

## بررسی عددی رفتار مخازن مستطیلی بتنی مسلح زمینی حاوی سیال با ارتفاع متغییر تحت ضربه ناشی از انفجار به روش LBE

علی احمدی زاده

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد،

ایران

کاوه نظامی ساوجبلاغی\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

علالدین بهروش

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران

محسن پرویز

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

k.nezami@iau-mahabad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

### چکیده

در این تحقیق یک مخزن بتنی مسلح غیر مدفون حاوی سیال با ارتفاع های متغییر به ابعاد  $1 \times 1 \times 4$  متر تحت ضربه ناشی از انفجار با مقادیر مختلف تی ان تی با جرم های ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم در فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متر در دو موقعیت جانبی و بالای جداره پیرامونی مخزن بر روی سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شبیه سازی از روش (LBE Blast Enhanced Load) با نرم افزار دینامیکی غیرخطی LS-DYNA و همچنین برای شبیه سازی ضربه ناشی از موج انفجار، از روش حل صریح اکسپلیسیت استفاده شده است. پس از صحت سنجی روش عددی با مطالعات آزمایشگاهی با تغییر فواصل و مقادیر تی ان تی اثر ضربه، میزان فشار و آسیب وارده به مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد بحرانی ترین وضعیت در حالتی که تی ان تی در موقعیت جانبی از مخزن در فاصله ۲/۵ متری است و به ترتیب با ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن مقدار تی ان تی اثر ناشی از ضربه انفجار و فشار وارده به مخزن حدود ۲۰٪، ۳۰٪، ۳۶٪ و ۴۳٪ افزایش یافته و خرابی نیز بیشترین گسترش را داشته است. با افزایش ۲۵٪ ارتفاع سیال در مخزن مقدار فشار وارد بر مخزن نسبت به حالت خالی از سیال حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. همچنین این مقدار با افزایش ارتفاع سیال به ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ به ترتیب با کاهش ۲۸٪، ۴۳٪، ۶۲٪ همراه بوده است که بیانگر کاهش میزان آسیب و گسترش خرابی در بدنه مخزن با افزایش ارتفاع سیال می باشد.

**کلید واژگان:** مخزن، غیر مدفون، انفجار، فشار، ال اس داین، ارتفاع سیال

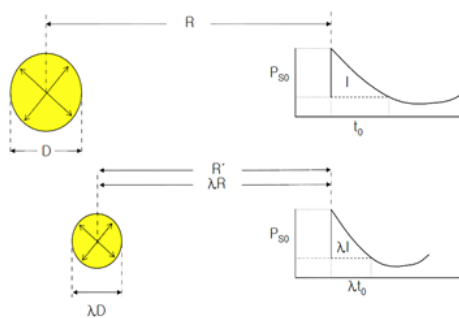
مقدمه

مخازن برای ذخیره کردن آب در سیستم‌های آب‌رسانی و سوخت در شهرک‌های صنعتی و پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این سازه‌ها در مناطق صنعتی و تأسیسات هسته‌ای نیز استفاده‌های فراوانی به عمل می‌آید. در حوزه صنعت انرژی و اقتصاد کلان جامعه، صیانت از منابع و ذخایر به‌عنوان یکی از ضروریات مهم و استراتژیک مطرح است. به‌طور کلی اندرکنش سازه و سیال زمانی رخ می‌دهد که جریان یک سیال دچار فعل و انفعالاتی با بدنه‌ی یک سازه جامد شود که به اختصار FSI نامیده می‌شود. اعمال بار فشاری توسط سیال به یک جسم جامد از جمله مواردی است که می‌تواند بین سازه و سیال اتفاق بیفتد. این فعل و انفعال می‌تواند باعث تغییر شکل در سازه گردد. گاهی این تغییر شکل به قدری بزرگ است که حتی ماهیت جریان سیال را می‌تواند تحت تأثیر قرار بدهد. به‌طور کلی به حالتی که تغییر شکل در سازه باعث تغییر ماهیت جریان سیال می‌شود، اندرکنش دوطرفه (two way interaction) گفته می‌شود و حالتی که تغییر شکل سازه، تأثیری بر جریان سیال ندارد، اندرکنش یک‌طرفه (one way interaction) نامیده می‌شود. به‌طور کلی اندرکنش بین سیال و سازه (FSI) یک مولتی‌فیزیک است که معادلات بین دینامیک سیالات و مکانیک جامدات را کوپل می‌کند. به عبارتی دیگر زمانی که یک جریان سیال با یک جامد (سازه) برخورد می‌کند، تنش یا کرنش (به‌طور کلی نیرویی که منجر به تغییر شکل شود) به سازه اعمال می‌شود. این تغییر شکل بستگی به فشار و سرعت سیال و همچنین رفتار و خواص مکانیکی جامد، می‌تواند بسیار بزرگ یا بسیار کوچک باشد. لوسیونی و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی رفتار دال‌های بتنی تحت اثر بار انفجار پرداختند [۱]. کیانوش و همکاران [۲] نیز با انجام یک مطالعه پارامتری بررسی نمودند که انعطاف‌پذیری دیواره مخزن در هنگام محاسبه فشار هیدرودینامیکی، باید حتماً در نظر گرفته شود. لو و همکاران در سال ۲۰۰۶ مدلی برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، انفجار در خاک و توزیع فشار حاصل از انفجار در خاک ارائه کردند [۳]. همچنین سازن و همکاران به بررسی کارکرد لرزه‌ای مخازن و تحقیق بر روی پارامترهای مؤثر در رفتار دینامیکی مخازن پرداختند [۴]. در آن مطالعه برای تحلیل دینامیکی از یک مدل ساده شده سه جرمی و مدل اجزاء محدود استفاده شد و نتایج نشان داد که مقاومت محوری و جانبی ستون‌های تکیه‌گاهی دو مخزن تقریباً پر برای مقاومت موردنیاز در برابر زلزله کافی

نبودند. مطابق با عملکرد سازه‌ای مشاهده شده، یک پاسخ الاستیک برای ستون‌های تکیه‌گاهی ۲۵٪ عدم خرابی را برای مخازن پر یکسان پیش‌بینی می‌کند. آن‌ها، به بررسی تأثیر مؤلفه قائم زلزله و ممان واژگونی پرداختند و نتیجه گرفتند که جداساز آونگ اصطکاکی ابزاری مؤثر در کاهش برش پایه مخازن در نظر گرفته شده بود. با توجه به اینکه مخازن ذخیره سیال جزء سازه‌های استراتژیک هر کشوری هستند حفاظت از خواص ضد محیط زیست مواد ذخیره شده در آن‌ها امری مهم می‌باشد و از این جهت از نظر طبقه‌بندی جزء سازه‌های بسیار حساس می‌باشند. اگر یک سازه مقاوم در برابر زلزله اصول مقاوم‌سازی انفجاری را نیز رعایت کند، می‌تواند ایستادگی حداقل و عدم فروپاشی را در انفجار نیز داشته باشد [۵]. بررسی بار دینامیکی از سال ۱۹۶۰ در طراحی پی‌های مستطیلی مطرح شد. پیش از آن نیز پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه آنالیز رفتار دینامیکی سازه‌ها انجام گرفته بود. در این آنالیزها پاسخ سازه با در نظر گرفتن درجات آزادی وقتی اثر زلزله مستقیم بر آن اعمال می‌شود، با استفاده از معادلات حرکت سازه به دست می‌آمد، اما در حالتی که اطراف سازه خاک بوده است، اثر زلزله به خاک وارد شده و مستقیماً به سازه وارد نمی‌شود. در این حالات مشخص شد که رفتار سازه از تغییرات دینامیکی سیستم پی نوین تحت عنوان اندرکنش خاک و سازه در بررسی رفتار فونداسیون تأثیر می‌پذیرد که این تأثیر پایه‌گذار رویکردی دینامیکی سازه‌ها نامیده شد. مشکل اصلی نظریه مرزهای جاذب محدودیت در تحلیل حوزه‌ی فرکانسی بود. کیانوش و مسلمی [۶]، رفتار دینامیکی مخازن باز در بالای سطح زمین را بررسی کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که در حال حاضر، روش‌های طراحی در برآورد فشار هیدرودینامیک، بیش از حد محافظه‌کارانه است. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی AUTODYN و با کمک معادله حالت و مدل رفتاری مناسب مصالح، خاک، ماده منفجره و سازه را در یک محیط مدل کرده و نسبت به تحلیل آن اقدام کردند. ژانگ و همکارانش به مطالعه عددی پاسخ دینامیکی و تحلیل شکست مخازن ذخیره کروی تحت بار انفجاری پرداخته است. در این بررسی متد TNT معادل، برای شبیه‌سازی انفجار بخارهای نفت خام بر روی مخزن ۱۰۰۰ مترمکعب قرار گرفته و پاسخ دینامیکی این مخزن، مانند توزیع تنش مؤثر تغییر مکان‌های سازه‌ای، مد شکست و توزیع انرژی تحت بارهای انفجاری مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که فشار ایجاد شده بر مخزن کروی به تدریج از خط میانه کره به سمت قطب‌های آن

