

بررسی اثر لایه بندی خاک بر فشار و شتاب وارد بر زیستگاه های زیرزمینی تحت اثر انفجار سطحی

پرهام مهدی پور قزوینی^۱، وحید حسینی تودشکی^{۲*} و محمدحسین نوری قیداری^۳

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک

۲- استادیار، گروه عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. v.h.toudeshki@iauz.ac.ir

۳- استادیار، گروه عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

چکیده

پاسخ زیستگاه های زیرزمینی به بارگذاری حاصل از انفجار سطحی، موضوعی مهم در حفاظت محیط زیست است. زیستگاه های زیرزمینی اغلب به صورت غارهای کوچک و بزرگ و همچنین به شکل سفره های آب زیرزمینی در زیر رشته کوه ها و در نقاط مختلف کره زمین یافت می شوند. تاکنون مطالعات زیادی بر روی پارامترهای مختلف از جمله پاسخ زمین، پاسخ سازه، آزمایش های میدانی و ... صورت گرفته است؛ اما هنوز جنبه های مجهول و مبهم فراوانی در زمینه انفجار و تأثیر آن بر محیط خاک و سازه وجود دارد. در این تحقیق، تأثیر لایه بندی خاک بر روی ایمنی یک زیستگاه زیرزمینی از جهت میزان شتاب و انتقال فشار وارد بر آن بررسی شده است. جهت مدل سازی زیستگاه زیرزمینی، از نرم افزار اتوداین کمک گرفته شده و در مدل سازی ها 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 داده ها با استفاده از گیج های قرار داده شده در مدل، ثبت شده است. نتایج به دست آمده نشان داده که وجود لایه رس ماسه ای در سطح باعث انتقال فشار بیشتر به لایه بعدی و وخیم تر شدن اوضاع شده است. همچنین وجود رس ماسه ای خشک در زیر لایه ماسه ای باعث افزایش مقدار شتاب شده است.

واژگان کلیدی: انفجار سطحی، زیستگاه زیرزمینی، اتوداین، لایه بندی خاک، مدلسازی.

مقدمه

زیستگاه های زیرزمینی را می توان به روش های نیمه مدفون و مدفون نیز اجرا کرد. در روش مدفون و نیمه مدفون، ضخامت خاک روی زیستگاه زیرزمینی باید حداقل به اندازه نصف کوچک ترین بعد زیستگاه بوده و مجموع ضخامت خاک و بتن باید بزرگ تر از عمق نفوذ بمب های نفوذگر باشد. در ساخت زیستگاه زیرزمینی بهتر است از خاک های تراکم پذیر و یا از شن شکسته با دانه بندی درشت استفاده شود. مطالعه و بررسی موضوعات مربوط به انفجار سطحی می تواند از طریق آزمایش های صحرائی، شبیه سازی های آزمایشگاهی و مدل سازی عددی صورت گیرد. مدل سازی عددی تنها روشی است که می توان به راحتی آن را اجرا

زیستگاه ها به مکان هایی اطلاق می شود که موجودات زنده در آن جا زندگی می کنند. فاکتورهای زیادی در تعیین نوع زیستگاه موجودات زنده دخیل هستند. زیستگاه ها بر چهار نوع می باشند: زیستگاه های خشکی، زیستگاه های آبی، زیستگاه های هوایی و زیستگاه های زیرزمینی.

زیستگاه های زیرزمینی اغلب به صورت غارها و همچنین به شکل سفره های آب زیرزمینی در زیر رشته کوه ها و در نقاط مختلف کره زمین یافت می شوند. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه حفاظت از این سفره های آب زیرزمینی صورت گرفته است (مجبی و اصغری مقدم، ۱۳۹۷؛ زرنگ و همکاران، ۱۳۹۶؛ قاسمی و تقوی، ۱۳۹۵). با این حال،

را در آنالیز المان محدود تونل‌های تحت بار انفجار، بررسی نمایند. نتیجه به دست آمده نشان داد که در خاک‌های پر چگال تر، سرعت انتشار امواج ناشی از انفجار بیشتر است.

بررسی‌های (قلی زاد و عابدی ایوریق، ۱۳۹۶) 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، ۲۰۱۵) 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 آنالیز توزیع فشار بر محیط سازه‌های زیرزمینی ناشی از انفجار، در حوزه نزدیک سازه بررسی شده است. (چن و همکاران، ۲۰۱۳) طی تحقیقی با محوریت بررسی پاسخ الاستیک قوس‌های دایره‌ای تحت بار انفجار زیرزمینی که در آن اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است، راه‌حل محاسبه لرزه‌ای این سازه‌ها را به دست آوردند. (مبارکی و واقفی، ۲۰۱۵) 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، ۲۰۱۶) ارزیابی گردیده است. تأثیر انفجارهای داخلی متوالی بر مقاومت یک اتاقک آزمون ساخته شده از بتن مسلح توسط (سوری و همکاران، ۱۳۹۷) بررسی شده است.

در این تحقیق سعی شده است از طریق بررسی لایه بندی خاک، نتایجی را به دست آورد که بتوان از آن‌ها در روند انتخاب محل زیستگاه‌های زیرزمینی و یا طراحی آن‌ها استفاده نمود.

روش تحقیق

در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود اتوداین استفاده شده است. جهت اعتبارسنجی نرم‌افزار، تحقیقی که (لین و سندویک، ۲۰۰۱) بر روی ماسه

نمود. ضمن آن‌که از سرعت تحلیل بالایی نیز برخوردار بوده و نتایج آن از صحت و دقت خوبی برخوردار است. در این راستا، مدل‌سازی انفجار در آب با دو روش دارای شبکه‌بندی (از دو دیدگاه اولری و لاگرانژی) و بدون شبکه SPH توسط (کریمی فرزقی و نادری، ۱۳۹۴) صورت گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داده است که با استفاده از روش بدون شبکه، می‌توان فشار انفجار را تا فاصله کمتری از مرکز انفجار نسبت به روش‌های دارای شبکه بندی تعیین کرد.

(امبروسینی و همکاران، ۲۰۰۲) طی مجموعه آزمایش‌های صحرایی سعی نموده‌اند تا ابعاد کراتر ایجاد شده 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، ۲۰۰۳) صورت گرفته است. همچنین 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 (یانگ و همکاران، ۲۰۱۰) بررسی شده است. (فلدگون و همکاران، ۲۰۱۱) مطالعه‌ای بر روی توزیع فشار انفجار بر روی یک سازه مدفون در خاک متخلخل مرطوب انجام دادند. در این تحقیق از مدل خاک سه فازی استفاده شده تا تأثیر هر سه پارامتر آب، هوا و اجزای جامد خاک بررسی شوند. بررسی قابلیت اعتماد سازه بتن آرمه مدفون در خاک متأثر از انفجار سطحی توسط (امامزاده و همکاران، ۱۳۹۷) صورت گرفته است. مطالعاتی با محوریت شبیه‌سازی عددی انفجار سطحی بر روی خاک خشک و غیر چسبنده توسط (دی، ۲۰۱۲) صورت گرفته که در آن رفتار خاک خشک و غیر چسبنده در صورت وقوع یک انفجار سطحی بررسی شده است. (هیگینز و همکاران، ۲۰۱۲) طی تحقیقی سعی کردند یک مدل با نسبت کشش بالا برای ماسه ساخته و کاربرد آن

مدل سازی

در این تحقیق، جهت مدل سازی انفجار از دو محیط اویلری و لاگرانژی استفاده شده است. استفاده از محیط و معادلات حاکم بر فضای لاگرانژی، جهت تحلیل بتن و فولاد مصرفی موجود در سازه توصیه می شود. به طور کلی می توان گفت از معادلات لاگرانژی جهت تحلیل مواد و مصالح صلب استفاده می شود. فضای لاگرانژی این تحقیق شامل یک زیستگاه زیرزمینی به ابعاد بیرونی ۶*۶*۶ متر و ضخامت دیواره ۰/۵ متر بوده که فضای داخلی قابل استفاده 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 المان های آن بر اثر انفجار به سرعت بسیار بالایی می رسند و جابجایی بسیار زیادی در زمان کمی خواهند داشت. بنابراین توصیه می شود جهت مدل سازی هوا، TNT و خاک که در محدوده شعاع موثر امواج اولیه انفجار هستند از محیط اویلر استفاده شود.

