

پاسخ مخازن بتنی ذخیره آب در برابر انفجار

عبدالحمید رسولی منفرد^۱، یحیی رحیمی^۲، علیرضا کیانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، hamidrasouli65@gmail.com

۲- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، Rahimi.yahya@gmail.com

۳- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، kiani349@yahoo.com

چکیده

با افزایش روزافزون حملات تروریستی و احتمال هدف قرار گرفتن سازه‌ها در جنگ‌های مختلف، به طور خاص در منطقه خاورمیانه و ایران، مبحث پدافند غیر عامل اهمیت فراوانی یافته است. با توجه به نیاز شدید ایران به آب و بحران کم‌آبی در کشور، یکی از اهداف حمله، مخازن آب و سدها هستند. بررسی تجربی آسیب‌پذیری این سازه‌ها بسیار هزینه‌بر بوده و غیر ممکن به نظر می‌رسد. یکی از راهبردهایی که می‌توان در این رابطه، مورد استفاده قرار داد، استفاده از روش‌های اجزاء محدود است. در بین نرم‌افزارهایی که تاکنون برای این کار توسعه داده شده‌اند، نرم‌افزار *LS-DYNA* جایگاه ویژه‌ای در شبیه‌سازی فرایند انفجار دارد. در مطالعه حاضر، انفجار مخزن مکعب مستطیل در نرم‌افزار *LS-DYNA* بررسی شده است. مخزن، آب درون آن، هوای مجاور مخزن و ماده منفجره مدل شده و شبیه‌سازی صورت گرفته است. اثر متغیرهای مختلفی همچون فاصله ماده منفجره و جرم آن، بر روی سازه مذکور مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در نهایت، تغییر شکل‌ها، تنش‌ها و خرابی‌ها در مخزن بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان می‌دهند که با افزایش فاصله، خرابی، تعادلی بین توسعه‌یافتگی و شدت موج است. روش مورد استفاده در این مطالعه، ابزار مناسبی در دست محققینی خواهد بود که قصد مقاوم‌سازی سازه‌های تحت انفجار و اجرای رویکردهای پدافند غیر عامل دارند.

واژه‌های کلیدی: انفجار، پدافند غیر عامل، نرم‌افزار *LS-DYNA*

۱- مقدمه

ایده ساخت مخازن بتنی برای اولین بار در توکیو، سال ۱۹۱۴ مطرح شد. در خلال جنگ جهانی دوم ایالات متحده برای ذخیره‌سازی سوخت کشتی‌های خود، اقدام به ساخت این‌گونه مخازن کرد. بین سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۶۳، تقریباً ۲۱۰ مخزن بتنی برای ذخیره نفت و سایر فرآورده‌های آن ساخته شد. در طرح اولیه‌ی ساخت مخازن بتنی عامل بازدارنده نشتی نفت بود لیکن با توسعه اختراعات نوین مهندسی در خصوص پوشش‌ها و سیستم‌های داخلی مخازن به همراه استفاده از روش‌های پیش‌تنیده و پس‌تنیده این مشکل برطرف شد. پژوهش‌های بین‌المللی درباره مخازن به سال ۱۹۲۰ برمی‌گردد. به ویژه دانشگاه شفیلد از ابتدای دهه هفتاد میلادی تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با تأثیرات جانبی نفت و مواد شیمیایی محلول در بتن آغاز نمود [۱۳].

قلی‌زاد و بهنمیری به بررسی اثرات انفجار روی مخازن سوخت پرداختند. آن‌ها عملکرد سازه‌ای مخازن سوخت را با حجم متناسب با تأسیسات صنعتی را با استفاده از مدل‌سازی دقیق و در نظر گرفتن تأثیر متقابل سازه-سیال در برابر انفجار مورد بررسی قرار دادند و راهکارهای مناسب را برای کاهش خطرات معرفی نمودند [۱۴].

کیویتی ۱ در سال ۱۹۹۳ در پایان‌نامه خود به بررسی پاسخ یک سازه در برابر انفجار داخلی پرداخت. در واقع وی یک مدل رایانه‌ای از پاسخ سازه در برابر موج ناشی از مواد فوق انفجاری که در داخل ساختمان منفجر می‌شوند توسعه داد. این شبیه‌سازی با استفاده از کد سه‌بعدی *MSC/DYTRAN* با استفاده از روش صریح و در نظر گرفتن تقابل سازه و سیال انجام گرفت. سازه مدل شده شامل قسمت‌هایی برای مقاومت در مقابل انفجار مانند پانل‌هایی در قسمت‌های مختلف سازه بود. شبیه‌سازی سازه به این ترتیب بود که برای نواحی ورق مانند در المان‌های پوسته‌ای و برای نواحی بتنی از المان‌های متناسب استفاده گردید [۱].

کیم ۲ و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از یک روش کوپل سیال-سازه-خاک مسئله اندرکنش مخازن استوانه‌ای را به صورت عددی بررسی کردند. در این تحقیق پایه‌های مخازن استوانه‌ای به وسیله یک سری فنر از پایه جداسازی شده و در معرض تحریکات زمین‌لرزه قرار داده شد. در ادامه یک آنالیز دینامیکی از این مخازن با استفاده از فرمول هیبرید کوپل انجام شد که از اجزاء محدود برای ساخت جداره مخزن و از عناصر مرزی جهت مدل‌سازی سیال و خاک استفاده شد. این سیستم از سه بخش تشکیل می‌شد، بخش واکنش سازه-سیال، بخش واکنش خاک-فونداسیون و بخش پایه‌های جداسازی شده، المان سیال و سازه به گونه‌ای مدل‌سازی شدند که شرایط مرزی سیستم به طور دقیق برآورده شود. در بخش واکنش خاک-فونداسیون، با استفاده از اجزاء محدود فونداسیون مدل‌سازی شد [۳].

