

# ارزیابی عددی میزان تأثیرپذیری ایستگاه‌های متروی تهران تحت انفجار سطحی قوی

رامین عالی‌باف (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی کهنک‌پناه\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)  
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۲/۲، ص. ۱۴۹-۱۵۸، (پادداشت‌نوی)

سازه‌های زیرزمینی از جمله ایستگاه‌های مترو حین حملات تروریستی، یک سازه‌ی امن و راهبردی هستند. در پژوهش حاضر سعی شده است میزان تأثیرپذیری ایستگاه‌های خط ۷ متروی تهران تحت انفجار قوی سطحی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA مطالعه شود. با توجه به تغییر شکل‌های بزرگ، که در مدل به وجود می‌آید، از روش ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) استفاده شده است. در ابتدا، یک مدل خاک بدون مقطع ایستگاه تحت انفجار سطحی مطالعه شده و مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار با توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM جهت صحت‌سنجی مقایسه شده است. در ادامه، به مطالعه‌ی چاله‌ی ایجاد شده در اثر انفجارهای ۳، ۷ و ۱۱ تن پرداخته شده و پاسخ ایستگاه‌های مترو تحت انفجار ۱۱ تن TNT، که قدرت معادل قوی‌ترین موشک غیرهسته‌یی حاضر است، در عمق‌های مختلف بررسی شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهند ایستگاه‌هایی که در عمق بیشتری از ۱۹ متر قرار گرفته‌اند، بدون آسیب و امن هستند.

ramin.alibaf@modares.ac.ir  
a-panah@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: پدافند غیرعامل، انفجار سطحی، ایستگاه مترو، LS-DYNA.

## ۱. مقدمه و تاریخچه‌ی پژوهش

افزایش روزافزون عملیات تروریستی و احتمال حمله‌ی هوایی دشمن به شهرها، لزوم مطالعه و شناخت مکانیک انفجار و طراحی امن سازه‌های شهری در قالب پدافند غیرعامل را نشان می‌دهد. کشور ما ایران هم با توجه به قرارگیری در منطقه‌ی خاورمیانه و با توجه به تهدیدهای خارجی از این مسئله مستثنی نیست.

حملات تروریستی صورت گرفته در مترو مسکو ۲۰۰۴، مترو لندن ۲۰۰۵ و مترو بلاروس ۲۰۱۱ نشان می‌دهد که ایستگاه‌های مترو یکی از اهداف حملات تروریستی در سال‌های اخیر بوده‌اند. اصلی‌ترین گزینه برای گروه‌های تروریستی، انفجار وسایل نقلیه‌ی حامل بمب به دلیل قدرت زیاد و ایجاد آسیب جدی به اطراف است.<sup>[۱]</sup>

ایستگاه‌های مترو ممکن است تحت انفجار داخلی یا خارجی قرار گیرند. با توجه به تدابیر امنیتی موجود در ایستگاه‌های مترو، امکان انفجار داخلی قوی، دور از دسترس به نظر می‌رسد؛ لیکن انفجار خارجی یا سطحی، گزینه‌ی محتمل برای حملات دشمن از طریق موشک و یا از طریق انباشتن مواد منفجره در سطح زمین است. انفجار خارجی ممکن است به صورت بمب‌گذاری در وسایل نقلیه و یا به صورت حمله‌ی هوایی صورت گیرد.

مطالعات آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس با توجه به هزینه‌بر بودن و قابل دسترس نبودن، نویسنده مستعمل

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۹/۸/۲۵.  
DOI:10.24200/J30.2021.55049.2698

تیمواری<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۵]</sup> با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۶</sup> با استفاده از تحلیل اویبری لاگرانژی جفت شده (CEL)<sup>۷</sup>، رفتار مقطع تونل دایره‌ی را بررسی کردند و دریافته‌اند که با افزایش ضخامت پوشش، آسیب ناشی از انفجار در تونل کاهش می‌یابد. جابه‌جایی پوشش با ضخامت ۵۵ میلی‌متر، ۹۰٪ نسبت به جابه‌جایی متناظر با ضخامت پوشش ۳۵ میلی‌متر کمتر بود. علاوه بر این، یک رابطه‌ی مثبت بین وزن ماده‌ی منفجره و مقدار جابه‌جایی پوشش تونل مشاهده کردند، که نشان می‌داد جابه‌جایی پوشش تحت انفجار ۵۰ کیلوگرم ماده‌ی منفجره، ۷۸٪ نسبت به جابه‌جایی متناظر تحت انفجار ۲۵ کیلوگرم ماده‌ی منفجره بیشتر است.

\* نویسنده مستعمل

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۹/۸/۲۵.

DOI:10.24200/J30.2021.55049.2698

بررسی رفتار مقطع تونل در اثر وقوع انفجار داخلی توسط پژوهشگران زیادی صورت گرفته است. [۱۲-۶] با توجه به احتمال وقوع انفجار سطحی، اخیراً مطالعات برای بررسی تأثیر انفجار سطحی یا خارجی در مقطع تونل انجام شده است. فن<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، [۱۳] ویژگی‌های بار وارده به مقطع بتن تونل کم‌عمق را بررسی کردند.

دی<sup>۹</sup> و همکاران، [۱۴ و ۱۵] با انجام چندین آزمایش سانتریفیوژ برای توصیف تأثیر انفجار سطحی در یک سازه‌ی استوانه‌یی، که در خاک شنی خشک مدفون بود، داده‌های کمی برای تأثیر انفجارهای سطحی در تونل‌ها ارائه کرده‌اند.

وانگ و لو<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۳)، [۱۶] مدل سه‌بعدی برای مطالعه‌ی انتشار موج در خاک انجام دادند. یانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، [۱۷] نیز عملکرد دینامیکی مقطع تونل مترو تحت انفجار سطحی معادل ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT را بررسی کردند و دریافته‌اند که تاج تونل نسبت به قسمت‌های دیگر آسیب‌پذیر است و مقطع تونل با ضخامت پوشش ۳۵۰ میلی‌متر و عمق مدفون بیش از ۷ متر تحت انفجارهای با وزن کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم TNT ایمن است.

کشواران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۴)، [۱۸] تأثیر عمق تونل و خرج ماده‌ی منفجره در پاسخ دینامیکی مقطع دایره‌یی تونل را مطالعه کرد و نتیجه گرفت که تونل با عمق مدفون ۶/۳۵ و ۹/۵۲ متر به ترتیب تحت انفجار ۶۲۵ و ۱۱۲۵ کیلوگرم TNT، امن است. واقفی و مبارکی<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵)، [۱۹] تأثیر مقطع و عمق تونل را تحت انفجار سطحی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA و نیز رفتار خاک ماسه‌یی را تحت انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در عمق‌های ۳، ۷، ۱۰، ۱۴ متری بررسی کردند. مقاطع بررسی شده عبارت بودند از مقاطع: جعبه، دایره، تخم‌مرغی و نعل‌اسبی که نشان داد مقطع تخم‌مرغی، بیشترین مقاومت و مقطع دایره‌یی کمترین مقاومت در برابر بار ناشی از انفجار را دارد.

همچنین کشواران و همکارانش (۲۰۱۵)، [۲۰] به منظور بهبود پاسخ تونل مدفون تحت انفجار سطحی، از دو روش مدل‌سازی ALE و SPH<sup>۱۴</sup> استفاده کردند و نتایج به دست آمده از دو روش اخیر را با داده‌های موجود حاصل از آزمایش مقایسه کردند و نشان دادند که مدل‌سازی به روش ALE، پاسخ بهتری نسبت به روش SPH برای مطالعه‌ی رفتار تونل تحت انفجار سطحی می‌دهد. در ادامه، رفتار انواع سگمنت‌های استفاده شده در تونل را نیز بررسی کردند.