مشخصات مصالح

جهت اطمینان از درستی مشخصات مصالح، تا حد امکان سعی شده است از مصالح پیش فرض برنامه اتوداین استفاده شود. در ادامه مشخصات مصالح مصرفی به کاررفته در مدل سازی ها بررسی می شود.

هوا: هوای استفاده شده در مدل سازی از مصالح پیش فرض برنامه است. مشخصات ترمودینامیکی و انتقال امواج آن توسط (روجرز و مایو، ۲۰۱۴) استخراج و در نرم افزار به کار گرفته شده است.

TNT: خرج انفجاری در نظر گرفته شده جهت وقوع انفجار از نوع TNT است که جزو مصالح پیش فرض نرم افزار اتوداین است. حجم خرج انفجاری TNT، ۳۲۰۰۰ سانتی مترمکعب یا به عبارتی معادل ۵۲/۱۶ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده است. مشخصات رفتاری TNT استخراج گردیده؛ و معادلات احتراق و انفجار JWL حاکم بر این ماده

انجام داده اند، مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق برای نمونه ای به قطر ۳۸ و ارتفاع ۹۰ میلی متر از طریق فرمول های ریاضی، U_p و U_s های مختلف محاسبه گردیده که در جدول (۱) نشان داده شده اند. با مقایسه جدول های (۱) و (۲) مشاهده می شود که اختلاف بسیار جزئی و کوچکی بین محاسبات ریاضی و تحلیل نرم افزاری وجود دارد که این مسئله بر درستی عملکرد نرم افزار صحت می گذارد.

جدول ۱- نتایج به دست آمده از محاسبات لین و سندویک

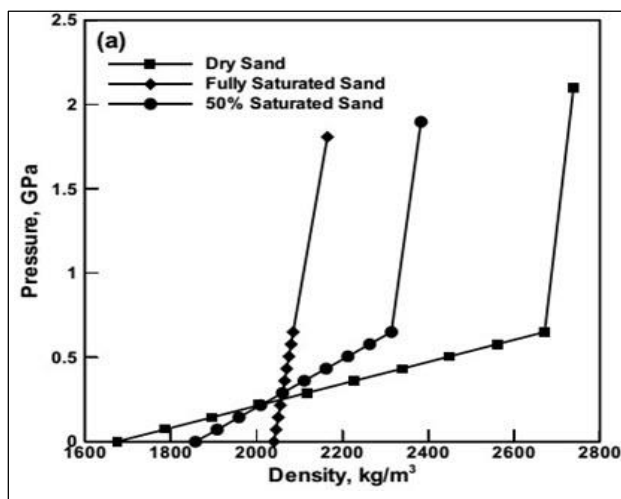
(۲۰۰۱)

$\rho_i \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	P_i (Mpa)	$U_p \left(\frac{m}{s}\right)$	$U_s \left(\frac{m}{s}\right)$
۱۶۷۴	۰۰/۰	۰۰/۰	۲۶۵/۲
/۵	۴/۵۸	۱۰/۱۵	۲۶۹/۷
/۸	۱۴/۹۸	۳۰/۸۹	۲۸۹/۷
۱۹۹۷	۲۹/۱۵	۵۳/۰۷	۳۲۸/۱
/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
/۳	۶۵۰/۷	۳۸۰/۹	۱۰۲۰/۴

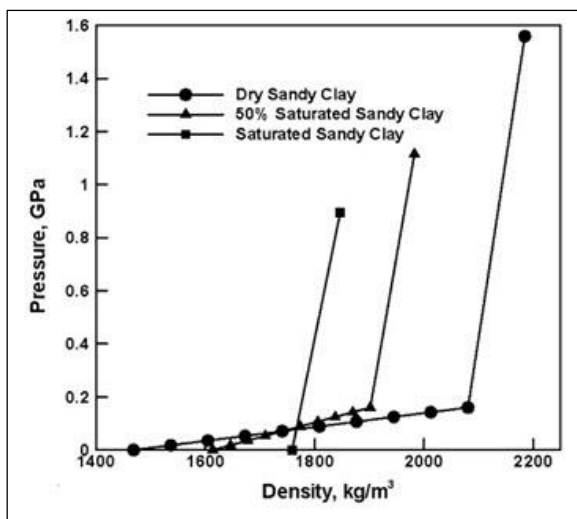
جدول ۲- نتایج به دست آمده از نرم افزار

$\rho_i \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	P (Mpa)	$U_p \left(\frac{m}{s}\right)$	$U_s \left(\frac{m}{s}\right)$
۱۷۳۹/۵	۴/۶۳	۱۰/۱۵	/۷
۱۸۷۳/۸	۱۴/۷۹	۳۰/۸۹	/۴
۱۹۹۷	۲۹/۱۸	۵۳/۰۷	/۷
۲۱۴۳/۸	۵۹/۱۱	۸۸/۰۲	۴۰۲
۲۲۵۰	۹۸/۱۳	۱۲۲/۵	/۱
۲۳۸۰	۱۷۹/۴	۱۷۸/۳	/۸
۲۴۸۵	۲۸۸/۹	۲۳۷/۶	۷۲۷
۲۵۸۵	۴۴۸	۳۰۷/۹	۸۶۹
۲۶۷۱/۳	۶۵۰/۳	۳۸۰/۹	۱۰۱

از خاک‌های استفاده شده در مدل‌سازی می باشد که در واقع رس ماسه ای با درجه اشباع ۰ است. این نوع خاک و مشخصات و رفتار آن تحت بارگذاری انفجار توسط گروچیسیک و همکاران (۲۰۱۰) طی آزمایش‌های تجربی و آزمایشگاهی مشخص گردیده و به صورت نمودارهایی ترسیم شده است (شکل ۲). اعداد و ارقام به دست آمده از این نمودارها، با تعریف یک خاک جدید در نرم‌افزار وارد می‌شوند.



شکل ۱- نمودار چگالی - فشار ماسه در درجات اشباع مختلف (گروچیسیک و همکاران، ۲۰۰۸)



شکل ۲- نمودار چگالی - فشار رس ماسه ای در درجات اشباع مختلف (گروچیسیک و همکاران، ۲۰۱۰)

مشخص شده و در نرم‌افزار قرار گرفته است. مشخصات TNT استفاده شده در این تحقیق در جدول (۳) نشان داده شده است.