### قوانین مقیاس در انفجار

یکی از روش‌های معمول برای مقیاس کردن خصوصیات موج انفجار، روش معادل‌سازی می‌باشد. روش‌های متعدد دیگری جهت تخمین مشخصات موج انفجار پیشنهاد شده است که اغلب بر پایه نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که می‌توان خصوصیات موج انفجار حاصل از مقدار فاصله دلخواه را تخمین زد. در بسیاری از تحلیل‌ها جهت مقیاس‌گذاری امواج انفجار از فرمول‌های هاپکینسون ۱۲ و کرانز ۱۳ استفاده می‌شود که در شکل (۱) نمایش داده شده است. این مقیاس به وسیله ریشه سوم وزن ماده منفجره تعریف می‌شود، به این صورت که اگر دو ماده منفجره اولیه کروی، با مقدار جرم‌های  $W_1$  و  $W_2$  و فواصل  $d_1$  و  $d_2$  وجود داشته باشد  $W_1$  با  $d_1^3$  و  $W_2$  با  $d_2^3$  متناسب است.



شکل ۱- قوانین هاپکینسون-کرانز برای مقیاس شده [۱۳]

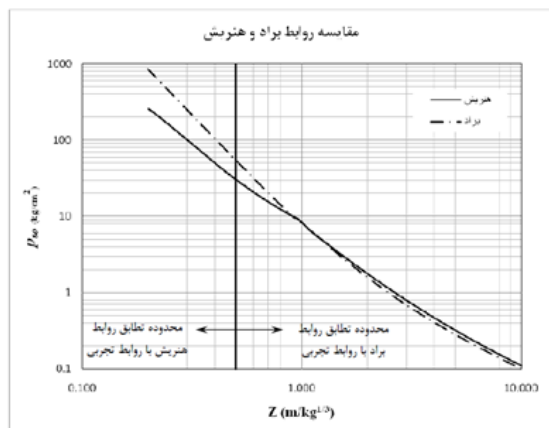
همچنین می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $R_1$  فاصله مسافتی می‌باشد که اضافه فشار  $P$  توسط ماده منفجره اول به جرم  $W_1$  ایجاد شده است و  $R_2$  فاصله مسافتی است که همان مقدار اضافه فشار، توسط ماده منفجره دوم تولید شده است. بنابراین با توجه به روابط فوق فاصله مقیاس شده ( $Z$ ) به صورت زیر به دست می‌آید.

کاهش پیدا می‌کند، با این وجود این اثرات موج انفجاری در پایه‌های مخزن آشکار نیست. این بررسی با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA مورد مطالعه قرار گرفت [۷]. برای مدل‌سازی پاسخ مخازن به بارهای انفجاری می‌توان با استفاده از نتایج آزمایشات و تحقیقات تجربی صورت گرفته، بارهای انفجاری را به شکل نرم‌افزاری به سازه اعمال نمود و با توجه به روش‌های عددی و اجزاء محدود به مدل‌سازی پاسخ سازه به این بارها پرداخت. تعیین دقیق و منطقی بار انفجاری اساس تحلیل میزان خرابی سازه‌ای و طراحی مقاوم‌سازی مخازن تحت این بارها می‌باشد [۸]. عسگری و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر بی‌نظمی‌های توپوگرافی بر رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع مستطیلی شکل پرداختند. به منظور ارزیابی اثر بی‌نظمی‌های توپوگرافی، سطوح خاک صاف و شیب‌دار با سه نوع خاک مختلف در نظر گرفته شد. بدنه مخزن به صورت پهن و باریک تحت تأثیر شش حرکت لرزه‌ای مختلف با نسبت‌های مختلف حداکثر شتاب زمین به سرعت زمین مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر وجود مایع بر پاسخ مخزن، مخزن پر و مخزن خالی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تقویت ناشی از بی‌نظمی‌های توپوگرافی تأثیر چشمگیری بر پاسخ مخزن دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که محتوای فرکانس زلزله به‌طور قابل توجهی بر رفتار دینامیکی مخازن مایع تأثیر می‌گذارد [۹]. تیسپیانیس و همکاران به بررسی پاسخ دینامیکی و اندرکنش مخازن ذخیره مایع باریک برای شرایط مختلف فونداسیون پرداختند. همچنین آن‌ها در تحقیق خود از مدل‌های اجزای محدود شامل فرمول‌های تماسی مناسب برای مدل‌سازی دقیق اندرکنش خاک و سازه برای هر نوع شرایط استفاده نمودند [۱۰]. چنگ و همکاران به بررسی یک مدل مکانیکی جرم-فنر ساده برای آنالیز مخزن مستطیلی ذخیره‌سازی مایع بتنی (CRLSS) پرداختند. تجزیه و تحلیل پارامترهای تحقیق نشان می‌دهد که سختی ضربه، شکاف اولیه، سرعت، ارتفاع مایع و نسبت طول به عرض ( $L/W$ ) سازه از عوامل اصلی مؤثر بر پاسخ ضربه در مخزن هستند [۱۱]. حال در این تحقیق توجه بیشتری بر میزان گسترش خرابی وارده به بدنه مخزن تحت ناشی از موج انفجار با توجه به مقادیر مختلف تی ان تی در فواصل مختلف مقیاس شده گردیده است.

که در این روابط  $Z$  مطابق رابطه (۲) و دارای واحد  $m/Kg^{1/3}$  و ماکزیمم فشار انفجار  $(P_{SO})$  می‌باشد. فشار مینا انفجار بر اساس فاصله مقیاس شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- فشار مینا انفجار  $P_{SO}$  بر اساس فاصله مقیاس شده ( $Z$ )

بر اساس مطالعات انجام شده توسط محققین آیین‌نامه‌هایی برای طراحی سازه‌ها در برابر انفجار ارائه شده است. از جمله این آیین‌نامه‌ها می‌توان به آیین‌نامه ۱۳۰۰- TM5 وزارت دفاع آمریکا در سال ۱۹۹۰، آیین‌نامه UFC 3-340-02 آمریکا در سال ۲۰۰۸، آیین‌نامه استاندارد ASCE/SEI 9-11 آمریکا در سال ۲۰۱۱ و آیین‌نامه IITK-GSOMA هند در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد.

