

## بررسی اثر اشباع خاک ماسه‌ای بر پناهگاه‌های بتنی تحت اثر انفجار سطحی

پرهام مهدی‌پور قزوینی<sup>۱</sup>، وحید حسینی تودشکی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

(دریافت: ۹۶/۱۰/۰۶، پذیرش: ۹۷/۰۲/۲۲)

### چکیده

سازه‌های زیرزمینی نظیر پناهگاه‌ها و تونل‌ها از جمله سازه‌های مهم و راهبردی محسوب می‌شوند. پاسخ یک سازه زیرزمینی به بارگذاری حاصل از انفجار سطحی، موضوعی مهم در پدافند غیرعامل است. تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای مختلف از جمله پاسخ زمین، پاسخ سازه، آزمایش‌های میدانی و ... صورت گرفته است؛ اما هنوز جنبه‌های مجهول و مبهم فراوانی در زمینه انفجار و تأثیر آن بر محیط خاک و سازه وجود دارد. در این تحقیق، تأثیر رطوبت خاک بر روی ایمنی یک پناهگاه زیرزمینی از جهت میزان تنش و جابجایی وارد بر آن بررسی شده است. جهت مدل‌سازی پناهگاه زیرزمینی، از نرم‌افزار Autodyn کمک گرفته شده و در مدل‌سازی‌ها از دو محیط لاگرانژی و اویلری در نظر گرفته شده است. خرج انفجاری انتخاب شده در این تحقیق، معادل ۵۲/۱۶ کیلوگرم TNT بوده و داده‌ها با استفاده از گیج‌های قرار داده شده در مدل، ثبت شده است. نتایج به دست آمده نشان داده که بالا رفتن درجه اشباع لایه خاک، موجب افزایش فشار گذرنده از خاک شده و در نتیجه تنش فون مایرز سیستم بتن و فولاد، افزایش یافته و منجر به وخامت اوضاع گردیده است.

**کلیدواژه‌ها:** انفجار سطحی، پناهگاه زیرزمینی، اتوداین، درجه اشباع خاک

## Investigating the Effect of Soil Moisture on the Safety of the Underground Shelters against the Waves Caused by Surface Explosion

P. Mehdipour Ghazvini, V. Hosseini Toudeshki\*

Islamic Azad University, Zanjan  
(Received: 27/12/2017; Accepted: 12/05/2017)

### Abstract

Underground structures such as sanctuaries and tunnels are considered as important and strategic structures. The response of an underground structure to loading from a surface explosion is a major issue in passive defence. So far, many studies have been carried out on various parameters such as ground response, structure response, field experiments, etc. However, there are still many unknown and vague aspects of the explosion and its impact on the soil and structure environment. In this study, the effect of soil moisture on the safety of an underground shelter has been investigated for the different amount of stress and displacement. Autodyn software has been used to model the underground shelter, and two Lagrangian and Eulerian environments have been considered. The chosen explosive charge in this study is 52.16 kg of TNT, and the data is recorded using the gauges enclosed in the model. The results show that increase in the degree of saturation of the soil layer has increased the excessive pressure from the soil, and as a result, the von Mises stress in the concrete and steel system has increased and led to the deterioration of the situation.

**Keywords:** Surface Blast, Underground Shelter, Autodyn, Degree of Soil Saturation

## ۱. مقدمه

با افزایش درگیری‌های نظامی، حملات موشکی و تروریستی، اهمیت پدافند غیرعامل هر روز بیشتر نمایان می‌شود. در حوزه سازه‌های زیرزمینی، پدافند غیرعامل در واقع همان تلاش برای طراحی، بهینه‌سازی و جاگیری مناسب این نوع سازه‌ها است. مطالعه و بررسی موضوعات مربوط به انفجار سطحی می‌تواند از طریق آزمایش‌های صحرایی، شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی صورت گیرد. آزمایش‌های صحرایی در مقیاس واقعی دارای هزینه زیاد و نیز مشکلات عدیده برای تأمین خرج‌های انفجاری هستند.

شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک، نیاز به تجهیزات فوق پیشرفته و مجهز به ابزارآلات اندازه‌گیری دقیق از جمله شتاب‌سنج‌ها و تغییر مکان‌سنج‌های بسیار دقیق دارد. به‌علاوه ساخت نمونه‌های واقع‌گرایانه در محیط آزمایشگاهی برای مباحث مربوط به انفجار، کاری بسیار پیچیده است که با وجود سازه زیرزمینی و خاک تقریباً غیرممکن است. بنابراین، مدل‌سازی عددی تنها روشی است که می‌توان به راحتی آن را اجرا نمود. ضمن آن که از سرعت تحلیل بالایی نیز برخوردار بوده و نتایج آن از صحت و دقت خوبی برخوردار است. در این راستا، تفاوت نتایج تجزیه و تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی توسط لو و همکاران [۱] بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که در تجزیه و تحلیل‌های میدان آزاد<sup>۱</sup>، فشار محاسبه‌شده در نقطه ۱۰ متری از خرج انفجاری در حالت دوبعدی و سه‌بعدی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

امبروسینی و همکاران [۲] طی مجموعه آزمایش‌های صحرایی سعی نموده‌اند تا ابعاد کراتر<sup>۲</sup> ایجادشده توسط مواد منفجره را در سه حالت انفجار زیرزمینی، سطحی و بالای سطحی پیش‌بینی و بررسی نمایند. تحقیقی نیز با عنوان مطالعه مکانیسم تغییر شکل دینامیکی خاک، تحت بارگذاری انفجار توسط وانگ و لو [۳] صورت گرفته است. همچنین وانگ و همکاران [۴] مطالعه‌ای با عنوان شبیه‌سازی عددی روان‌گرایی خاک بر اثر انفجار و اثرات آن بر سازه‌های سطحی انجام دادند.

نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار سطحی در حالت میدان آزاد و پاسخ تونل زیرزمینی در برابر انفجار سطحی توسط وانگ و همکاران [۵] بررسی شده است. فلدگون و همکاران [۶] مطالعه‌ای بر روی توزیع فشار انفجار بر روی یک سازه مدفون در خاک متخلخل مرطوب انجام دادند. در این تحقیق از مدل خاک سه‌فازی استفاده‌شده تا تأثیر هر سه پارامتر آب، هوا و اجزای جامد خاک بررسی شوند. مطالعاتی با محوریت شبیه‌سازی عددی

انفجار سطحی بر روی خاک خشک و غیر چسبنده توسط دی [۷] صورت گرفته که در آن رفتار خاک خشک و غیر چسبنده در صورت وقوع یک انفجار سطحی بررسی شده است. هیگینز و همکاران [۸] طی تحقیقی سعی کردند یک مدل با نسبت کشش بالا برای ماسه ساخته و کاربرد آن را در تجزیه و تحلیل المان محدود تونل‌های تحت بار انفجار، بررسی نمایند. نتیجه به‌دست‌آمده نشان داد که در خاک‌های پر چگال‌تر، سرعت انتشار امواج ناشی از انفجار بیشتر است.

بررسی‌های قلی زاد و عابدی ایوبی [۹] نشان داده است که پارامترهای عدم قطعیت مربوط به بارگذاری انفجاری، تأثیرگذارتر از پارامترهای مربوط به مشخصات سازه از قبیل هندسه سازه، ویژگی‌های مصالح و ابعاد مقاطع است. کرینسکی و همکاران [۱۰] مطالعاتی را بر روی موج بازتاب شده اولیه ناشی از انفجار زیرزمینی نزدیک به یک سازه صلب مدفون در خاک انجام داده‌اند. در این تحقیق نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل توزیع فشار بر محیط سازه‌های زیرزمینی ناشی از انفجار، در حوزه نزدیک سازه بررسی شده است. چن و همکاران [۱۱] طی تحقیقی با محوریت بررسی پاسخ الاستیک قوس‌های دایره‌ای تحت بار انفجار زیرزمینی که در آن اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته‌شده است، راه‌حل محاسبه لرزه‌ای این سازه‌ها را به دست آوردند. مبارکی و واقفی [۱۲] نتایج مطالعه‌ای عددی بر روی عمق و شکل مقطع عرضی تونل‌ها را تحت انفجار سطحی ارائه داده‌اند. شبیه‌سازی المان محدود انفجار بالای سطحی بر روی خاک‌های رسی توسط بوش و همکاران [۱۳] ارزیابی گردیده است.

