است به طرفین سگمنت حرکت کرده و افزایش فشار را بر دیگر نقاط اعمال می‌نماید و مجدداً پس از رسیدن موج به کف سگمنت، به سمت بالای سگمنت حرکت می‌نماید (شکل ۱۲).



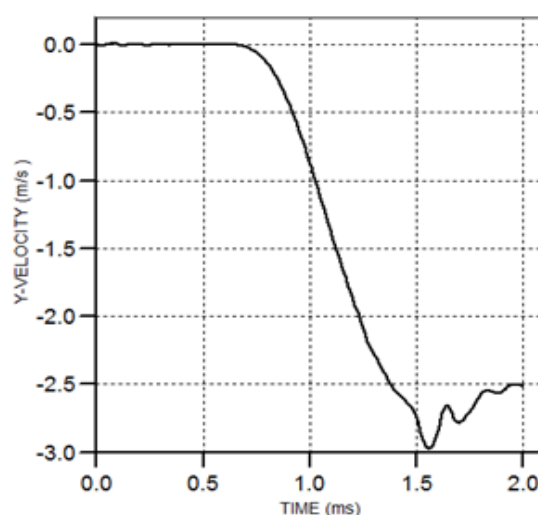
شکل ۱۲. نمایش میزان فشار بر نمونه ۱

این تحلیل و استخراج نمودارها برای هر سه نمونه مدل‌سازی شده سگمنت‌ها با ضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، به طور جداگانه به دست آمد. سرانجام به خاطر بررسی بهتر و مقایسه بین نتایج نمودار رفتاری برای هر کدام از نمونه‌ها که شامل میزان حداکثر جابجایی نقطه ۳ بر اساس مقدار و فاصله ماده منفجره است، به دست آمده و در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به صورت نمودار ترسیم گردید. در شکل‌های مذکور به طور واضح رابطه مستقیم کاهش جابجایی حداکثر با افزایش فاصله انفجار و نیز افزایش ضخامت سگمنت‌ها مشهود است.

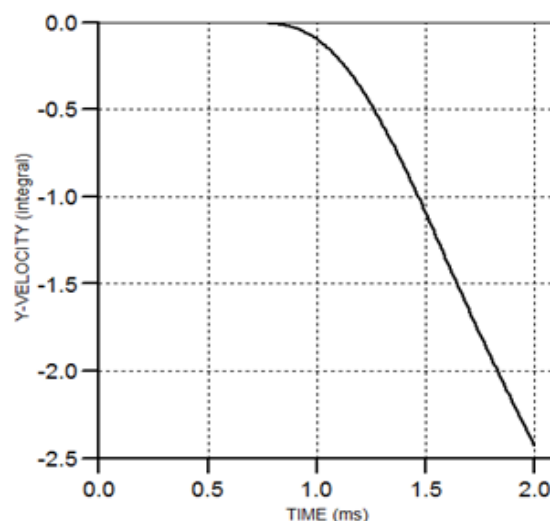
در ادامه تحلیل‌های انفجاری و برای مشخص شدن میزان مقاومت بتن سگمنت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر، با ثابت نگه‌داشتن فاصله انفجار به مقدار ۲ متر، مقدار مواد منفجره را به تدریج افزایش داده تا مقدار ماده انفجاری که باعث شکست این سگمنت می‌گردد تعیین شود که این مقدار ماده منفجره برای نمونه ۲ به میزان ۳۲۰ lb به دست آمد.