موسی<sup>۱۵</sup> و همکارانش (۲۰۱۷)، [۲۱] میزان آسیب‌پذیری تونل با مقطع جعبه‌یی تحت انفجار سطحی را با در نظر گرفتن ظرفیت ۴ نوع وسیله‌ی نقلیه‌ی: سواری، ون، کامیون و تریلر برای ماده‌ی منفجره در عمق‌های ۴، ۶ و ۸ متری بررسی و مشاهده کردند که تونل با ضخامت پوشش ۷۵۰ میلی‌متر در عمق‌های مذکور برای انفجارهای سطحی ایمن است.

گوترو<sup>۱۶</sup> و همکارانش (۲۰۱۷)، [۲۲] به بررسی تأثیر شکل ماده‌ی منفجره در نتایج پرداختند و برای ماده‌ی منفجره، شکل‌های نیمه‌کروی، استوانه‌یی و مستطیلی در نظر گرفتند و مشاهده کردند که هندسه‌ی ماده‌ی منفجره، تأثیر به‌سزایی در نتایج دارد و همچنین ایمپالس نسبی برای ماده‌ی منفجره به شکل نیمه‌کروی بیشتر از حالت‌های دیگر است.

با توجه به این‌که در کشور ما مطالعات جدی در زمینه‌ی نحوه‌ی تأثیر انفجار سطحی در سازه‌های زیرزمینی از جمله ایستگاه‌های مترو انجام نشده است، در پژوهش حاضر سعی شده است میزان تأثیرپذیری ایستگاه‌های خط ۷ متروی تهران تحت انفجار قوی سطحی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود LS-DYNA مطالعه و بررسی شود. بدین منظور، ابتدا مقدمه‌یی از مکانیک انفجار به صورت خلاصه توضیح داده شده و پس از مطالعه‌ی یک مدل ساده‌ی خاک بدون مقطع ایستگاه مترو تحت

انفجار سطحی، مقادیر به دست آمده از نرم‌افزار جهت صحت‌سنجی با توصیه‌نامه‌ی ذکر شده‌ی ۱-TM5-۸۵۵-۱، [۲۳] مقایسه شده است. در نهایت، با بررسی پاسخ ایستگاه‌های مترو تحت انفجار ۱۱ تن TNT، که قدرت معادل قوی‌ترین موشک غیرهسته‌یی حاضر است، ایمنی ایستگاه‌ها با توجه به معیار تعریف شده سنجیده شده است.

## ۱.۱. مقدمه‌یی بر مکانیک انفجار

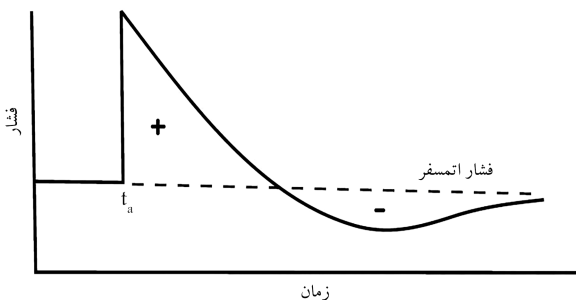
انفجار یک پدیده‌ی آبی است که در اثر آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی به وجود می‌آید. رهاسازی انرژی باید ناگهانی باشد و یک محیط پراانرژی در اطراف مبدأ ایجاد آن به وجود آید. این انرژی متمرکز شده به سرعت از راه‌های مختلف، مانند موج انفجاری، پرتاب ترکش‌ها، تشعشع حرارتی، یا یونیزاسیون پخش می‌شود. قدرت یک انفجار بر اساس مقدار انرژی آزاد شده بیان می‌شود، بنابراین می‌توان آن را مستقیماً با واحدهای انرژی مانند ژول بیان کرد. برای مقایسه‌ی قدرت انفجاری مواد منفجره باید مبنایی در نظر گرفت و بر اساس آن، استانداردهایی بنا کرد. یکی از میناهای اساسی، انرژی آزاد شده در انفجار ماده‌ی منفجره‌ی TNT است. دلیل انتخاب ماده‌ی TNT، درصد خلوص، راحتی در اندازه‌گیری و در دسترس بودن آن است. همچنین TNT از لحاظ کاربرد ایمن است. لازم به ذکر است که از انفجار ۱ گرم TNT، ۴۶۱۰ ژول یا ۱۱۰۰ کالری انرژی ایجاد می‌شود. [۲۴]

در شکل ۱، نمودار فشار - زمان امواج انفجار عادی نشان داده شده‌است. در محور زمان،  $t_a$  زمان رسیدن بعد از شروع انفجار جبهه‌ی موج انفجاری در فاصله‌یی دورتر از مرکز انفجار است، به طوری که فشار به طور ناگهانی به بیشترین مقدار خود افزایش می‌یابد، که در نتیجه باعث اعمال نیرویی برابر با حاصل ضرب مقدار فشار در مساحت صفحه‌ی موج انفجار می‌شود. اما شرایط اخیر پایدار نیست و این افزایش فشار به طور ناگهانی شروع به کاهش می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، روند کاهش افزایش فشار به صورت شبه‌نمایی است.

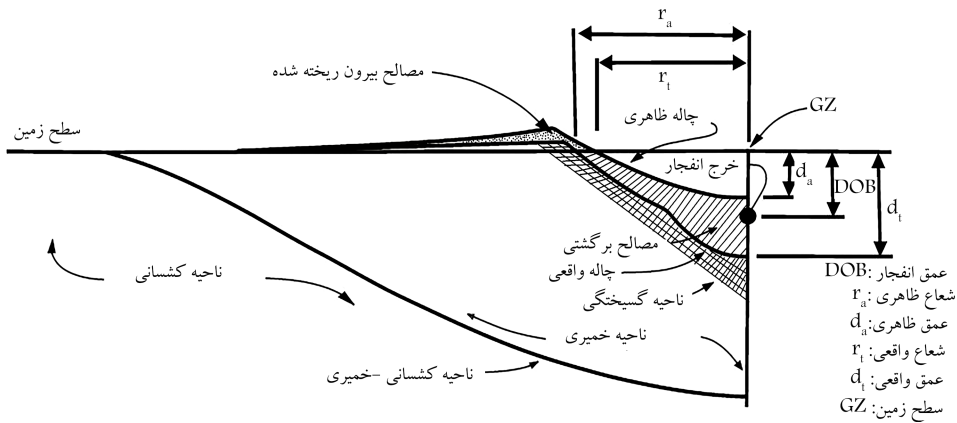
زمانی که انفجار در روی زمین یا نزدیک به سطح زمین به وقوع بپیوندد، امواج حاصل از انفجار داخل زمین حرکت می‌کنند و سازه‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تنش‌های حاصل از انفجار سطحی و مدت زمان بقای آن نسبت به انفجار در هوا بیشتر است.

تنش‌ها و جابه‌جایی‌های به وجود آمده در صورتی که ماده‌ی منفجره در زمین نفوذ کند، بیشتر خواهد بود. برای کاهش مقدار نفوذ بمب‌های مذکور می‌توان لایه‌های محافظ از جنس سنگ یا بتن در سطح زمین ایجاد کرد. پارامترهای تأثیرگذار در شدت بارگذاری اعمالی به سازه‌ها عبارت‌اند از:

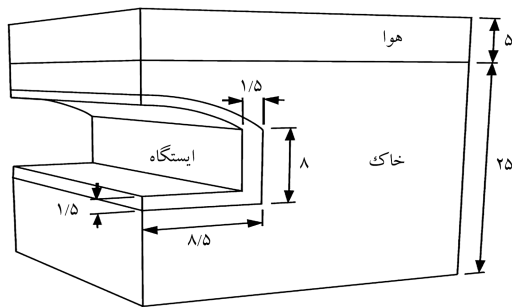
- مقدار ماده‌ی منفجره و فاصله‌ی آن از سازه،
- خواص مکانیکی خاک یا سنگ بین سازه‌ی زیرزمینی و محل انفجار،



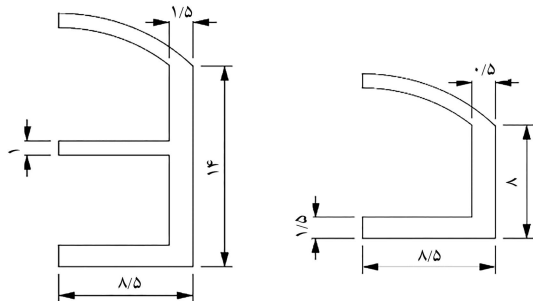
شکل ۱. منحنی معمول برای نمایش تغییرات فشار - زمان یک موج انفجاری. [۲۴]



شکل ۲. شکل کلی چاله‌ی ایجاد شده در سطح زمین در اثر انفجار سطحی. [۲۳]



شکل ۳. هندسه و ابعاد مدل (ابعاد به متر).



