

### بررسی اثر پوشش‌های حفاظتی با چگالی کم بر پاسخ مخازن مدفون تحت اعمال بار ناشی از انفجار

#### پژوهشی

محسن پرویز\*؛ محمدرضا حسنی<sup>۱</sup>؛ اسدالله رنجبر کرکانکی<sup>۲</sup>

۱- استادیار؛ جهاد دانشگاهی واحد استان بوشهر، mohsen\_parviz1987@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، happy\_poya@yahoo.com

۳- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، ranjbar.iau@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۴/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۶/۲۴

شماره صفحات: ۶۷ تا ۸۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2020.8654.1371

واژگان کلیدی	چکیده
انفجار مخازن زیرزمینی ژئوفوم ژئوسنتتیک ژئوتکنیک	در این پژوهش از دو نوع خاک و سه نوع ژئوفوم با پنج مقدار تی‌ان‌تی مختلف برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده جهت تحلیل <i>LS-Dyna</i> است. استفاده از خاک‌های با چگالی پایین‌تر نسبت به سایر خاک‌ها می‌تواند از فشار وارده به مخزن بکاهد اما در خاک‌های با چگالی بیشتر فشار وارده به مخزن افزایش می‌یابد. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش ۶۰ درصدی فشار وارده به مخزن با استفاده از خاک‌های با چگالی پایین اشاره کرد. همچنین با کاهش مقدار تی‌ان‌تی و افزایش فاصله از مخزن به ترتیب با کاهش ۵۲ و ۲۵ درصدی فشار همراه بوده است.

#### ۱- مقدمه

به همراه داشته باشد. هندسه مدل با نرم‌افزار *Ansys* ساخته شده است. برای مشاهده نتایج از نرم‌افزار *LS-Dyna* استفاده می‌شود و در پایان بررسی شده است که هرکدام از متغیرهای در نظر گرفته شده در این مقاله چه تأثیری در نتایج داشته و چقدر می‌تواند خسارات ناشی از انفجار را کاهش دهد و نهایتاً منجر به افزایش امنیت سازه گردد. هنگامی که در نزدیکی سطح زمین انفجاری رخ می‌دهد، قسمت زیادی از انرژی آزاد شده در هوا منتشر می‌شود و پس از برخورد با سطح زمین، قسمتی از آن به داخل زمین راه می‌یابد و بخشی دیگر از آن منعکس می‌شود (Nagy, 2015). همه انفجارهایی که در نزدیکی سطح زمین یا در

توجه به این موضوع که سازه‌های مدفون محل ذخیره مواد حیاتی هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. این سازه‌ها باید در برابر انفجار مقاوم و کمترین آسیب را ببینند. از آنجا که حوادثی نظیر انفجار اجتناب‌ناپذیر است، بهسازی و ایجاد موانعی برای کاهش خطرات انفجار بحث کاربردی و مهمی است. هدف این پژوهش بررسی پوشش‌های حفاظتی با چگالی کم، تحت بار انفجار و کاهش اثر خرابی ناشی از بار انفجار است. به‌طور کلی استفاده از ژئوفوم می‌تواند خسارات ناشی از انفجار را کاهش دهد اما در نظر گرفتن ضخامت و فاصله محل قرارگیری آن از سازه می‌تواند بهترین پاسخ را

میانه - اردبیل را شبیه‌سازی کردند و مشاهده نمودند که بیش‌ترین جابجایی در تاج تونل رخ می‌دهد که با داده‌های تجربی نیز مطابقت دارد (Shahnazari, et al., 2010). هانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ توانستند با نرم‌افزار LS-DYNA به روش MM-ALE تأثیرات انتشار موج انفجاری را بروی یک سازه شبیه‌سازی کنند و در نهایت نتایج حاصله از شبیه‌سازی را با تست آزمایشگاهی مقایسه کردند (Huang, et al., 2012). السید و همکارانش آزمایشی را در خصوص اعمال بار انفجار به بتن مسلح انجام دادند. آنها پارامترهای بتن مسلح را در چندین بار تغییر دادند و توانستند رفتار دیوار بتنی مسلح را با متغیرهای مختلف در قالب نمودارهایی ارائه دهند. هدف تحقیق آنها ایجاد حالتی بالانس بین شکل‌پذیری و مقاومت بتن در برابر انفجار بوده است (Elsayed, et al., 2011).

لیواقلی رفتار ارتعاشی مخازن مستطیلی را بررسی کردند و متوجه شدند تغییر مکان و برش پایه با کاهش لزجت مایع داخل سیال کاهش پیدا می‌کند (Livaoglu, et al., 2008). کیانوش و همکاران با انجام یک مطالعه پارامتری بیان کردند که انعطاف‌پذیری دیواره مخزن در هنگام محاسبه فشار هیدرودینامیکی، باید در نظر گرفته شود (Kianoush, et al., 2006). پاندی و همکاران اثر یک انفجار خارجی بر پوسته بیرونی سازه بتن مسلح محفظه هسته‌ای را بررسی کردند. در تحقیق وی، مطالعه پارامتری و نیز بررسی فاصله بحرانی برای انفجارهای سطحی با مقادیر متفاوت خرج انفجاری در فاصله ۱۰۰ متری از پوسته محفظه هسته‌ای انجام شد (Pandey, et al., 2006). میتال و همکارانش به تحلیل دینامیکی مخزن سقفی روباز استوانه‌ای ذخیره آب تحت اثر بار انفجار با استفاده از فرمول ترکیبی اویلری-لاگرانژی پرداخته است. در این مقاله، حداکثر تنش حلقوی و تنش برشی در دیواره مخزن و ارتفاع موج آب در مخزن و پاسخ انرژی مخزن مورد مطالعه قرار گرفت (Mittal, et al., 2014). ژانگ و همکارانش به مطالعه عددی پاسخ دینامیکی و تحلیل شکست مخازن ذخیره کروی تحت بار انفجاری پرداخته است. در این بررسی پاسخ دینامیکی مخزن، مانند توزیع تنش مؤثر، تغییر مکان‌های سازه‌ای، مدت شکست و توزیع انرژی تحت بارهای انفجاری مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که فشار

عمق زیاد رخ می‌دهند یا از نوع موج سطحی یا حجمی است. با توجه به اینکه پارامترهای جبهه موج انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، حل تحلیلی پارامترهای انفجار برای اولین بار توسط هوگانیوت (Hugoniot) و رانکین (Rankine) بیان شده است. Z فاصله مقیاس شده و از رابطه (۱) قابل محاسبه است. در این رابطه مقدار تی‌ان‌تی را با (W) برحسب کیلوگرم و فاصله از هدف (R) برحسب متر تعریف می‌شود (UFC 3-340-02, 2008).

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

در مطالعاتی که محققین در زمینه انفجار انجام داده‌اند نتایج آزمایشات بر اساس مقدار ماده منفجره تی‌ان‌تی گزارش شده است؛ لذا ارائه رابطه‌ای برای معادل‌سازی سایر مواد منفجره با تی‌ان‌تی ضروری به نظر می‌رسد. جرم ماده منفجره می‌تواند با استفاده از دمای احتراق به معادل تی‌ان‌تی تبدیل شود (Kiger, et al., 1983).