### شبیه‌سازی روش عددی

از مهم‌ترین اهدافی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است بررسی عملکرد اثر ضربه ناشی از موج انفجار بر مخزن بتنی مسلح و همچنین بررسی میزان گسترش خرابی می‌باشد. جهت مدل‌سازی از روش (LBE (Load Blast Enhanced و از نرم‌افزار ال اس دینا مورد استفاده شده است. المان مورد استفاده در تحقیق SOLID\_164 می‌باشد. مقادیر تی ان تی مورد استفاده جهت مدلسازی ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم در فواصل مختلف ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری از مخزن بتنی در حالت غیرمدفون در دو حالت جانبی و بالای مخزن شبیه‌سازی گردیده است و بیشینه فشار اعمالی به مخزن بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه مدلسازی شامل مخزن بتنی، آب و تی ان تی می‌باشد و جهت ایجاد اثر اندرکنش بین سیال و مخزن در نرم‌افزار از دستور FSI (Fluid Structure Interaction) مورد استفاده

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_2} &= \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} \\ &= \left(\frac{1}{W_2}\right)^{\frac{1}{3}} \\ &\Rightarrow \frac{R_1}{R_2} \\ &= \frac{R_1}{W_2^{1/3}} \\ &\Rightarrow Z \\ &= \frac{R}{W_{eq}^{1/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

دوی و اسپراز، نشان دادند که مقیاس‌ها پکینسون-کرانز حالتی خاص از مقیاس ساچز می‌باشد. به این صورت که در روش مقیاس ساچز در شرایط اتمسفر یکسان بین داده‌های آزمایشگاهی و شرایط موجود، همان روش مقیاس‌ها پکینسون-کرانز می‌باشد [۱۳].

بارگذاری انفجار در حوزه آزاد

تابع نمودار فشار-زمان به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد.

$$P_s(t) = P_o + P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_d}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $P_o$  فشار لحظه‌ی،  $P_{SO}$  ماکزیمم فشار اولیه،  $t_d$  زمان تداوم امواج در فاز مثبت فشار و  $\alpha$  نیز از رابطه (۳) به دست می‌آید.

### روابط اسمیت و هدرینگتون

بر اساس مطالعات انجام شده توسط اسمیت و هدرینگتون مقدار ماکزیمم فشار انفجار از روابط زیر به دست می‌آید [۱۳].

$$p_{so} = \frac{1407.2}{Z} + \frac{544}{Z^2} + \frac{035.7}{Z^3} + \frac{0.625}{Z^4} \quad (0.05 \leq Z < 0.3) \quad (4)$$

$$p_{so} = \frac{619.4}{Z} + \frac{32.6}{Z^2} + \frac{213.2}{Z^3} \quad (0.3 \leq Z \leq 1) \quad (5)$$

$$p_{so} = \frac{66.2}{Z} + \frac{405}{Z^2} + \frac{328.8}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 10) \quad (6)$$

استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق برای مدل ماده منفجره از معادله حالت JWL و از مدل ماده MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN استفاده شده است که معادله فشار آن به صورت زیر تعریف شده است:

$$p = A \left[ 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[ 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (7)$$

که در آن P فشار، R1، R2، B، A ضرایبی می‌باشند که بر اساس ماده منفجره تغییر می‌کنند، V حجم ماده منفجره و E انرژی مشخصه انفجار می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات تی ان تی [۱۴].

مشخصات مدل ماده	مقدار عددی
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	1630
سرعت انتشار موج انفجار (متر بر ثانیه)	6930
Pcj (Gpa)	21
A (Gpa)	374
B (Gpa)	3.23
R1	4.15
R2	0.95
$\Omega$	0.35
V	1
E0 (J/kg)	6.00E+09

### مدل ماده مخزن بتنی:

در آن تحقیق برای مدل مخزن بتنی از مدل ماده (-Mat Pseudo-Tensor) برای مدل‌سازی استفاده شده است. مخزن مورد استفاده در این تحقیق با سطح مقطع مستطیلی ۱۰۰۰ \* ۱۰۰۰ \* ۴۰۰۰ و به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر مدل‌سازی شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات مخزن بتنی [۱۴].

چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)	۲۴۰۰	PER	0.18
مدول برشی (پاسکال)	1.25 E 10	ER	2.1 E 11
ضریب پواسون	0.2	ضریب پواسون میلگرد	0.3
SIGF	2.3 E 6	SIGY	3.4 E 8
A0	-1	مدول سختی پلاستیک	4.83 E 9

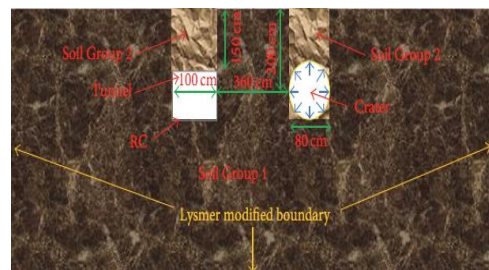
قرار گرفته است که بتوان اثر سیال را بر روی دیواره مخزن مشاهده نمود. در این تحقیق جهت راست آزمایی با آزمایشی که توسط سهیلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است مقایسه گردیده است. آن‌ها در تحقیق خود یک مخزن مکعب مستطیل به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و ابعاد ۱۰۰۰ \* ۱۰۰۰ \* ۴۰۰۰ میلی‌متر که در خاک مدفون شده بود را مورد انفجار قرار دادند.



شکل ۳- مدل آزمایشگاهی مدفون در خاک

مخزن بتنی که در آزمایش مورد انفجار قرار گرفته است یک سازه بتن مسلح است که با میلگردهای سایز ۸ و با مقاومت تسلیم ۳۴۰ مگاپاسکال در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است.

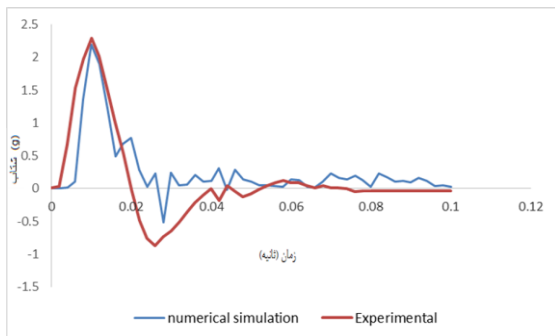
### مدل ماده منفجره:



در آن پژوهش جهت بارگذاری انفجار در نرم‌افزار ال اس داینای از منوی LOAD\_BLAST\_ENHANCED مورد

### صحت سنجی مدل سازی

مدل صحت سنجی یک مدل آزمایشگاهی است که توسط سهیلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شده است. مدل آزمایشگاهی دارای ضخامت ۱۰۰ میلی متر و ابعاد ۴۰۰۰\*۱۰۰۰\*۱۰۰۰ میلی متر می باشد. 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 میلی متری از سطح زمین قرار دارد. ماده منفجره در آزمایش از نوع آمونیوم نیترات (ANFO) است که معادل ۱/۶۹ کیلوگرم تی آن تی است. در مدل آزمایشگاهی برای اندازه گیری شتاب از شتاب سنج استفاده شده است. با توجه به اینکه ابعاد مخزن ۱۰۰۰\*۱۰۰۰\*۴۰۰۰ میلی متر می باشد، شتاب سنج دقیقاً در فاصله ۲۰۰۰ میلی متری (وسط مخزن) قرار گرفته است و همچنین نسبت به کف مخزن در فاصله ۵۰۰ میلی متری قرار گرفته است. پس از انفجار شتاب وارده توسط سنسورهای شتاب سنج اندازه گیری شده است [۱۴]. در شکل (۴) نمودار مقایسه بین پیک شتاب در شبیه سازی در حالتی که مقدار تی آن تی ۱/۶۹ کیلوگرم می باشد با حالت مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۴- نمودار مقایسه شتاب بر حسب زمان شبیه سازی و مدل آزمایشگاهی