فهرست علائم اختصاری	
چگالی اولیه	ρ_i
فشار اولیه	P_i
سرعت ذره	U_p
سرعت موج انفجار	U_s
فشار	P
پارامترهای معادله JWL	ω, R_2, R_1, B, A
پارامترهای چپمن - جیگی	C-J

جدول ۳- مشخصات JWL برای TNT (لی و همکاران، ۱۹۷۳)

مقدار	مشخصات
$3/74E+11$	پارامتر A (پاسکال)
$3/75E+9$	پارامتر B (پاسکال)
$4/15$	پارامتر R_1
$0/9$	پارامتر R_2
$0/35$	پارامتر ω
۶۹۳۰	C-J انفجار
$3/68E+6$	انرژی 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 خشک و همچنین رس ماسه‌ای خشک. 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 خشک در واقع ماسه با درجه اشباع ۰ است که مشخصات آن با انجام آزمایش‌های تجربی و آزمایشگاهی توسط گروچیسیک و همکاران (۲۰۰۸) تحت بار انفجار، استخراج شده و به صورت نمودارهایی ترسیم شده است (شکل ۱). رس ماسه‌ای خشک نوع دیگری

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 مش بندی نیز در این دو محیط به صورت مجزا انجام گیرد. برای مش بندی سازه بتنی و پلیت فولادی از المان‌های ۱۰ سانتی متری استفاده شده که در محیط لاگرانژی صورت گرفته است. برای TNT، هوا و محیط خاکی نیز از المان‌های اویلری ۱۰ سانتی متری استفاده شده است. لازم به ذکر است که کیفیت مش بندی توسط نرم‌افزار جانبی گامبیت بررسی گردید و از معیار سلامت ۱۰۰ درصد، نمره ۸۳ به کیفیت مش داده شد که نمره مناسبی است.

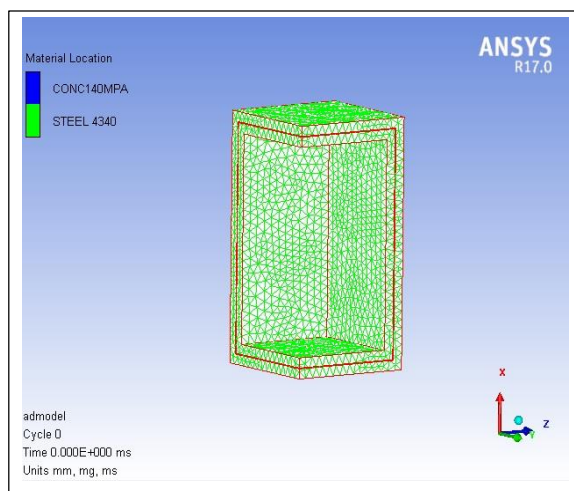
شرایط مرزی

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل از نوع فلوآوت 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.

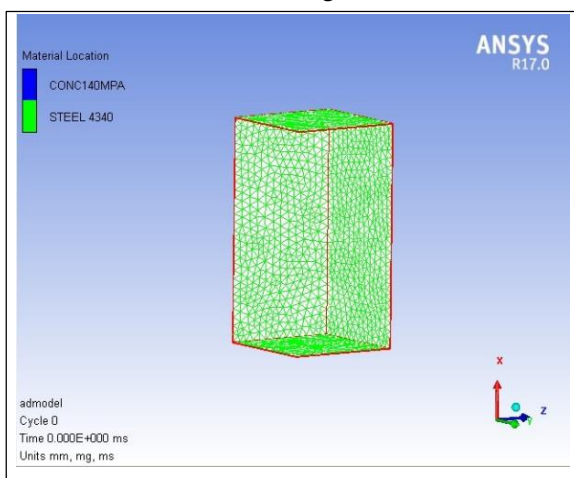
تقارن یک چهارم

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 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، همان طور که یک‌چهارم هوا، خاک، سازه و پلیت فولادی مدل می‌شود، این امر در مورد TNT نیز صادق بوده و فقط باید یک‌چهارم آن مدل شود. شکل‌های (۳) تا (۶) مربوط به مدل‌سازی با تقارن یک‌چهارم و مش بندی مربوط به آن است.

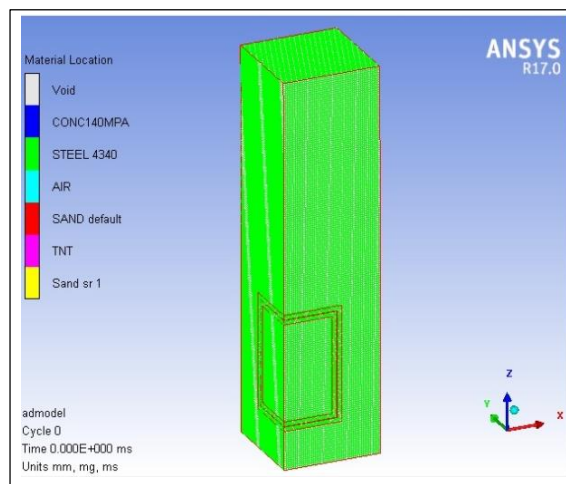


شکل ۳- مدل زیستگاه زیرزمینی با تقارن یک‌چهارم و مش بندی آن

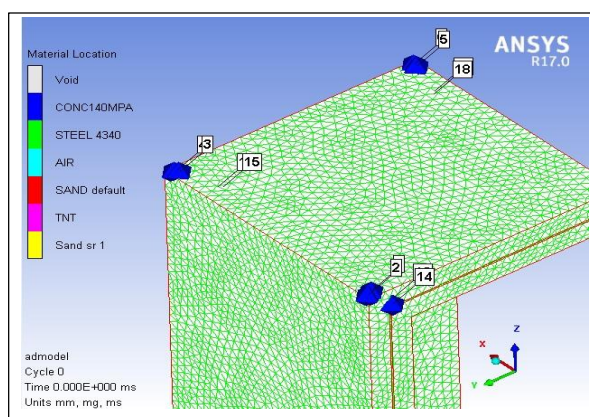


شکل ۴- پلیت فولادی به ضخامت ۲ سانتی‌متر با تقارن یک‌چهارم که جایگزین شبکه میل‌گرد شده است

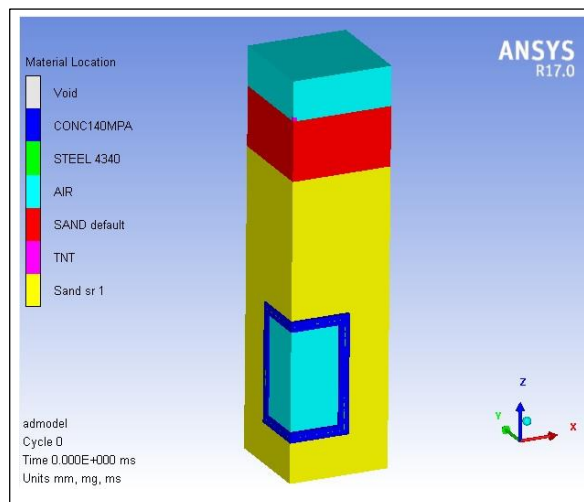
لازم به ذکر است که سه نوع گیج را می‌توان در نرم‌افزار اتوداین استفاده کرد که این گیج‌ها عبارت‌اند از گیج‌های سوار بر المان، گیج‌های سوار بر نود و گیج‌های فیکس. از دو نوع اول، در محیط لاگرانژی مربوط به سازه زیستگاه زیرزمینی استفاده می‌شود. از گیج‌های فیکس نیز می‌توان در محیط اویلری مربوط به خاک، هوا و TNT استفاده نمود. گیج‌های شماره ۱ تا ۲۰ از نوع المان و نود بوده و برای زیستگاه زیرزمینی تعریف شده‌اند و از گیج‌های شماره ۲۱ تا ۲۸ در محیط اویلری و برای خاک و هوا استفاده شده است. محل گیج‌ها در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