## ۲- پیشینه مطالعات

اهمیت پدافند غیرعامل در ایران موجب شده که مطالعات گسترده‌ای در این رابطه انجام شود. محافظت و مقاوم‌سازی خاک‌ها از مباحث عمیق و مهمی است که در مهندسی ژئوتکنیک مطرح است. یکی از راه‌های مقاوم‌سازی، استفاده از ژئوفوم و خاک‌های با چگالی پایین به‌عنوان یک پوشش محافظتی برای خاک اطراف مخزن است. فضاهاى زیرزمینی، از اهمیت بالایی برخوردارند، به طوری که در زمان جنگ می‌توان از آنها به‌عنوان پناهگاه‌های زیرزمینی، انبار تجهیزات و مهمات استفاده کرد. با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ابزارهای تهدیدات هوایی دشمن، طراحی و انتخاب محل احداث فضاها و سازه‌های مذکور باید به‌گونه‌ای باشد که در هنگام تهدیدات دشمن کمترین آسیب و خسارت را متحمل شوند. به‌طور کلی ایمن‌سازی مراکز و تأسیسات مهم جمعیتی و نظامی، دستیابی به راهکارهای مناسب در مقابل تهدیدهای هوایی دشمن از دیدگاه پدافند غیرعامل بسیار حائز اهمیت است. (Fakher, et al., 2007). یانگ و همکاران انفجار سطحی را بر یک تونل بررسی کردند و دریافتند که اگر تونل در عمق بیشتر از ۷ متر حفر شود و ماده منفجره معادل کمتر از ۴۴۵ کیلوگرم باشد تونل ایمن خواهد بود (Yang, et al., 2010). شاه نظری و همکاران در یک مدل تونل راه‌آهن

ایجادشده بر مخزن کروی به تدریج از خط میانه کره به سمت قطب‌های آن کاهش پیدا می‌کند ( Zhang, et al., 2015). شیندر و همکاران در سال ۲۰۰۰ میلادی به مطالعه مخازن عمودی استوانه‌ای فلزی تحت بار انفجار پرداختند و متوجه شدند یک آسیب گسترده در سقف مخازن اتفاق می‌افتد. (Schneider, et al., 2000). سالونکه و همکاران مخازن نفت مایع را بررسی کردند و متوجه شدند در حالتی که مخزن حدود ۳۳ درصد پر باشد بیشترین آسیب را می‌بیند (Salunke, et al., 2017). تیج و همکارش اثر اندرکنش سازه-سیال (FSI) و میرایی آیرودینامیک بر پاسخ سازه‌ای انعطاف‌پذیر با بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار دادند (Teich, et al., 2013). حسینی نسب و همکاران به بررسی اثر موقعیت و ابعاد دال‌های محافظ تونل بر کاهش آثار ناشی از انفجار در سطح زمین پرداختند. آنها اثر عمق دفن دال‌های محافظ معمولی و سپس دال‌های مرکب تقویت‌شده با لایه‌ای از ورق فولادی در زیر آن را مورد بررسی قرار دادند. در ادامه به اثر ابعاد هندسه دال در کاهش آثار مخرب انفجار بر روی تونل پرداختند. همچنین متوجه شدند که هرچه قدر دال محافظ به سازه تونل نزدیک‌تر باشد، محافظت بهتری از تونل صورت خواهد گرفت و افزایش ضخامت دال بتنی همواره باعث کاهش آثار ناشی از انفجار بر روی مقطع تونل می‌شود. ( Hosseini Nassab, et al., 2019)

ژئوسنتتیک‌ها صفحاتی از جنس مواد پلیمری هستند و امروزه به‌طور گسترده برای حل مشکلات ژئوتکنیکی به کار گرفته می‌شوند. ژئوگرید، ژئونت، ژئوسل، ژئوتکستایل، ژئوکامپوزیت، ژئوممبران، ژئوفوم، ژئوسنتتیک آستر از خانواده ژئوسنتتیک‌ها تلقی می‌گردند. مهم‌ترین ویژگی این محصولات آن است که به دلیل جنس پلیمری و در نتیجه مقاومت بالای آنها در برابر فرسودگی، می‌توان آنها را در کنار و زیر خاک به کار برد. از این مواد برای مسلح کردن، عایق‌بندی رطوبتی، زهکشی و مواردی مشابه استفاده می‌شود و در حل مسائل گوناگونی مانند پی‌ها، دیوارهای نگهبان، شیب‌ها، روسازی راه، پایه پل‌ها و غیره کاربرد دارند. از آنجا که ژئوفوم‌ها از پلی استایرن منبسط‌شونده (EPS) ساخته می‌شوند، دارای وزن مخصوص پایینی هستند و در گروه مواد ژئوتکنیکی سبک‌وزن قرار می‌گیرند. به‌طور کلی

ژئوفوم به دلیل وزن سبک، عدم تغییر حجم در برابر آب، نفوذپذیری پایین و مقاومت نسبتاً مناسب، قابلیت بسیاری برای رفع مشکلات ژئوتکنیکی دارد. از ژئوفوم‌ها در خاکریزها، دیوارهای حائل، پایدارسازی شیب‌ها و بتن‌های سبک وزن استفاده می‌شود. نخستین بار در سال ۱۹۷۰ در نروژ، ژئوفوم‌ها برای بازسازی خاکریز پایه یک پل به کار گرفته شدند (Frydenlund, 1996). دامنه تغییرات مقاومت فشاری این مواد ۷۰ تا ۳۵۰ کیلوپاسکال است. چگالی ژئوفوم، پایین و در حدود یک درصد چگالی خاک است. براساس استاندارد ASTM D6817، حدود چگالی ژئوفوم بین ۱۱/۲ تا ۴۵/۷ کیلوگرم مترمکعب است و بیشینه مقاومت فشاری این مواد در کرنش‌های ۱، ۵ و ۱۰ درصد به ترتیب برابر با ۱۲۸، ۳۰۰ و ۳۴۵ کیلو پاسکال در دانسیته ۴۵/۷ کیلوگرم‌مترمکعب است. ژئوفوم‌ها، به دلیل قابلیت اشتعال، در دماهای بالا نیاز به مراقبت دارند. ژئوفوم غالباً به‌صورت بلوک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بلوک‌ها با چگالی، مقاومت و اندازه‌های گوناگون ساخته می‌شوند. بلوک‌های ژئوفوم غالباً با عرض ۱/۲۵ متر و در ضخامت‌های متنوع از ۰/۱ تا ۱ متر تولید می‌شوند. ویژگی‌های ذاتی ژئوفوم‌ها از جمله چگالی، مدول کشسانی، رفتار تحت بارهای فشاری و همچنین استفاده از آنها در بتن‌های سبک وزن و خاک‌های منبسط‌شونده توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است. نگوسی در سال ۲۰۰۷ با انجام آزمایش‌های فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری، مشاهده کرد که با افزایش دانسیته، مقاومت فشاری و مدول کشسانی ژئوفوم افزایش می‌یابد (Negusse, 2007). با توجه به آنکه با افزایش سطح کرنش در یک دانسیته ثابت، مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، نگوسی رابطه‌ای بین مقاومت و دانسیته در سطح کرنش‌های گوناگون ارائه داد؛ وی همچنین مشاهده کرد که با افزایش ابعاد نمونه‌های مکعبی ژئوفوم از ۵۰ میلی‌متر به ۶۰۰ میلی‌متر، مدول کشسانی تقریباً دو برابر می‌شود. که این واقعیت به اثر انتهایی نسبت داده شد چرا که مشخص شد، مدول یانگ در انتها و وسط نمونه‌ها متفاوت است. هازاریکا در سال ۲۰۰۶ با آزمایش فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌های مکعبی و مکعب مستطیلی ژئوفوم در اندازه‌های گوناگون نشان داد که نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری

است اما وجود حجم قابل توجه ضایعات ژئوفوم حاصل از بسته‌بندی مواد غذایی و کالاهای، استفاده از این مواد در ابعاد کوچک و تا حد دانه‌ای را توجیه می‌کند؛ همچنین استفاده از بلوک‌های ژئوفوم در فضاهای کوچک و فضاهای غیرقابل دسترسی، مناسب نیست.

به‌طور کلی به‌کارگیری مصالح سبک وزن در اطراف انواع سازه‌ها از قبیل: مخازن، دیوارها و سازه‌های مدفون یکی از روش‌های متداول کاهش تنش جانبی محسوب می‌شود. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد برخی از این مصالح نظیر خرده لاستیک، بلوک‌های ژئوفوم (*EPS*)، انواع پوک‌های معدنی و صنعتی در انواع سازه‌ها (در مجاور خاک) انجام پذیرفته است. ژئوفوم‌های *EPS* به دلیل چگالی بسیار کم مصالح، سختی کم و میرایی بالا گزینه مناسبی برای این منظور به‌شمار می‌رود. عمده مطالعات انجام شده در راستای کاهش تنش‌های جانبی را می‌توان در قالب دو دسته طبقه‌بندی کرد: (الف) اصلاح مشخصات هندسی و مقاومتی اطراف سازه موردنظر (ب) اصلاح مشخصات فیزیکی و مقاومتی خاک اطراف سازه.