در این تحقیق سعی شده است با کنار گذاشتن پارامترهای معمول و تکراری و از طریق بررسی میزان رطوبت خاک، نتایجی را به دست آورد که بتوان از آن‌ها در روند انتخاب محل پناهگاه‌های زیرزمینی و یا طراحی آن‌ها استفاده نمود.

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود اتود این<sup>۳</sup> استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی نرم‌افزار، تحقیقی که لین و سندویک [۱۴] بر روی ماسه انجام داده‌اند، مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق برای نمونه‌ای به قطر ۳۸ و ارتفاع ۹۰ میلی‌متر از طریق فرمول‌های ریاضی،  $U_p$  و  $U_s$ ‌های مختلف محاسبه گردیده که در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

با مقایسه جدول‌های (۱-۲) مشاهده می‌شود که اختلاف بسیار جزئی و کوچکی بین محاسبات ریاضی و تحلیل نرم‌افزاری وجود دارد که این مسئله بر درستی عملکرد نرم‌افزار صحه می‌گذارد.

<sup>۱</sup> Free Field Analyzes<sup>۲</sup> Crater Dimensions<sup>۳</sup> Autodyn

جدول ۱. نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات لین و سندویک [۱۴]

$\rho_i$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	$P_i$ (Mpa)	$U_p$ ( $\frac{m}{s}$ )	$U_s$ ( $\frac{m}{s}$ )
۱۶۷۴	۰۰/۰	۰۰/۰	۲۶۵/۲
۱۷۳۹/۵	۴/۵۸	۱۰/۱۵	۲۶۹/۷
۱۸۷۳/۸	۱۴/۹۸	۳۰/۸۹	۲۸۹/۷
۱۹۹۷	۲۹/۱۵	۵۳/۰۷	۳۳۸/۱
۲۱۴۳/۸	۵۹/۱۸	۸۸/۰۱	۴۰۱/۶
۲۲۵۰	۹۸/۱۰	۱۲۲/۵	۴۷۸/۵
۲۳۸۰	۱۷۹/۴	۱۷۸/۳	۶۰۱/۱
۲۴۸۵	۲۸۹/۴	۲۳۷/۶	۷۲۷/۹
۲۵۸۵	۴۵۰/۲	۳۰۷/۹	۸۷۳/۶
۲۶۷۱/۳	۶۵۰/۷	۳۸۰/۹	۱۰۲۰/۴

بتن: بتن مورد استفاده در مدل‌سازی از مصالح پیش‌فرض نرم‌افزار اتوداین است و مشخصات بتن توسط ریدل و همکاران [۱۵] تحت بارهای دینامیکی شدید استخراج و در پیش‌فرض نرم‌افزار قرار داده شده است. مشخصات این بتن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات بتن مورد استفاده در مدل‌سازی [۱۵]

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی	۲۵۲۰	کیلوگرم بر مترمکعب
مدول بالک	۳۵/۲۷	پاسکال
مدول برشی	۲۲/۰۶	پاسکال

جدول ۲. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار

$\rho_i$ ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	P (Mpa)	$U_p$ ( $\frac{m}{s}$ )	$U_s$ ( $\frac{m}{s}$ )
۱۷۳۹/۵	۴/۶۳	۱۰/۱۵	۲۶۹/۷
۱۸۷۳/۸	۱۴/۷۹	۳۰/۸۹	۲۹۰/۴
۱۹۹۷	۲۹/۱۸	۵۳/۰۷	۳۳۷/۷
۲۱۴۳/۸	۵۹/۱۱	۸۸/۰۲	۴۰۲
۲۲۵۰	۹۸/۱۳	۱۲۲/۵	۴۷۹/۱
۲۳۸۰	۱۷۹/۴	۱۷۸/۳	۶۰۰/۸
۲۴۸۵	۲۸۸/۹	۲۳۷/۶	۷۲۷
۲۵۸۵	۴۴۸	۳۰۷/۹	۸۶۹
۲۶۷۱/۳	۶۵۰/۳	۳۸۰/۹	۱۰۱۹

فولاد: فولاد مورد استفاده در مدل‌سازی جهت پلایت فولادی نیز از مصالح پیش‌فرض نرم‌افزار بوده که مشخصات آن تحت بار دینامیکی شدید و انفجار توسط جانسن و کوک [۱۶] استخراج و در نرم‌افزار وارد شده است. مشخصات فولاد مصرفی در جدول (۴) و مدل مقاومتی آن در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات فولاد مورد استفاده در مدل‌سازی [۱۶]

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی	۷۸۳۰	کیلوگرم بر مترمکعب
مدول بالک	۱/۵۹E+۱۱	پاسکال
مدول برشی	۸/۱۸E+۱۰	پاسکال

جدول ۵. مدل مقاومتی فولاد مورد استفاده در مدل‌سازی [۱۶]

نرخ کرنش ثابت	توان سخت‌شوندگی	ثابت سخت‌شوندگی (پاسکال)
۰/۰۱۴	۰/۲۶	۵/۱E+۸

هوا: هوای استفاده‌شده در مدل‌سازی از مصالح پیش‌فرض برنامه است. مشخصات ترمودینامیکی و انتقال امواج آن توسط روجرز و مایبو [۱۷] استخراج و در نرم‌افزار به‌کار گرفته شده است.

TNT: خرج انفجاری در نظر گرفته‌شده جهت وقوع انفجار از نوع TNT است که جزو مصالح پیش‌فرض نرم‌افزار اتوداین است. حجم خرج انفجاری TNT، ۳۲۰۰۰ سانتی‌مترمکعب یا به عبارتی معادل ۵۲/۱۶ کیلوگرم TNT در نظر گرفته‌شده است. مشخصات رفتاری TNT توسط لی و همکاران [۱۸] استخراج گردیده؛ و معادلات احتراق و انفجار JWL حاکم بر این ماده مشخص‌شده و در نرم‌افزار قرار گرفته است. مشخصات TNT استفاده‌شده در این تحقیق در جدول (۶) نشان داده شده است.

## ۱-۲-۱. مدل‌سازی

در این تحقیق، جهت مدل‌سازی انفجار از دو محیط اویلری و لاگرانژی استفاده‌شده است. استفاده از محیط و معادلات حاکم بر فضای لاگرانژی، جهت تحلیل بتن و فولاد مصرفی موجود در سازه توصیه می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت از معادلات لاگرانژی جهت تحلیل مواد و مصالح صلب استفاده می‌شود. فضای لاگرانژی این تحقیق شامل یک پناهگاه به ابعاد بیرونی ۶\*۶\*۶ متر و ضخامت دیواره ۰/۵ متر بوده که فضای داخلی قابل‌استفاده آن، مساحتی برابر ۲۵ مترمربع با ارتفاع ۵ متر را دارا است. محیط اویلری و معادلات حاکم بر فضای اویلر برای تحلیل مصالحی مناسب هستند که المان‌های آن بر اثر انفجار به سرعت بسیار بالایی می‌رسند و جابجایی بسیار زیادی در زمان کمی خواهند داشت. بنابراین توصیه می‌شود جهت مدل‌سازی هوا، TNT و خاک که در محدوده شعاع موثر امواج اولیه انفجار هستند از محیط اویلر استفاده شود.

## ۱-۲-۱. مشخصات مصالح

جهت اطمینان از درستی مشخصات مصالح، تا حد امکان سعی شده است از مصالح پیش‌فرض برنامه اتوداین استفاده شود. در ادامه مشخصات مصالح مصرفی به‌کاررفته در مدل‌سازی‌ها بررسی می‌شود.