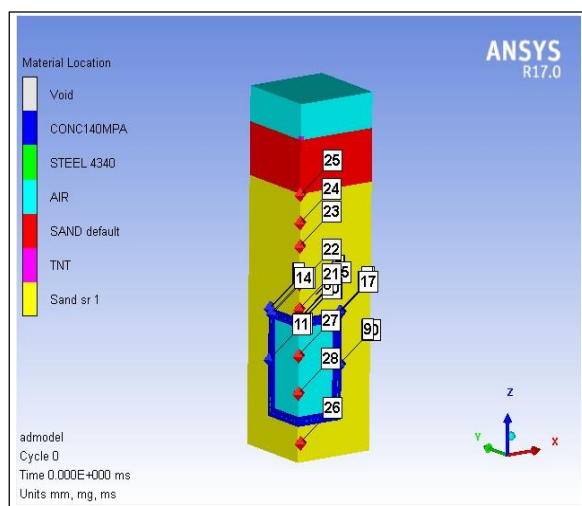
شکل ۵- محیط اویلری حاوی خاک، هوا و TNT با تقارن یک‌چهارم و مش بندی آن



شکل ۷- نمونه‌ای از نحوه قرارگیری گیج‌ها بر روی بتن و پلیت فولادی

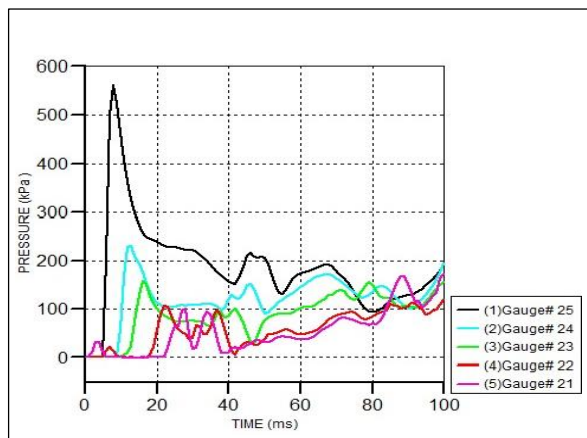


شکل ۶- مدل نهایی با تقارن یک‌چهارم پس از اختصاص دادن مصالح

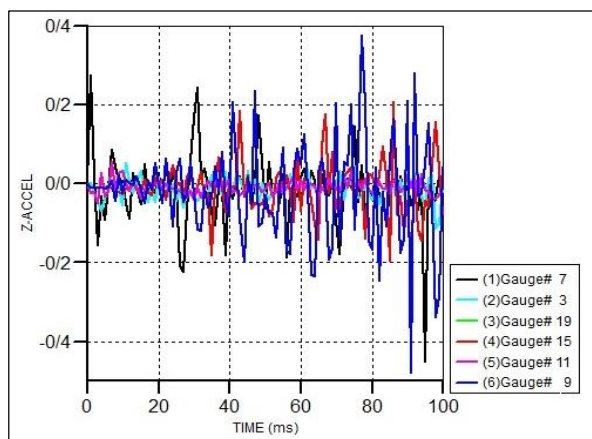


شکل ۸- شمای کلی گیج گذاری در محیط اویلری و لاگرانژی

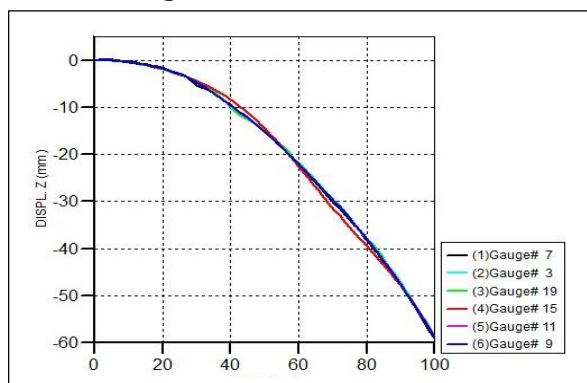
جهت برداشت نتایج پس از تحلیل، لازم است که تعدادی گیج در نقاط مورد نظر قرار داده شود تا بتوان نتایج مورد نیاز را برداشت نمود. تنوع نتایجی که می‌توان برای هر گیج تعریف کرد بسیار زیاد بوده و می‌توان بسیاری از اهداف از جمله تنش، جابه‌جایی، فشار و بسیاری دیگر از هدف‌ها را برای یک گیج تعریف کرد. به دلیل حساسیت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



شکل ۱۰- نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای مدل اول نمودار نشان می‌دهد که با افزایش عمق، فشار کمتری از خاک عبور می‌کند. بیشینه فشار وارد مربوط به گیج ابتدایی است که مقدار آن کمتر از ۶۰۰ کیلو پاسکال است. نتایج مربوط به گیج‌های سقف سازه، پلیت فولادی و دیواره در شکل‌های (۱۱ تا ۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودار زمان - شتاب در راستای Z گیج‌های نود سازه



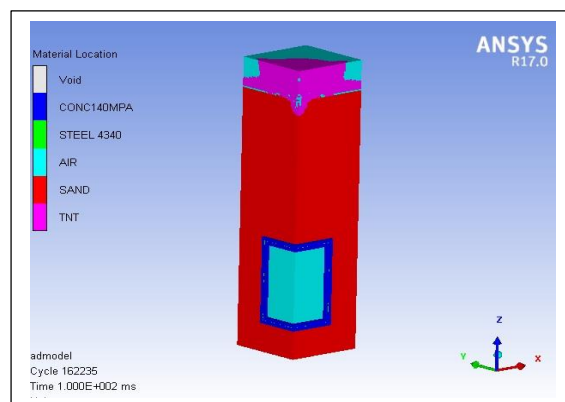
شکل ۱۲- نمودار زمان - جابجایی در راستای Z گیج‌های نود سازه برای مدل اول

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 به دست آمده 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.

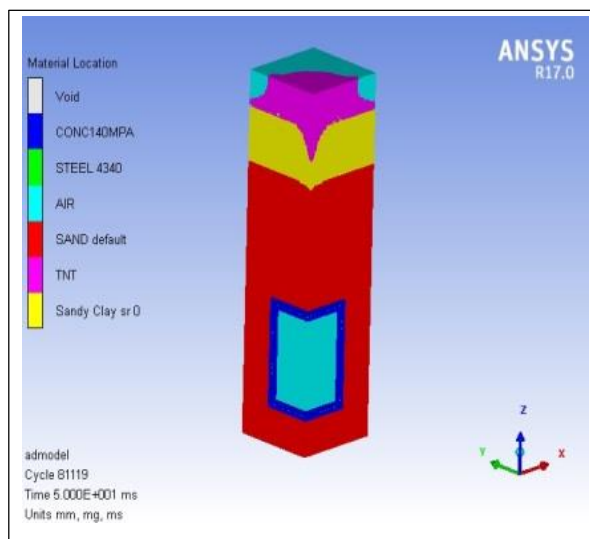
بحث و نتایج

مدل اول: در این مدل، تمام ۱۸ متر ستون خاک موجود، ماسه پیش‌فرض برنامه است. جهت اطمینان از این‌که 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 بررسی‌شده در تحلیل‌های صورت گرفته عبارت‌اند از تنش فون مایزر، شتاب المان‌ها در حین انفجار و فشار گذرنده از عمق خاک در حین انفجار. شکل (۹) مرحله پایان تحلیل را نشان می‌دهد و نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۱۰) نشان شده است.