## ۲-۱- روش *LBE*

روش *LBE* (*Load Blast Enhanced*) روشی است بر اساس روش لاگرانژی که در این روش ضرورتی بر مدل‌سازی هوا نیست. (*LSTC, 2017*) روش *LBE* متداول‌ترین روشی است که در مدل‌سازی انفجار در نرم‌افزار *LS-DYNA* مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش *LBE* نیازی نیست که ماده منفجره و هوای اطراف سازه حتماً مدل‌سازی شود. در این روش در ابتدا مدل‌سازی به‌طور کامل شبیه‌سازی می‌شود و سپس موقعیت ماده منفجره به نرم‌افزار داده می‌شود. به‌طور کلی انفجار هم می‌تواند به‌صورت کروی و هم به‌صورت سطحی به سازه اعمال شود.

## ۲-۳- شبیه‌سازی عددی

در این تحقیق از سه نوع ژئوفوم و دو نوع خاک در مدل‌سازی استفاده شده است. از مدل ماده‌های استفاده شده در این شبیه‌سازی می‌توان به خاک، ژئوفوم، مخزن بتنی و هوا اشاره کرد. جرم‌های تی‌ان‌تی مورد بررسی در این تحقیق ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم هستند. انفجار در فواصل ۱/۵ و ۲/۵ متری از مخزن اتفاق افتاده است. در این مقاله

دارای کمترین مقاومت فشاری و نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری دارای بیشترین مقاومت فشاری در دانسیته یکسان هستند. وی مشاهده کرد که نمودار تنش- کرنش تا حد زیادی غیرخطی و تنها در محدوده کوچکی کشسانی است. همچنین با افزایش نرخ کرنش، مقاومت فشاری و مدول کشسانی نمونه‌های ژئوفوم افزایش می‌یابد. بر اساس آزمایش‌های یادشده، هازاریکا ۲۰۰۶ رابطه‌ای بین مدول کشسانی و دانسیته ارائه داد (*Hazarika, 2006*). لعل عارفی و همکاران به بررسی انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های زیرزمینی در برابر تهدیدات ناشی از انفجار پرداخته است. پژوهش آنها نشان می‌دهد ایجاد موج‌گیر و خم‌های کافی در سازه‌های زیرزمینی به‌عنوان بهترین گزینه برای مقاوم‌سازی فضاهای زیرزمینی است. همچنین استفاده از الیاف پلیمری، ایجاد حفره‌هایی به‌عنوان تله انفجاری، استفاده از دال‌های انفجاری، استفاده از میراگرها و استفاده از مصالح پلی استایرن به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته اند (*Lale Arefi, et al., 2013*). روابط مشابهی توسط الراجی و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه گردیده است. (*Elragi, et al., 2000*) تفاوت در روابط یاد شده توسط پژوهشگران را می‌توان به تفاوت در اندازه نمونه‌ها و روش‌های تولید ژئوفوم به کار گرفته در کشورهای مختلف نسبت داد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که وجود ژئوفوم باعث بهبود مشکلات ناشی از متورم‌شوندگی خاک‌های رس شود. آیتکین و همکاران در سال ۲۰۰۸ با آزمایش خاک متورم‌شونده بدون ژئوفوم و با وجود رول‌های ژئوفوم با ضخامت‌های مختلف، فشار تورم جانبی و قائم را به دست آوردند (*Aytekin, et al., 2008*). نتایج این پژوهشگران نشان داد که با گذشت زمان، فشار تورم جانبی و قائم افزایش می‌یابد. همچنین به‌کار بردن ژئوفوم باعث کاهش فشارهای تورم جانبی و قائم می‌شود که این کاهش در مورد فشار تورم جانبی بیشتر است. با افزایش ضخامت رول‌های ژئوفوم، فشار تورم جانبی و قائم کاهش بیشتری می‌یابد که این کاهش در مورد دیوارهای صلب در حالتی که نسبت ضخامت ژئوفوم به ارتفاع دیوار ۰/۲ باشد، بیشینه است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده نقش مؤثر ژئوفوم در کاهش فشار جانبی خاک رس بر دیوارهای حائل است. هرچند تاکنون، استفاده از ژئوفوم‌ها به شکلی غیر از بلوک‌های حجیم رواج کمی یافته

### ۳-۲- مدل ماده هوا

مدل هوا در تحقیقات معمولاً با *NULL MATERIAL* و معادله حالت *EOS* خطی مدل‌سازی می‌شود. (Parviz, et al., 2017) معادله فشار مدل ماده هوا در نرم‌افزار *Ls-Dyna* به صورت زیر تعریف شده است و همچنین مشخصات مدل ماده هوا در جدول ۲، آورده شده است:

$$P = C_0 + C_1 + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2) E_0 \quad (3)$$

که در آن  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی و  $\rho_0$  چگالی مبنا و  $C_0$  تا  $C_6$  نیز ضرایب ثابت معادله حالت هستند.  $E_0$  انرژی مشخصه داخلی بر واحد حجم و  $\mu$  که تابعی از چگالی است از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (4)$$

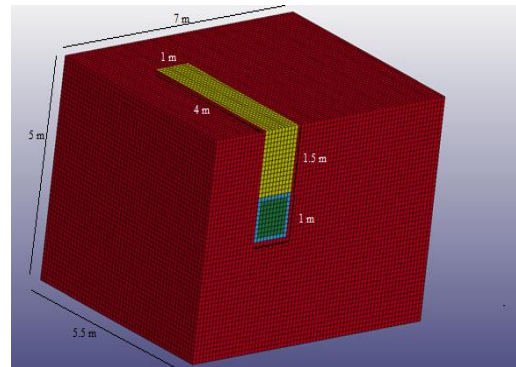
جدول ۱- مشخصات مدل ماده تی‌ان‌تی (Parviz, et al., 2017)

مقدار عددی	مشخصات مدل ماده
۱۶۳۰	چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)
۹۶۳۰	سرعت انتشار موج انفجار (متربر ثانیه)
۲۱	$P_{ej}$ (گیگاپاسکال)
۳۷۴	$A$ (گیگاپاسکال)
۳/۲۳	$B$ (گیگاپاسکال)
۴/۱۵	$R_1$
۰/۹۵	$R_2$
۰/۳۵	$\Omega$
۱	$V$
$6 E+09$	$E_0$ (ژول/کیلوگرم)

جدول ۲- مشخصات مدل ماده هوا (Parviz, et al., 2017)

مقدار عددی	مشخصات مدل ماده
۱/۳۹	$C_0$
.	$C_1$
.	$C_2$
.	$C_3$
.	$C_4$
۰/۴	$C_5$
۰/۴	$\rho_0$ (کیلوگرم/مترمکعب)
۱	$E_0$ (ژول/کیلوگرم)
$2/5 E+05$	چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)

یکی از مهم‌ترین اهداف ما بررسی عملکرد مخزن بتنی در برابر انفجار است که برای مدل‌سازی از نرم‌افزار *Ls-Dyna* استفاده شده است. برای مدل‌سازی باید از روش صریح استفاده شود، المان مورد استفاده در این تحقیق *solid164* انتخاب شده است. شکل ۱، بخش‌های مختلف و اجزای تشکیل‌دهنده مدل‌سازی را نشان می‌دهد. پس از مش‌بندی، مدل هندسی مورد نظر تحت بارگذاری انفجار قرار می‌گیرد. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی به این شرح است که سطح بالای مدل اصطلاحاً *FREE* بدون قید در نظر گرفته شده است، سطح پایین مدل در تمامی جهات مقید شده است و دو سطح جلو مدل که در شکل ۱، مشاهده می‌شود در جهت عمود مقید شده و برای دو سطح جانبی دیگر مدل از شرایط مرزی جاذب (*Non-Reflecting*) استفاده شده است.