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه نقطه پیک شتاب در انفجار بسیار حائز اهمیت است در این تحقیق سعی بر آن شده است که نقاط پیک شتاب هم از نظر مقداری و هم از نظر زمانی بر روی یکدیگر تطابق مناسبی داشته باشد. پیک شتاب شبیه سازی ۲/۲g در زمان ۰/۰۱ ثانیه به دست آمده است که این مقدار در مقاله صحت سنجی نیز برابر با ۲/۱۶g اتفاق افتاده است. میزان اختلاف به دست آمده حدود ۱/۸۸٪ می باشد

### مدل ماده آب

برای مدل سازی آب درون مخزن در نرم افزار ال اس دایناس معادله حالت (GRUNEISEN) استفاده شده است. مشخصات مدل ماده آب به صورت جدول (۳) آورده شده است. مدل ماده سیال مورد استفاده در این تحقیق به نام MAT NULL در نرم افزار ال اس دایناس تعریف شده است و دارای یک معادله حالت کلی به نام Gruneisen Equational state می باشد و معادله فشار آن به صورت زیر تعریف شده است:

$$E(\gamma_0 + a\mu) + \frac{\rho_0 C_2 \mu (1 + (1 - \gamma_0 / 2)\mu - a\mu^2 / 2)}{(1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu_2 / (1 + \mu) - S_3 \mu^3 / (1 + \mu_2))^2} \quad (8)$$

مطابق با معادله فوق P فشار،  $\mu$  که برابر رابطه  $\frac{\rho}{\rho_0} - 1$  چگالی، E مقدار انرژی ویژه داخلی، C سرعت موج انتشار در سیال و  $S_1, S_2, S_3, \alpha, \gamma_0$  ضرایب ثابت معادله می باشند.

جدول ۳- مشخصات مدل ماده آب [۱۴].

C	۱۴۸۰	S3	۰,۷
S1	۱۴۲	GAMAO	۰,۵
S2	۰,۳۳	RO	۱۰۲۵

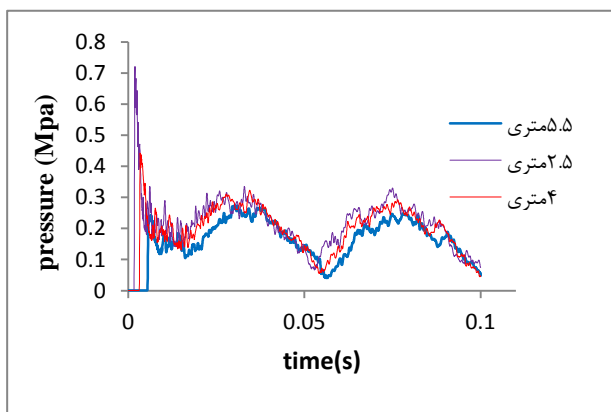
### مدل ماده خاک

در نرم افزار ال اس دایناس برای مدل سازی خاک از مدل ماده SOIL\_AND\_FOAM که مدلی بسیار کاربردی است و عملکرد مناسبی در برابر انفجار دارد استفاده شده است. خصوصیات آن در جدول (۴) آورده شده است. مطابق با جدول ۴،  $a_0, a_1$  و  $a_2$  نیز ضرایب ثابت تابع تنش می باشند که بسته به نوع مدل ماده خاک متغیر می باشند.

جدول ۴- مشخصات خاک مورد استفاده در مدل سازی [۱۴].

مشخصات خاک	مشخصات مدل ماده
1440	چگالی
3.4 E + 6	مدول برشی
15.02 E + 6	مدول بالک
0	Pc
0	a0
0	a1
۰/۶	a2

می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد که مقدار فشار آن برابر با ۰/۷۲ مگاپاسکال بوده است و در زمان ۰/۰۰۱۸ ثانیه اتفاق افتاده و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۴۴ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۰۳۳ ثانیه و در فاصله ۵/۵ متری برابر است با ۰/۲۷ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۰۳ ثانیه رخ داده است. همان‌طور که مشخص است مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری ۳۹٪ کاهش یافته است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش ۶۳٪ همراه بوده است. به‌طور کلی هر چه فاصله دورتر می‌شود سرعت موج انفجار رفته رفته کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر مخرب تی ان تی بر دیواره مخزن نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۷- نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۲ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۲ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد که مقدار فشار آن برابر با ۰/۸۸ مگاپاسکال بوده است و در زمان ۰/۰۰۱۷ ثانیه اتفاق افتاده و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۵۳ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر است با ۰/۳۱ مگاپاسکال به دست آمده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری ۴۰٪ کاهش یافته است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش ۶۴٪ همراه بوده است. به‌طور کلی زمانی که تی ان تی ۱۲ کیلوگرم بوده است نسبت به ۱۰ کیلوگرم تی ان تی، این

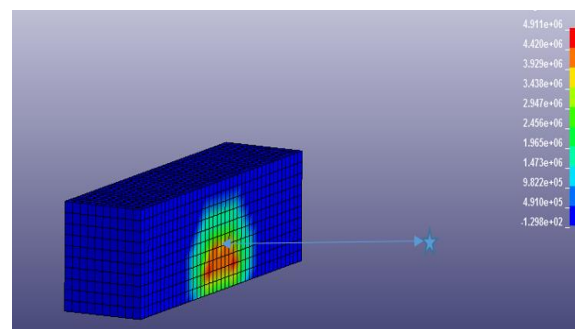
که این میزان خطا بیانگر این موضوع است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی بسیار نزدیک به نتایج مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

### فشار وارده به مخزن تحت بار ضربه ناشی از انفجار در حالت تی ان تی در کنار مخزن

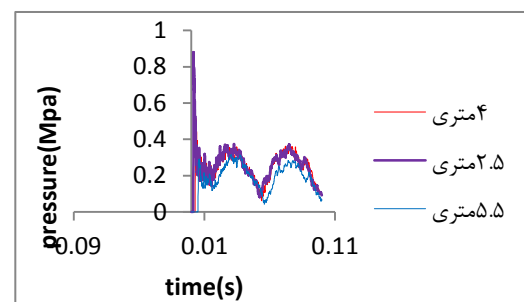
در این بخش به بحث و بررسی نتایج به دست آمده ناشی از عملکرد مخزن تحت بار ضربه ناشی از انفجار برای جرم‌های تی ان تی ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم در فواصل مختلف پرداخته شده است. در این بخش تی ان تی در کنار مخزن قرار گرفته است و نتایج به دست آمده به‌طور خلاصه در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵- فشارهای وارده به مخزن در حالت تی ان تی در کنار مخزن

جرم (kg)	R=2/5 (m)	R=4 (m)	R=5/5 (m)
۱۰	۰/۷۲ (Mpa)	۰/۴۴ (Mpa)	۰/۲۷ (Mpa)
۱۲	۰/۸۸ (Mpa)	۰/۵۳ (Mpa)	۰/۳۱ (Mpa)
۱۴	۰/۹۹ (Mpa)	۰/۶۰ (Mpa)	۰/۳۶ (Mpa)
۱۶	۱/۱۳ (Mpa)	۰/۷۰ (Mpa)	۰/۴۲ (Mpa)
۱۸	۱/۲۳ (Mpa)	۰/۷۶ (Mpa)	۰/۴۴ (Mpa)



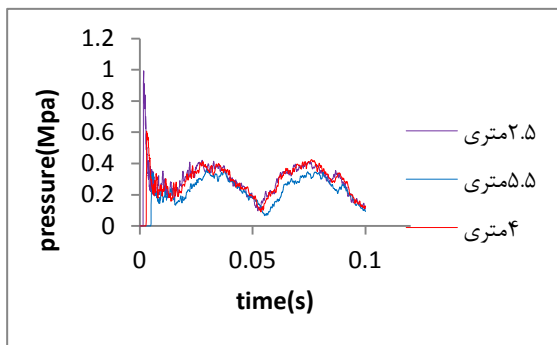
شکل ۵- موقعیت شماتیک تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن



شکل ۶- نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۰ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن

شکل (۶) مربوط به نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۰ کیلوگرم تی ان تی برای فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری را نشان

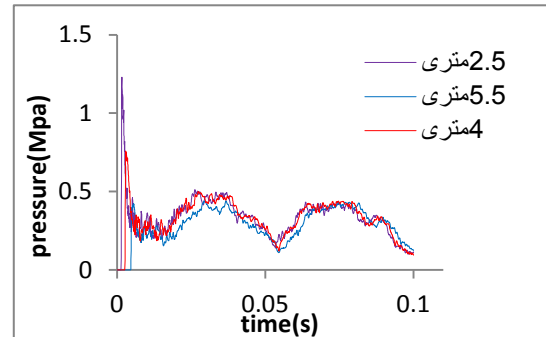
بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۶ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متری برابر با ۱/۱۳ مگاپاسکال بوده است و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۷ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر است با ۰/۴۲ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۷۷ ثانیه رخ داده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری ۳۸٪ کاهش یافته است. این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش ۶۳٪ همراه بوده است. افزایش فشار وارده به مخزن زمانی که تی ان تی ۱۶ کیلوگرم بوده است نسبت به ۱۴ کیلوگرم به طور متوسط برابر با افزایش گسترش آسیب ۱۵٪ همراه بوده است.



شکل ۱۰- نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۸ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن

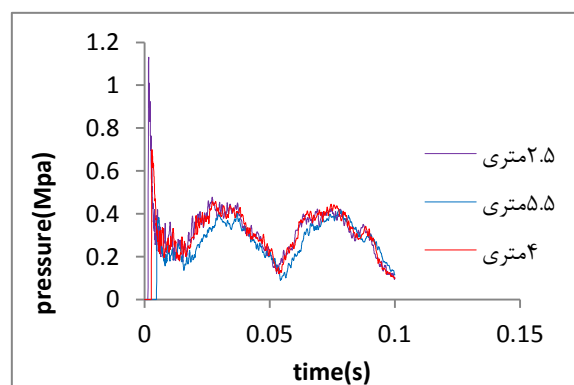
شکل (۱۰) مربوط به نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۸ کیلوگرم تی ان تی برای فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری از کنار مخزن را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۸ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد که مقدار فشار آن برابر با ۱/۲۳ مگاپاسکال بوده است و در زمان ۰/۰۱۵ ثانیه اتفاق افتاده و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۷۶ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۲۸ ثانیه و در فاصله ۵/۵ متری برابر است با ۰/۴۴ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۳ ثانیه رخ داده است. همان طور که از نتایج پیداست مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش ۳۸٪ همراه بوده است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش ۶۴٪ همراه بوده است. افزایش فشار وارده به مخزن زمانی که تی ان تی ۱۸ کیلوگرم بوده است نسبت به ۱۶ کیلوگرم به طور متوسط برابر با افزایش گسترش خرابی ۷٪ همراه بوده است.

مقدار به طور متوسط با افزایش آسیب حدود ۱۷٪ همراه بوده است.



شکل ۸- نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۴ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن

همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۴ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متری برابر با ۰/۹۹ مگاپاسکال بوده است. این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر با ۰/۶۰ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر است با ۰/۳۶ مگاپاسکال به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری ۳۹٪ کاهش یافته است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش گسترش خرابی ۶۳٪ همراه بوده است. به طور کلی زمانی که تی ان تی ۱۴ کیلوگرم بوده است نسبت به ۱۲ کیلوگرم تی ان تی، این مقدار به طور متوسط با افزایش خرابی حدود ۱۳٪ همراه بوده است.



شکل ۹- نمودار فشار برحسب زمان برای جرم ۱۶ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از کنار مخزن



نشان می‌دهد که در فاصله ۲/۵ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن حدود ۲۰٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۳۰٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۶٪ و ۴۳٪ فشار همراه بوده است. در فاصله ۴ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن ۱۷٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۲۷٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۸٪ و ۴۲٪ فشار همراه بوده است. در فاصله ۵/۵ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن ۱۳٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۲۵٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۵٪ و ۳۹٪ فشار همراه بوده است. همچنین در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد به طور متوسط بیشترین توسعه خرابی مخزن در حالت تی ان تی در کنار مخزن با افزایش ۴۲٪ همراه بوده است.

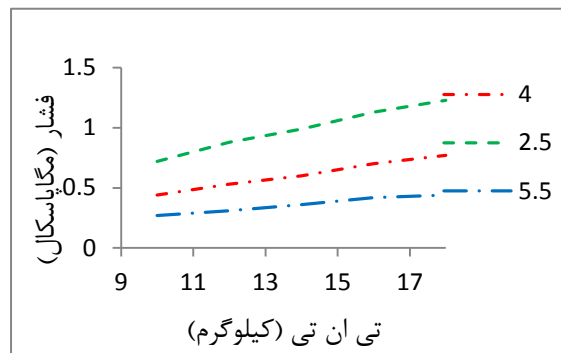
#### فشار وارده به مخزن تحت بار ضربه ناشی از انفجار در

##### حالت تی ان تی در بالای مخزن

در این قسمت تی ان تی با جرم‌های ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ و ۱۸ در موقعیت بالای مخزن در فاصله‌های ۲/۵ و ۴ و ۵/۵ متری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله از مدلسازی به طور خلاصه در جدول (۶) آورده شده است.

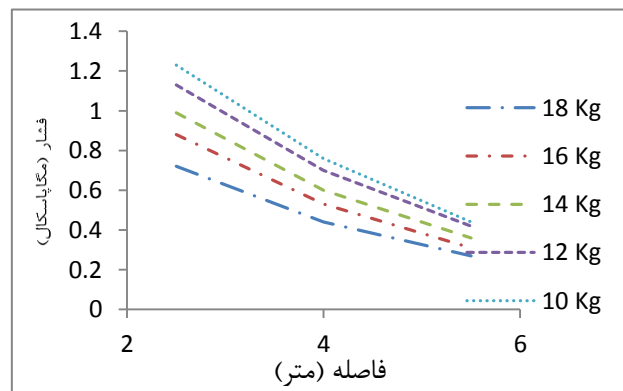
جدول ۶- فشارهای وارده به مخزن در حالت تی ان تی بالای مخزن

(kg) جرم	R=2/5 (m)	R=4 (m)	R=5/5 (m)
۱۰	۰/۶۸ (Mpa)	۰/۴۲ (Mpa)	۰/۲۶ (Mpa)
۱۲	۰/۸۱ (Mpa)	۰/۵۰ (Mpa)	۰/۳۰ (Mpa)
۱۴	۰/۹۱ (Mpa)	۰/۵۷ (Mpa)	۰/۳۴ (Mpa)
۱۶	۱/۰۳ (Mpa)	۰/۶۵ (Mpa)	۰/۳۷ (Mpa)
۱۸	۱/۱۴ (Mpa)	۰/۷۳ (Mpa)	۰/۴۱ (Mpa)



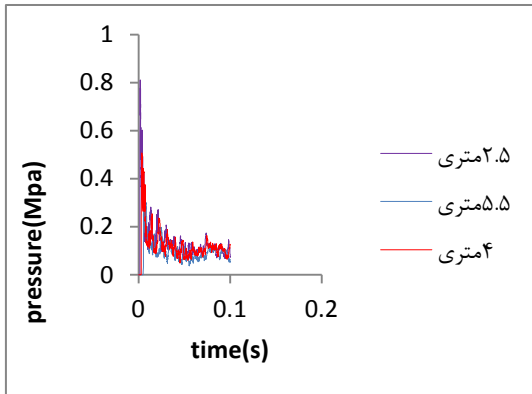
شکل ۱۱- نمودار فشار بر حسب جرم تی ان تی در فواصل مختلف در حالت تی ان تی کنار مخزن

شکل (۱۱) مربوط به نمودار فشار بر حسب جرم تی ان تی در فواصل ۲،۵ و ۴ و ۵،۵ متر می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است با افزایش جرم تی ان تی فشار وارد بر دیواره مخزن در فواصل مختلف با افزایش گسترش خرابی مخزن همراه بوده است که این میزان به طور متوسط حدود ۱۲٪ به دست آمده است و با افزایش فاصله تی ان تی تا دیواره مخزن فشار وارد بر مخزن نیز به طور متوسط با کاهش خرابی ۳۸٪ همراه بوده است.