شکل ۴. هندسه و ابعاد مقطع ایستگاه (ابعاد به متر).

- عمق انفجار نسبت به سطح زمین.

- توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵ برای تخمین بیشینه‌ی فشار به وجود آمده در اثر انفجار، رابطه‌ی ۱ را پیشنهاد کرده است. [۲۳]

$$P_0 = f \times \rho c \times 16^0 \times \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (1)$$

که در آن،  $P_0$  بیشینه‌ی فشار بر حسب psi،  $f$  ضریب جفت‌شدگی،  $\rho c$  امیدانس آکوستیک بر حسب psi/fps،  $R$  فاصله از محل انفجار بر حسب ft،  $W$  وزن ماده‌ی منفجره بر حسب lb و  $n$  ضریب میرایی است. هنگام وقوع انفجار در سطح زمین، حفره یا چاله‌ی در سطح زمین به وجود می‌آید، که مشخصات و شکل کلی آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

## ۲. مدل‌سازی عددی

در مطالعه‌ی حاضر، از روش عددی المان محدود برای مدل‌سازی مسئله استفاده شده است. برای این منظور از یکی از قدرتمندترین کدهای پرکاربرد مسائل غیرخطی به نام LS-DYNA در محیط سه‌بعدی استفاده شده است. در پژوهش حاضر، ایستگاه‌های خط ۷ متروی تهران بررسی شده‌اند. خط ۷، یک خط درون‌شهری به طول ۲۷ کیلومتر با ۲۳ ایستگاه است، که عمیق‌ترین خط متروی تهران است.

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن قدرت انفجاری معادل ۳، ۷ و ۱۱ تن TNT، مدل‌سازی انجام شده است. ماده‌ی منفجره در سطح زمین مدل شده و انفجار به صورت سطحی<sup>۱۷</sup> بوده است. همچنین، در کلیه‌ی مدل‌های ساخته شده با توجه به اطلاعات موجود از ایستگاه‌ها، سطح آب زیرزمینی در تراز پایین‌تر از مقطع ایستگاه در نظر گرفته شده است.

### ۱.۲. مدل هندسی

با در نظر گرفتن تقارن محوری و برای کاهش زمان محاسبه، یک مدل یک‌چهارم با ابعاد  $25 \times 25 \times 30$  متر بر اساس آزمون‌های آلکسینکو<sup>۱۸</sup>،<sup>[۲۵]</sup> طبق شکل ۳ تعریف شده است. مدل مورد بررسی در پژوهش حاضر شامل ۴ ماده‌ی: هوا، خاک، ماده‌ی منفجره و مقطع ایستگاه مترو بوده است. شکل هندسی مقاطع استفاده شده در پژوهش حاضر به صورت شکل ۴ است.

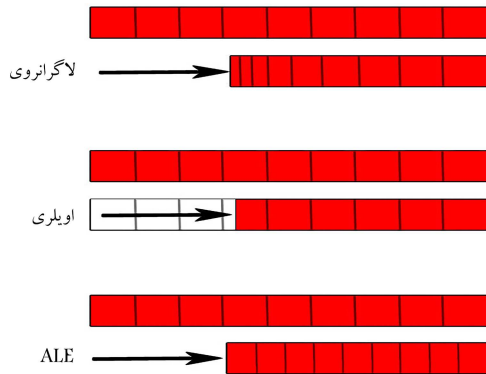
### ۲.۲. المان‌بندی مدل هندسی

در مدل اجزاء محدود از المان‌های ۸ گره‌ی برای مدل‌سازی استفاده شده است. ابعاد مش‌بندی که لازم است در نظر گرفته شوند تا هم‌زمان با کاهش زمان تحلیل، دقت نتایج حاصل از آن نیز مطلوب باشد، دو مدل با اندازه‌ی المان‌های ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری بوده است، که با شرایط یکسان، بررسی و تحلیل شدند و در نهایت با توجه به زمان تحلیل توسط سیستم و دقت نتایج، از مش‌های ۵۰ سانتی‌متری در مدل استفاده شده است. در جدول ۱، میزان حساسیت فشار به وجود آمده در عمق‌های مختلف خاک در دو مدل ساخته شده‌ی اخیر ارائه شده است.

با توجه به راهنمای نرم‌افزار، ماده‌ی منفجره بهتر است به شکل کروی مدل شود؛ لذا با توجه به قابلیت نرم‌افزار، ماده‌ی منفجره به صورت مش مجازی و کیورود Initial\_Volume\_Fraction\_Geometry، در نرم‌افزار مدل شده است. مدل اجزاء محدود برای مطالعه‌ی حاضر به صورت شکل ۵ بوده است.

جدول ۱. حساسیت‌سنجی مدل با ابعاد مش مختلف.

وزن ماده‌ی منفجره (تن)	عمق (متر)	فشار در عمق‌های مختلف با ابعاد مختلف مش (MPa)		درصد اختلاف (%)
		۲۵ (سانتی‌متر)	۵۰ (سانتی‌متر)	
۱۱	۳	۷۴/۸	۸۵/۲	۱۳/۹
	۳/۵	۳۶/۵	۳۹/۹	۹/۳
	۴	۱۶/۵	۱۷/۸	۷/۸
	۴/۵	۷/۷	۸/۱	۵/۲



شکل ۷. مقایسه‌ی روش‌های لاگرانژی، اویلری و ALE.

حرکت شبکه، کنترل می‌شود. با مدیریت مناسب الگوریتم حرکت شبکه می‌توان هم قابلیت‌های تقریب لاگرانژی و هم توانایی‌های تقریب اویلری را در اختیار گرفت. این موضوع کاربرد را قادر می‌سازد که مرزهای متحرک، سطوح آزاد و تغییرشکل‌های بزرگ را به نحو بهتری مدل‌سازی کند. در شکل ۷، مقایسه‌ی انجام شده بین روش‌های لاگرانژی، اویلری و ALE مشاهده می‌شود. برای مدل کردن خاک، هوا و ماده‌ی منفجره از مش‌های ALE و برای مقطع تونل از مش لاگرانژی استفاده شده است.