شکل ۱- شماتیک مدل هندسی

### ۳-۱- مدل ماده منفجره

در این مقاله برای مدل ماده تی‌ان‌تی از معادله حالت *JWL* (*Jones-Wilkins-Lee*) استفاده شده است و از مدل ماده *MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN* برای مدل‌سازی ماده منفجره استفاده شده است. (Parviz, et al., 2017) معادله فشار آن در نرم‌افزار *Ls-Dyna* به صورت زیر تعریف شده است:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{VR_1}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{VR_2}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

که در آن  $P$  فشار و  $R_1, A, B, R_2$  و  $\omega$  ضرایبی هستند که برحسب نوع مواد منفجره تغییر می‌کند.  $V$  حجم ماده منفجره و  $E$  انرژی مشخصه انفجار است. مشخصات مدل ماده تی‌ان‌تی در جدول ۱، بصورت خلاصه آورده شده است.

### ۳-۳- مخزن بتنی

در این تحقیق برای مدل ماده مخزن بتنی مدل جانسون هلمکوئست برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق مخزن با سطح مقطع مستطیلی  $1000 * 1000$  میلی‌متر در نظر گرفته شده و ضخامت مخزن ۱۰۰ میلی‌متر است. مشخصات مخزن بتنی در جدول ۳، آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات مخزن بتنی  
(Soheyli, et al., 2016)

مقدار عددی	مشخصات مدل ماده
۲۴۰۰	چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)
۳۰۰۰۰	مدول یانگ (مگاپاسکال)
۲۳	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۲/۳	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۰/۳۵	کرنش تسلیم

### ۳-۴- مدل ماده خاک

برای مدل‌سازی خاک از مدل ماده *SOIL\_AND\_FOAM* استفاده شده است. این مدل ماده عملکرد مناسبی در برابر انفجار دارد و خصوصیات آن در جدول ۴، آورده شده است. پارامترهای مورد استفاده در مدل ماده خاک عبارت‌اند از  $\rho$  چگالی خاک،  $G$  مدول برشی،  $K$  مدول بالک و  $a_0, a_1, a_2$  ضرایب ثابت تابع تنش که بسته به نوع مدل ماده خاک متغیرند. خاک نمونه ۱ مورد بررسی در این تحقیق از نوع خاک رس نرم و خاک نمونه ۲ از نوع ماسه متراکم است. مشخصات مربوط به خاک‌ها با توجه به نسبت پوآسون، مدول الاستیسیته، مدول برشی، مدول بالک و وزن مخصوص خاک ارائه شده است.

### ۳-۵- مدل ژئوفوم

برای مدل‌سازی ژئوفوم نیز از مدل ماده *SOIL\_AND\_FOAM* استفاده شده و خصوصیات آن در جدول ۵، آورده شده است (Wang, et al., 2006).

جدول ۴- مشخصات خاک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی (Soheyli, et al., 2016)

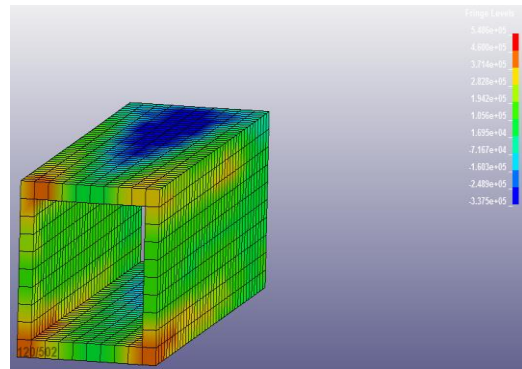
مشخصات مدل ماده	مشخصات خاک نوع ۲	مشخصات خاک نوع ۱
چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)	۱۶۵۰	۱۴۴۰
مدول برشی (پاسکال)	$4/1 E+07$	$3/4 E+06$
مدول بالک (پاسکال)	$5 E+07$	$15/0.2 E+06$
$PC$ (پاسکال)	.	.
$a_0$	.	.
$a_1$	.	.
$a_2$	.	۰/۶

جدول ۵- مشخصات ژئوفوم‌های مورد استفاده در مدل‌سازی (Chew & Leong, 2009)

مشخصات مدل ماده	مشخصات ژئوفوم نوع ۳	مشخصات ژئوفوم نوع ۲	مشخصات ژئوفوم نوع ۱
چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)	۴۵/۷	۲۱/۶	۱۱/۲
مدول برشی (پاسکال)	$5/7 E+03$	$2/2 E+03$	$6/7 E+03$
مدول بالک (پاسکال)	$5/51 E+03$	$2/3 E+03$	$6/6 E+02$
$PC$ (پاسکال)	-۵۱۷	-۲۴۰	-۶۹
$a_0$	.	.	.
$a_1$	.	.	.
$a_2$	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵

#### ۴- بررسی تأثیر ژئوفوم و مشخصات ژئوتکنیکی مختلف خاک تحت بارگذاری انفجار

همان‌طور که مشخص است شکل ۲، کانتور فشار وارده به مخزن را نشان می‌دهد. با انتشار انفجار در سطح مخزن می‌توان نقاط بحرانی و آسیب دیده مخزن را شناسایی کرد و در آن منطقه حداکثر فشار را مورد بررسی قرار داد. لازم به ذکر است که خاک یکی از مهم‌ترین پارامترهای این مقاله می‌باشد. با شناخت خاک اطراف مخزن و استفاده از خاک مناسب می‌توان فشار و آسیب وارده به مخزن را کاهش داد.



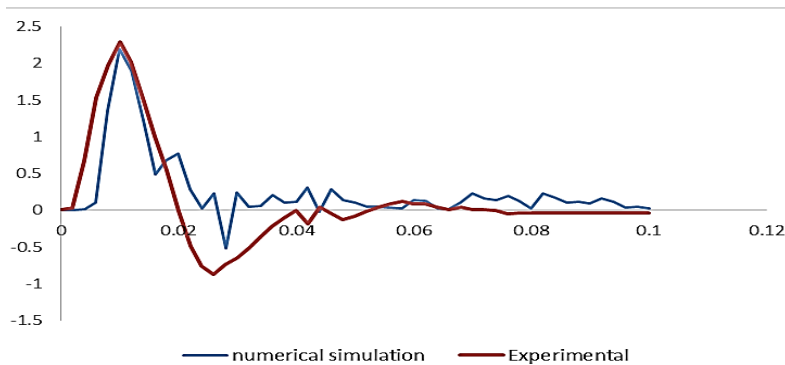
شکل ۲- کانتور فشار وارده به مخزن تحت بارگذاری انفجار

#### ۴-۱- راستی آزمایشی مدل‌سازی

مدل راستی آزمایشی، یک مدل آزمایشگاهی است که توسط سهیلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شده است. مدل آزمایشگاهی که برای راستی آزمایشی انتخاب شده دارای

ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و ابعاد  $4000 \times 1000 \times 1000$  میلی‌متر می‌باشد که در خاک مدفون شده است. دو نوع خاک در آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. خاک نوع اول که در اطراف مخزن بتن مسلح مدفون قرار دارد و خاک نوع دوم که روی آن قرار گرفته است. مخزن بتنی مسلح به فاصله ۱۵۰۰ میلی‌متری از سطح زمین قرار دارد. ماده منفجره در آزمایش از نوع آمونیوم نیترات (ANFO) است که معادل  $1/69$  کیلوگرم تی‌ان‌تی است. در مدل آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری شتاب از شتاب‌سنج استفاده شده است. با توجه به اینکه ابعاد مخزن  $1000 \times 1000 \times 4000$  میلی‌متر است، شتاب‌سنج دقیقاً در فاصله ۲۰۰۰ میلی‌متری (وسط مخزن) و در فاصله ۵۰۰ میلی‌متری، نسبت به کف مخزن قرار گرفته است. پس از انفجار، شتاب وارده توسط سنسورهای شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده است (Soheily, et al., 2016). در شکل ۳، نمودار مقایسه پیک شتاب شبیه‌سازی در حالتی که مقدار تی‌ان‌تی  $1/69$  کیلوگرم است، با حالت مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه نقطه پیک شتاب در انفجار بسیار حائز اهمیت است در این مقاله سعی شده است که نقاط پیک شتاب هم از نظر مقداری و هم از نظر زمانی بر روی یکدیگر تطابق مناسبی داشته باشد. پیک شتاب شبیه‌سازی  $2/2g$  در زمان  $0/01$  ثانیه به دست آمده است که این مقدار در مقاله صحت‌سنجی نیز برابر با  $2/16g$  اتفاق افتاده و میزان اختلاف به دست آمده حدود  $1/88$  درصد است. حداکثر فشار معادل شتاب  $2/2g$  در مدل‌سازی برابر با  $0/33$  مگاپاسکال به دست آمده است.