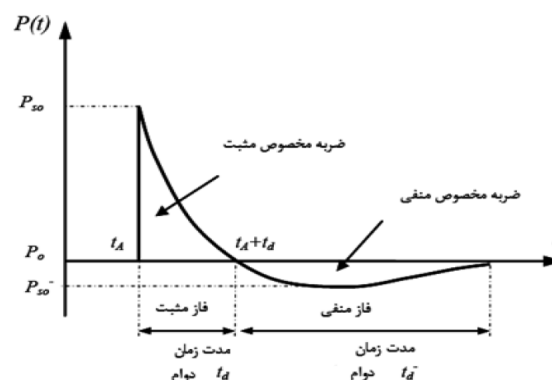
دونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ پاسخ یک مخزن در برابر انفجار را بررسی نمودند. در واقع دونگ و همکارانش پاسخ کماتشی یک مخزن با پوسته نازک را که در برابر نیروی ناشی از یک انفجار تصادفی حاصل از گاز قرار گرفته باشد مورد مطالعه قرار دادند. یک رشته آزمایش‌های مدل شده روی سیلندرهای نازک صورت گرفت تا اثرات پاسخ مخزن به دست آید. برای پیش‌بینی خرابی در مخزن از مدل‌های ساده‌شده شبیه تحلیلی ساده‌شده که بر اساس معادلات دونل ۳ و نقوص بحرانی توسعه داده شده بودند استفاده شد. مقایسات با نتایج آزمایشگاهی نشان از انطباق خوب این نتایج با نتایج آزمایشگاهی می‌داد [۴].

۲- انفجار و مبانی آن

مطابق شکل ۱ پروفیل فشار-زمان شامل دو فاز مثبت و منفی است. زمانی که جبهه موج به موضع مورد نظر می‌رسد، فشار آن به اندازه P_{MAX} افزایش می‌یابد. با گذشت زمان و عبور جبهه موج طی زمان t_p ، فشار افت کرده و به صفر می‌رسد. مدت زمان t_p را زمان تداوم فاز مثبت می‌نامند. به دلیل افزایش حجم محیط انفجار، در داخل آن فشار منفی ایجاد می‌شود که موجب بروز فاز منفی در پروفیل فشار می‌شود. تابع ریاضی پروفیل فشار زمان مطابق رابطه زیر تابعی نمایی است [۵].

$$P_t(t) = (P_{MAX} - P_0) \left(1 - \frac{t - t_A}{t_p} \right) e^{-b \left(\frac{t - t_A}{t_p} \right)} \quad (1)$$

در معادله (۱)، P_0 فشار محیطی، t_p زمان تداوم فاز مثبت، t_A زمان ورود و P_{MAX} قله‌ی فشار است.



شکل ۱: مرحله مثبت و مرحله منفی در نمودار فشار-زمان [۸]

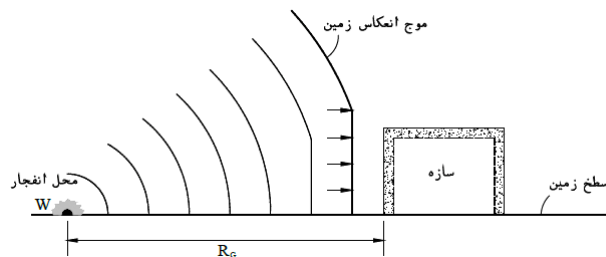
بار ناشی از انفجار باعث افزایش سریع فشار هوا می‌گردد که خود باعث به وجود آمدن فضایی در اطراف بمب انفجاری خواهد شد که در جلوی این محیط هوا دست‌نخورده می‌ماند ولی در پشت سر آن هوای تحت فشار جدیدی قرار خواهد گرفت که این منطقه شوک جلویی موج

1- Kivity

2- Kim

3- Donnel equations

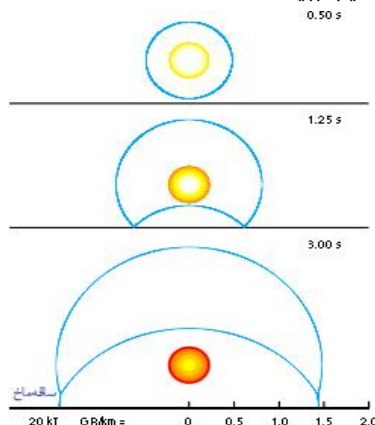
انفجار نامیده می‌شود. چون موج انفجار باعث گرم و منبسط شدن هوای اطراف می‌شود نتیجتاً این امر در هوا و مایعات قابل تراکم، موجب به وجود آمدن موج انفجار خواهد شد.



شکل ۲: موج انفجار ناشی از انفجار در سطح زمین

اهدافی که در مجاورت صفر زمین واقع هستند ممکن تحت تأثیر دو موج انفجار اولیه و کمی بعد یک موج ثانویه منعکس قرار گیرند. این منطقه محدود و نزدیک به صفر زمین که در آن موج اولیه و منعکس شده جدا از هم هستند به عنوان منطقه انعکاس منظم شناخته شده است. موج منعکس شده خیلی سریع‌تر حرکت می‌کند و به سرعت از موج اولیه سبقت می‌گیرد. سپس این دو ترکیب شده و جبهه موج ترکیبی موسوم به ساقه ماخ^۴ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳). ارتفاع ساقه ماخ با حرکت موج انفجار به بیرون افزایش یافته و تقریباً جبهه موج انفجار عمودی می‌شود.