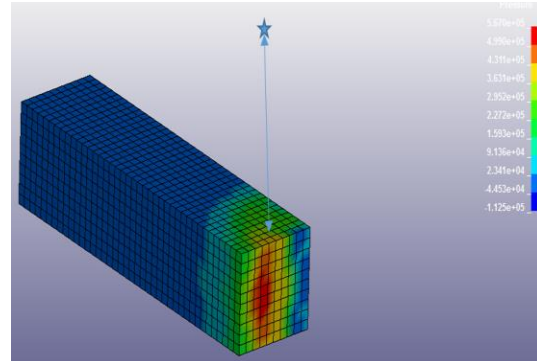


شکل ۱۲- نمودار فشار بر حسب فاصله برای مقادیر مختلف تی ان تی در حالت کنار مخزن

شکل (۱۲) بیشینه فشار بر حسب فاصله برای تی ان تی‌های مختلف را نشان می‌دهد. مقدار فشار اعمالی به مخزن برای فاصله ۲/۵ متری برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۸۸، ۰/۹۹، ۱/۱۳ و ۱/۲۳ مگاپاسکال به دست آمده است. این مقدار برای فاصله ۴ متری به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۵۳، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۷۶ مگاپاسکال به دست آمده است. فشار اعمالی به مخزن برای فاصله ۵/۵ متری برای جرم‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ کیلوگرم به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۳۶، ۰/۴۲ و ۰/۴۴ مگاپاسکال به دست آمده است. نتایج

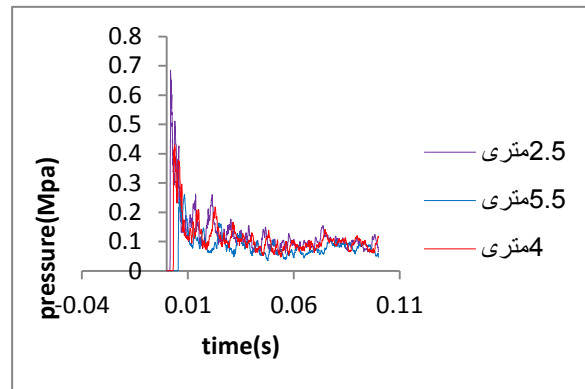


شکل ۱۳- موقعیت شماتیک تی ان تی در فواصل مختلف از بالای مخزن

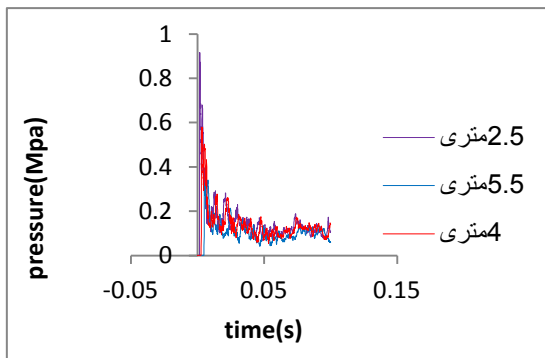


شکل ۱۵- نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۲ کیلوگرم تی ان تی در سه فاصله مختلف از بالای مخزن

همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۲ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد و مقدار فشار آن برابر با ۰/۸۱ مگاپاسکال بوده است. این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۵۰ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر است حدود ۰/۳ مگاپاسکال در زمان ۰/۰۰۸۱ ثانیه رخ داده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۴ متری با توسعه آسیب ۳۸٪ همراه بوده است و این مقدار برای فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۵/۵ متری با گسترش فشار ۶۲٪ همراه بوده است.

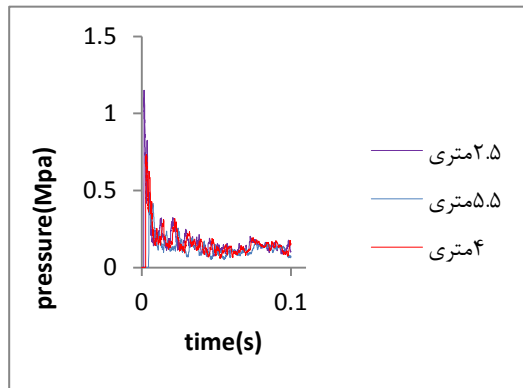


شکل ۱۴- نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۰ کیلوگرم تی ان تی در فواصل مختلف از بالای مخزن



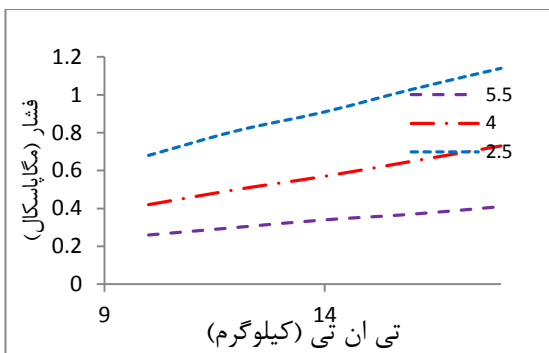
شکل ۱۶- نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۴ کیلوگرم تی ان تی در فاصله مختلف از بالای مخزن

شکل (۱۴) مربوط به نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۰ کیلوگرم تی ان تی برای فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برابر با ۰/۶۸ مگاپاسکال به دست آمده است و در زمان ۰/۰۰۱۸ ثانیه اتفاق افتاده است و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر با ۰/۴۲ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر با ۰/۲۶ مگاپاسکال می‌باشد. همان‌طور که از نتایج پیداست مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۴ متری ۲۸٪ افزایش یافته است و این مقدار برای فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۵/۵ متری با افزایش خرابی ۶۱٪ همراه بوده است.



شکل ۱۸ - نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۸ کیلوگرم تی ان تی در سه فاصله مختلف از بالای مخزن

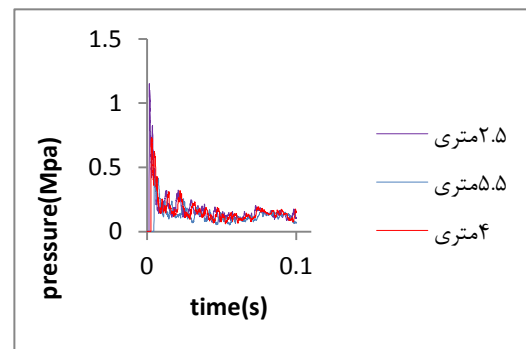
شکل (۱۸) مربوط به نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۸ کیلوگرم تی ان تی برای فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار فشار برابر با ۱/۱۴ مگاپاسکال بوده است و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر با ۰/۷۳ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر با ۰/۴۱ مگاپاسکال به دست آمده است و در زمان ۰/۰۷۵ ثانیه رخ داده است.