شکل ۳- نمودار مقایسه شتاب برحسب زمان شبیه‌سازی و مدل آزمایشگاهی

بررسی نیز قرار گرفته است. به‌طور کلی با ۱/۸ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی حداکثر فشار وارده به مخزن در فاصله ۲/۵ متری از سطح خاک حدود ۲۵ درصد با افزایش همراه بوده است. همان‌طور که در شکل ۵، قابل مشاهده است برای جرم ۱۰ kg با افزایش ۱۵ درصد چگالی خاک، حداکثر فشار وارده به مخزن ۲۳ درصد افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل ۶ برای جرم ۱۲ kg تی‌ان‌تی، حداکثر فشار وارده به خاک نوع اول و خاک نوع دوم با افزایش ۱/۲ چگالی خاک با افزایش ۲۱ درصد همراه بوده است. مطابق شکل ۷ و شکل ۸ برای جرم ۱۴ کیلوگرم تی‌ان‌تی میزان حداکثر فشار وارده به مخزن با افزایش چگالی ۱۵ درصد خاک، ۲۴ درصد افزایش یافته است و این مقدار برای جرم ۱۶ کیلوگرم تی‌ان‌تی با افزایش ۱۵ درصد چگالی خاک، ۲۲ درصد افزایش یافته است. بیشترین فشار وارده به مخزن برای جرم‌های ۱۴ و ۱۶ کیلوگرم در زمان حدوداً ۰/۱۲ ثانیه اتفاق افتاده است.

#### ۴-۳- تأثیر جنس خاک بر حداکثر فشار وارده به

##### مخزن در فاصله ۱/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک

همان‌طور که در جدول ۷، مشخص است، مقادیر حداکثر فشار وارده به مخزن برای خاک‌های با چگالی ۱۴۴۰ و ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب که مشخصات فنی آن در بخش‌های قبل به آن اشاره شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی حداکثر فشار وارده به مخزن برای خاک‌های نوع اول و دوم به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۸۶ مگاپاسکال به دست آمده است. این مقادیر همان‌طور که در نمودار شکل ۹ مشخص است به ترتیب در زمان‌های ۰/۰۷ و ۰/۰۸ ثانیه اتفاق افتاده است.

مقدار فشار حداکثر برای خاک بدون ژئوفوم ۰/۳۳ مگاپاسکال به دست آمده است. فشار وارده به مخزن در حالتی که ژئوفوم‌های  $G_1$ ،  $G_2$  و  $G_3$  مدل‌سازی شده است نسبت به خاک بدون ژئوفوم به ترتیب ۷۵/۸، ۶۰ و ۵۰/۵ درصد کاهش فشار به همراه داشته است. نتایج فوق بیانگر این مطلب‌اند که ژئوفوم به دلیل سبک بودن و چگالی پایین‌تر در هنگام انفجار مانند یک میراگر عمل می‌کند و فشار وارده به مخزن را کاهش می‌دهد. با ۲/۲ برابر کردن چگالی ژئوفوم، حداکثر فشار وارده به مخزن ۳۸ درصد افزایش یافته است. همچنین با ۴ برابر کردن چگالی ژئوفوم حداکثر فشار وارده به مخزن ۵۰ درصد افزایش یافته است. در ادامه مدل‌سازی برای پنج جرم تی‌ان‌تی ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم برای دو نوع خاک با چگالی‌های مختلف برای دو فاصله ۱/۵ و ۲/۵ متر تی‌ان‌تی مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۲- تأثیر جنس خاک بر حداکثر فشار وارده به

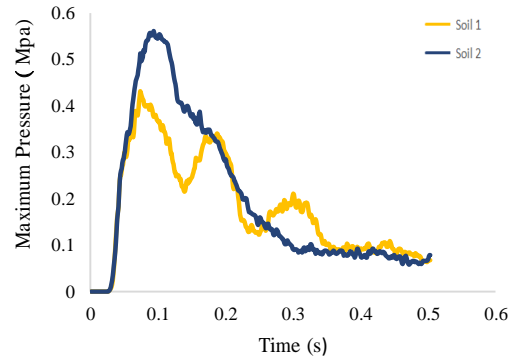
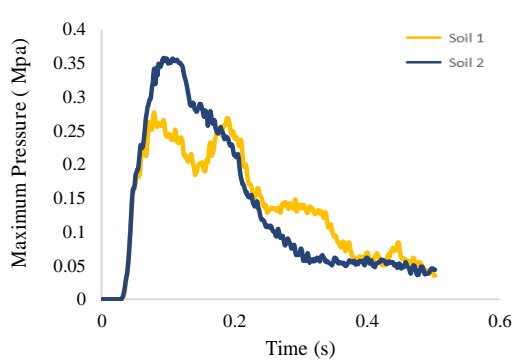
##### مخزن در فاصله ۲/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک

همان‌طور که در جدول ۶، مشخص است، مقادیر فشار حداکثر برای دو نوع خاک با چگالی ۱۴۴۰ و ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ارائه شده است. برای جرم ۱۸ kg تی‌ان‌تی، همان‌طور که در شکل ۴، مشخص است بیشترین فشار وارده به مخزن ۰/۵۶ مگاپاسکال است که مربوط به خاک دوم بوده که در زمان حدوداً ۰/۱۱ ثانیه اتفاق افتاده است. برای جرم ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی حداکثر فشار وارده به مخزن با افزایش ۱/۲ برابری چگالی خاک حدود ۲۳ درصد افزایش یافته است. در ادامه فشار وارده به مخزن برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ کیلوگرم تی‌ان‌تی نیز مورد

جدول ۶- حداکثر فشار وارده به مخزن بتنی برای فاصله ۲/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک

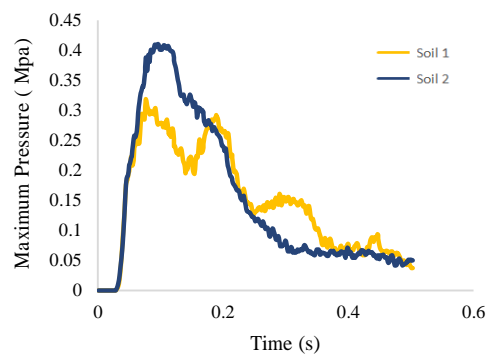
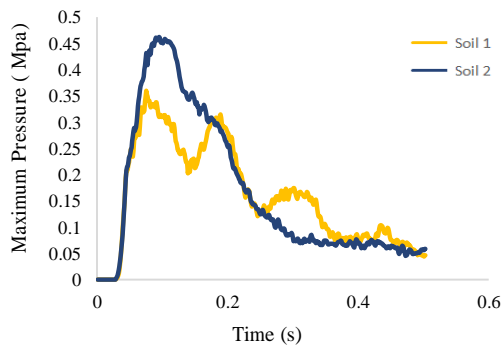
مقدار تی‌ان‌تی (کیلوگرم)	$P_{Max} \text{ Soil 1 (Mpa)}$	$P_{Max} \text{ Soil 2 (Mpa)}$
۱۰	۰/۲۷	۰/۳۵
۱۲	۰/۳۱	۰/۴۱
۱۴	۰/۳۵	۰/۴۶
۱۶	۰/۳۹	۰/۵۰
۱۸	۰/۴۳	۰/۵۶