#### ۱.۴.۲. فرمولاسیون روش ALE

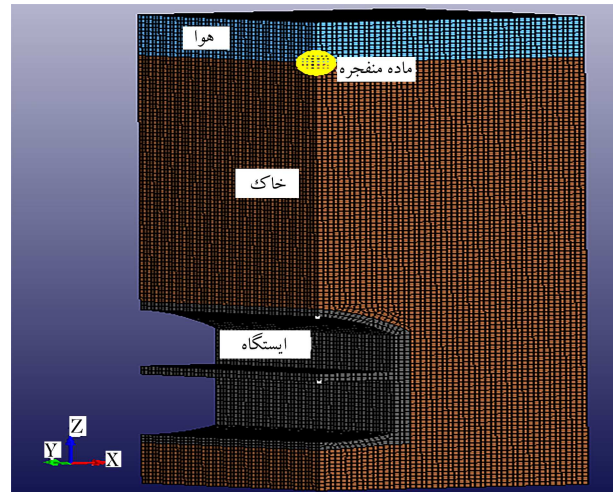
در روش ALE، حرکت نقاط مادی مستقل از نقاط گره‌ی است و این در حالی است که شبکه‌ی مش در حین حل بدون تغییر باقی می‌ماند. برای این‌که حرکت نقاط مادی مستقل از نقاط گره‌ی باشد، علاوه بر ناحیه‌های مادی و فضایی، یک ناحیه‌ی سوم، که ناحیه‌ی مرجع نامیده می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. ناحیه‌ی مادی، شامل مختصات مادی X است و در توصیف لاگرانژی استفاده می‌شود. ناحیه‌ی فضایی با مختصات فضایی x است، که در توصیف اویلری استفاده می‌شود؛ و ناحیه‌ی سوم مختص روش ALE است، که متشکل از مختصات شبکه‌ی المان با مش  $\chi$  است.<sup>[۲۶]</sup>

معادلات حاکم بر ALE شامل مشتق زمانی - مادی کمیتهای گوناگون است. مشتق مادی تابع دلخواه f، بیانگر نرخ تغییرات تابع با ثابت نگه داشتن ذرات مادی X است رابطه‌ی ۲:

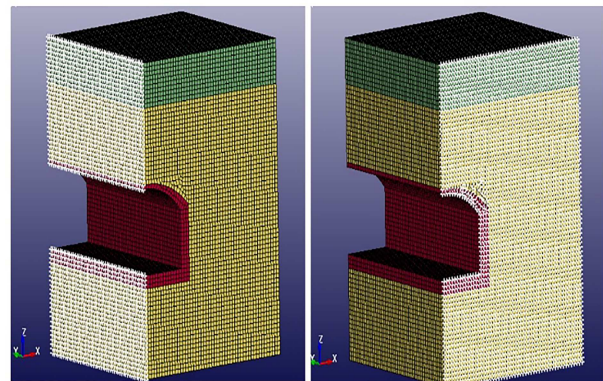
$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_X \quad (2)$$

ناحیه‌ی شبکه‌ی مش، ناحیه یا پیکره‌ی محاسباتی است که تاریخچه‌ی تمام کمیتهای را دنبال می‌کند. مشتق زمانی شبکه‌ی مش، مشتق زمانی تابع f با ثابت نگه داشتن  $\chi$  است و به صورت f' مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$f' = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_\chi \quad (3)$$



شکل ۵. هندسه‌ی مدل اجزاء محدود.



شکل ۶. شرایط مرزی مدل.

#### ۳.۲. شرایط مرزی

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با توجه به تقارن هندسی مدل، جابه‌جایی عمود بر صفحات XZ و YZ مقید شده و در دو وجه کناری دیگر نیز با استفاده از شرایط مرزی نیمه بی‌نهایت برای ممانعت از بازگشت موج پس از برخورد به صفحات اشاره شده، صفحه‌ی زیرین در تمام جهات مقید شده است.

#### ۴.۲. روش حل

با توجه به تغییرشکل‌هایی که در طول تحلیل و همچنین اعوجاج المان‌ها به وجود می‌آید، روشی که برای مدل‌سازی از آن استفاده شده است روش ALE<sup>[۱۹]</sup> (انتخابی اویلری - لاگرانژی) بوده است، که در آن انتقال و دوران شبکه‌بندی توسط یک الگوریتم

جدول ۲. مشخصات ماده‌ی هوا. [۱۷]

$\rho(kg/m^3)$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0(MPa)$	$V_0$
۱/۲۹	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰	۰	۰/۲۵	۱

جدول ۳. مشخصات ماده‌ی منفجره‌ی TNT. [۱۷]

$\rho(kg/m^3)$	$D(m/s)$	$P_{c,j}(MPa)$	$A(MPa)$	$B(MPa)$
۱۶۳۰	۶۹۳۰	$21 \times 10^3$	$3/73 \times 10^3$	$3/7 \times 10^3$
$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_0$	$E_0(MPa)$
۴/۱۵	۰/۹	۰۳/۵	۱	$6 \times 10^3$

### ۱.۵.۲. هوا

ماده‌ی هوا معمولاً با مدل ماده Null و معادله‌ی حالت چندجمله‌یی خطی، که در آن فشار با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ تعریف می‌شود، مشخص می‌شود: [۲۷]

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (10)$$

که در آن،  $C_i$ ها ثابت‌های ماده هستند و  $\mu$  از طریق رابطه‌ی ۱۱ مشخص می‌شود، که عبارت  $\frac{p}{\rho_0}$  در آن، نشان‌دهنده‌ی نسبت وزن مخصوص است.

$$\mu = \frac{p}{\rho_0} - 1 \quad (11)$$

در جدول ۲، پارامترهای استفاده شده برای ماده‌ی هوا ارائه شده است.

### ۲.۵.۲. ماده‌ی منفجره

ماده‌ی منفجره با مدل High\_Explosives\_Burn و معادله‌ی حالت JWL  $^{\circ}$  معرفی می‌شود. فشار در معادله‌ی حالت JWL به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف شده است: [۲۷]

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \omega \frac{e}{V} \quad (12)$$

که در آن، P فشار، V حجم و e چگالی انرژی داخلی بر واحد حجم اولیه‌ی ماده‌ی منفجره را نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای  $A, B, R_1, R_2$  و  $\omega$  ثابت‌های ماده‌ی منفجره برای معادله‌ی حالت اخیر هستند. در جدول ۳، مشخصات تعریف شده در نرم‌افزار برای ماده‌ی منفجره‌ی TNT ارائه شده است.

که در آن،  $\rho$  وزن مخصوص TNT، D سرعت انفجار و  $P_{c,j}$  فشار چاپمن - جوگت است.

### ۳.۵.۲. ماده‌ی خاک

ماده‌ی خاک در نرم‌افزار با مدل ماده‌ی Soil and Foam تعریف می‌شود، که مدلی ساده است و در مواقعی که خاک رفتاری مانند سیال دارد، کاربرد دارد. مدل مذکور در سال ۱۹۷۲ توسط کریگ [۲۸، ۲۹] ارائه شده است. پارامترهای اصلی مدل اخیر عبارت هستند از:  $\rho$  وزن مخصوص، G مدول برشی، K مدول بالک و  $a_i$  ثوابت تسلیم. پارامترهای اولیه‌ی مربوط به خاک ایستگاه‌های مترو تهران از گزارش پهنه‌بندی ژئوتکنیکی شهر تهران استخراج شدند، که این گزارش توسط سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، گروه مطالعات سطحی و زیرسطحی آماده شده است.

طبق مستندات موجود در گزارش پهنه‌بندی ژئوتکنیکی، توزیع ضربات SPT و نقشه‌ی چگالی خشک برای نواحی تهران قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن

به منظور پیدا کردن ارتباط بین دو مشتق زمانی مطابق روابط ۴ و ۵ عمل می‌شود:

$$\left. \frac{\partial f_i(x_j, t)}{\partial t} \right|_x = f'_i(x_j, t) \frac{\partial x_j}{\partial t} \Big|_x + \frac{\partial f_i}{\partial t} \Big|_x + \dot{v}_j \frac{\partial f_j}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\left. \frac{Df_i(x_j, t)}{Dt} \right|_x = f_i(x_j, t) \frac{\partial f_i}{\partial t} \Big|_x + \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial t} \Big|_x = \frac{\partial f_i}{\partial t} \Big|_x + V_j \frac{\partial f_j}{\partial x_j} \quad (5)$$

با ترکیب دو معادله‌ی اخیر می‌توان مشتق مادی را مطابق رابطه‌ی ۶ به دست آورد:

$$\dot{f}_i = f'_i + (v_j + \dot{v}_j) \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

به طوری که عبارت آخر در معادله‌ی اخیر، بیانگر آثار انتقالی ناشی از حرکت نسبی بین مش و ماده است. در معادله‌ی ۶، اگر سرعت ماده  $v_j$  و سرعت حرکت مش  $\dot{v}_j$  برابر باشند، آنگاه ماده و شبکه‌ی مش به یکدیگر متصل‌اند و حرکت مش همان حرکت ماده است و دیدگاه لاگرانژی شکل می‌گیرد، که عاری از آثار انتقالی است. اما اگر سرعت حرکت مش صفر در نظر گرفته شود، یا به عبارتی شبکه‌ی مش ثابت باشد، آنگاه توصیف اولیاری و زمانی که مش با سرعت متفاوت نسبت به ماده حرکت کند، توصیف ALE پدید می‌آیند.