رس ماسه‌ای با درجات اشباع ۰، ۰/۵ و ۱ (حاوی ۱۰ درصد حجمی ماسه و تخلخل ۳۰ درصد) نوع دیگری از خاک‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی است. این نوع خاک و مشخصات و رفتار آن تحت بارگذاری انفجار توسط گوروجیسیک و همکاران [۲۰] طی آزمایش‌های تجربی و آزمایشگاهی مشخص گردیده و به صورت نمودارهایی ترسیم شده است. اعداد و ارقام به دست آمده از این نمودارها، با تعریف یک خاک جدید در نرم‌افزار وارد می‌شوند.

## ۲-۲. ابعاد المان و مش بندی مدل

از آنجا که رسم هندسه و تعریف مصالح در دو محیط لاگرانژ و اویلر صورت می‌گیرد، لازم است که مش‌بندی نیز در این دو محیط به صورت مجزا انجام گیرد. برای مش‌بندی سازه بتنی و پلیت فولادی از المان‌های ۱۰ سانتی‌متری استفاده‌شده که در محیط لاگرانژی صورت گرفته است. برای TNT، هوا و محیط خاکی نیز از المان‌های اویلری ۱۰ سانتی‌متری استفاده‌شده است. لازم به ذکر است که کیفیت مش‌بندی توسط نرم‌افزار جانبی گامبیت<sup>۷</sup> بررسی گردید و از معیار سلامت ۱۰۰ درصد، نمره ۸۳ به کیفیت مش داده شد که نمره مناسبی است.

## ۳-۲. شرایط مرزی

شرایط مرزی در نظر گرفته‌شده برای مدل از نوع فلوآوت<sup>۸</sup> موجود در نرم‌افزار اتود این است. علت انتخاب این نوع شرایط مرزی به وجود آوردن مرزهایی است که قابلیت جریان رو به بیرون را داشته باشند و گرنه، بازتاب امواج حاصل از انفجار به داخل مدل در حین تحلیل، موجب غیرواقعی شدن نتایج می‌شود.

## ۴-۲. تقارن یک‌چهارم

از قابلیت‌های بسیار خوب نرم‌افزار اتوداین، امکان استفاده از صفحات تقارن است. استفاده از این امکان، باعث کوتاه‌تر شدن هرچه بیشتر مدت زمان تحلیل و درعین حال ثابت ماندن صحت نتایج می‌شود. در این راستا می‌توان از سه تقارن یک‌دوم، یک‌چهارم و یک‌هشتم استفاده نمود. تقارن یک‌دوم و یک‌چهارم برای صفحات نرمال X و Y و تقارن یک‌هشتم برای صفحه نرمال Z است. البته به دلیل این‌که در این تحقیق شرایط در راستای Z متغیر است نمی‌توان از تقارن یک‌هشتم استفاده کرد. اما به دلیل این‌که در دو جهت X و Y، سازه، هوا، خاک و TNT متقارن و بدون تغییر هستند، می‌توان از تقارن یک‌دوم و یا یک‌چهارم بنا به نیاز، استفاده نمود که در این تحقیق به علت حجم زیاد مدل و

فهرست علائم اختصاری	
$\rho_i$	چگالی اولیه <sup>۱</sup>
$P_i$	فشار اولیه <sup>۲</sup>
$U_p$	سرعت ذره <sup>۳</sup>
$U_s$	سرعت موج انفجار <sup>۴</sup>
P	فشار
$\omega, R_2, R_1, B, A$	پارامترهای معادله JWL <sup>۵</sup>
C-J	پارامترهای چپمن - جیگی <sup>۶</sup>

جدول ۶. مشخصات JWL برای TNT [۱۸]

مقدار	مشخصات
$3/74E+11$	پارامتر A (پاسکال)
$3/75E+9$	پارامتر B (پاسکال)
۴/۱۵	پارامتر R
۰/۹	پارامتر R
۰/۳۵	پارامتر $\omega$
۶۹۳۰	C-J انفجار
$3/68E+6$	انرژی C-J بر واحد جرم
$2/1E+10$	فشار C-J (پاسکال)

**خاک:** به طور کلی از سه نوع خاک در این تحقیق استفاده شده است که این خاک‌ها عبارت‌اند از ماسه پیش‌فرض برنامه، ماسه در درجه‌های اشباع ۰، ۰/۵ و ۱ و همچنین رس ماسه‌ای در درجات اشباع ۰، ۰/۵ و ۱. ماسه پیش‌فرض برنامه در واقع ماسه‌ای است که مشخصات و رفتار آن در برابر بارهای دینامیکی شدید و بارگذاری انفجار توسط لین و سندویک استخراج و در نرم‌افزار قرار داده شده است. ماسه در درجات اشباع ۰، ۰/۵ و ۱ در واقع ماسه‌ای است که مشخصات آن با انجام آزمایش‌های تجربی و آزمایشگاهی توسط گوروجیسیکا و همکاران [۱۹] تحت بار انفجار، استخراج شده و به صورت نمودارهایی ترسیم شده است. اعداد و ارقام به دست آمده از این نمودارها، با تعریف یک خاک جدید در نرم‌افزار وارد می‌شوند. مشخصات مربوط به این خاک در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۷. مشخصات پایه ماسه در درجات اشباع مختلف [۱۹]

مقدار	واحد	پارامتر
۲۶۴۱	$Kg/m^3$	Density of Solid Sand Particles
۱۰۰۰	$Kg/m^3$	Density of Water
۲۱/۶۸	$MPa.m^3Kg^{-1}$	Solid Sand Compaction Modulus
۲/۱۵۰	$MPa.m^3Kg^{-1}$	Bulk Modulus of Water
۰/۶۵۱	GPa	Minimum Pressure for Full Compaction of Dry Sand

<sup>۱</sup> Initial Density

<sup>۲</sup> Initial Pressure

<sup>۳</sup> Particle Velocity

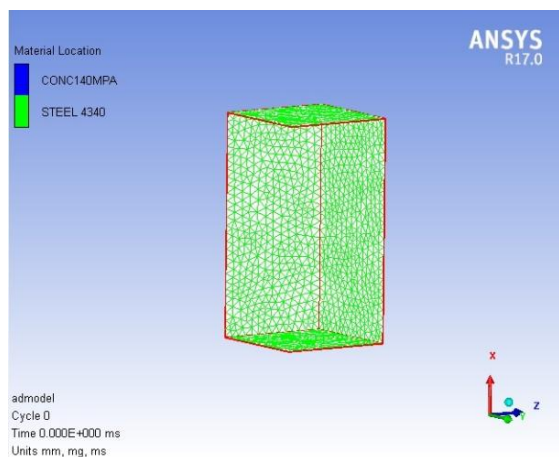
<sup>۴</sup> Shock Wave Velocity

<sup>۵</sup> Jones-Wilkens-Lee

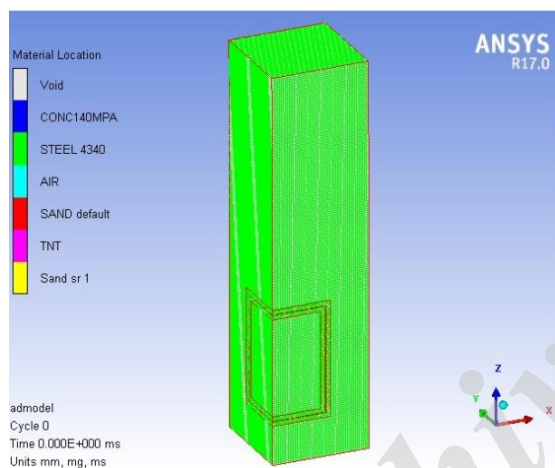
<sup>۶</sup> Chapman-Jouguet Parameters

<sup>۷</sup> Gambit

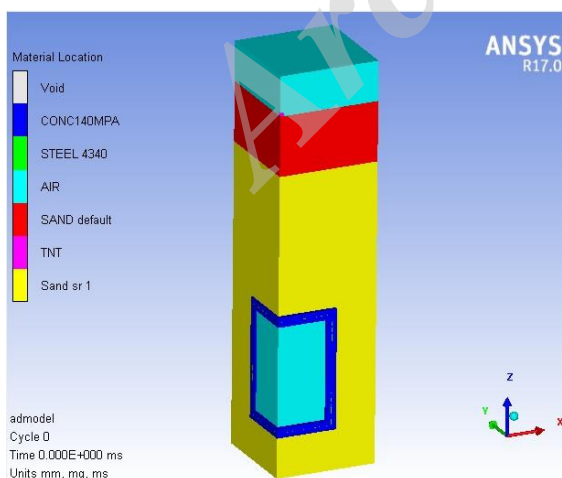
<sup>۸</sup> Flowout



شکل ۲. پلینت فولادی به ضخامت ۲ سانتی‌متر با تقارن یک‌چهارم که جایگزین شبکه میل‌گرد شده است