شکل ۴- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی

شکل ۵- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۲ کیلوگرم تی‌ان‌تی

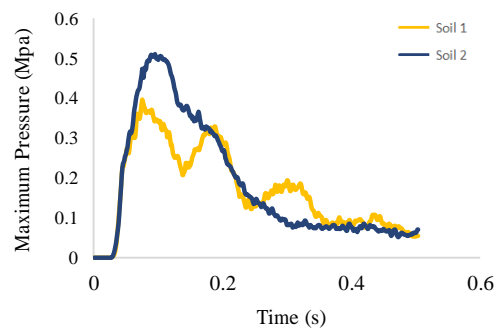


شکل ۶- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۴ کیلوگرم تی‌ان‌تی

شکل ۷- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۶ کیلوگرم تی‌ان‌تی

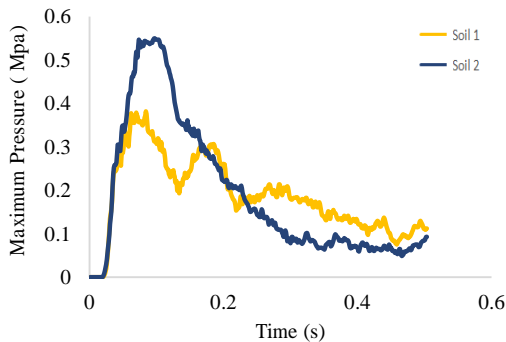
جدول ۷- فشار حداکثر وارده به مخزن بتنی برای فاصله ۱/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک

مقدار تی‌ان‌تی (کیلوگرم)	$P_{Max} \text{ Soil 1}$ (Mpa)	$P_{Max} \text{ Soil 2}$ (Mpa)
۱۰	۰/۳۸	۰/۵۵
۱۲	۰/۴۳	۰/۶۳
۱۴	۰/۴۹	۰/۷۰
۱۶	۰/۵۴	۰/۷۸
۱۸	۰/۵۹	۰/۸۶



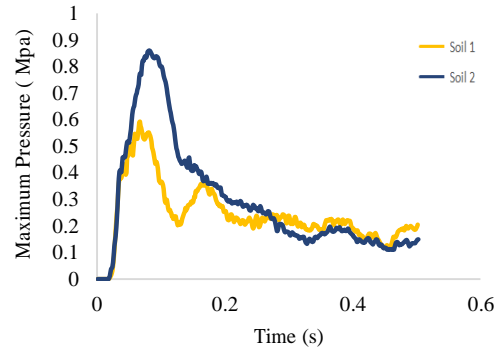
شکل ۸- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی

جنس خاک نوع دوم نسبت به خاک نوع اول نیز ۳۲ درصد به‌دست آمده است. با توجه به شکل ۱۲، برای جرم ۱۴ kg تی‌ان‌تی فشار ناشی از تأثیر جنس خاک نوع دوم نسبت به خاک نوع اول با افزایش ۳۰ درصد همراه بوده و با توجه به شکل ۱۳، برای جرم ۱۶ kg تی‌ان‌تی خاک نوع دوم نسبت به خاک نوع اول با افزایش ۳۱ درصد همراه بوده است.

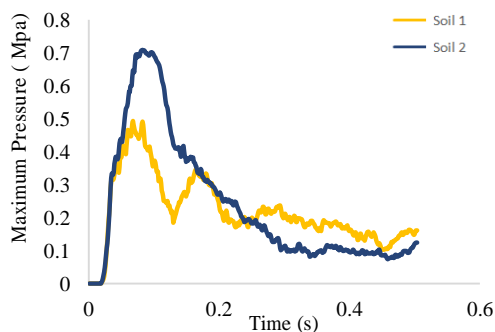


شکل ۱۰- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی

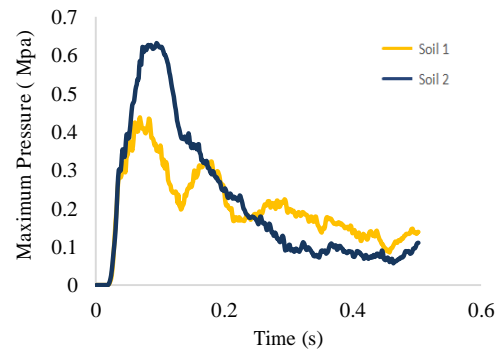
برای جرم ۱۸kg تی‌ان‌تی تأثیر جنس خاک نوع دوم نسبت به خاک نوع اول باعث افزایش ۳۲ درصد فشار وارده به مخزن شده است. با توجه به شکل ۱۰، برای جرم ۱۰kg تی‌ان‌تی، تأثیر جنس خاک نوع دوم نسبت به خاک اول باعث افزایش ۳۱ درصد فشار شده است و همچنین برای جرم ۱۲ kg تی‌ان‌تی، مطابق شکل ۱۱، فشار ناشی از تأثیر



شکل ۹- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی



شکل ۱۲- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۴ کیلوگرم تی‌ان‌تی

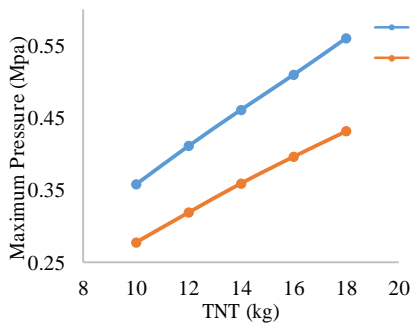


شکل ۱۱- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۲ کیلوگرم تی‌ان‌تی

با توجه به شکل ۱۵، برای فاصله ۱/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک به‌طور کلی با ۱/۲ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده به مخزن حدود ۱۳ درصد افزایش داشته است. با ۱/۴ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده به مخزن ۲۲/۷ درصد افزایش، با ۱/۶ برابر کردن تی‌ان‌تی فشار ۳۰ درصد افزایش داشته با ۱/۸ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی حداکثر فشار وارده به مخزن ۳۵/۶۴ درصد افزایش داشته است.

برای فاصله ۲/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک با توجه به شکل ۱۴، کاملاً مشخص است که با ۱/۲ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده به مخزن حدود ۱۳ درصد افزایش داشته است. با ۱/۴ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده به مخزن ۲۲/۴۵ درصد افزایش، با ۱/۶ برابر کردن تی‌ان‌تی فشار ۳۰ درصد افزایش داشته و با ۱/۸ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده به مخزن تا ۳۶/۱۸ درصد با افزایش همراه بوده است.

دو فاصله ۱/۵ و ۲/۵ متری تی‌ان‌تی از سطح خاک مورد بررسی قرار گرفته و به تأثیر جنس خاک‌ها برای پنج جرم تی‌ان‌تی ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم پرداخته است. با توجه به **جدول ۸**، حداکثر فشار وارده به خاک نوع اول برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی به ترتیب ۲/۲۱، ۲/۶۸، ۳/۱، ۳/۳ و ۳/۶۱ مگاپاسکال به‌دست آمده است. این مقدار برای فاصله ۲/۵ متری به ترتیب ۱/۰۲، ۱/۲، ۱/۳۷، ۱/۵۱ و ۱/۷۱ مگاپاسکال و اختلاف ناشی از تغییر فاصله از ۱/۵ به ۲/۵ متری به ترتیب ۵۳، ۵۵، ۵۶، ۵۴ و ۵۲ درصد به‌دست آمده است.