از طرفی معادلات بقاء جرم، اندازه‌ی حرکت و انرژی در روش ALE به صورت معادلات ۷ الی ۹ است: [۲۶]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = +\bar{c} \cdot \nabla \rho + \rho \bar{\nabla} \cdot \bar{v} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \bar{\sigma} + \bar{b} = \rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \Big|_x + (\bar{c} \cdot \bar{\nabla}) \bar{v} \right) \quad (8)$$

$$\bar{\sigma} : \bar{D} = \rho \left( \frac{\partial e}{\partial t} \Big|_x + \bar{c} \bar{\nabla} e \right) \quad (9)$$

که در آنها،  $\rho$  چگالی،  $\sigma$  تانسور تنش کوشی،  $\bar{b}$  بردار نیروی حجمی و e انرژی ویژه داخلی است. D نشان‌دهنده‌ی تانسور نرخ کرنش است، که همان ناحیه‌ی متقارن تانسور گرادبان سرعت  $\nabla v$  است. [۲۶]

### ۵.۲. مشخصات مصالح

چهار نوع ماده در پژوهش حاضر استفاده شده است، که عبارت‌اند از: خاک، هوا، ماده‌ی منفجره و مقطع ایستگاه.

جدول ۷. حالت‌های محاسباتی.

عمق مدفون ایستگاه (متر)	قدرت انفجار (تن TNT)	مورد بررسی
۳۰/۵	۳	۱
۳۰/۵	۷	۲
۳۰/۵	۱۱	۳
۸/۵	۱۱	۴
۱۲	۱۱	۵
۱۳/۵	۱۱	۶
۱۷	۱۱	۷
۱۹	۱۱	۸
۲۳	۱۱	۹

جدول ۴. پارامترهای اولیه‌ی خاک.

عدد SPT	$\rho(kg/m^3)$
۴۰	۱۶۵۰

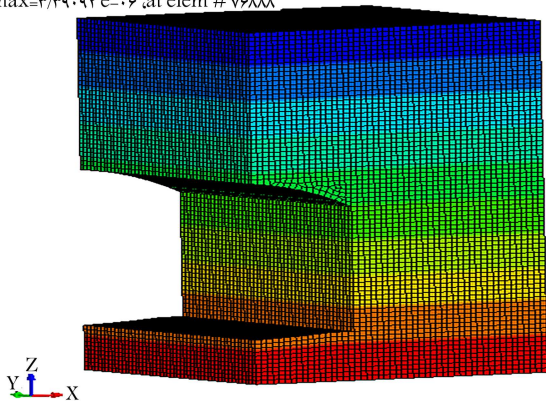
جدول ۵. مشخصات ماده‌ی خاک.

$\rho(kg/m^3)$	$G(MPa)$	$K(MPa)$	$a_0$	$a_1$	$a_2$
۱۶۵۰	۸	۱۳/۵	۰	۰	۰/۸۷۰۲

جدول ۶. مشخصات ماده‌ی ایستگاه. [۲۷]

$\rho(kg/m^3)$	$E$ (MPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$E_{tan}$ (MPa)	$\beta$
۲۶۵۰	$۳۹/۱ \times ۱۰^۳$	۰/۲۵	۱۰۰	$۴ \times ۱۰^۲$	۰/۵

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=  
Contours of Pressure  
min=۰.۰ at elem # ۱۸۱۰۷۸  
max=۳۳۹۰۹۲ e-۰۶ at elem # ۷۶۸۸۸



شکل ۸. فشار اولیه در مدل.

مسیر خط ۷ متروی تهران و انطباق با نقشه‌های موجود در گزارش، پارامترهای خاک به صورت جدول ۴ انتخاب شدند.

مقدار مدول کشسانی برای نوع خاک تهران از معادله‌ی ۱۳ به دست می‌آید: [۲۹]

$$E(MPa) = ۰,۴N_1 - ۰,۷N_1 \quad (۱۳)$$

$$E = ۱۶ - ۲۸(MPa) \rightarrow E = ۲۰(MPa)$$

با در دست داشتن  $E$  و فرض  $\nu = ۰/۲۵$ ، بقیه‌ی پارامترهای خاک مطابق روابط ۱۴ و ۱۵ قابل محاسبه هستند:

$$G = \frac{E}{۲(۱ + \nu)} = \frac{۲۰}{۲(۱ + ۰,۲۵)} = ۸MPa \quad (۱۴)$$

$$K = \frac{۲G(۱ + \nu)}{۳(۱ - ۲\nu)} = \frac{۲ \times ۸ \times (۱,۲۵)}{۳(۱ - ۰,۵)} = ۱۳,۵MPa \quad (۱۵)$$

جدول ۵، به عنوان ورودی در نرم‌افزار برای ماده‌ی خاک اختصاص یافته است. که در آن،  $\rho$  وزن مخصوص،  $G$  مدول برشی،  $K$  مدول بالک و  $a_i$  ثابت ماده هستند، که به صورت رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شوند: [۲۷]

$$\sigma_y = \left[ ۳ \left( a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \right) \right]^{1/2} \quad (۱۶)$$

#### ۴.۵.۲. مقطع ایستگاه

برای مقطع ایستگاه در نرم‌افزار LS-DYNA از مدل ماده‌ی Plastic\_Kinematic استفاده شده است، که برای مدل کردن مواد ایزوتروپیک و حالت خمیری با سخت‌شوندگی کینماتیک مناسب است. [۲۷]

پارامترهای مدل Plastic\_Kinematic مشتمل بر پارامترهای:  $\rho$  چگالی،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  نسبت پواسون،  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $E_{tan}$  مدول تانژانت،  $\beta$  پارامتر سخت‌شوندگی و  $\epsilon f$  کرنش تسلیم هستند. به دلیل این‌که پاسخ مصالح بتن‌آرمه به بار دینامیکی، روند پیچیده‌ی غیرخطی دارد، مدل‌های اندکی برای رفتار دینامیکی آن معرفی شده‌اند، که در جدول ۶ مشخصات آنها ارائه شده است؛ لیکن از جدول ۶، مشخصات مدل رفتاری موجود در برنامه انتخاب شده‌اند. [۲۷]

که در آن،  $\rho$  وزن مخصوص،  $E$  مدول یانگ،  $E_{tan}$  مدول تانژانت،  $\nu$  نسبت پواسون،  $\sigma_y$  تنش تسلیم و  $\beta$  پارامتر سخت‌شوندگی هستند.

### ۳. بررسی نتایج

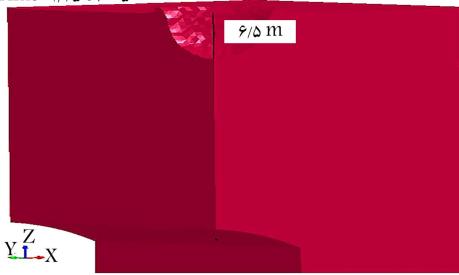
با لحاظ کردن عمق‌های مختلف ایستگاه‌های مترو و همچنین قدرت‌های انفجاری مختلف، حالت‌های محاسباتی به صورت جدول ۷ بوده است.