شکل ۳. محیط اوپلری حاوی خاک، هوا و TNT با تقارن یک‌چهارم و مش‌بندی آن

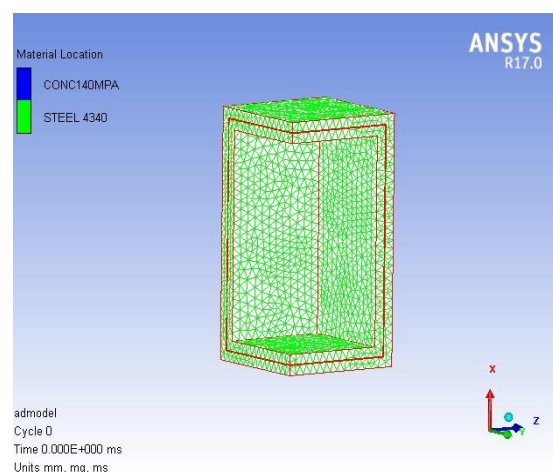


شکل ۴. مدل نهایی با تقارن یک‌چهارم پس از اختصاص دادن مصالح

به منظور جلوگیری از طولانی شدن مدت زمان تحلیل، تقارن یک‌چهارم استفاده شده است تا نتایج، هرچه سریع‌تر به دست آیند. لازم به ذکر است که در این تقارن، همان‌طور که یک‌چهارم هوا، خاک، سازه و پلینت فولادی مدل می‌شود، این امر در مورد TNT نیز صادق بوده و فقط باید یک‌چهارم آن مدل شود. شکل‌های (۴-۱) مربوط به مدل‌سازی با تقارن یک‌چهارم و مش بندی مربوط به آن است.

جهت برداشت نتایج پس از تحلیل، لازم است که تعدادی گنج در نقاط مورد نظر قرار داده شود تا بتوان نتایج مورد نیاز را برداشت نمود. تنوع نتایجی که می‌توان برای هر گنج تعریف کرد بسیار زیاد بوده و می‌توان بسیاری از اهداف از جمله تنش، جابه‌جایی، فشار و بسیاری دیگر از هدف‌ها را برای یک گنج تعریف کرد. به دلیل حساسیت موضوع، در این تحقیق سعی شده از گنج‌های زیادی (۲۸ گنج) در مدل استفاده شود تا بتوان تعداد نتایج قابل قبولی را برداشت نمود.

لازم به ذکر است که سه نوع گنج را می‌توان در نرم‌افزار اتوداین استفاده کرد که این گنج‌ها عبارت‌اند از گنج‌های سوار بر المان، گنج‌های سوار بر نود و گنج‌های فیکس. از دو نوع اول، در محیط لاگرانژی مربوط به سازه پناهگاه استفاده می‌شود. از گنج‌های فیکس نیز می‌توان در محیط اوپلری مربوط به خاک، هوا و TNT استفاده نمود. گنج‌های شماره ۱ تا ۲۰ از نوع المان و نود بوده و برای پناهگاه تعریف شده‌اند و از گنج‌های شماره ۲۱ تا ۲۸ در محیط اوپلری و برای خاک و هوا استفاده شده است. محل گنج‌ها در شکل‌های (۶-۵) نشان داده شده است.

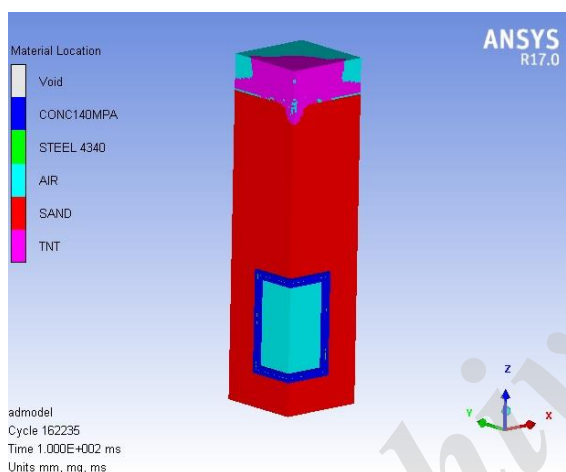


شکل ۱. مدل پناه‌گاه زیرزمینی با تقارن یک‌چهارم و مش‌بندی آن

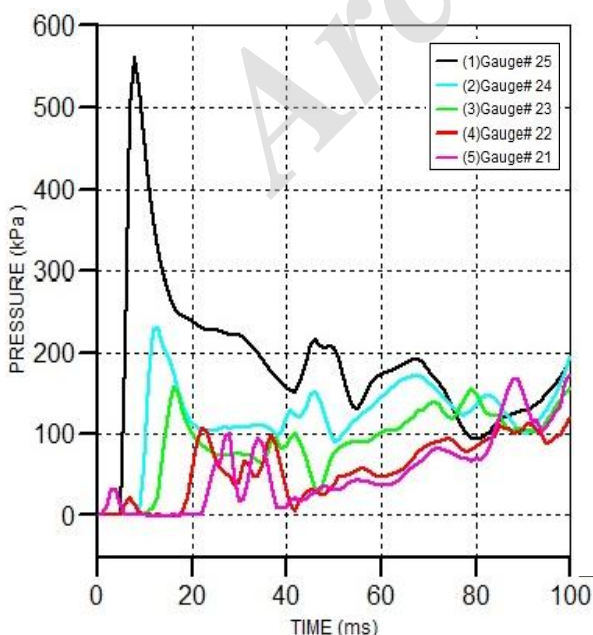
### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. مدل اول

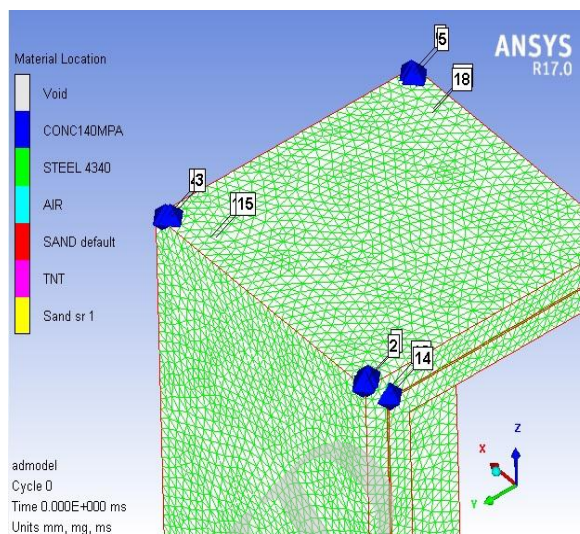
در این مدل، تمام ۱۸ متر ستون خاک موجود، ماسه پیش فرض برنامه است. جهت اطمینان از این که پیک فشارها و امواج در چه بازه‌ای از زمان رخ می‌دهند، لازم بود تا این مدل به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه تحلیل شود. با مشاهده نتایج معلوم شد که مدت زمان ۵۰ میلی‌ثانیه برای سایر مدل‌ها کافی است. پارامترهای بررسی شده در تحلیل‌های صورت گرفته عبارتند از تنش فون مایز، شتاب‌المان‌ها در حین انفجار و فشار گذرنده از عمق خاک در حین انفجار. شکل (۷) مرحله پایان تحلیل را نشان می‌دهد و نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۸) نشان شده است.