با کاهش ارتفاع انفجار، کل مساحت تحت پوشش برای اثر موج انفجار نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. انتخاب ارتفاع انفجار تا حد زیادی به ماهیت هدف وابسته است. اهداف نسبتاً مقاوم، نیاز به موج انفجار متمرکز ناشی از انفجار کم ارتفاع یا سطحی دارند، در حالی که هدف‌های حساس ممکن است با یک موج انفجار کم شدت‌تر، یا انفجاری در ارتفاع بالاتر، آسیب ببینند. در مورد دوم، منطقه اثر انفجار، بزرگ‌تر است و در نتیجه، تعداد زیادی از اهداف ممکن است آسیب ببینند.



شکل ۳: ساقه ماخ [۹]

۳- شبیه‌سازی عددی

مسائلی همچون بارگذاری ضربه‌ای، پدیده انفجار و موج انفجار به واسطه ماهیت گذرای خود، به شدت وابسته به زمان هستند و معمولاً با پدیده‌های غیرخطی همراهند و لازم است طیف عظیمی از فرایندهای فیزیکی در محاسبات به کار روند تا چنین فرایندهایی تحلیل شوند. برای شبیه‌سازی این دست از مسائل نرم‌افزارهای ویژه‌ای تدارک دیده شده‌اند که با نام هیدروکد از دیگر نرم‌افزارهای عددی متمایز شده‌اند. تفاوت

^۴-Mach stem

اصلی این نرم‌افزارها، قابلیت آن‌ها در شبیه‌سازی مسائلی است که در آن‌ها مواد (حتی جامدات) به دلیل شدت بارهای وارده به صورت سیال رفتار می‌کنند [۱۳].

یکی از هیدروکدهای معروف، نرم‌افزار *LS-DYNA* است که قابلیت‌های بسیار بالایی در حل مسائل دینامیکی غیرخطی دارد. توان بالای این کد در تحلیل مسائل انفجار، انتشار امواج شوک، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، برخورد اجسام، نفوذ پرتابه در هدف و غیره و با داشتن تقریباً ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح، این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده است که می‌تواند در بسیاری از مسائل انفجار و ضربه مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

۳-۱- معرفی مدل

برای مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه در این شبیه‌سازی از پنج ماده متفاوت استفاده شده است. این مدل ماده‌ها عبارت‌اند از: مدل ماده تی‌ان‌تی، مدل ماده آب، مدل ماده هوا، مدل ماده بتن و مدل ماده آرماتور

۳-۱-۱- تی‌ان‌تی

در این تحقیق از مدل ماده *Mat_High_Explosive_Burn* برای تی‌ان‌تی استفاده شد. معادله حالتی که برای این مدل ماده در نظر گرفته شده، معادله حالت *EOS_JWL* است [۷]. در جدول ۱ مشخصات محل و جرم انفجار در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ماده انفجاری تی‌ان‌تی در پژوهش حاضر

نوع	جرم (کیلوگرم)	شعاع کره (متر)	فاصله (متر)	نوع	جرم (کیلوگرم)	شعاع کره (متر)	فاصله (متر)
عرضی	۱۰۰	۰,۲۴۷	۰,۵	طولی	۱۰۰	۰,۲۴۷	۰,۵
	۲۵۰	۰,۳۳۵	۱		۲۵۰	۰,۳۳۵	۱
	۵۰۰	۰,۴۲۲	۲		۵۰۰	۰,۴۲۲	۲
	۱۰۰۰	۰,۵۳۲	۴		۱۰۰۰	۰,۵۳۲	۴

۳-۱-۲- آب

مدل ماده در نظر گرفته شده برای آب در این شبیه‌سازی *MAT_NULL* است. معادله حالت *EOS_gruneisen* برای این مدل ماده استفاده شده است [۸]. همچنین، نوع المان مورد استفاده برای آب از نوع اوپلری-لاگرانژی دلخواه ۵ است.

۳-۱-۳- هوا

در این شبیه‌سازی مدل ماده در نظر گرفته شده برای هوا همان مدل ماده آب است. معادله حالت در نظر گرفته شده برای این مدل ماده *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL* است [۹، ۱۰]. نوع المان مورد استفاده برای هوا از نوع اوپلری-لاگرانژی دلخواه است.

۳-۱-۴- بتن

مدل ماده در نظر گرفته شده برای بتن در این شبیه‌سازی مدل ماده جانسون هلمکوئیست به شماره ۱۱۱ نسخه ۹۷۱ نرم‌افزار است. این مدل ماده در شرایطی که بتن تحت تأثیر کرنش‌های بزرگ، تغییرات کرنش شدید و فشارهای بالا قرار دارد استفاده می‌شود. در این مدل استحکام، معادله بتن به صورت تابعی از فشار، کرنش و آسیب تعریف می‌شود و شامل اثر تغییر شکل‌های دائمی است که آسیب به صورت تابعی از کرنش پلاستیک حجمی، کرنش پلاستیک معادل فشار تعریف می‌شود. بر اساس این مدل، تنش معادل بی بعد شده در رابطه زیر تعریف شده است [۱۱].