در قسمت اول پژوهش حاضر، مقطع ایستگاه تحت قدرت انفجاری معادل ۳، ۷ و ۱۱ تن TNT بررسی شده و در ادامه، پاسخ ایستگاه در عمق‌های مختلف تحت انفجار ۱۱ تن TNT تحلیل شده است. بمب مذکور در سال ۲۰۰۲ توسط نیروی هوایی آمریکا طراحی شده است، که شامل ۸/۵ تن ماده‌ی منفجره‌ی H-۶ با توان انفجار هم‌ارز ۱۱ تن TNT بوده است. با توجه به این‌که سازه و خاک قبل از وقوع انفجار تحت اثر تنش‌های اولیه هستند، لذا در فاز اول، مدل تحت تنش‌های اولیه‌ی ناشی از وزن، مقداردهی اولیه شده و در فاز بعدی انفجار اتفاق افتاده است. در شکل ۸، شرایط اولیه‌ی مدل قبل از وقوع انفجار مشاهده می‌شود.

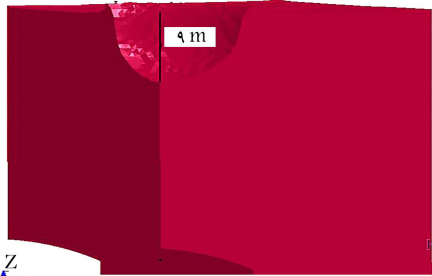
#### ۱.۳. صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل انفجار سطحی با استفاده از داده‌های موجود در نوشتار مبارکی و همکارش (۲۰۱۵)، [۱۹] انجام شده است. برای صحت‌سنجی، انفجار سطحی بدون حضور تونل در سطح خاک به وجود آمده و نتایج مدل با مقادیر ارائه شده در توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵ مقایسه شده‌اند.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=1/45 e+005



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=2/15 e+005



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=4/0498 e+005



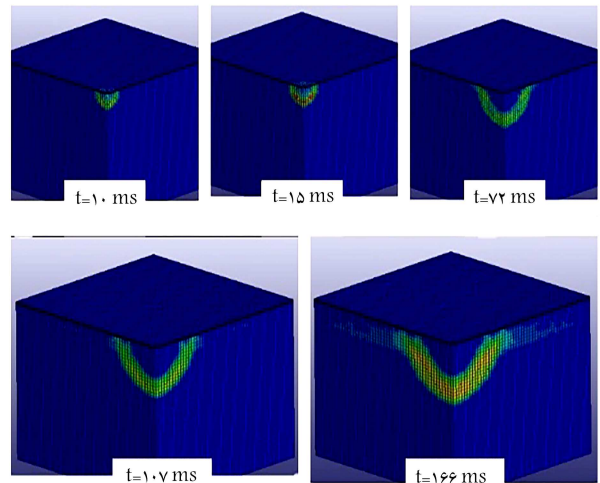
شکل ۱۱. عمق چاله‌ی ایجاد شده در خاک تحت انفجارهای مختلف.

جدول ۹. مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار ارائه شده توسط توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵ و نرم‌افزار

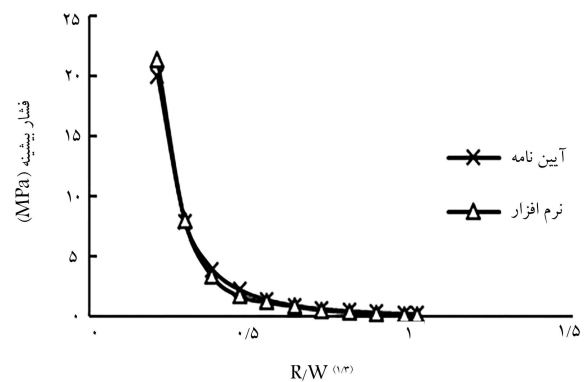
$R/W$	فشار بیشینه (MPa)		درصد اختلاف
	تخمین توصیه‌نامه	نتایج عددی	
۰/۲۱	۲۰/۱	۲۳/۲۷	۱۵
۰/۲۹	۷/۹۵	۸	۰/۶
۰/۳۸	۳/۸۹	۳/۴	۱۴
۰/۴۷	۲/۱۱	۱/۷۶	۱۷
۰/۵۵	۱/۴۵	۱/۲۶	۱۳
۰/۶۴	۰/۹۸	۰/۹۳	۵
۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۱	۱۱
۰/۸	۰/۴۵	۰/۴۱	۹
۰/۸۹	۰/۳۹	۰/۲۶	۱۰
۰/۹۷	۰/۳	۰/۲۶	۱۳

جدول ۱۰. عمق چاله‌ی ایجاد شده در اثر انفجارهای مختلف.

وزن خرج ماده منفجره‌ی TNT (تن)	چاله‌ی حاصله از انفجار (متر)
۱۱	۱۲
۷	۹
۳	۶/۵



شکل ۹. پیشروی موج فشار در خاک.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵ و نرم‌افزار.

جدول ۸. پارامترهای خاک طبق توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵. [۱۹]

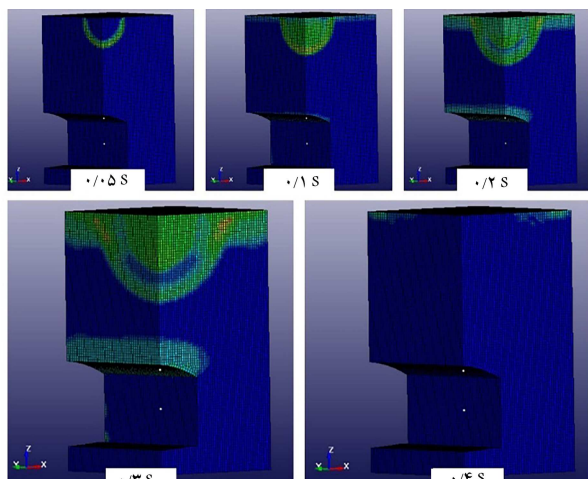
$f$	$\rho c$	$n$
۰/۱۴	۴/۹۷۲	-۲/۷۵

در شکل ۹، پیشروی موج فشار در خاک، در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود، که مطابق آن امواج فشاری به صورت نیم‌کروی در خاک منتشر می‌شوند، که مطابق با آزمون‌های آلکسینکو می‌شود. [۲۵]

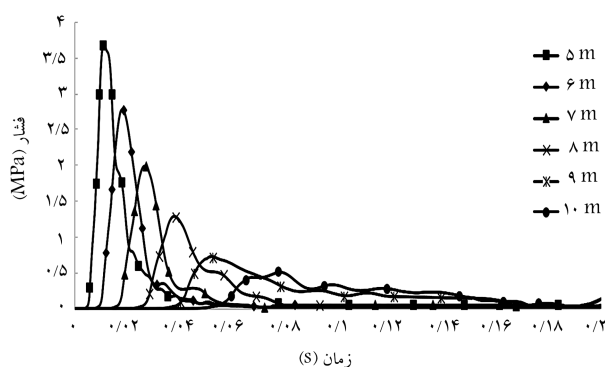
نمودارهای ذکر شده، یک پیک فشاری دارند، که با نتایج آزمون‌های آلکسینکو، [۲۵] مطابقت دارند. با توجه به نوع خاک، ضرایب مطابق جدول ۸ انتخاب شده‌اند. نتایج بررسی‌های صورت گرفته و مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار بین نتایج به دست آمده از نرم‌افزار و توصیه‌نامه‌ی ۱-۸۵۵-TM۵ در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند. در جدول ۹، مقایسه‌ی کمی بیشینه‌ی فشار حاصل از فرمول توصیه‌نامه و نرم‌افزار ارائه شده است.