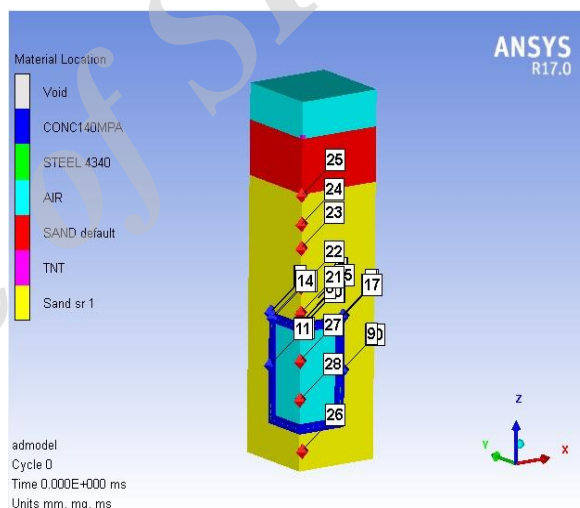
شکل ۷. وضعیت پایان تحلیل



شکل ۸. نمودار زمان - فشار گذرنده از خاک



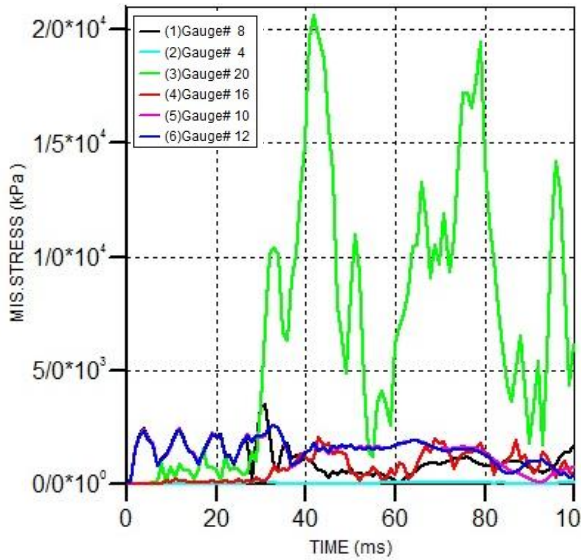
شکل ۵. نمونه‌ای از نحوه قرارگیری گیج‌ها بر روی بتن و پلیت فولادی



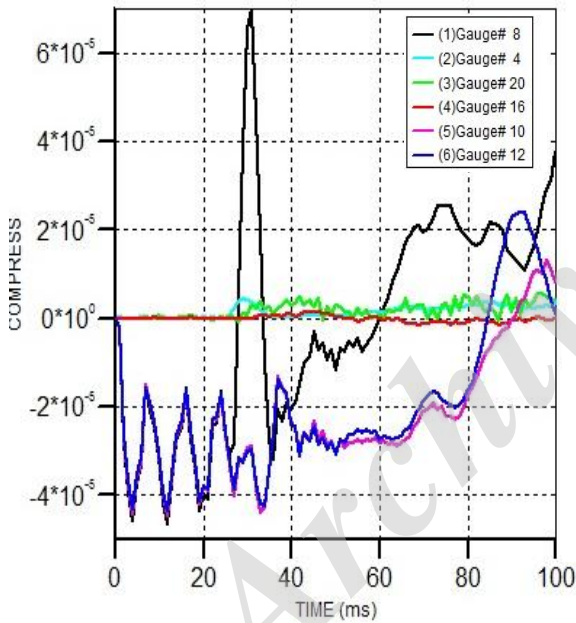
شکل ۶. شمای کلی گیج گذاری در محیط اوپلری و لاگرانژی

#### ۲-۶. بازه زمانی تحلیل و مدت زمان لازم جهت تحلیل

با بررسی پیشینه تحقیق و نیز استفاده از سعی و خطا مشخص گردید که مدت زمان بهینه‌ای که برای تحلیل می‌توان به نرم‌افزار معرفی کرد ۵۰ میلی‌ثانیه از لحظه شروع انفجار است. نتایج به‌دست‌آمده نیز نشان داده‌اند که پیک‌های اولیه امواج انفجار در ۵۰ میلی‌ثانیه، تولید شده، از سازه عبور کرده و میرا خواهند شد. در این تحقیق از بررسی استاتیکی مدل و سناریوهای قبل از انفجار صرف‌نظر شده است؛ زیرا با در نظر گرفتن شتاب جاذبه ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، حداقل ۱۰۰ میلی‌ثانیه اولیه جهت تحلیل استاتیکی و سپس ۵۰ میلی‌ثانیه جهت تحلیل انفجار یعنی مجموعاً ۱۵۰ میلی‌ثانیه زمان لازم است و این باعث طولانی شدن زمان تحلیل‌ها می‌گردد.



شکل ۱۱. نمودار زمان- تنش فون مایرز گج‌های المان سازه



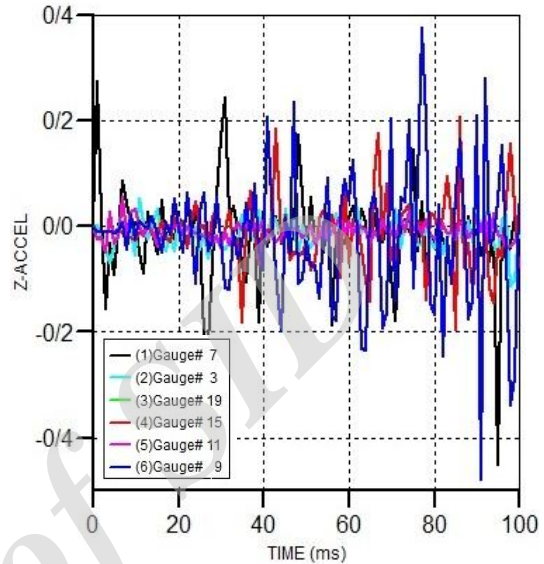
شکل ۱۲. نمودار زمان- فشردگی گج‌های المان سازه

۲-۳. مدل دوم

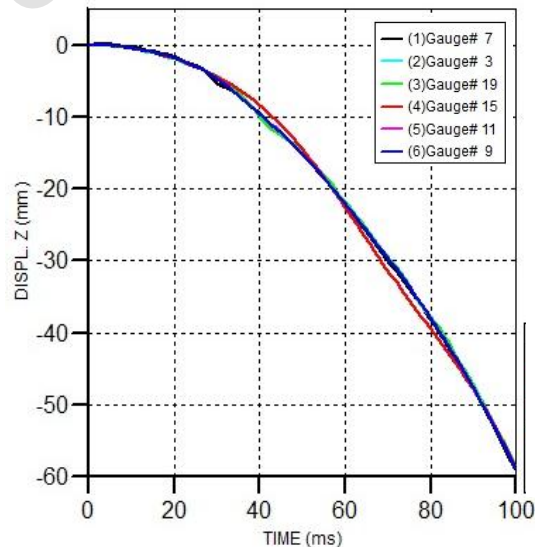
این مدل در سه حالت بررسی شده است:

- حالت اول: ۳ متر ابتدایی ستون خاک، رس ماسه‌ای با درجه اشباع صفر و مابقی، ماسه پیش فرض برنامه است.
  - حالت دوم: ۳ متر ابتدایی ستون خاک، رس ماسه‌ای با درجه اشباع ۰/۵ و مابقی ماسه پیش فرض برنامه است.
  - حالت سوم: ۳ متر ابتدایی ستون خاک، رس ماسه‌ای با درجه اشباع ۱ و مابقی ماسه پیش فرض برنامه است.
- شکل‌های (۱۳-۱۵) مرحله پایان تحلیل را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با بالا رفتن درصد اشباع رس

نمودار فوق نشان می‌دهد که با افزایش عمق، فشار کمتری از خاک عبور می‌کند. بیشینه فشار وارد مربوط به گج ابتدایی است که مقدار آن کمتر از ۶۰۰ کیلو پاسکال است. نتایج مربوط به گج‌های سقف سازه، پلیت فولادی و دیواره در شکل‌های (۹-۱۲) نشان داده شده است.