شکل ۹. جابجایی نقطه ۳ با قرارگیری مواد ناریه در فاصله ۱ متر

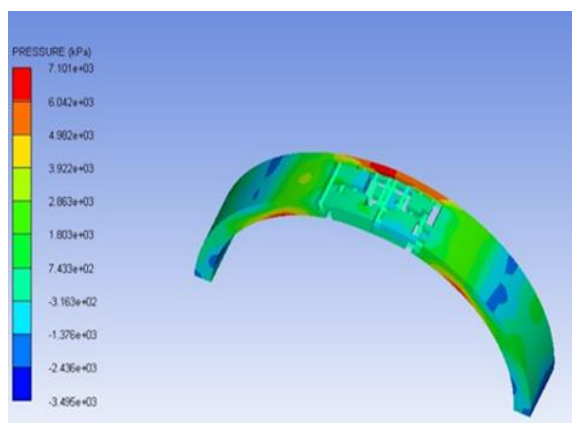


شکل ۱۰. سرعت حرکت نقطه ۳ در واحد زمان با قرارگیری مواد ناریه در فاصله ۲ متر



شکل ۱۱. جابجایی نقطه ۳ با قرارگیری مواد ناریه در فاصله ۲ متر

با توجه به متفاوت بودن میزان آسیب و شکست سگمنت‌ها سطح‌بندی نشان داده‌شده در جدول (۴) را جهت دسته‌بندی بهتر مقدار آسیب انجام داده که در آن  $\gamma$  میزان حداکثر جابجایی عمودی نقطه فوقانی سگمنت و یا همان محل گنج ۳ است. سطح خسارت کمی نشان داده‌شده در این جدول، با ساده‌سازی رفتار تونل‌ها معادل یک سازه یک درجه آزادی الاستیک با رفتار پلاستیک کامل به دست آمده است. [۲۰ و ۲۱]



شکل ۱۶. نمونه سگمنت که بر اثر بارگذاری انفجاری دچار شکست گردیده

جدول ۴. سطح‌بندی میزان حداکثر جابجایی و شکست در محل سنجش گر ۳

سطح شکست	میزان جابجایی نقطه ۳ (mm)
LD	$Y < 20$
MD	$20 < Y < 40$
HD	$40 < Y < 60$
C	$Y > 60$

سطوح شکست در جدول فوق عبارت‌اند از:

LD (Low Damage): آسیب کم

MD (Medium Damage): آسیب متوسط

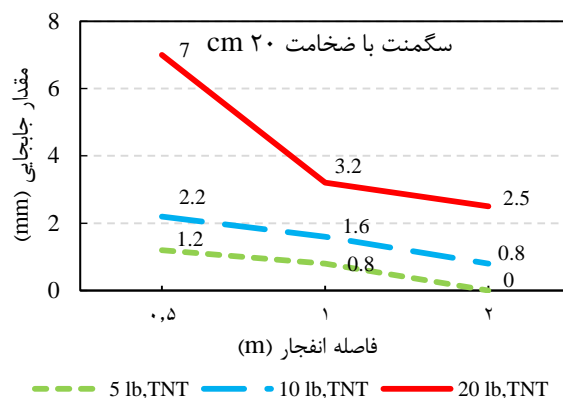
HD (High Damage): آسیب زیاد

C (Collapse): شکست کامل

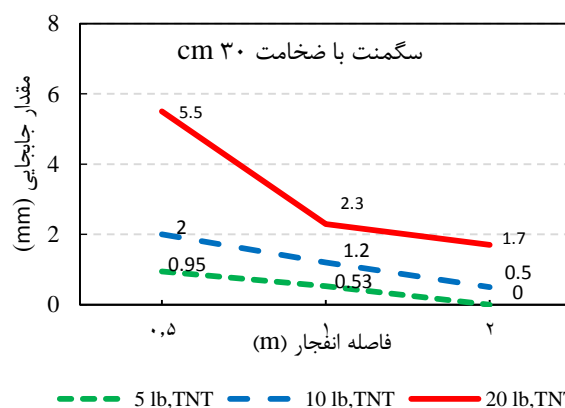
با استفاده از نتایج نمودارها و نیز سطح‌بندی شکست، جدول (۵) حاصل می‌گردد که نشان‌دهنده میزان آسیب و مقایسه تأثیر ضخامت‌های مختلف بر آسیب‌پذیری سگمنت‌ها است. با مشاهده جدول و نمودارهای فوق نتایج زیر حاصل می‌گردد:

۱- انفجار با میزان مواد منفجره کمتر از ۲۰ lb هیچ‌گونه آسیب جدی را برای سگمنت‌ها ایجاد نمی‌کند.