در عبارت فوق σ تنش معادل واقعی f'_c مقاومت فشاری است و مقدار σ^* برای بتن به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] \quad (2)$$

⁵- Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)

در رابطه فوق پارامتر p^* معرف فشار بی بعد است که به صورت $p^* = \frac{P}{f_c}$ تعریف می‌شود. نرخ کرنش بدون بعد است که به صورت $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ تعریف می‌شود. متغیر D بیانگر پارامترهای آسیب است ($0 \leq D \leq 1$). مقاومت چسبندگی بی بعد شده، B ضریب سختی فشاری بی بعد شده، N سختی فشاری نمایی و C ضریب نرخ کرنش بتن است. معیار آسیب در نظر گرفته شده برای المان به صورت زیر است:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon P + \Delta \mu P}{D_1 (P^* + T^*)^{D/2}} \quad (3)$$

در رابطه فوق $\Delta \mu P$ و $\Delta \epsilon P$ به ترتیب بیانگر افزایش کرنش پلاستیک و افزایش کرنش حجمی پلاستیک می‌باشند و D_1 و D_2 ثابت‌های آسیب مربوط به ماده می‌باشند. همچنین T^* بیانگر تنش کششی بیشینه بی بعد شده است که به صورت $T^* = \frac{T}{f_c}$ تعریف می‌شود. در این رابطه، T معرف تنش کششی بیشینه است. رابطه ارائه شده برای محاسبه فشار در مدل جانسون-هلموکویست با فرض اینکه ماده متراکم باشد در رابطه زیر ارائه شده است.

$$P = \bar{\mu} K_1 + \bar{\mu} K_2 + \bar{\mu} K_3 \quad (4)$$

در رابطه فوق K_1 ، K_2 و K_3 مقادیر ثابت هستند و $\bar{\mu}$ بیانگر مقدار کرنش حجمی است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}} \quad (5)$$

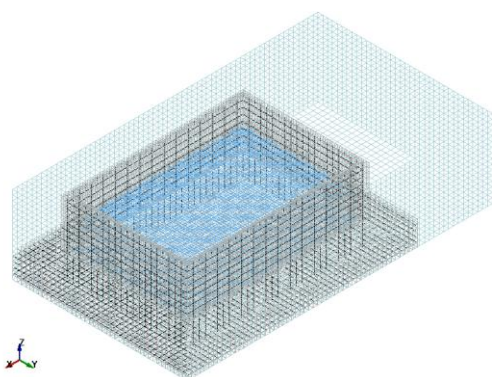
در رابطه فوق بیانگر کرنش حجمی پلاستیک است [۱۵]. نوع المان مورد استفاده برای بتن از نوع لاگرانژی است.

۳-۱-۵- آرماتور

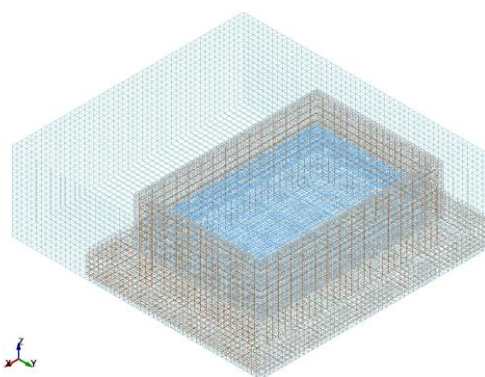
مدل ماده مورد استفاده برای آرماتور، مدل ماده *MAT_PLASTIC_KINEMATIC* است. مدل ماده ذکر شده، مدلی ساده است که سخت‌شوندگی همسانگرد^۶ و وابستگی به نرخ کرنش از خواص آن هستند. در این شبیه‌سازی از وابستگی به نرخ کرنش صرف‌نظر شده است [۷]. آرماتور در داخل فضای بتنی مقید شده است. به منظور خرابی آرماتور کرنش شکست برابر با ۰٫۲ به مدل ماده افزوده شده است.

۳-۲- مدل مخزن

دو مدل مختلف در این مطالعه بررسی شده‌اند؛ مدل اول که در آن، انفجار با فاصله‌ای مشخص از لبه بالایی و در سمت طول مخزن انجام می‌شود و در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این تصویر، مخزن در هوای محیط قرار دارد. مدل دوم که در آن، انفجار با فاصله‌ای از لبه بالایی و در سمت عرض مخزن انجام می‌شود و در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: مدل مخزن در انفجار عرضی در مدل‌سازی



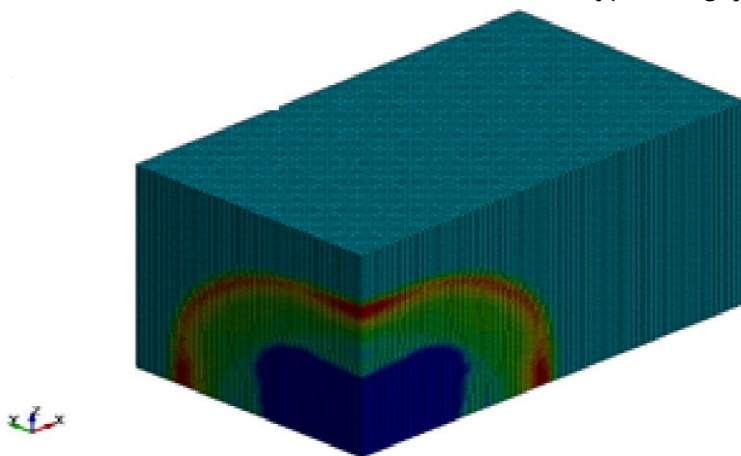
شکل ۴: مدل مخزن در انفجار طولی در مدل‌سازی

۳-۳- صحت‌سنجی

با توجه به این که در پژوهش حاضر، فشار وارده بر سازه، معیار اصلی مقایسه بوده است، صحت‌سنجی بر اساس این سنجه صورت گرفت. نظر به این موضوع که به منظور مقایسه، استفاده از دو روش مختلف ممکن بود، ابتدا این دو روش تشریح می‌شوند.