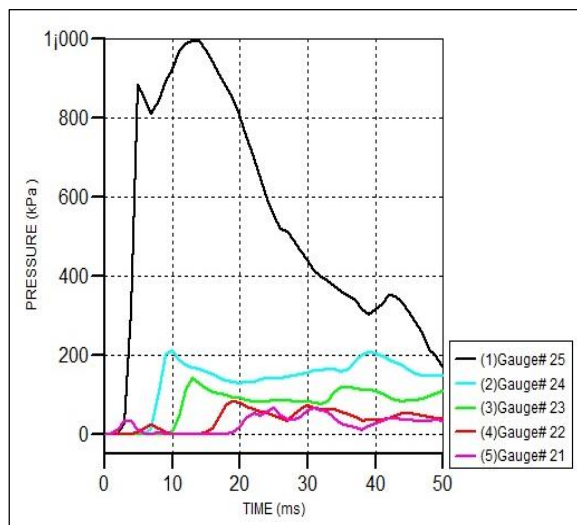


شکل ۹- وضعیت پایان تحلیل برای مدل اول

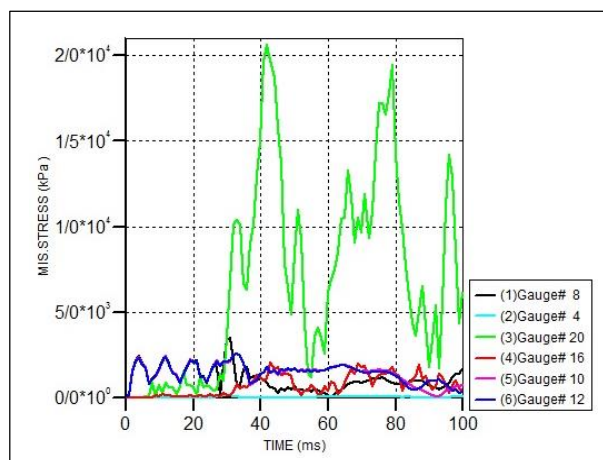
مدل دوم: در مدل دوم ۳ متر ابتدایی ستون خاک، رس ماسه‌ای خشک و مابقی، ماسه پیش‌فرض برنامه است. شکل (۱۵) مرحله پایان تحلیل را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در این حالت کراتر ایجاد شده بر اثر انفجار، نسبت به مدل قبل بزرگتر شده است. نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۱۶) نشان شده است.



شکل ۱۵- وضعیت پایان تحلیل برای مدل دوم

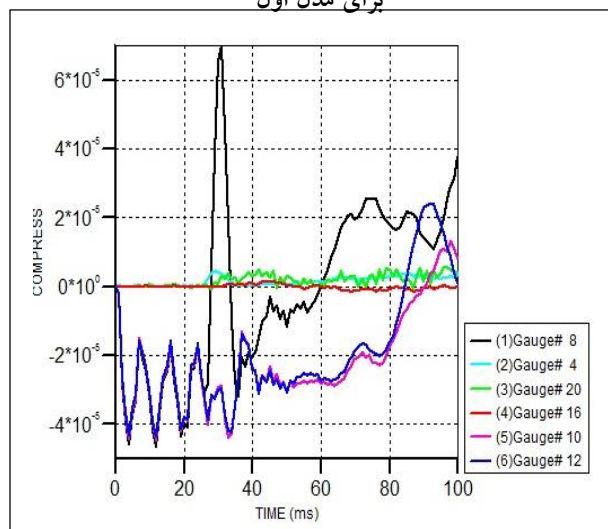


شکل ۱۶- نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای مدل دوم



شکل ۱۳- نمودار زمان- تنش فون مایز گیج‌های المان سازه

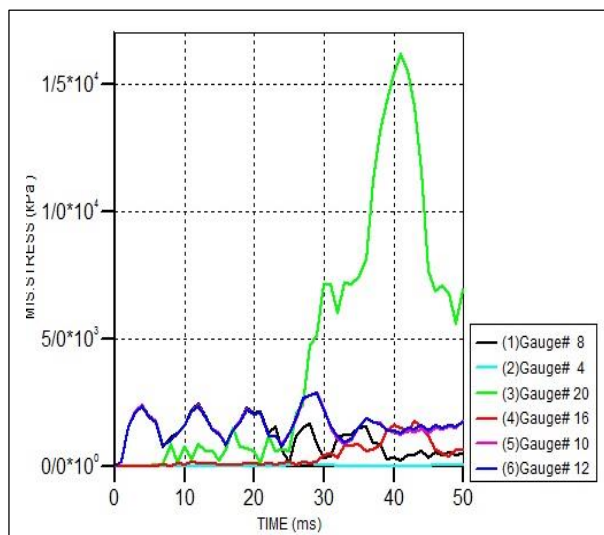
برای مدل اول



شکل ۱۴- نمودار زمان- فشردگی گیج‌های المان سازه برای

مدل اول

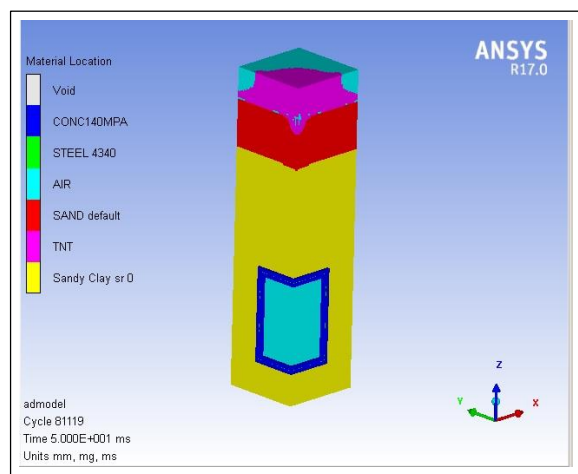
از آنجا که بارگذاری انفجار، شدید و در کسری از ثانیه است نوع خاک به صورت تک لایه در برابر امواج گذرنده از خاک تأثیری نداشته است. در بحث مربوط به زیستگاه زیرزمینی توان این نتیجه را گرفت که خاک ماسه پیش‌فرض نرم‌افزار سبب تشدید شتاب المان‌های دیواره سازه شده است. بعلاوه مشخص گردید که استفاده از خاک پیش‌فرض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



شکل ۱۸- نمودار زمان- تنش فون مایرز زیستگاه زیرزمینی

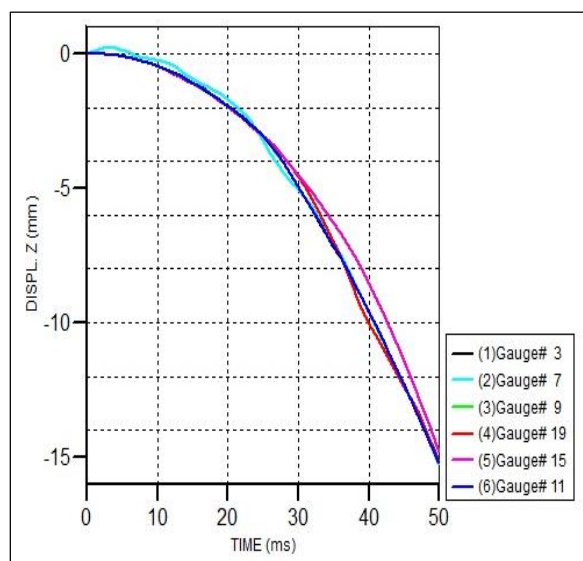
با بررسی نمودار زمان - تنش فون مایرز، این نتیجه به دست می‌آید که وجود یک لایه رس ماسه‌ای خشک باعث کاهش یافتن تنش فون مایرز در بازه ۵۰ میلی‌ثانیه گشته به گونه‌ای که وجود این لایه باعث کاهش تنش در پلیت فولادی به مقدار ۵۰۰ کیلو پاسکال شده است. از آنجا که این مقدار کاهش تنش ناچیز است، نمی‌توان گفت که وجود لایه رس ماسه‌ای خشک در سطح، مفید است.