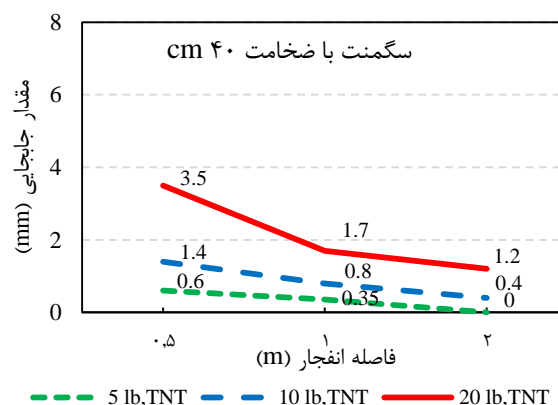
۲- سگمنت با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر به دلیل آسیب‌پذیری بالا مجاز به استفاده نبوده و اصلاً توصیه نمی‌گردد.



شکل ۱۳. حداکثر جابجایی نقطه ۳ بر حسب فاصله انفجار (نمونه ۱)



شکل ۱۴. حداکثر جابجایی نقطه ۳ بر حسب فاصله انفجار (نمونه ۲)

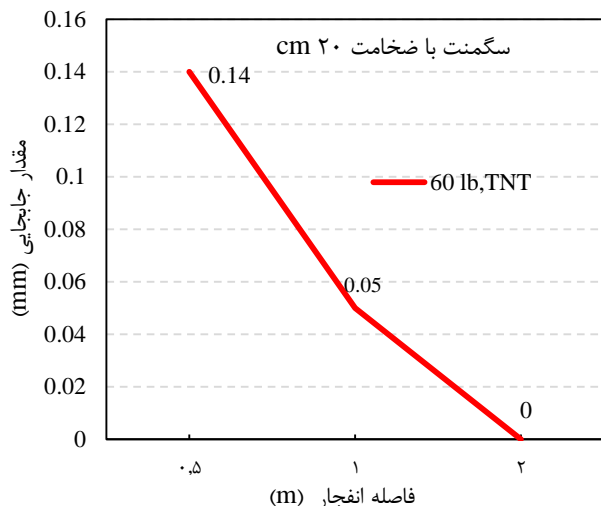


شکل ۱۵. حداکثر جابجایی نقطه ۳ بر حسب فاصله انفجار (نمونه ۳)

در واقع در صورت افزایش فشار و میزان جابجایی بیش از حد مجاز سگمنت دچار شکست شده و میزان این شکست بنا به مقدار فشار وارده حاصل از انفجار، شدت و ضعف خواهد داشت که به طور نمونه یکی از سگمنت‌هایی که دچار شکست کامل گردیده در شکل (۱۶) آورده شده است.



تقریبی ۹۸٪ کاهش پیدا کرده است. با این میزان خاک‌ریزی، حتی با ۳ برابر کردن مواد انفجاری نیز آسیب قابل توجهی به سازه وارد نخواهد شد.



شکل ۱۷. مقدار حداکثر جابجایی نقطه ۳ پس از ۰/۵ متر خاک‌ریزی و با مقدار مواد منفجره 60 lb