شکل ۱۹ - نمودار فشار بر حسب جرم تی ان تی در فواصل مختلف در حالت تی ان تی بالای مخزن

شکل (۱۹) مربوط به نمودار فشار بر حسب جرم تی ان تی در فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متر می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است اختلاف فشار در تی ان تی‌های مختلف و در فواصل گوناگون قابل مشاهده است و با افزایش جرم تی ان تی مقدار فشار وارد بر دیواره مخزن در فواصل مختلف به‌طور متوسط حدود ۱۲٪ افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله تی ان تی تا جداره مخزن میزان گسترش آسیب تا ۴۰٪ کاهش یافته است.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۴ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد که مقدار فشار آن برابر با ۰/۹۱ مگاپاسکال بوده است و در زمان ۰/۰۱۷ ثانیه اتفاق افتاده و این مقدار فشار در فاصله ۴ متری برابر است با ۰/۵۷ مگاپاسکال و در فاصله ۵/۵ متری برابر با ۰/۳۴ مگاپاسکال به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار پیشرفت آسیب وارده به مخزن در فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۵/۵ متری با افزایش حدود ۶۵٪ همراه بوده است.



شکل ۱۷ - نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۶ کیلوگرم تی ان تی در سه فاصله مختلف از بالای مخزن

شکل (۱۷) مربوط به نمودار فشار بر حسب زمان برای جرم ۱۶ کیلوگرم تی ان تی برای فواصل ۲/۵، ۴ و ۵/۵ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین فشار وارده به مخزن برای ۱۶ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متر می‌باشد که مقدار فشار آن برابر با ۱/۰۳ مگاپاسکال بوده است و در زمان ۰/۰۱۶ ثانیه اتفاق افتاده است و این مقدار فشار در فاصله ۴ و ۵/۵ متری به ترتیب برابر با ۰/۶۵ و ۰/۳۷ مگاپاسکال به دست آمده است. همان‌طور که مشخص است میزان گسترش خرابی مخزن در فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۴ متری ۳۶٪ افزایش یافته است و این میزان برای فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۵/۵ متری با افزایش ۶۴٪ همراه بوده است.

### تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر فشار وارده به مخزن

در این قسمت به بررسی تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر فشار وارده به مخزن در حالت تی ان تی بالای مخزن برای بحرانی‌ترین حالت مورد بررسی، ۱۰ کیلوگرم تی ان تی در فاصله ۲/۵ متری از مخزن پرداخته شده است. نتایج حاصله از مدلسازی به‌طور خلاصه در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷- تأثیر ارتفاع سیال داخل مخزن بر فشار وارده به مخزن در حالت تی ان تی بالای مخزن

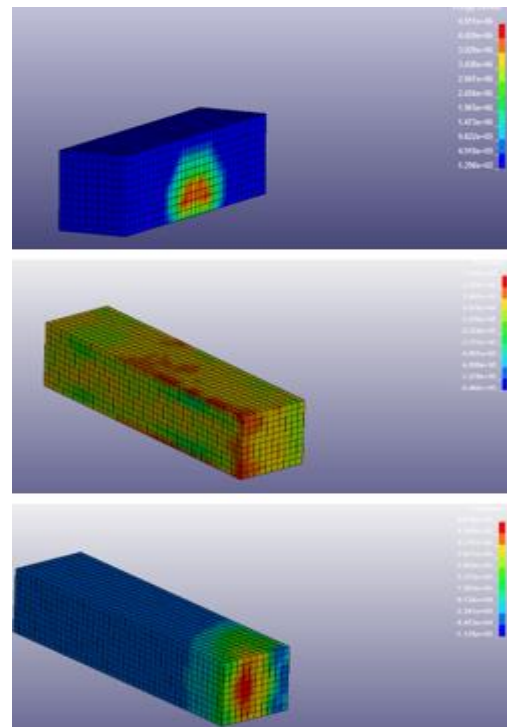
(kg) جرم	Empty	H=0.25h	H=0.5 h	H=0.75 h	Full
۱۰	(Mpa) ۱/۷۶	۱/۴ (Mpa)	(Mpa) ۱/۲۷	(Mpa) ۱/۱۳	(Mpa) ۰/۶۸

مطابق با جدول ۷ نتایج نشان می‌دهد که مقدار فشار وارده به مخزن در پنج حالت مورد بررسی در حالت های خالی، ۱/۴، نیمه پر، ۳/۴، و پر نسبت به حجم مخزن به ترتیب ۱/۷۶، ۱/۴۰، ۱/۲۷، ۱/۱۳، ۰/۶۸ مگاپاسکال به دست آمده است. با افزایش ۲۵٪ ارتفاع سیال در مخزن مقدار فشار وارد بر مخزن نسبت به حالت خالی از سیال حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. همچنین این مقدار با افزایش ارتفاع سیال به ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ به ترتیب با کاهش ۲۸٪، ۴۳٪، ۶۲٪ همراه بوده است که بیانگر کاهش میزان آسیب و گسترش خرابی در بدنه مخزن را با افزایش ارتفاع سیال در مخزن نشان می‌دهد. به عبارت دیگر وجود سیال در مخزن مطالعه موردی این تحقیق به پایداری و استحکام جداره مخزن در برابر موج ناشی از انفجار کمک کرده است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در فاصله ۲/۵ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن در حالتی که تی ان تی در موقعیت بالای مخزن قرار دارد حدود ۱۶٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۲۶٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۴٪ و ۴۰٪ فشار همراه بوده است. در فاصله ۴ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن ۱۶٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۲۶٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۵٪ و ۴۲٪ فشار همراه بوده است. در فاصله ۵/۵ متری با ۱/۲ برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن ۱۳٪ افزایش یافته است و این مقدار با ۱/۴ برابر کردن تی ان تی با افزایش ۲۴٪ همراه بوده است. همچنین با ۱/۶ و ۱/۸ برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود ۳۰٪ و ۳۷٪ فشار همراه بوده است. همچنین در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد به‌طور متوسط بیشترین گسترش خرابی مخزن در حالت تی ان تی در بالای مخزن با افزایش ۳۹/۶٪ همراه بوده است.

شکل ۲۰ کانتور انتشار موج فشار ناشی از انفجار به مخزن و کانتور فشار وارده به مخزن حاوی سیال در گام‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد.

شکل ۲۰- کانتور انتشار موج فشار ضربه ناشی از انفجار به مخزن



## نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین حالت هنگامی است که تی ان تی در کنار سطح مخزن قرار گرفته است و در این حالت دیواره مخزن بیشترین فشار را تجربه می‌کند و بیشترین گسترش و توسعه خرابی مشاهده شده است و هنگامی که تی ان تی در بالای سطح مخزن قرار داشته باشد آسیب کمتری به دیواره مخزن وارد می‌شود.

فاصله تی ان تی با اثر تخریب رابطه عکس دارد. زیرا هر چه فاصله بیشتر شود سرعت موج تی ان تی در لحظه برخورد با سطح مخزن کاهش پیدا و باعث می‌شود اثر میزان تخریب بدنه کاهش پیدا کند.

در این تحقیق نتایج نشان می‌دهد به‌طور متوسط بیشترین گسترش خرابی مخزن در حالت تی ان تی در بالای مخزن و کنار مخزن به ترتیب با افزایش  $۳۹/۶\%$  و  $۴۲\%$  همراه بوده است.

مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری برای تی ان تی ۱۲ کیلوگرم در حالت کنار سطح مخزن نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش  $۴۰\%$  همراه بوده است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش خرابی  $۶۴\%$  همراه بوده است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری برای تی ان تی ۱۴ کیلوگرم در حالت کنار سطح مخزن نسبت به فاصله ۲/۵ متری  $۳۹\%$  کاهش یافته است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش خرابی  $۶۳\%$  همراه بوده است.

مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری برای تی ان تی ۱۶ کیلوگرم در حالت کنار سطح مخزن نسبت به فاصله ۲/۵ متری  $۳۸\%$  کاهش یافته است. این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش  $۶۳\%$  همراه بوده است.