مدل سوم: در مدل سوم ۳ متر ابتدایی ستون خاک، ماسه پیش فرض برنامه و مابقی، رس ماسه‌ای خشک است.



شکل ۱۹- وضعیت پایان تحلیل برای مدل سوم

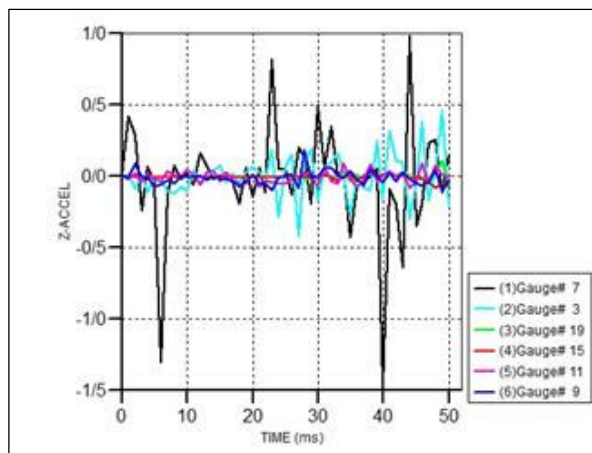
با بررسی نمودار زمان - فشار گذرنده از خاک، مشخص می‌شود که وجود لایه رس ماسه‌ای خشک در سطح باعث بالارفتن فشار تا حد ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در گیج شماره ۲۵ شده است. این گیج اولین گیج بعد از لایه رس ماسه‌ای است. بنابراین در مقایسه با مقدار ۵۵۰ کیلوپاسکال مربوط به مدل اول، نتیجه گرفته می‌شود که وجود لایه رس ماسه‌ای در سطح باعث انتقال فشار بیشتر به لایه بعدی و وخیم‌تر شدن اوضاع شده است. نمودار جابجایی در راستای Z زیستگاه زیرزمینی برای مدل دوم در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نمودار زمان- جابجایی در راستای Z زیستگاه

زیرزمینی برای مدل دوم

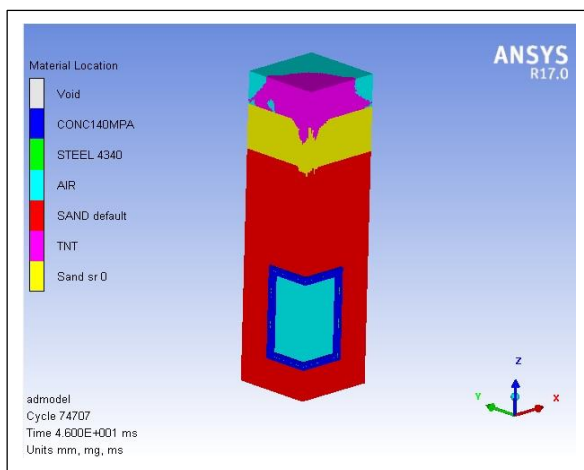
همان طور که مشاهده می‌شود مقدار جابجایی در بازه هدف ۳۰ میلی‌ثانیه، حدود ۵ میلی‌متر است. این مسئله نشان می‌دهد که وجود رس ماسه‌ای خشک در سطح باعث ایجاد جابجایی کمتر در زیستگاه زیرزمینی نسبت به حالت تک لایه ماسه پیش فرض برنامه شده است. در شکل (۱۸) نمودار تنش فون مایرز در راستای Z زیستگاه زیرزمینی برای مدل دوم نشان داده شده است.



شکل ۲۱- نمودار زمان- شتاب در راستای Z گیج‌های نود سازه برای مدل سوم

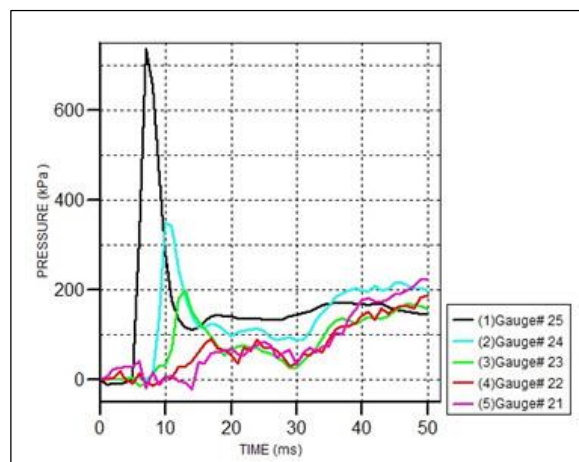
درمقایسه با مدل اول که دارای ماکزیمم شتاب 0.3 برای گیج شماره ۷ (سقف زیستگاه زیرزمینی در زیر محل وقوع انفجار) می باشد روشن می شود که وجود رس ماسه ای خشک در زیر لایه ماسه ای باعث افزایش مقدار شتاب شده است.

مدل چهارم: درمدل چهارم ۳ متر ابتدایی ستون خاک، ماسه خشک و مابقی، ماسه پیش فرض برنامه است. شکل (۲۲) مرحله پایان تحلیل را نشان می دهد. در این حالت کراتر ایجادشده بر اثر انفجار، از نظر جانبی گسترده تر شده است. نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۲۳) نشان شده است.



شکل ۲۲- وضعیت پایان تحلیل برای مدل چهارم

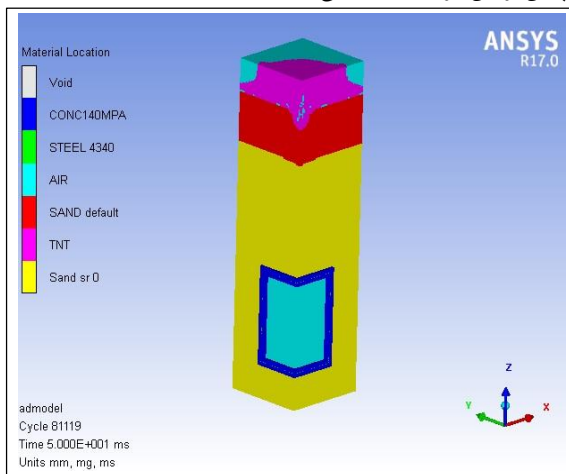
شکل (۱۹) مرحله پایان تحلیل را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در این حالت کراتر ایجادشده بر اثر انفجار، تقریباً مشابه مدل اول یعنی حالت تک لایه ماسه پیش فرض برنامه می باشد. نتایج حاصل از تحلیل برای گیج‌های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۲۰) نشان شده است.