### ۲.۳. نتایج پژوهش

در شکل ۱۱، عمق چاله‌ی ایجاد شده تحت قدرت‌های انفجاری معادل ۳، ۷ و ۱۱ تن TNT مشاهده می‌شود و همچنین در جدول ۱۰ مقادیر عمق چاله‌ی ایجاد شده در اثر انفجارهای اخیر ارائه شده است. با توجه به جدول ۹ و این‌که خاک سر‌باره‌ی مقطع ایستگاه در اثر انفجار کنار می‌رود، می‌توان نتیجه گرفت که مقطع ایستگاه در

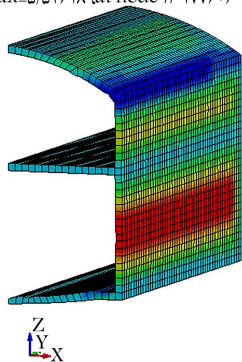


شکل ۱۴. بیشینه مقدار پیشروی موج فشاری حاصل از انفجار.



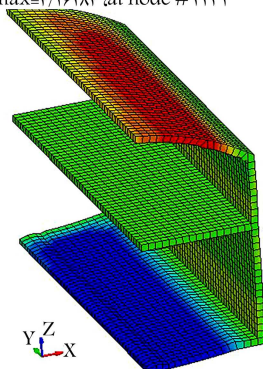
شکل ۱۵. نمودار فشار ایجاد شده در خاک.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=۴۴۹۶۳  
Contours of X-displacement  
min=-۱/۸۸۵۲۵, at node # ۳۳۱۱  
max=۵/۵۲۶۱۸, at node # ۱۷۷۶۰۶



کانتور جا به جایی افقی

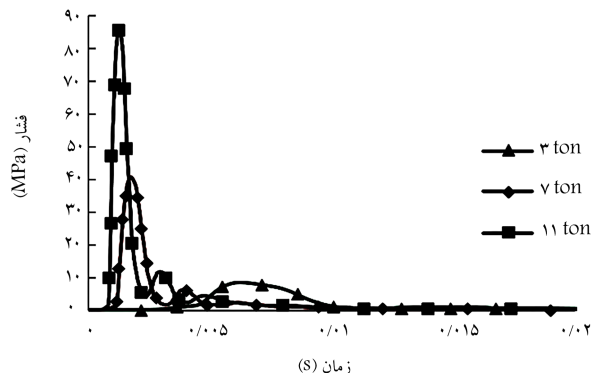
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time=۴۴۹۶۳  
Contours of Z-displacement  
min=-۵/۲۰۴۴۷, at node # ۱۷۲۲۵۴  
max=۴/۱۶۲۸۴, at node # ۳۳۳۱



کانتور جا به جایی قائم

شکل ۱۶. کانتور جابه‌جایی افقی و قائم.

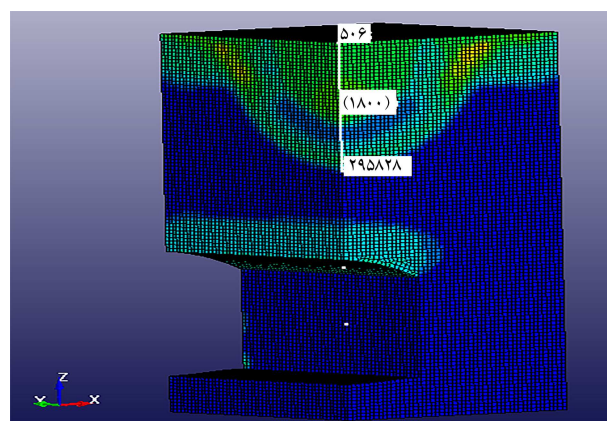
تاج تونل به وجود آمده است، که با نتایج به دست آمده از مطالعات واقعی و مبارکی (۲۰۱۵)<sup>[۱۹]</sup> مطابقت دارد، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بودن تاج تونل در اثر انتشار امواج ناشی از انفجار سطحی است. در جدول ۱۲، مقدار بیشینه فشار برای عمق‌های مختلف تحت انفجار ۱۱ تن TNT ارائه شده است. با توجه به اطلاعات موجود از ایستگاه‌های خط ۷ متروی تهران، عمق



شکل ۱۷. فشار ناشی از انفجار در عمق ۳ متری با خرج‌های متفاوت.

جدول ۱۱. بیشینه فشار برای قدرت‌های انفجاری مختلف.

قدرت ماده منفجره (تن TNT)	مگاپاسکال
۳	۸/۵۶
۷	۴۰/۵
۱۱	۸۵/۲



شکل ۱۸. نمودار فشار ایجاد شده در خاک.

عمق‌های ۹، ۶/۵ و ۱۲ متر به ترتیب تحت انفجارهای ۳، ۷ و ۱۱ تن TNT نایمن تلقی می‌شود. در شکل ۱۲، نمودار فشار در عمق ۳ متری، تحت مقادیر خرج‌های مختلف مشاهده می‌شود. در جدول ۱۱، بیشینه فشار در عمق ۳ متر تحت انفجارهای مختلف ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۳، موج فشاری ناشی از انفجار ۱۱ تن TNT در عمق ۱۸ متری از خاک به کمتر از ۱٪ مقدارش در عمق ۳ متری می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، امواج ناشی از انفجار ۱۱ تن TNT، طی ۰/۴ ثانیه در خاک به صورت نیم‌گردی منتشر و سپس مستهلک شده‌اند. تحت انفجار ۱۱ تن TNT، فشار به وجود آمده در خاک در عمق‌های ۳، ۴، ۹، ۱۲ متری به صورت نمودار مشاهده شده در شکل ۱۵ است. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه جابه‌جایی در راستای افقی (x) در بدنه تونل ایجاد شده و بیشینه جابه‌جایی در راستای قائم (z) در قسمت



جدول ۱۲. بیشینه فشار تحت انفجار ۱۱ تن TNT برای عمق‌های مختلف.

قدرت ماده‌ی منفجره‌ی TNT (تن)	عمق (متر)	فشار بیشینه (مگاپاسکال)	درصد کاهش نسبت به عمق ۵ متر
۱۱	۵	۳/۶۲	-
	۶	۲/۷۵	۲۴
	۷	۱/۹۲	۴۷
	۸	۱/۴۲	۶۰
	۹	۰/۷۲	۸۰
	۱۰	۰/۵	۸۶

جدول ۱۳. بررسی ایمنی ایستگاه‌های مترو.

نام ایستگاه	عمق ایستگاه (متر)	مقدار تنش اولیه (MPa)	تنش بعد انفجار (MPa)	درصد افزایش تنش	ایمنی
بریانک	۸/۵	۰/۱۰۴	۱/۳۵	۱۲۸۷۴	ناایمن
هلال احمر	۱۲	۰/۰۸۲۹	۰/۳۹۶۹	۳۷۸	ناایمن
کمیل	۱۳/۵	۰/۱۱۲	۰/۳۲۵	۱۹۸	ناایمن
تریت مدرس	۱۷	۰/۱۶۹	۰/۲۶۴۱	۵۶	ناایمن
بوستان گفتگو	۱۹	۰/۲۰۸	۰/۲۷۷۱	۳۳	مرز ایمن و ناایمن
شهید نواب صفوی	۲۳	۰/۲۸۴	۰/۳۲۵۵	۱۴	ایمن
باقرخان	۳۰/۵	۰/۴۲۷	۰/۴۳۹۶	۳	ایمن

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی شد تا میزان تأثیرپذیری ایستگاه‌های مترو تحت یک انفجار بزرگ که در سطح زمین اتفاق می‌افتد، بررسی و تخمینی از پایداری مقطع ایستگاه‌های مترو ارائه شود. نتایج تحلیل‌ها را می‌توان بدین صورت خلاصه کرد:

۱. امواج فشاری به وجود آمده تا عمق ۱۸ متری، خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در فاصله‌ی ۰/۴ تا ۰ ثانیه از بین می‌روند.
۲. طبق بررسی‌های صورت گرفته، با اعمال قدرت انفجاری معادل ۳، ۷ و ۱۱ تن TNT، چاله‌ی به وجود آمده در سطح زمین به ترتیب ۱۲، ۵/۶ و ۹ متر شده است.
۳. با توجه به معیار ایمنی تعریف شده، مقطع ایستگاه‌های مترو تحت انفجار ۱۱ تن TNT با عمق مدفون بیش از ۱۹ متر، امن تلقی می‌شوند.
۴. با توجه به نتیجه‌ی اخیر مشاهده می‌شود که از ۲۳ ایستگاه خط ۷ متروی تهران، ۷ ایستگاه با عمق بیش از ۱۹ متر در مقابل انفجار ۱۱ تن TNT امن هستند.