مقدار فشار وارده به مخزن در فاصله ۴ متری برای تی ان تی ۱۸ کیلوگرم در حالت کنار سطح مخزن نسبت به فاصله ۲/۵ متری با کاهش  $۳۸\%$  همراه بوده است و این مقدار برای فاصله ۵/۵ متری نسبت به فاصله ۲/۵ متری با افزایش  $۶۴\%$  همراه بوده است.

با افزایش جرم تی ان تی فشار و گسترش خرابی مخزن در حالت کنار سطح مخزن در فواصل مختلف به‌طور متوسط حدود  $۱۲\%$  افزایش یافته است و با افزایش فاصله تی ان تی آسیب وارد بر دیواره مخزن نیز به‌طور متوسط با کاهش آسیب  $۳۸\%$  همراه بوده است.

همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در فاصله ۲/۵ متری در حالت کنار سطح مخزن با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن حدود  $۲۰\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۳۰\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با توسعه خرابی  $۳۶\%$  و  $۴۳\%$  همراه بوده است.

در فاصله ۴ متری در حالت کنار سطح مخزن با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن  $۱۷\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۲۷\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش فشار حدود  $۳۸\%$  و  $۴۲\%$  همراه بوده است.

در فاصله ۵/۵ متری در حالت کنار سطح مخزن با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن  $۱۳\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۲۵\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش خرابی و آسیب  $۳۵\%$  و  $۳۹\%$  همراه بوده است.

همان‌طور که از نتایج پیداست مقدار آسیب وارده به مخزن در فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۴ متری  $۳۵\%$  افزایش یافته است و این مقدار برای فاصله ۲/۵ متری نسبت به فاصله ۵/۵ متری با افزایش  $۶۴\%$  همراه بوده است.

نتایج نشان می‌دهد که در فاصله ۲/۵ متری با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن در حالتی که تی ان تی در موقعیت بالای مخزن قرار دارد حدود  $۱۶\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۲۶\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود  $۳۴\%$  و  $۴۰\%$  فشار همراه بوده است.

در فاصله ۴ متری در حالت بالای سطح مخزن با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن  $۱۶\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۲۶\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود  $۳۵\%$  و  $۴۲\%$  خرابی مخزن همراه بوده است.

در فاصله ۵/۵ متری در حالت بالای سطح مخزن با  $۱/۲$  برابر کردن تی ان تی فشار وارده به مخزن  $۱۳\%$  افزایش یافته است و این مقدار با  $۱/۴$  برابر کردن تی ان تی با افزایش  $۲۴\%$  همراه بوده است. همچنین با  $۱/۶$  و  $۱/۸$  برابر کردن تی ان تی به ترتیب با افزایش حدود  $۳۰\%$  و  $۳۷\%$  فشار همراه بوده است.

با افزایش  $۲۵\%$  ارتفاع سیال در مخزن مقدار فشار وارد بر مخزن نسبت به حالت خالی از سیال حدود  $۲۰\%$  کاهش یافته است. همچنین این مقدار با افزایش ارتفاع سیال به  $۵۰\%$ ،  $۷۵\%$  و  $۱۰۰\%$  به ترتیب با کاهش  $۲۸\%$ ،  $۴۳\%$ ،  $۶۲\%$  همراه بوده است که بیانگر کاهش میزان آسیب و گسترش خرابی در بدنه مخزن با افزایش ارتفاع سیال می‌باشد.

## مراجع

- [10] Tsipianitis A, Tsompanakis Y, Psarropoulos PN. Impact of dynamic soil-Structure interaction on the response of liquid-storage tanks. *Frontiers in Built Environment*. 2020; 6:140.
- [11] Cheng X, Jing W, Qi L, Gong L. Pounding Dynamic Responses and Mitigation Measures of Sliding Base-isolated Concrete Rectangular Liquid Storage Structuress. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23(7):3146-61.
- [12] Dusenberry DO, editor. *Handbook for blast resistant design of buildings*. John Wiley & Sons. 2010.
- [13] UFC U. UFC 3-340-2. Structures to resist the Effects of Accidental Explosions. UFC 3-340-02, ARMY TM 5-1300, Navy NAVFAC P-397 and Air Force AFR 88-22. 2008.
- [14] Soheyli MR, Akhaveissy AH, Mirhosseini SM. Large-scale experimental and numerical study of blast acceleration created by close-in buried explosion on underground tunnel lining. *Shock and Vibration*. 2016.
- [1] Luccioni BM, Luege M. Concrete pavement slab under blast loads. *International journal of impact engineering*. 2006; 32(8):1248-66.
- [2] Kianoush MR, Chen JZ. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering structures*. 2006; 28(5):704-15.
- [3] Lu Y, Wang Z. Characterization of structural effects from above-ground explosion using coupled numerical simulation. *Computers & Structures*. 2006; 84(28):1729-42.
- [4] Sezen H, Livaoglu R, Dogangun A. Dynamic analysis and seismic performance evaluation of above-ground liquid-containing tanks. *Engineering Structures*. 2008; 30(3):794-803.
- [5] Parisi F, Augenti N. Influence of seismic design criteria on blast resistance of RC framed buildings: A case study. *Engineering Structures*. 2012; 44:78-93.
- [6] Moslemi M, Kianoush MR. Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks. *Engineering Structures*. 2012; 42:214-30.
- [7] Zhang BY, Li HH, Wang W. Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 34:209-17.
- [8] Hu K, Zhao Y. Numerical simulation of internal gaseous explosion loading in large-scale cylindrical tanks with fixed roof. *Thin-Walled Structures*. 2016; 105:16-28.
- [9] Asgari MH, Khodakarami MI, Vahdani R. The Effect of Topographic Irregularities on Seismic Response of the Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks Incorporating Soil-Structure-Liquid Interaction. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2020; 44(4):1179-97.

# Numerical Investigation of the Reinforced Concrete rectangular liquid storage structure (CRLSS) under blast impact by LBE method

Ali Ahmadi Zadeh

Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, West Azerbaijan, Iran

Kaveh Nezamisavjbolaghi

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, West Azerbaijan, Iran

Aladdin Behravesh

professor, Department of Civil Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, West Azerbaijan, Iran

Mohsen Parviz

Assistant Professor, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

k.nezami@iau-mahabad.ac.ir

## Abstract

Liquid Storage refers to structures utilized to store water in the water supply and refueling systems of industrial estates and refineries. These structures are also widely used in industrial areas and nuclear facilities. In the field of energy industry and macroeconomics, protection of resources and storage structures is considered as one of the important and strategic necessities. The present research investigated an unburied concrete reinforced liquid storage structure (CRLSS) with dimensions of  $1 \times 1 \times 4$  m under impact of blast with different TNT masses of 10, 12, 14, 16 and 18 kg at 2.5, 4 and 5.5 meters at both lateral and upper positions of the surrounding wall of the CRLSS. Load blast enhanced (LBE) and LS-DYNA, a non-linear dynamic software, were applied for modeling and explicit solution modeling was used to model the shock caused by the blast wave. The impact of shock, pressure and damage to the CRLSS has been investigated after validating the numerical method by laboratory studies by changing the distances and masses of TNT in both lateral and upper positions of the CRLSS. The results indicate that the most critical situation is when TNT is in the lateral position at 2.5 meters from CRLSS, and impact of blast shock and pressure on the CRLSS increased by approximately 20%, 30%, 36% and 43% by increasing the amount of TNT to 1.2, 1.4, 1.6 and 1.8 times, respectively. Based on the results, the reduction of the amount of damage and the spread of damage in the body of the CRLSS has occurred with the increase of the height of the fluid.

**Keywords:** Tank, Unburied, Blast, Pressure, LS-DYNA, LBE



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)