شکل ۲۰- نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای مدل سوم بررسی نمودار موجود در شکل (۲۰) نشان می دهد که مقدار فشار ثبت شده در گیج شماره ۲۵ حدود ۷۵۰ کیلوپاسکال است که چیزی مابین مدل اول و مدل دوم بوده و نشان دهنده انتقال فشار کمتر به لایه بعدی نسبت به مدل دوم می باشد. اما به محض ورود امواج فشار ناشی از انفجار به محیط رس ماسه ای شاهد بالا رفتن مقدار فشار در گیج شماره ۲۴ و رسیدن آن به حدود ۳۵۰ کیلوپاسکال هستیم. در مقایسه با مدل اول و دوم مشخص می گردد که انتقال فشار در لایه رس ماسه ای سریع تر از لایه ماسه ای صورت می گیرد. نمودار جابجایی در راستای Z زیستگاه زیرزمینی برای مدل سوم در شکل (۲۱) نشان داده شده است. با بررسی نمودار فوق می توان دریافت که در مدل سوم که حاوی رس ماسه ای خشک در زیر لایه ماسه پیش فرض برنامه می باشد، ماکزیمم شتاب مثبت ۱ و ماکزیمم شتاب منفی $1/5$ می باشد.

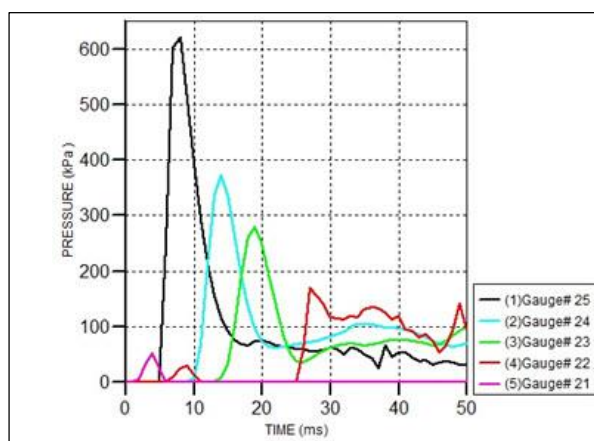
زیرزمینی هستند شده است. با این حال، شتاب گیج های سقف زیستگاه زیرزمینی تفاوت چندانی را با مدل اول نشان نمی دهند.

مدل پنجم: در مدل پنجم ۳ متر ابتدایی ستون خاک، ماسه پیش فرض برنامه و مابقی، ماسه خشک است.

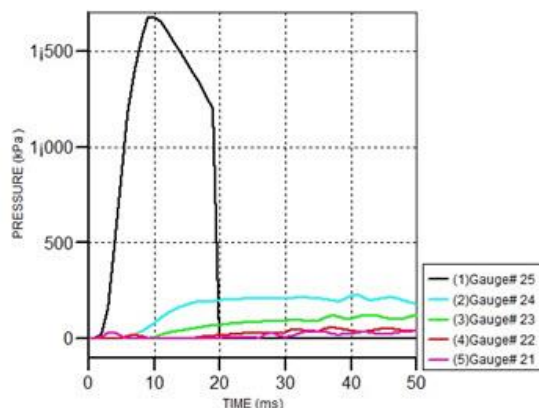


شکل ۲۵- وضعیت پایان تحلیل برای مدل پنجم

شکل (۲۵) مرحله پایان تحلیل را نشان می دهد. در این حالت کراتر ایجاد شده بر اثر انفجار، تقریباً مشابه مدل اول می باشد. نتایج حاصل از تحلیل برای گیج های ۲۱ تا ۲۵ مربوط به فضای خاکی بالای سازه در شکل (۲۶) نشان شده است.

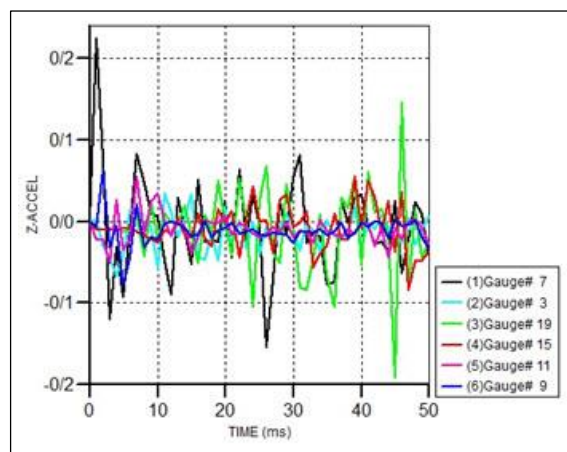


شکل ۲۶- نمودار زمان - فشار گذرنده از خاک برای مدل پنجم از آنجا که در این مدل از مشخصات ماسه خشک استفاده شده است بنابراین، نتایج این مدل با مدل اول که در آن از خاک ماسه پیش فرض نرم افزار استفاده شده تفاوتی ندارد و



شکل ۲۳- نمودار زمان- فشار گذرنده از خاک برای مدل چهارم

با بررسی نمودار زمان - فشار گذرنده از خاک، مشخص می شود که به جز گیج شماره ۲۵ در سایر موارد تفاوت چندانی با مدل اول ندارد یعنی در فشار گذرنده از خاک تغییر چندانی نسبت به حالت تک لایه ماسه پیش فرض برنامه صورت نگرفته است. در شکل (۲۴) نمودار زمان - شتاب در راستای Z زیستگاه زیرزمینی برای مدل چهارم نشان داده شده است.



شکل ۲۴- نمودار زمان- شتاب در راستای Z گیج های نود سازه برای مدل سوم

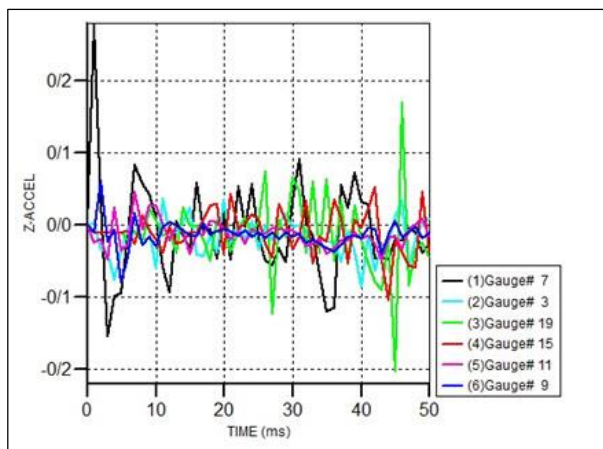
با بررسی نمودار زمان- شتاب در راستای Z می توان دریافت که وضعیت لایه بندی در این مدل، باعث کاهش شتاب در گیج های شماره ۹ و ۱۱ که مربوط به دیوار زیستگاه

خاک ماسه‌ای تک لایه، خاک مناسبی جهت ساخت زیستگاه زیرزمینی مقاوم در برابر انفجار است. علاوه بر این در حیطه بهسازی پناهگاه‌های موجود، می‌توان از نتایج این تحقیق استفاده نمود و از طریق جایگزینی لایه رس ماسه‌ای با ماسه، مقاومت زیستگاه‌های زیرزمینی در برابر انفجار را افزایش داد.