مدفون ایستگاه‌ها در محدوده‌ی ۳/۵ تا ۳۰ متری از سطح زمین احداث شده‌اند. مصالح تشکیل‌دهنده‌ی سازه‌ی ایستگاه، متشکل از بتن‌آرمه است، که برای بارهای وارده طراحی شده‌اند. در پژوهش حاضر، ابتدا تحلیل مقطع ایستگاه تحت وزن خود صورت گرفته و سپس انفجار به عنوان فاز بعدی، مدل‌سازی شده است.

با توجه به معادلات حاکم بر بتن‌آرمه در پژوهش حاضر، معیاری که برای ایمنی ایستگاه‌های مترو انتخاب شده است، این گونه بود که اگر بعد از انفجار تنش قائم وارده به تاج مقطع ایستگاه، که نسبت به سایر نقاط مقطع آسیب‌پذیر است، بیش از ۳۰٪ نسبت به پیش‌تنش موجود در سازه‌ی ایستگاه افزایش یابد، مقطع ایستگاه ناایمن تلقی می‌شود. این معیار پیشنهادی پژوهش حاضر است و بیشتر مبتنی بر ضرایب اطمینان به کار رفته در طراحی‌های غیرلززه‌ی (به دلیل عمق زیاد ایستگاه‌ها) بوده است. بررسی‌های صورت گرفته برای مقاطع ایستگاه‌ها در عمق‌های مختلف به صورت خلاصه در جدول ۱۳ ارائه شده است.

#### پانویس‌ها

1. Kutter
2. Davis and Williams
3. Kendorski
4. peak particle velocity
5. Tiwari
6. Abaqus
7. coupled eulerian-lagrangian
8. Fan
9. De
10. Wang and Lu
11. Yang, Xie and Wang

12. Koneshwaran
13. Vaghefi and Mobaraki
14. smooth particle hydrodynamics
15. Mussa
16. Guerrero
17. surface explosion
18. Alkseenko
19. arbitrary lagrangian eulerian
20. Jones-Wilkens-Lee
21. Chapman-Jouget pressure
22. Kreig

### منابع (References)

1. Lue, K.S., Wang, Y., Zhang, Y.-T. and et al. "Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion", *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, **6** (2007).
2. Kutter, B., O'Leary, M., Thompson, P. and et al. "Gravity-scaled tests on blast-induced soil-structure interaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, **114**(4), pp. 431-447 (1988).
3. Davies, M. and Williams, A. "Centrifuge modelling the protection of buried structures subjected to blast loading", *In Structures Under Shock and Impact II: Proceedings of the 2ed International Conference, held in Portsmouth, UK, Thomas Telford Publishing*, pp. 663-674 (16-18 June, 1992).
4. Kendorski, F.S., Jude, C.V. and Duncan, W.M. "Effect of blasting on shotcrete drift linings", *Min. Eng.*, **25**(12), pp. 38-41 (1973).
5. Tiwari, R., Chakraborty, T. and Matsagar, V. "Dynamic analysis of underground tunnels subjected to internal blast loading", *In: World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI)*, Barcelona (2014).
6. Feldgun, V., Kochetkov, A., Karinski, Y. and et al. "Internal blast loading in a buried lined tunnel", *International Journal of Impact Engineering*, **35**(3), pp. 172-183 (2008).
7. Jiang, N. and Zhou, C. "Blasting vibration safety criterion for a tunnel liner structure", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **32**, pp. 52-57 (2012).
8. Papanikolaou, V.K. and Kappos, A.J. "Practical nonlinear analysis of unreinforced concrete tunnel linings", *Tunn. Undergr. Space Technol.*, **40**, pp. 127-140 (2014).
9. Cheesman, B.A., Wolf, S., Yen, C.F. and et al. "Blast simulation of explosive buried in saturated sand", *Fragblast*, **10**(1-2), pp. 1-8 (2006).
10. Gao, M., Xu, X., Chen, Q. and et al. "Responses of a cylindrical lined tunnel due to internal dynamic load in two distinct mediums: Ideal elastic and saturated porous medium", *Soils and Foundations*, **59**(6), pp. 2356-2366 (2019).
11. Yuzhen han, Zhang, L. and Yang, X. "Soil-tunnel interaction under medium internal blast loading", *Procedia Engineering*, **143**, pp. 403-410 (2016).
12. Osinov, V.A., Chrisopoulos, S. and Triantafyllidis, T. "Numerical analysis of the tunnel-soil interaction caused by an explosion in the tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **122**, pp. 318-326 (2019).
13. Fan, J.-Y., Fang, Q. and Liu, J.-C. "Characteristics of loads on shallow-buried structures under the ground explosions", *19th Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, pp. 676-680 (2008).
14. De, A. "Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil", *Comput. Geotech.*, **43**, pp. 72-79 (2012).
15. De, A., Morgante, A.N. and Zimmie, T.F. "Mitigation of blast effects on underground structure using compressible porous foam barriers", *5th Biot Conference on Poromechanics*, pp. 971-980 (2013).
16. Wang, Z. and Lu, Y. "Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **23**(8), pp. 705-714 (2003).
17. Yang, Y., Xie, X. and Wang, R. "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **2**(4), pp. 373-384 (2010).
18. Koneshwaran, S. "Blast response and sensitivity analysis of segmental tunnel", *PhD thesis, Queensland University of Technology* (2014).
19. Mobaraki, B. and Vaghefi, M. "Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **47**, pp. 114-122 (2015).
20. Koneshwaran, S., Thambiratnam, D.P. and Gallage, C. "Response of segmented bored transit tunnels to surface blast", *Advances in Engineering Software*, **89**, pp. 77-89 (2015).
21. Mussa, M.H., Mutalib, A.A., Hamid, R. and et al. "Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **66**, pp. 64-76 (2017).
22. Artero-Guerrero, J., Pernas-Sánchez, J. and Teixeira-Dias, F. "Blast wave dynamics: the influence of the shape of the explosive", *Journal of Hazardous Materials*, **331**, pp. 189-199 (2017).
23. TM 5-855-1, "Fundamentals of protective design for conventional weapons", *US Army, Navy and Air Force, US Government Printing Office, Washington DC* (1986).
24. Zamani, J. "Mechanics of explosion", *Khajeh Nasir publications*, pp.8 (2015).
25. Hallquist, J. and Manual, L.-D.K.U.s. "Nonlinear dynamic analysis of structures", *Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA* (1999).
26. Dipl.-Ing. Christian Linder, "An arbitrary lagrangian-eulerian finite element formulation for dynamics and finite strain plasticity models", *University Stuttgart D-70569 Stuttgart, Pfaffenwaldring, 7*, pp.3-4, 35 (2003).
27. Giroux, E. "HEMP user's manual", *California Univ., Livermore (USA), Lawrence Livermore Lab*, pp.13-14 (1973).
28. Krieg, R.D. "A simple constitutive description for cellular concrete", *Sandia National Laboratories Albuquerque, NM*, pp.15-35 (1972).
29. Arman, A., Samtani, N., Castelli, R. and et al. "Geotechnical and foundation engineering module 1-subsurface investigations", *National Highway Institute, Washington D.C., United States*, **314** p.122 (1997).