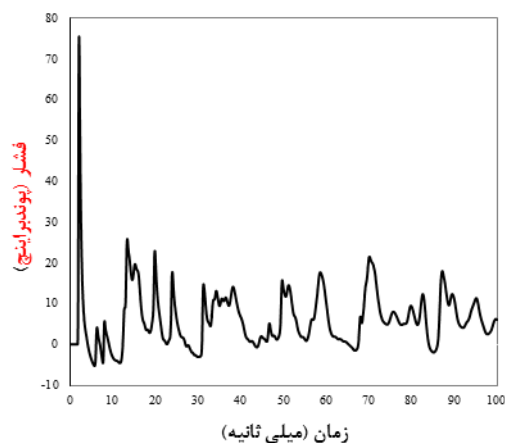
^۶ - Isotropic strain hardening

نتایج عددی می‌توانند از طریق مقایسه با نتایج آزمایش با روش‌های تحلیلی، صحت‌سنجی شوند. با توجه به اصالت نتایج آزمایش و در نظر گرفتن محدودیت‌های آزمایشگاهی، اعتبار نتایج این پژوهش با مقایسه نتایج انفجار در مرجع [۱۲] مورد تأیید قرار گرفت. نمونه مورد نظر در فرایند صحت‌سنجی، اتاقی با ابعاد $6,1 \times 3,6 \times 4$ مترمکعب است که مقداری تی‌ان‌تی به جرم $0,91$ کیلوگرم در مرکز آن منفجر می‌شود. فشار تجربی بر روی سطح دیوار هدف اندازه‌گیری شده است که به فاصله $1,8$ متر از مرکز اتاق قرار دارد. با توجه به محل قرارگیری ماده منفجره و با توجه به تقارن، مدل کردن یک‌هشتم از فضای اتاق کافی بود. در شکل ۶، مدل مذکور، لحظاتی پس از وقوع انفجار دیده می‌شود که پیش‌روی جبهه موج در آن کاملاً مشهود است.

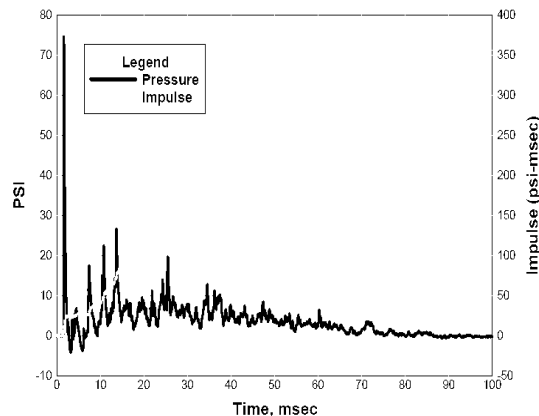


شکل ۶: کانتور فشار پیش‌روی موج انفجار پیش از رسیدن جبهه موج به دیوارها (فشارها به پاسکال هستند)

نمودار فشار-زمان تجربی در مرجع [۱۲] ارائه شده است (نمودار ۱). برای نتایج تحقیق حاضر، نمودار فشار-زمان بر روی مرز هدف در نمودار ۲ نشان داده شده است.



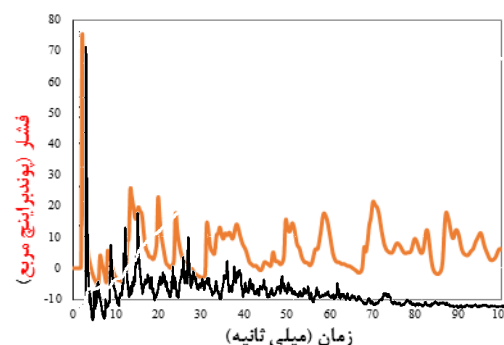
نمودار ۲: نمودار عددی فشار-زمان بر روی دیواری با فاصله $1,8$ متر از مرکز وقوع انفجار تی‌ان‌تی با جرم $0,91$ کیلوگرم حاصل از *LS-DYNA*



نمودار ۱: نمودار تجربی فشار-زمان بر روی دیواری با فاصله $1,8$ متر از مرکز وقوع انفجار تی‌ان‌تی با جرم $0,91$ کیلوگرم در مرجع [۱۲]

نمودار ۳ نشان دهنده تطبیق خوب نمودار فشار- زمان مرجع و تحقیق حاضر می باشد.

بیشینه فشار (پوندبراینچ)	بیشینه فشار (مگاپاسکال)	
۷۵	۰٫۵۲	مرجع [۱۶]
۷۵٫۶	۰٫۵۲۱	LS-DYNA
۰٫۸	۰٫۱	خطا (%)



جدول ۲: مقایسه نتایج عددی تحقیق حاضر و مرجع [۱۶] صحت‌سنجی

نمودار ۳: نمودار بر هم افتاده فشار- زمان مرجع و تحقیق حاضر

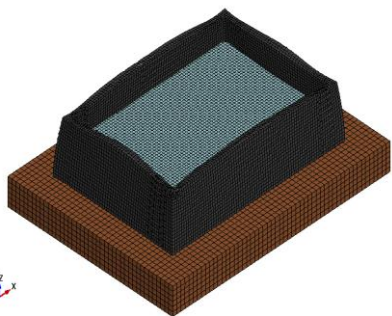
در جدول ۲ بیشینه فشار در دو حالت تجربی و تحقیق حاضر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. دقت قابل توجه روش عددی در این جدول کاملاً مشاهده می‌شود.