همچنین، با افزایش مقادیر مواد منفجره، میزان موادی که بتواند باعث شکست نمونه گردد محاسبه شد. این مقدار در نمونه سگمنت با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و مقدار ۰/۵ متر خاک‌ریزی به مقدار ۱۳۵ lb است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، با مقدار مواد ناربه ۲۰lb (مقدار ماده انفجاری که توسط یک شخص قابل حمل است) و حداکثر فاصله انفجاری ۰/۵ متر از سطح سگمنت (سگمنت‌های با ضخامت ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر)، سگمنت دچار شکست می‌گردد. در صورت استفاده از مقدار مواد ناربه کمتر و یا با همان مقدار مواد ولی با فاصله بیشتر از ۰/۵ متر آسیب جدی به سگمنت بتنی وارد نمی‌شود. همچنین حداقل مواد ناربه لازم که بتواند به سگمنت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر از فاصله ۲ متری آسیب وارد نماید، مقدار ۳۲۰ lb به دست آمد. درعین حال در تونل‌های انتقال آبی که خطر بروز حوادث در نزدیکی آن‌ها متصور است، به طور مثال تونل‌هایی که در نزدیکی مرزها و شهرهای مرزی احداث می‌گردد (به دلیل احتمال اقدامات تروریستی)، بهینه‌ترین ضخامت سگمنت‌های بتنی تونل انتقال آب، حداقل مقدار ۳۰ سانتی‌متر است. با خاک‌ریزی به میزان حداقل ۰/۵ متر بر روی سگمنت‌های در معرض خطر (به طور ویژه دهانه‌های ورودی و خروجی تونل‌ها)، می‌توان به میزان قابل توجهی، آسیب‌پذیری آن‌ها را کاهش داد.

۳- سگمنت‌های با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر نیز به دلیل حجم مواد و مصالح مصرفی دارای صرفه اقتصادی نبوده و فقط در موارد و شرایط ویژه توصیه می‌گردد.

۴- بهینه‌ترین ضخامت برای سگمنت‌های بتنی ۳۰ سانتی‌متر بوده و بر اساس نمودارهای فوق، جهت آسیب‌رسانی به سگمنت‌ها بایستی مواد انفجاری در فاصله کمتر از ۰/۵ متر قرار داده شده و در صورت افزایش فاصله، هیچ‌گونه تهدید تروریستی توسط یک فرد مؤثر نیست.

جدول ۵. مقایسه میزان شکست و آسیب‌پذیری نمونه‌ها

ضخامت (cm)	فاصله (m)	سطح شکست		
		۵ lb	۱۰ lb	۲۰ lb
۲۰	۰/۵	LD	MD	C
	۱	LD	LD	MD
	۲	LD	LD	MD
۳۰	۰/۵	LD	MD	HD
	۱	LD	LD	MD
	۲	LD	LD	LD
۴۰	۰/۵	LD	LD	MD
	۱	LD	LD	LD
	۲	LD	LD	LD

#### ۳-۲. تأثیر پوشش سگمنت با مخلوط خاک طبیعی بر آسیب‌پذیری آن در معرض انفجار

در این حالت مشخصات سگمنت و دیگر شرایط مشابه حالت اول و نمونه ۱ است با این تفاوت که مقدار ۰/۵ متر خاک‌ریزی بر روی سگمنت اضافه گردیده است. همان‌گونه که اشاره شد برای مدل کردن نمونه خاک‌ریزی شده با تقریب قابل قبولی از شکست‌های چندضلعی اطراف منحنی سگمنت استفاده شده است.

در این وضعیت مشاهده گردید که انفجار با مقدار ماده منفجره ۲۰ پوند هیچ‌گونه اثری بر روی سگمنت ایجاد نمی‌کند. بنابراین به علت افزایش قابل توجه مقاومت نمونه، مقادیر مواد منفجره بارگذاری انفجاری در چندین مرحله و تا مقدار ۶۰ lb اضافه و تحلیل‌ها تکرار گردید تا بتوان مقدار جابجایی قابل محاسبه نقطه ۳ را تعیین نمود. شکل (۱۷) مقدار حداکثر جابجایی نقطه ۳ با میزان ۶۰ پوند مواد منفجره پس از نیم متر خاک‌ریزی را نشان می‌دهد.