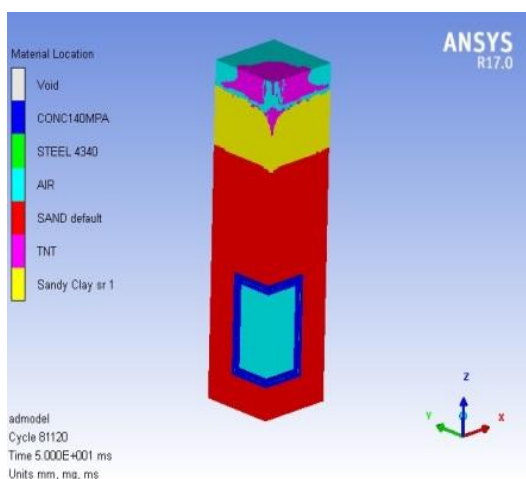


شکل ۹. نمودار زمان - شتاب در راستای z گج‌های نود سازه

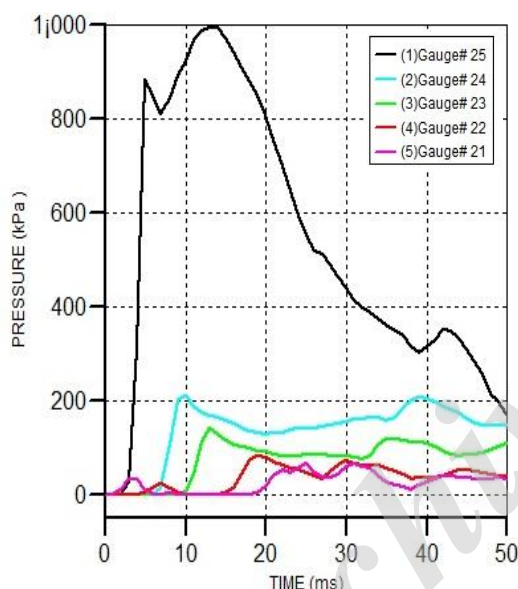


شکل ۱۰. نمودار زمان- جابجایی در راستای z گج‌های نود سازه

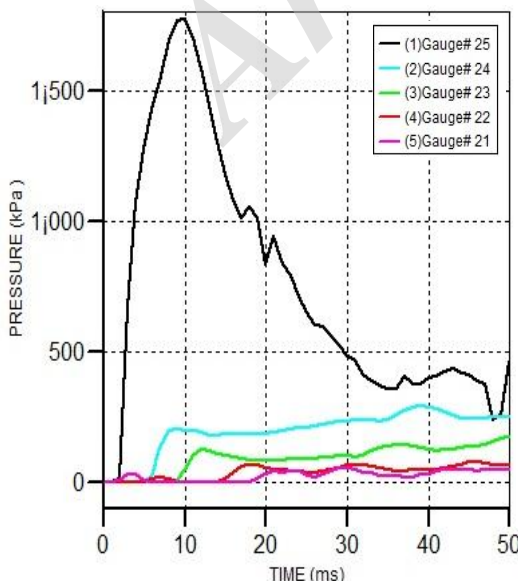
از آنجا که بارگذاری انفجار، شدید و در کسری از ثانیه است نوع خاک به صورت تک لایه در برابر امواج گذرنده از خاک تأثیری نداشته است. در بحث مربوط به پناهگاه می‌توان این نتیجه را گرفت که خاک ماسه پیش فرض نرم‌افزار سبب تشدید شتاب المان‌های دیواره سازه شده است. به‌علاوه مشخص گردید که استفاده از خاک پیش فرض برنامه با وجود تنش فون مایرز کم برای بتن سازه (حدود ۳۰۰۰ کیلو پاسکال)، سبب بالا رفتن این تنش برای صفحه فولادی تقویتی شده است.



شکل ۱۵. وضعیت پایان تحلیل برای حالت سوم



شکل ۱۶. نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای حالت اول

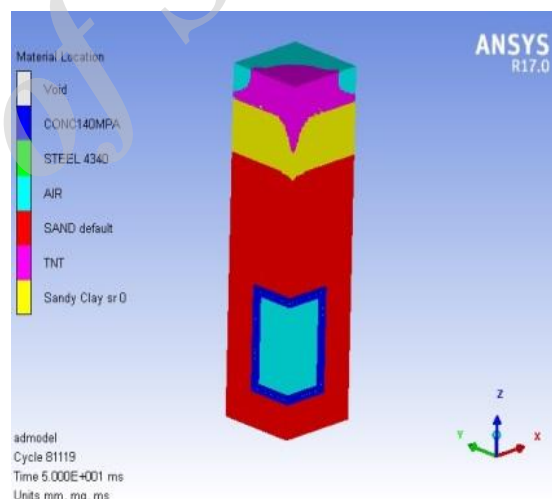


شکل ۱۷. نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای حالت دوم

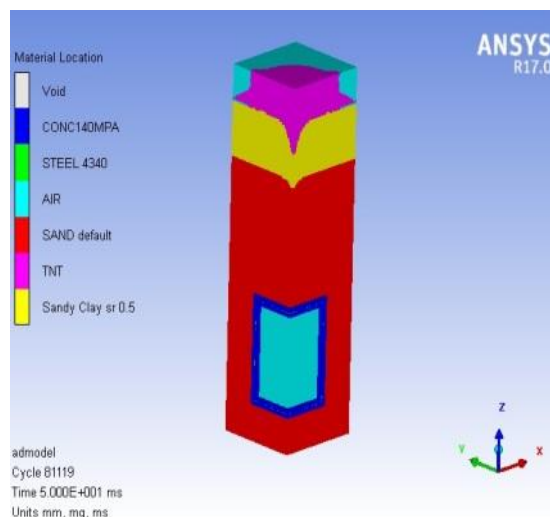
ماسه‌ای، کراتر ایجادشده بر اثر انفجار، کوچک‌تر شده است و حتی در حالت سوم، شاهد بازتاب TNT به سمت بالا و در خلاف جهت (روبه بالا) هستیم.

نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل‌های (۱۸-۱۶) نشان شده است.