شکل ۱۴- فشار برحسب تی‌ان‌تی برای دو نوع خاک در فاصله ۲/۵ متری

جدول ۸- فشار حداکثر وارده به خاک اطراف مخزن برای خاک نوع اول

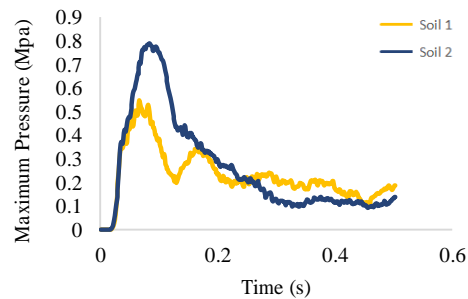
TNT (kg)	R=1.5 (m)	R=2.5 (m)	Diff (%)
۱۰	۲/۲۱	۱/۰۲	۵۳
۱۲	۲/۶۸	۱/۲۰	۵۵
۱۴	۳/۱	۱/۳۷	۵۶
۱۶	۳/۳۰	۱/۵۱	۵۴
۱۸	۳/۶۱	۱/۷۱	۵۲

ترتیب ۱/۰۷، ۱/۲۷، ۱/۴۶، ۱/۶۰ و ۱/۸۲ مگاپاسکال به‌دست آمده است. به‌طور متوسط می‌توان از نتایج فوق برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی دریافت که با افزایش ۱ متری فاصله تی‌ان‌تی از مخزن بتنی برای

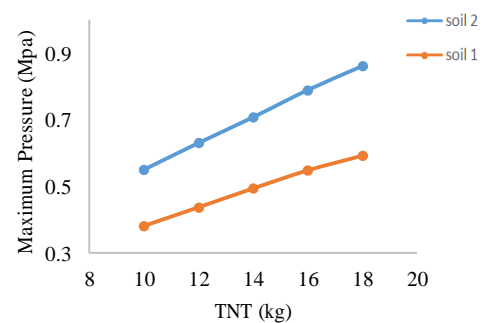
#### ۴-۴- تأثیر جنس خاک بر فشار وارده به اطراف

##### مخزن

یکی از مهم‌ترین نتایجی که در این مقاله می‌توان به آن اشاره کرد تأثیر جنس خاک است که در حقیقت خاک می‌تواند خود به‌عنوان یک پوشش محافظتی در مقابل انفجار عمل کند. این موضوع می‌تواند برای بحث مقاومت‌سازی و بهسازی خاک بسیار حائز اهمیت باشد بدین ترتیب که با شناخت رفتار خاک هنگام طراحی مخازن مدفون در خاک‌های با چگالی پایین‌تر می‌توان از مخازن با مقاومت پایین‌تر استفاده کرد. در این مقاله مقادیر فشار حداکثر در



شکل ۱۳- فشار برحسب زمان برای دو نوع خاک و ۱۶ کیلوگرم تی‌ان‌تی



شکل ۱۵- فشار برحسب تی‌ان‌تی برای دو نوع خاک در فاصله ۱/۵ متری

با توجه به **جدول ۹**، حداکثر فشار وارده به خاک نوع دوم برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی به ترتیب ۲/۴۵، ۲/۹۵، ۳/۳۹، ۳/۵۹ و ۳/۹۲ مگاپاسکال به‌دست آمده است. این مقدار برای فاصله ۲/۵ متری به

خاک‌های نوع اول، دوم حدود ۲۶ درصد از فشار وارده به مخزن کاهش یافته است.

جدول ۹- فشار حداکثر وارده به خاک اطراف مخزن برای خاک نوع دوم

TNT (kg)	R=1.5 (m)	R=2.5 (m)	Diff (%)
۱۰	۲/۴۵	۱/۰۷	۵۶
۱۲	۲/۹۵	۱/۲۷	۵۷
۱۴	۳/۳۹	۱/۴۶	۵۷
۱۶	۳/۵۹	۱/۶۰	۵۵
۱۸	۳/۹۲	۱/۸۲	۵۳

به‌طور کلی یکی از مهم‌ترین دلایل عدم عکس‌العمل مشابه در نمودارهای فشار برحسب زمان در این پژوهش جنس خاک‌هاست. طی بررسی‌های انجام‌شده جنس خاک در انتشار امواج انفجار به سازه‌های مدفون بسیار حائز اهمیت است. بدین ترتیب که با کاهش چگالی خاک، رفتار خاک مانند یک میراگر بخشی از موج انفجار را دمپ می‌کند و هنگامی که چگالی خاک افزایش می‌یابد موج ناشی از انفجار تأثیر بیشتری بر روی سازه مدفون دارد. البته خاک دارای پارامترهای تأثیرگذار دیگری نیز دارد مثل مدول الاستیسیته، مدول بالک و ضرایب ثابت تنش، اما چون در هنگام انتشار موج، چگالی خاک نسبت به سایر پارامترها تأثیر بیشتری در پاسخ و عکس‌العمل سازه در هنگام انفجار دارد لذا نمودارها با توجه به چگالی خاک تفسیر شده‌اند. در این پژوهش به بررسی تأثیر مشخصات ژئوتکنیکی خاک و رفتار آن بر روی مخزن، تأثیر خاک‌های با چگالی کمتر به منظور کاهش فشار وارده به مخزن و یا به‌عبارتی دیگر به بررسی تأثیر خاک‌های مختلف و با چگالی کم بر روی مخازن مدفون در فواصل مختلف تحت بارگذاری انفجار پرداخته شده است که در مقایسه با نتایج دیگر محققین می‌توان دریافت که تمرکز بیشتر تحقیقات بر روی جابجایی، برش پایه، عمق دفن تی‌ان‌تی، تأثیر جداره مخازن با توجه به ارتفاع موج آب مخازن بوده است. معیار آسیب‌شناسی و بهبود شرایط مخزن بیشتر بر اساس جابجایی در مقابل انفجار است و به‌منظور کاهش این جابجایی از نوارهای

لایه‌های FRP جهت مقاوم‌سازی و کاهش جابجایی مخزن استفاده شده است، اما تمرکز این پژوهش بیشتر بر روی جنس خاک به‌عنوان پوشش حفاظتی به منظور کاهش آسیب وارده به مخازن بوده است و علاوه بر آن به رفتار عکس‌العمل مخزن تحت بارگذاری انفجار با توجه به خاک‌های مختلف پرداخته شده است که از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش ۶۰ درصدی فشار وارده به مخزن با استفاده از خاک‌های با چگالی پایین‌تر، کاهش ۵۲ درصدی فشار وارده به مخزن با افزایش فاصله تی‌ان‌تی از مخزن و کاهش ۲۵ درصدی فشار وارده به مخزن با کاهش مقدار تی‌ان‌تی اشاره کرد. همانطور که از نتایج پیداست در این پژوهش به‌جای استفاده از سازه‌های محافظ یا ورق‌های FRP به‌منظور کاهش آسیب وارده به مخزن از خاک‌هایی با چگالی کم به‌عنوان پوشش حفاظتی استفاده گردید.

## ۵- نتیجه‌گیری

- ۱- فشار وارده به مخزن در حالتی که ژئوفوم‌های  $G_1$ ,  $G_2$  و  $G_3$  مدل‌سازی شده‌اند نسبت به خاک بدون ژئوفوم به ترتیب ۷۵/۸ درصد، ۶۰ درصد و ۵۰/۵ درصد کاهش فشار به همراه داشته است.
- ۲- با استفاده از ژئوفوم، به دلیل چگالی پایین‌تر نسبت به سایر خاک‌ها می‌توان فشار وارده به مخزن را کاهش داد ولی در خاک‌های با چگالی بیشتر فشار وارده به مخزن افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای مخازنی که در خاک‌های چگالی بالاتری هستند بایستی مخزن با مقاومت بالا طراحی شود و در خاک‌های با چگالی کمتر می‌توان مخازن را با مقاومت پایین‌تری طراحی کرد.
- ۳- به‌طور متوسط می‌توان از نتایج فوق برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم تی‌ان‌تی دریافت که با افزایش یک متری فاصله تی‌ان‌تی از مخزن بتنی برای خاک‌های نوع اول، دوم حدود ۲۶ درصد از فشار وارده به مخزن کاهش یافته است.
- ۴- هرچقدر جرم تی‌ان‌تی بیشتر باشد میزان فشار و تنش وارده به مخزن بیشتر است و فاصله انفجار تا مخزن با میزان خرابی مخزن، رابطه عکس دارد به این معنی که هرچه فاصله بیشتر باشد میزان خرابی کمتر است.
- ۵- به‌طور کلی با ۱/۲ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارده

به مخزن حدود ۱۳ درصد افزایش داشته است. با ۱/۴ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی فشار وارد شده به مخزن ۲۲/۷ درصد افزایش داشته است. با ۱/۶ برابر کردن تی‌ان‌تی فشار ۳۰ درصد افزایش داشته است و با ۱/۸ برابر کردن مقدار تی‌ان‌تی حداکثر فشار وارد شده به مخزن ۳۵/۶۴ درصد افزایش یافته است.