نمودار شکل (۱۷) نشان می‌دهد که مختصر خاک‌ریزی انجام‌گرفته بر روی سازه و سگمنت (به ارتفاع ۰/۵ متر)، تأثیر زیادی در محافظت از سازه خواهد داشت و جابجایی ناشی از انفجار با در نظر گرفتن میزان ماده منفجره به‌کاررفته، به میزان

## ۵. مراجع‌ها

- [11] Katayama, M.; Itoh, M.; Tamura, S.; Beppu, M.; Ohno, T. "Numerical Analysis Method for the RC and Geological Structures Subjected to Extreme Loading by Energetic Materials"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 1546-1561.
- [12] Wu, K. C.; Li, B.; Tsai, K. C. "The Effects of Explosive Mass Ratio on Residual Compressive Capacity of Contact Blast Damaged Composite Columns"; *J. Constr. Steel. Res.* 2011, 67, 602-612.
- [13] Saedi Darian, A.; Jalili, S. "Blast and Impact Engineering with Autodyn Applications"; Tehran, Darian Engineering, 2012.
- [14] Anderson F. E. "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects"; American Society of Civil Engineers, 1964.
- [15] LS-DYNA, L. "Keyword User's Manual"; Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [16] AUTODYN, A. "Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, Version 12, User's Manual"; SAS IP Inc., 2009.
- [17] U.S. Army Corps of Engineers (USACE) "Engineering and Design, Tunnels and Shafts in Rock"; EM 1110-2-2901, May, 46-57, 1997.
- [18] Mussa, M. H.; Mutalib, A. A.; Hamid, R.; Naidu, S. R.; Radzi, N. A. M.; Abedini, M. "Assessment of Damage to an Underground Box Tunnel by a Surface Explosion"; *Tunn. Undergr. Space Tech.* 2017, 66, 64-76.
- [19] Department of the Army. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM5-1300. 1990.
- [20] Fallah, A. S.; Louca, L. "Pressure-Impulse Diagrams for Elastic-Plastic-Hardening and Softening Single-Degree-of-Freedom Models Subjected to Blast Loading"; *Int. J. Impact Eng.* 2007, 34, 823-842.
- [1] Feldgun, V. R.; Kochetkov, A. V.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. "Internal Blast Loading in a Buried Lined Tunnel"; *Int. J. Impact Eng.* 2008, 35, 172-183.
- [2] Feldgun, V.; Karinski, Y.; Yankelevsky, D. "The Effect of an Explosion in a Tunnel on a Neighboring Buried Structure"; *Tunn. Undergr. Space Tech.* 2014, 44, 42-55.
- [3] Jiang, N.; Zhou, C. "Blasting Vibration Safety Criterion for a Tunnel Liner Structure"; *Tunn. Undergr. Space Tech.* 2012, 32, 52-57.
- [4] Papanikolaou, V. K.; Kappos, A. J. "Practical Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Tunnel Linings"; *Tunn. Undergr. Space Tech.* 2014, 40, 127-140.
- [5] Blanchat, T. K. "Development of Explosive Event Scale Model Testing Capability at Sandia's Large Scale Centrifuge Facility"; Sandia National Laboratories, 1998.
- [6] Ohno, T. "Study on Structural Response to Explosion of Explosives and Blast Resistance Design"; National Defence Academy of Japan, 2008.
- [7] De, A.; Zimmie, T. F.; Abdoun, T.; Tessari, A. "Physical Modeling of Explosive Effects on Tunnels"; *Geotech. Test J.* 2010, 30, 427-431.
- [8] Foglar, M.; Hajek, R.; Fladr, J.; Pachman, J.; Stoller, J. "Full-Scale Experimental Testing of the Blast Resistance of HPC and UHPC Bridge Decks"; *Constr. Build. Mater.* 2017, 145, 588-601.
- [9] Ishikawa, N.; Beppu, M. "Lessons from Past Explosive Tests on Protective Structures in Japan"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 34, 1535-1545.
- [10] Jiang, Q.; Feng, X. T.; Fan, Y.; Fan, Q.; Liu, G.; Pei, S.; Duan, S. "In Situ Experimental Investigation of Basalt Spalling in a Large Underground Powerhouse Cavern"; *Tunn. Undergr. Space Tech.* 2017, 68, 82-94.