با بررسی نمودارهای زمان- فشار گذرنده از خاک، مشخص می‌شود که با بالا رفتن درجه رطوبت و در نتیجه درجه اشباع لایه سطحی خاک که متشکل از رس ماسه‌ای است، مقدار فشار نیز بالا می‌رود به طوری که برای درجات اشباع ۰ و ۰/۵ و ۱، به ترتیب مقادیر ۱۰۰۰، ۱۷۰۰ و ۱۲۰۰۰ کیلوپاسکال به دست آمده است. بنابراین، در مقایسه با مقدار ۵۵۰ کیلوپاسکال مربوط به مدل اول، نتیجه گرفته می‌شود که وجود لایه رس ماسه‌ای باعث انتقال فشار بیشتر به لایه بعدی و وخیم‌تر شدن اوضاع شده است. نمودارهای جایجایی در راستای Z پناهگاه برای سه حالت فوق‌الذکر در شکل‌های (۲۱-۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۳. وضعیت پایان تحلیل برای حالت اول

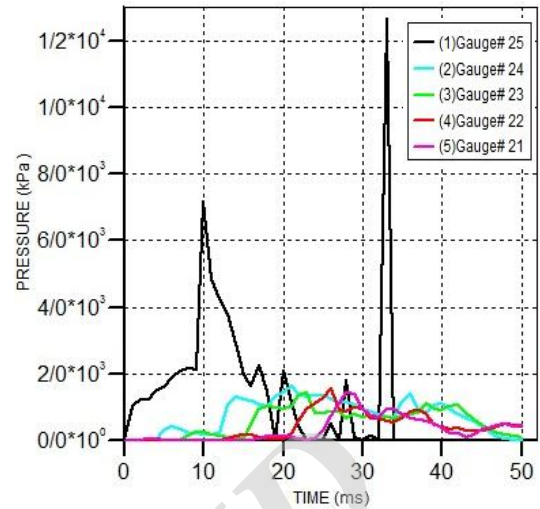
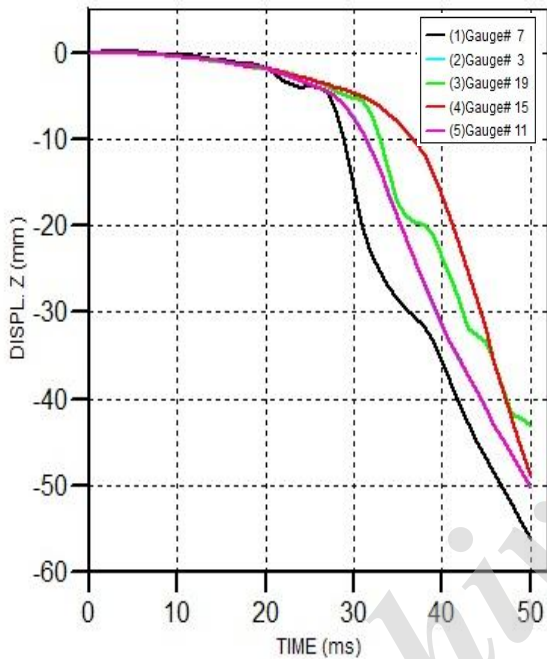


شکل ۱۴. وضعیت پایان تحلیل برای حالت دوم

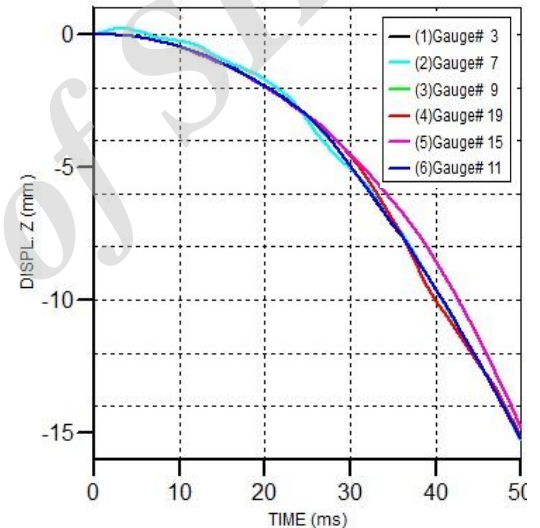


همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین جابجایی مربوط به حالت سوم است که در بازه هدف ۳۰ میلی‌ثانیه، حدود ۲۰ میلی‌متر جابجایی حاصل شده؛ در صورتی که در حالت اول، مقدار جابجایی حدود ۵ میلی‌متر است. این مسئله نشان می‌دهد که وجود رس ماسه‌ای اشباع در سطح باعث ایجاد جابجایی بیشتر در پناهگاه و در نتیجه کاهش ایمنی شده است.

در شکل‌های (۲۲-۲۴) نمودارهای تنش فون مایزر در راستای Z پناهگاه برای هر سه حالت نشان داده شده است.

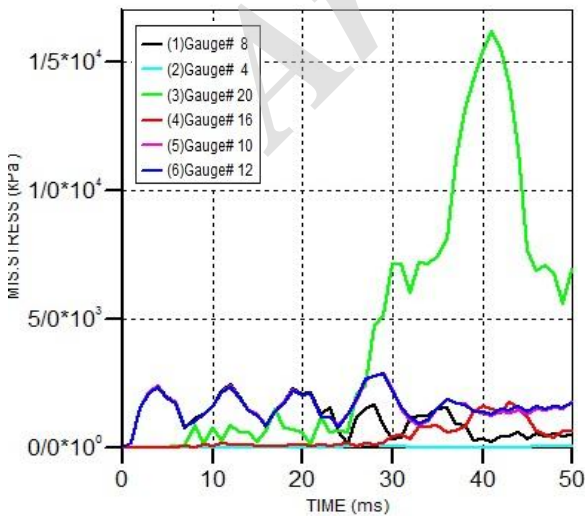


شکل ۱۸. نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای حالت سوم

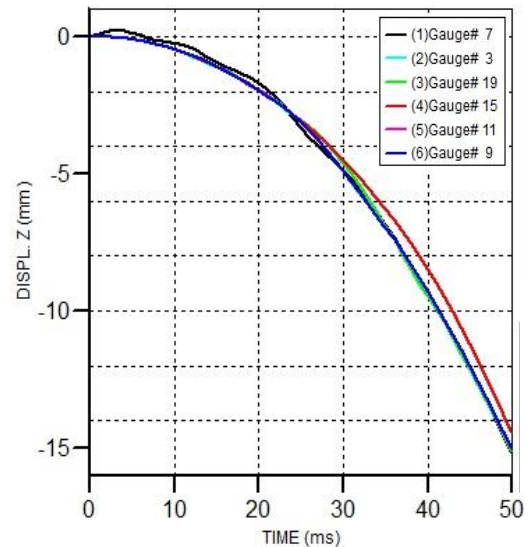


شکل ۱۹. نمودار زمان- جابجایی در راستای Z پناهگاه برای حالت اول

شکل ۲۱. نمودار زمان- جابجایی در راستای Z پناهگاه برای حالت سوم



شکل ۲۲. نمودار زمان- تنش فون مایزر پناهگاه برای حالت اول



شکل ۲۰. نمودار زمان- جابجایی در راستای Z پناهگاه برای حالت دوم

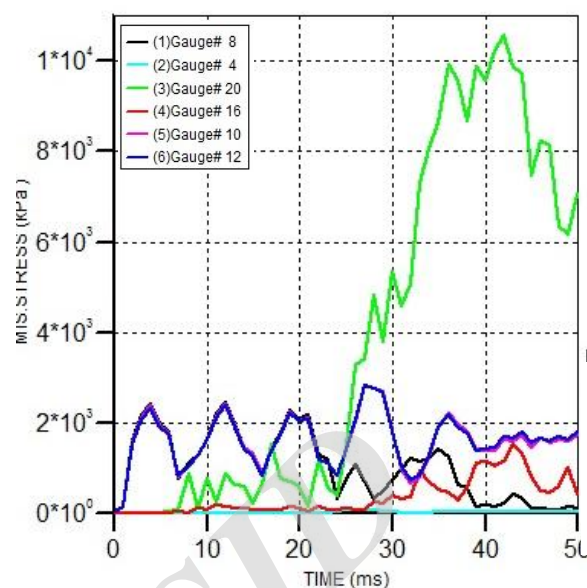
لازم به ذکر است که در مقایسه با مدل اول، وجود یک لایه رس ماسه‌ای خشک باعث کاهش یافتن تنش فون مایرز در بازه ۵۰ میلی ثانیه گشته به گونه‌ای که وجود این لایه باعث کاهش تنش در پلیت فولادی به مقدار ۵۰۰ کیلو پاسکال شده است. از آنجا که این مقدار کاهش تنش ناچیز است، نمی‌توان گفت که وجود لایه رس ماسه‌ای خشک در سطح، مفید است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