۴- نتایج

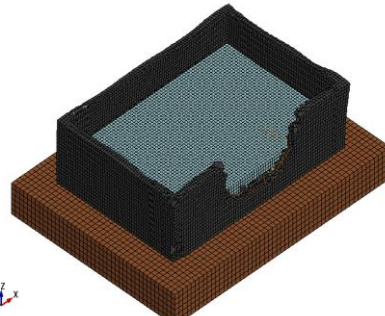
نتایج این تحقیق در دو بخش ارائه شده‌اند. در بخش اول، نمای سازه پس از تغییر شکل در چند حالت که انواع تغییر شکل‌های غالب سازه هستند، نمایش داده شده است. در بخش دوم، نتایج عددی تغییرات تنش و جابجایی در چند حالت آرایه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد هر چه فاصله انفجار از سازه بیشتر شود، تخریب محلی به تخریب حجمی و کلی مبدل می‌گردد و اثر افزایش جرم ماده منفجره، افزایش تنش خواهد بود. همچنین تغییر شکل به صورت انقباض دیواره‌های بالایی مخزن به سمت داخل در می‌آید.

۴-۱- نمای تغییر شکل سازه

در شکل ۷ نمای سازه پس از انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۰٫۵ متری نمایش داده شده است. تخریب محلی در لبه بالایی سازه در سمت انفجار مشاهده می‌شود. همچنین، انقباض لبه بالایی سازه به سمت خارج مخزن تاحدودی به نظر می‌رسد. در شکل ۸ نمای سازه پس از انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴ متری نمایش داده شده است. تغییر شکل در این حالت، صورت بسیار گسترده‌ای پیدا کرده است. شکل ۹ تغییر شکل محلی سازه را در سمت انفجار در مخزن آب نشان می‌دهد. این انفجار با جرم ۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۰٫۵ متری ایجاد شده است. همانند سایر اجرام تی‌ان‌تی که در فاصله ۲ متری قرار داشتند، شکل ۱۰ نیز توسعه‌یافتگی شدید و تورفتگی لبه بالایی را در انفجار عرضی برای جرم ۱۰۰۰ کیلوگرمی نشان داده است.



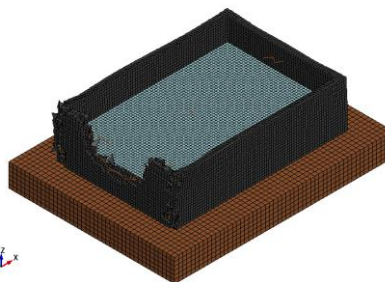
شکل ۸: نمای سازه پس از انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴ متری



شکل ۷: نمای سازه پس از انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۰٫۵ متری

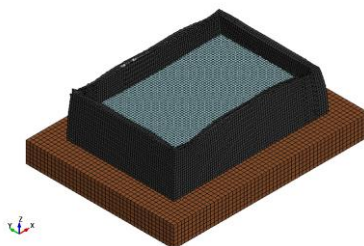


شکل ۱۰: نمای سازه پس از انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۲ متری



شکل ۹: نمای سازه پس از انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۵۰۰ کیلوگرم در فاصله ۰٫۵ متری

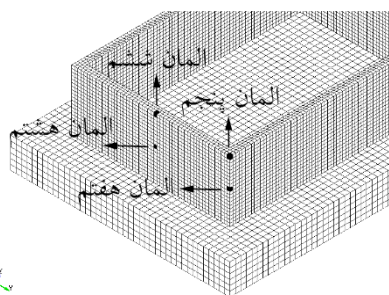
در فاصله ۴ متری در انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی، تغییر شکل مخزن به صورت انقباض مخزن به سمت داخل مخزن است. این رفتار در مورد همه جرم‌های دیگر در فاصله ۴ متری نیز مشاهده شد. تصویر این انفجار در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



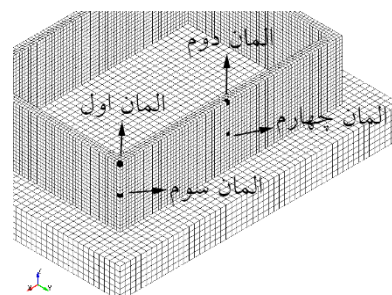
شکل ۱۱: نمای سازه پس از انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۴ متری

۲-۴ تنش‌های معادل و جابجایی‌ها

در هر حالت از دو انفجار طولی و عرضی، چهار المان و چهار گره در سمت انفجار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. المان‌ها که تحلیل تنش بر روی آن‌ها صورت گرفته است در قسمت بتنی انتخاب شده و جابجایی‌ها به دلیل خرابی کمتر بر روی گره‌های آرماتور، در مجاورت همان المان‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۱۲ المان‌های مورد بررسی در انفجار طولی نشان داده شده‌اند. همانند آنچه در مورد انفجار طولی ذکر شد، در شکل ۱۳ المان‌های بررسی شده در انفجار عرضی، نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۳: محل قرارگیری گره‌ها در انفجار عرضی تی‌ان تی در مخزن



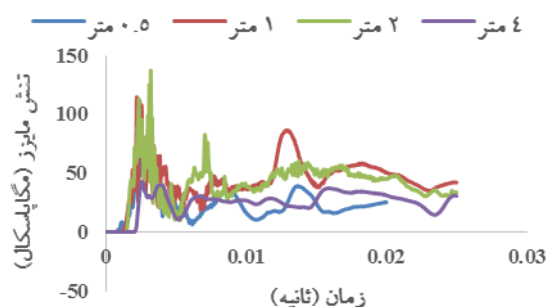
شکل ۱۲: محل قرارگیری المان‌ها (و گره‌ها) در انفجار طولی تی‌ان تی در مخزن

۴-۲-۱ انفجار در فواصل مختلف

با توجه به نمودار ۳ و جدول ۳، بیشینه تنش در گوشه‌های مخزن در فاصله ۲ متری اتفاق می‌افتد. در واقع با افزایش فاصله از ۰.۵ تا ۲ متر، از میزان اتلاف انرژی به دلیل خرابی کاسته شده و انرژی بیشتری به گوشه‌ها می‌رسد و از طرفی موج نیز توسعه‌یافتگی کافی پیدا می‌کند. با افزایش فاصله به ۴ متر، با وجود توسعه‌یافتگی کافی موج کروی، شدت موثر بر گوشه‌های مخزن کاهش می‌یابد.