منابع

- امامزاده، س. ش؛ واحدی، خ؛ خسروی، ف؛ هاشم پور، س.، (۱۳۹۷)، "بررسی قابلیت اعتماد سازه بتن آرمه مدفون در خاک متاثر از انفجار سطحی"، مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین، سال نهم، شماره ۴، ص ۴۴۰-۴۲۹.
- زرنگ، م.، سلیمی، ل.، صیادی، م.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی پتانسیل کیفی منابع آب زیر زمینی روستاهای شهرستان دماوند"، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، شماره ۳۸، ص ۲۶-۱۱.
- سوری، ح؛ معتمدالشریعتی، س. ه.؛ سهرابی، ر.، (۱۳۹۷)، "پیش‌بینی تأثیر انفجارهای داخلی متوالی بر مقاومت یک اتاقک آزمون ساخته شده از بتن مسلح"، مجله علمی پژوهشی مواد پراورزی، سال سیزدهم، شماره ۲، ص ۱۲۴-۱۱۳.
- قاسمی، ف.، تقوی، ل.، (۱۳۹۵)، "بررسی تأثیر زمین شناسی زیست محیطی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: چاه های شرب روستای اخترآباد شهرستان ملارد)"، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، شماره ۳۶، ص ۸۲-۵۶.
- قلی زاد، ا؛ عابدی، ا.، (۱۳۹۶)، "تحلیل قابلیت اعتماد سازه ها تحت بار انفجار"، مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین، سال هشتم، شماره ۱، ص ۳۱-۱۹.
- کریمی فرزقی، ب؛ نادری، ر.، (۱۳۹۴)، "مقایسه روش عددی بدون شبکه SPH و دیدگاه های اولری و لاگرانژی در مدلسازی انفجار در آب"، مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری های پدافند نوین، سال ششم، شماره ۳، ص ۱۹۱-۱۸۳.
- محبی، ی.، اصغری مقدم، ا.، (۱۳۹۷)، "ارزیابی آسیب پذیری آبخوان دشت کهریز با استفاده از مدل دراستیک در محیط

هر دوی این حالت ها، یک الگوی فشار را دنبال می کنند. در واقع نمودار زمان- فشار گذرنده هر دو مدل، مقادیر نسبتاً مشابهی را دنبال می کنند. این شباهت را در نمودار های زمان- شتاب در راستای Z زیستگاه زیرزمینی هر دو مدل نیز می توان مشاهده نمود (شکل ۲۷).



شکل ۲۷- نمودار زمان- شتاب در راستای Z گیج‌های نود سازه برای مدل پنجم

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که انتقال فشار در لایه رس ماسه‌ای سریع‌تر از لایه ماسه‌ای صورت می‌گیرد. وجود لایه رس ماسه‌ای در سطح باعث انتقال فشار بیشتر به لایه بعدی و وخیم‌تر شدن اوضاع شده است. همچنین وجود رس ماسه‌ای خشک در زیر لایه ماسه‌ای باعث افزایش مقدار شتاب شده است. این مطلب نشان می‌دهد که وجود رس در بین ذرات ماسه، باعث افزایش مقدار شتاب و انتقال سریع‌تر فشار در بین لایه‌ها شده و سبب تشدید المان‌های سقف سازه گردیده است. در مدل‌هایی که در آن‌ها از لایه ماسه خشک استفاده شده است نتایج به دست آمده با حالتی که در آن از ماسه پیش فرض نرم افزار استفاده شده تفاوتی ندارد و همه آن‌ها یک الگوی فشار را دنبال می‌کنند. این شباهت را در نمودار های زمان- شتاب در راستای Z زیستگاه زیرزمینی نیز می‌توان مشاهده نمود. بنابراین نوع خاک به صورت تک لایه، در برابر امواج گذرنده از خاک تأثیری نداشته و لذا

Tunnel under Surface Explosion". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 47, 114-122.

- **Rogers, G. F. C., Mayhew, Y. R., (2014)**, "Thermodynamic and Transport Properties of Fluids". Oxford: Blackwell.

- **Wang, Z., Lu, Y., (2003)**, "Numerical Analysis on Dynamic Deformation Mechanism of Soils under Blast Loading". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 23, 705-714

- **Wang, Z., Lu, Y., Bai, Ch., (2011)**, "Numerical Simulation of Explosion-Induced Soil Liquefaction". *Finite Elem. Anal. Des.*, 47, 1079-1090.

- **Yang, Y., Xie, X., Wang, R., (2010)**, "Numerical Simulation of Dynamic Response of Operating Metro Tunnel Induced by Ground Explosion". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2, 373-384.

"GIS، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، شماره ۴۵، ص ۱۷-۱.

- **Ambrosini, R. D., Luccioni, B. M., Danesi, R. F., Riera, J. D., Rocha M. M., (2011)**, "Size of Craters Produced by Explosive Charges on or Above the Ground Surface". *Shock Waves* 2002, 12, 69-78.

- **Busch, C. L., Aimone-Martin, C. T., Tarefder, R. A., (2016)**, "Experimental Evaluation and Finite-Element Simulations of Explosive Airblast Tests on Clay Soils". *Int. J. Geomech.*, 16, 04015097.

- **Chen, H. L., Jin, F. N., Fan, H. L., (2013)**, "Elastic Responses of Underground Circular Arches Considering Dynamic Soil-Structure Interaction: A Theoretical Analysis". *Acta Mech. Sinica.*, 29, 110-12.

- **De, A., (2012)**, "Numerical Simulation of Surface Explosion over Dry Cohesionless Soil". *Comput. Geotech.*, 43, 72-79.

- **Feldgun, V. R., Karinski, Y. S., Yankelevsky, D. Z., (2011)**, "Blast Pressure Distribution on a Buried Obstacle in a Porous Wet Soil". *Int. J. Prot. Struct.*, 2, 45-70.

- **Grujicica, M., Pandurangana, B., Summersa, J. D., Cheeseman, B. A., Royb, W. N., Skaggs, R. R., (2008)**, "Application of the Modified Compaction Material Model to the Analysis of Landmine Detonation in Soil with Various Degrees of Water Saturation". *Shock Vib.*, 15, 79-99.

- **Grujicic, M., Pandurangan, B., Coutris, N., Cheeseman, B. A., Roy, W. N., Skaggs, R. R., (2010)**, "Derivation, Parameterization and Validation of a Sandy-Clay Material Model for Use in Landmine Detonation Computational Analyses". *J. Mater. Eng. Perform.*, 10, 434-450

- **Higgins, W., Chakraborty, T., Basu, D., (2012)**, "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.*, 37, 2590-2610.

- **Karinski, Y. S., Feldgun, V. R., Yankelevsky, D. Z., (2015)**, "Mach Stem due to an Underground Explosion near a Rigid Structure Buried in Soil". *Shock Waves*, 25, 63-76.

- **Laine, L., Sandvik, A., (2001)**, "Derivation of Mechanical Properties for Sand". 4th SILOS, CI-Premier LTD., 361-367.

- **Lee, E., Finger, M., Collins, W., (1973)**, "JWL Equations of State Coefficients for High Explosives". Technical Report, NSA-28-007802, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.

- **Mobaraki, B., Vaghefi, M., (2015)**, "Numerical Study of the Depth and Cross-Sectional Shape of

Investigating the effect of soil layering on the pressure and acceleration on the underground habitats against the waves caused by surface explosion

Parham Mehdipour Ghazvini¹, Vahid Hosseini Toudeshki^{2*} & Mohammad Hossein Noori Gheidari³

1-Geotechnical Master

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanzan Branch, Islamic Azad University, Zanzan, Iran

3-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanzan Branch, Islamic Azad University, Zanzan, Iran

Abstract

The response of underground habitats to loading from a surface explosion is a major issue in environmental Protection. Underground habitats are often found in small and large caves, as well as in the form of groundwater aquifers under mountain ranges and in various parts of the globe. 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 layering on the safety of an underground habitat has been investigated in terms of acceleration value and pressure transfer on it. Autodyn software has been used to model the underground habitat, 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 the presence of a sandy clay layer in the surface has transferred the more pressure to the next layer and led to the deterioration of the situation. Also, the presence of dry sand clay under the sand layer has increased the acceleration value.

Keywords: Surface Blast, Underground Habitat, Autodyn, Soil Layering, Modeling.