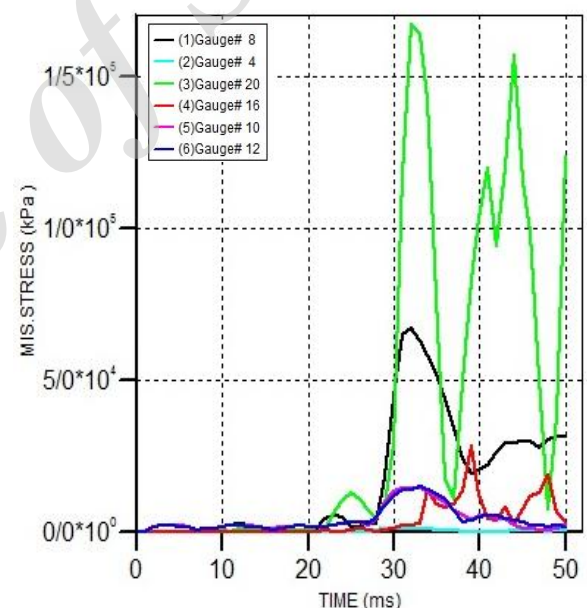
نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نوع خاک به صورت تک لایه، در برابر امواج گذرنده از خاک تأثیری نداشته و لذا خاک ماسه‌ای تک لایه، خاک مناسبی جهت ساخت پناهگاه زیرزمینی مقاوم در برابر انفجار است. وجود خاک‌های دیگر از قبیل رس ماسه‌ای با درجات اشباع ۰، ۰/۵ و ۱ سبب بالا رفتن مقادیر شتاب، تنش و ... شده است. بالا رفتن درجه اشباع لایه خاک، موجب افزایش فشار گذرنده از خاک و در نتیجه افزایش تنش فون مایرز سیستم بتن و فولاد شده و به عبارتی منجر به وخامت اوضاع گردیده است. در بحث مربوط به پناهگاه، مشخص گردید که خاک ماسه‌ای پیش‌فرض نرم‌افزار، سبب تشدید شتاب المان‌های دیواره سازه شده و خاک رس ماسه‌ای سبب تشدید المان‌های سقف سازه گردیده است. در این میان، فقط خاک ماسه با درجه اشباع ۰، موجب کاهش شتاب المان‌های دیواره و سقف سازه شده است. علاوه بر این می‌توان در حیطه بهسازی پناهگاه‌های موجود، از نتایج این تحقیق استفاده نمود؛ به نحوی که اگر در ساخت گاه پناهگاه‌ها، لایه رس مرطوب و اشباع وجود داشته باشد، از طریق زهکش‌ها و یا جایگزینی لایه رس با ماسه می‌توان مقاومت پناهگاه‌های زیرزمینی در برابر انفجار را افزایش داد.

#### ۵. مراجع‌ها

- [1] Lu, Y.; Wang, Z.; Chong, K. "A Comparative Study of Buried Structure in Soil Subjected to Blast Load Using 2D and 3D Numerical Simulations"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2005, 25, 275-288.
- [2] Ambrosini, R. D.; Luccioni, B. M.; Danesi, R. F.; Riera, J. D.; Rocha M. M. "Size of Craters Produced by Explosive Charges on or Above the Ground Surface"; *Shock Waves* 2002, 12, 69-78.
- [3] Wang, Z.; Lu, Y. "Numerical Analysis on Dynamic Deformation Mechanism of Soils under Blast Loading"; *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2003, 23, 705-714
- [4] Wang, Z.; Lu, Y.; Bai, Ch. "Numerical Simulation of Explosion-Induced Soil Liquefaction"; *Finite Elem. Anal. Des.* 2011, 47, 1079-1090.
- [5] Yang, Y.; Xie, X.; Wang, R. "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion"; *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2010, 2, 373-384.



شکل ۲۳. نمودار زمان-تنش فون مایرز پناهگاه برای حالت دوم



شکل ۲۴. نمودار زمان-تنش فون مایرز پناهگاه برای حالت سوم

با بررسی نمودارهای زمان-تنش فون مایرز، این نتیجه به دست می‌آید که بالا رفتن درجه اشباع خاک باعث بالا رفتن تنش در المان‌های پناهگاه می‌شود. به طور مثال در پلیت فولادی حالت اول، تنش حدود ۱۶۰۰۰ کیلو پاسکال است؛ در حالی که در حالت سوم، مقدار تنش به ۱۶۰۰۰۰ کیلو پاسکال رسیده است. به علاوه بیشترین آسیب به گنج ۸ (مرکز سازه در زیر محل وقوع انفجار) و گنج ۲۰ (مربوط به پلیت فولادی) وارد شده است.

نتایج مربوط به مدل دوم نشان می‌دهد که وجود لایه رس ماسه‌ای با درجات اشباع ۰ و ۰/۵ و ۱ منجر به اضافه شدن تنش‌ها، بالا رفتن جابجایی‌ها و وخیم‌تر شدن اوضاع شده است.

- [14] Laine, L.; Sandvik, A. "Derivation of Mechanical Properties for Sand"; 4<sup>th</sup> SILOS, CI-Premier LTD. 2001, 361-367.
- [15] Riedel, W.; Kawai, N.; Kondo, K. "Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in Concrete Materials"; Int. J. Impact Eng. 2008, 36, 283.
- [16] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; Eng. Fract. Mech. 1985, 21, 31-48.
- [17] Rogers, G. F. C.; Mayhew, Y. R. "Thermodynamic and Transport Properties of Fluids"; Oxford: Blackwell, 2014.
- [18] Lee, E.; Finger, M.; Collins, W. "JWL Equations of State Coefficients for High Explosives"; Technical Report, NSA-28-007802, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 1973.
- [19] Grujicica, M.; Pandurangana, B.; Summersa, J. D.; Cheeseman, B. A.; Royb, W. N.; Skaggs, R. R. "Application of the Modified Compaction Material Model to the Analysis of Landmine Detonation in Soil with Various Degrees of Water Saturation"; Shock Vib. 2008, 15, 79-99.
- [20] Grujicic, M.; Pandurangan, B.; Coutris, N.; Cheeseman, B. A.; Roy, W. N.; Skaggs, R. R. "Derivation, Parameterization and Validation of a Sandy-Clay Material Model for Use in Landmine Detonation Computational Analyses"; J. Mater. Eng. Perform. 2010, 10, 434-450.
- [6] Feldgun, V. R.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. "Blast Pressure Distribution on a Buried Obstacle in a Porous Wet Soil"; Int. J. Prot. Struct. 2011, 2, 45-70.
- [7] De, A. "Numerical Simulation of Surface Explosion over Dry Cohesionless Soil"; Comput. Geotech. 2012, 43, 72-79.
- [8] Higgins, W.; Chakraborty, T.; Basu, D. "A High Strain-Rate Constitutive Model for Sand and its Application in Finite-Element Analysis of Tunnels Subjected to Blast"; Int. J. Numer. Anal. Method. Geomech. 2012, 37, 2590-2610.
- [9] Gholizad, A.; Abedi Eivrih, E. "Reliability Analysis of Structures under Blast Loading"; J. Passive Defence Sci. & Technol. 2017, 1, 19-31 (In Persian).
- [10] Karinski, Y. S.; Feldgun, V. R.; Yankelevsky, D. Z. "Mach Stem due to an Underground Explosion near a Rigid Structure Buried in Soil"; Shock Waves 2015, 25, 63-76.
- [11] Chen, H. L.; Jin, F. N.; Fan, H. L. "Elastic Responses of Underground Circular Arches Considering Dynamic Soil-Structure Interaction: A Theoretical Analysis"; Acta Mech. Sinica. 2013, 29, 110-12.
- [12] Mobaraki, B.; Vaghefi, M. "Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of Tunnel under Surface Explosion"; Tunn. Undergr. Sp. Tech. 2015, 47, 114-122.
- [13] Busch, C. L.; Aimone-Martin, C. T.; Tarefder, R. A. "Experimental Evaluation and Finite-Element Simulations of Explosive Airblast Tests on Clay Soils"; Int. J. Geomech. 2016, 16, 04015097.

Archive 01