جدول ۳: بیشینه تنش المان اول در انفجار طولی تی‌ان تی با جرم ۵۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰.۵ متر	
۴۲.۹	۱۳۷.۳	۱۱۴.۶	۷۶.۳	بیشینه تنش (مگاپاسکال)

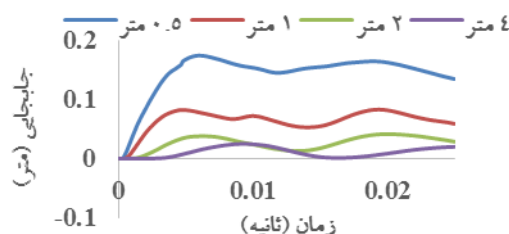


نمودار ۳: نمودار تنش-زمان انفجار طولی تی‌ان تی با جرم ۵۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از المان اول

منحنی جابجایی-زمان گره دوم در انفجار ۱۰۰ کیلوگرم مواد منفجره در طول سازه و با فاصله‌های مختلف، در نمودار ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، نتیجه ابتدایی که می‌توان گرفت این است که با افزایش فاصله ماده منفجره از سازه، میزان حداکثر جابجایی روی گره دوم کاهش یافته است. این یافته، بیش از آن که یک خصوصیت همیشگی باشد، یافته‌ای است که بر احساس منطبق است. بیشینه جابجایی در گره دوم با خصوصیات ذکر شده در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: بیشینه جابجایی گره دوم در انفجار طولی تی‌ان تی با جرم ۱۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰.۵ متر	
۰.۰۲۴۶	۰.۰۳۷۷	۰.۰۸۱۹	۰.۱۷۴	جابجایی (بیشینه متر)

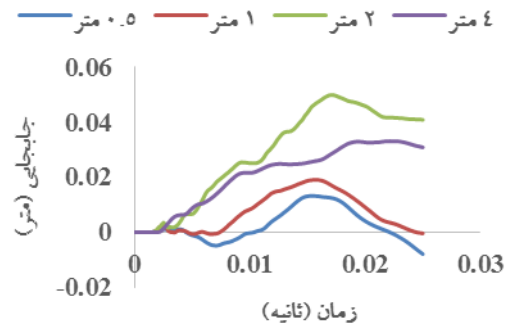


نمودار ۴: نمودار جابجایی-زمان انفجار طولی تی‌ان تی با جرم ۱۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از گره دوم

در گره سوم به ازای جرم ۱۰۰۰ کیلوگرمی، بیشینه جابجایی در فاصله ۲ متری اتفاق می‌افتد. در فاصله ۰.۵ متر، معکوس آنچه انتظار می‌رود جابجایی کمتری نسبت به سایر فواصل تی‌ان تی در سازه ایجاد شده است. تاثیر در این حالت محلی بوده است. جدول ۵، بیشینه جابجایی را در انفجار طولی تی‌ان تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از گره سوم نشان می‌دهد.

جدول ۵: بیشینه جابجایی گره سوم در انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰,۵ متر	
۰,۰۳۳۰	۰,۰۴۹۸	۰,۰۱۹۰۴	۰,۰۱۳۱۶	جابجایی بیشینه (متر)

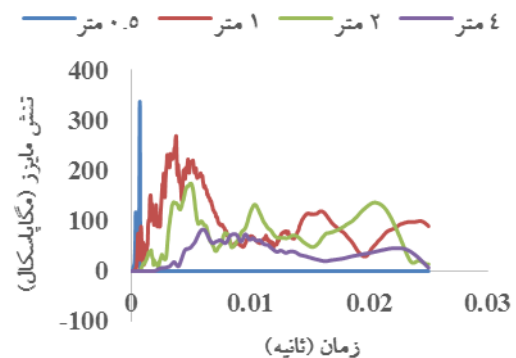


نمودار ۵: نمودار جابجایی-زمان انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از گره سوم

منحنی تنش-زمان گره چهارم در انفجاری در فواصل مختلف از مخزن در اثر انفجار ۲۵۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در نمودار ۶ نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در فاصله ۰,۵ متری، المان پس از تجربه کردن تنش بزرگ (حدود ۳۳۶ مگاپاسکال)، حذف شده است (جدول ۶). همچنین، با افزایش فاصله، بیشینه تنش کاهش یافته است. همچنین می‌توان تفاوت زمان رسیدن موج انفجار به المان را در نمودار مشاهده کرد.