## ۶- مراجع

- Aytekin, M., Banu Ikizler, S. and Nas, E. (2008). Laboratory Study of Expanded polystyrene (EPS) geof foam used with expansive soils. *Geotextiles and Geomembrance*, Vol 26, 189-195.
- Chew, J. H., & Leong, E. C. (2009). *Performance of Protective Barrier for Underground Structures*, 1-4.
- Elsayed, M., Asce, S. M., El-dakhkhni, W., Asce, M., Tait, M., & Asce, M. (2011). Response Evaluation of Reinforced Concrete Block Structural Walls Subjected to Blast Loading. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X).
- Eragi, A., Negussey, D. and Kyanka, G. (2000). Sample Size Effects On The Behavior of EPS Geof foam. *Proceedings of the United Engineering Foundation ASCE Geo Institute soft Ground Technology Conference-soft Ground Technology*, GSP 112 301, 280-291.
- Fakher, A., Cheshomi, A., & Khamechiyan, M. (2007). The addition of geotechnical properties to a geological classification of coarse-grained alluvium in a pediment zone.
- Frydenlund, T.E. and Aaboe, R. (1996). Expanded Polystyrene the Light Solution. *Proceedings of International Symposium on EPS Construction Method*, Tokyo, Japan, 31-46.
- Hazarika, H. (2006). Stress- Strain Modeling of EPS Geof foam For Large-Strain Applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 79-90.
- Hosseini Nassab, H., Movahedifar, S. M. (2019). Effect of Position and Dimensions of Tunnel Guard Slabs on the Reduction of Ground-Level Explosion Loads. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 7, 51-62.
- Huang, Y., Willford, M. R., Francisco, S., & Schwer, L. E. (۲۰۱۲). Validation of LS-DYNA ® MMALE with Blast Experiments, (3), 1-12.
- Kiger, S. A., Balsara, J. P., & Chemical, A. (1983). *W(Ib) D(n.) L(in.)* 260 280, 94-96.
- Kianoush, M. R., & Chen, J. Z. (2006). Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering structures*, 28(5), 704-715.
- Lale Arefi, S., Bitarafan, M. (2013). Evaluation of Retrofitting Methods for Underground Structures against Explosion Threats Using the Analytical Hierarchy Process (AHP) Method. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 2, 65-74.
- LSTC. (2017). *LS-DYNA: Keyword User Manual Volume 1. Technology (Vol. 1)*.
- Livaoglu, R. (2008). Investigation of seismic behavior of fluid-rectangular tank-soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(2), 132-146.
- Mittal, V., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler-Lagrange formulation. *Thin-Walled Structures*, 84, 91-111.

- Nagy, N. M. (2015). Numerical evaluation of craters produced by explosions on the soil surface. *Acta Physica Polonica A*, 128(2), 260–266. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-260>
- Negussey, D. (2007). Design Parameters For EPS Geofom. *Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, 47, NO.1, 161-170.
- Parviz, M., Aminnejad, B., & Fiouz, A. (2017). Numerical simulation of dynamic response of water in buried pipeline under explosion. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(7), 2798–2806. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0889-y>
- Pandey, A. K., Kumar, R., Paul, D. K., & Trikha, D. N. (2006). Non-linear response of reinforced concrete containment structure under blast loading. *Nuclear Engineering and design*, 236(9), 993-1002.
- Shahnazari, H., Esmaeili, M., & Ranjbar, H. H. (2010). Simulating the Effects of Projectile Explosion on a Jointed Rock Mass Using 2D DEM : A Case Study of Ardebil-Mianeh Railway, 8(2), 125–133.
- Soheyli, M. R., Akhaveissy, A. H., & Mirhosseini, S. M. (2016). Large-scale experimental and numerical study of blast acceleration created by close-in buried explosion on underground tunnel lining. *Shock and Vibration*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/891805>
- Schneider, P., & Alkhaddour, A. M. (2000). Survivability study on vertical cylindrical steel shell structures under blast load. *WIT Transactions on The Built Environment*, 48.
- Salunke.,sh& kulkarni.,s& kladlag.,v. (2017). blast analisis of liquad petroleam tank, *International journal of academic research and development*.2. 530-539.
- Teich, M., & Gebbeken, N. (2013). Analysis of FSI effects of blast loaded flexible structures. *Engineering Structures*, 55, 73-79.
- UFC 3-340-02. (2008). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. *Structures Congress 2011, (May 2005)*, 1867. [https://doi.org/10.1061/41171\(401\)127](https://doi.org/10.1061/41171(401)127)
- Wang, Z., Li, Y., & Wang, J. G. (2006). Numerical analysis of attenuation effect of EPS geofom on stress-waves in civil defense engineering, 24, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.04.002>
- Yang, Y., Xie, X., & Wang, R. (2010). Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(4), 373–384. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00373>.
- Zhang, B. Y., Li, H. H., & Wang, W. (2015). Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 209-217.

## Investigation of the Effect of Protective Coatings of Low Density on the Response of Buried Tanks under Blast Loading

M. Parviz<sup>\*1</sup>; M. R. Hasani<sup>2</sup>; A. Ranjbar Karkanaki<sup>3</sup>

1- Associate Professor; Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Bushehr Branch, Mohsen\_parviz1987@yahoo.com

2- M.Sc. Student of Civil Engineering; East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, happy\_poya@yahoo.com

3- Associate Professor; Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, ranjbar.iau@gmail.com

Received: 7 July 2019; Accepted: 15 Sep 2019  
DOI: 10.22044/tuse.2020.8654.1371

---

### Keywords

Blast  
Buried tanks  
Geofoam  
Geosynthetics  
Geotechnical

---

### Extended Abstract

#### Summary

The design and construction of underground reservoirs is of great importance because our country have rich oil and gas resources. For structures to resist against the blast, geofoam, an effective form of geosynthetics, could be a suitable solution. In this study, two types of soils and three types of geofoam with five different amounts of TNT were simulated. By using Ls-Dyana software, we tried in this research to model a tank in soil using geofoam and to analyze pressure reduction and damage to the tank.

### Introduction

The current research is a parametric study of the behavior of tanks buried in soil under blast loading. The effects on the physical properties of reinforced concrete, soil and TNT were investigated. The LBE method was used in LS-DYNA software to investigate the effects. The results showed that higher density soil caused higher pressure transfer to the buried tanks. Moreover, explosions in lower density soil resulted in less damage to the buried tanks because the soil acted as a damper under the waves of explosion, and transmits less pressure to the buried tanks.

### Methodology and Approaches

The current research is a parametric study of the behavior of tanks buried in the soil under blast loading. The effects on the physical properties of reinforced concrete, soil and TNT were investigated in this research. The LBE method was used in LS-DYNA software and the effects were compared.

### Results and Conclusions

In this study, two types of soils and three types of geofoam with five different amounts of TNT have been used for simulation. The software used for conducting the analysis is Ls-Dyna. The use of lower density soils can reduce the pressure on the tank, while in higher density soils, the pressure on the tank increases. One of the most important findings of this study is the reduction of pressure on the tank by 60% as a result of using low density soils. Furthermore, an increase in the TNT distance and a decrease in the TNT content were associated with a 52% and a 25% decrease in the pressure on the tank, respectively.

---