جدول ۶: بیشینه تنش المان چهارم در انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۲۵۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰,۵ متر	
۸۲,۹	۱۷۴,۳	۲۶۸	حذف المان	بیشینه تنش (مگاپاسکال)

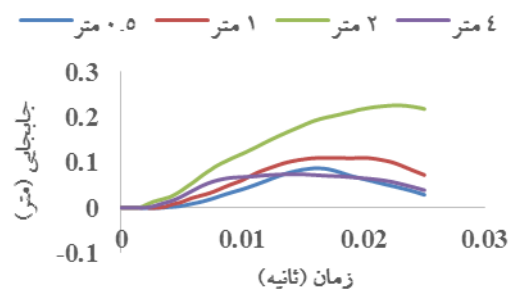


نمودار ۶: نمودار تنش-زمان انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم ۲۵۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از المان چهارم

نمودار ۷ نشان می‌دهد که جابجایی گره پنجم به ازای فاصله ۲ متر در بیشینه مقدار خود در انفجار ۵۰۰ کیلوگرمی قرار دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل توسعه یافتگی و شدت بالای موج فشاری در این فاصله باشد. بیشینه جابجایی در هر حالت در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷: بیشینه جابجایی گره پنجم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۵۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰,۵ متر	
۰,۰۷۳۸	۰,۰۲۲۶	۰,۰۱۰۹۹	۰,۰۰۸۷۰	جابجایی بیشینه (متر)



نمودار ۷: نمودار جابجایی-زمان انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۵۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از گره پنجم

برای فواصلی از المان ششم که شبیه‌سازی صورت گرفته است، به ازای انفجار ۱۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی، به اندازه‌ای که فاصله افزایش یافته است، تنش تجربه شده توسط المان ششم کاهش یافته است. بیشینه تنش‌ها در جدول نمایش داده شده‌اند.

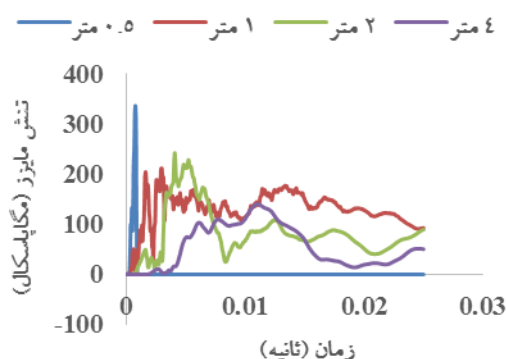
جدول ۸: بیشینه تنش المان ششم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۱۰۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰,۵ متر	
۱۵,۹۹	۳۹,۹	۲۸۷	حذف المان	بیشینه تنش (مگاپاسکال)

میزان تنش در المان هشتم با ثابت نگاه داشتن جرم تی‌ان‌تی به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم، در فواصل مختلف در نمودار نشان داده شده است. به ازای فاصله ۰,۵ متر المان حذف شده است اما این شکل نشان می‌دهد که مقدار تنش در فاصله ۲ متری از المان، در مقدار بیشینه در بین المان‌های حذف‌نشده قرار دارد. در جدول ۹، بیشینه تنش‌ها قابل مشاهده هستند.

جدول ۹: بیشینه تنش المان هشتم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۲۵۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف

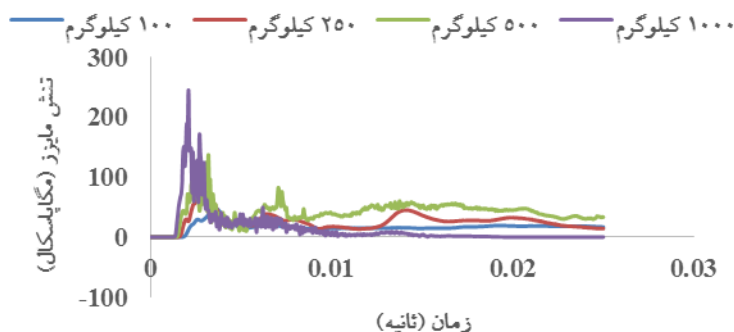
۴ متر	۲ متر	۱ متر	۰,۵ متر	
۱۴۰,۴	۲۴۲	۲۱۲	حذف المان	بیشینه تنش (مگاپاسکال)



نمودار ۸: نمودار تنش-زمان انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم ۲۵۰ کیلوگرم و در فواصل مختلف از المان هشتم

۲-۲-۴ انفجار با جرم‌های مختلف

در نمودار ۹ بیشینه تنش در المان اول، هنگامی که جرم افزایش یافته، بزرگتر شده است و همچنین، در زمان سریع‌تری نیز بیشینه ظاهر شده است. در جدول ۹، بیشینه تنش برای حالت‌های ذکر شده، نشان داده شده است.



نمودار ۹: نمودار تنش-زمان انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۲ متر از المان اول

جدول ۱۰: بیشینه تنش المان اول در انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۲ متر

بیشینه تنش (مگاپاسکال)	۱۰۰ کیلوگرم	۲۵۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم
	۴۷,۹	۷۶,۸	۱۳۷,۳	۲۴۴

در فاصله ۴ متری از طول مخزن، بیشینه جابجایی هنگامی اتفاق می‌افتد که بیشترین مقدار جرم استفاده شده باشد. با کاهش جرم ماده منفجره، میزان جابجایی نیز کاهش می‌یابد (جدول).

جدول ۱۱: بیشینه جابجایی گره سوم در انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۴ متر

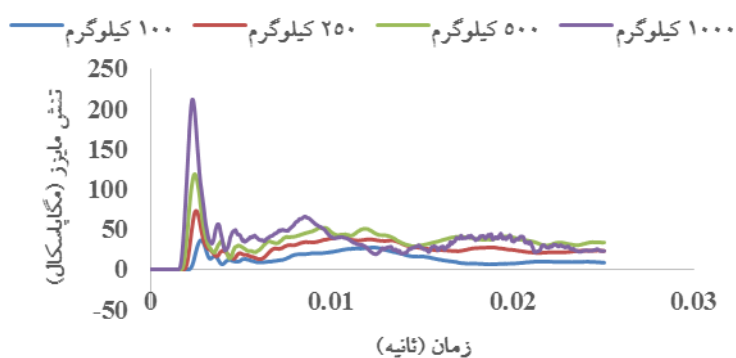
جابجایی بیشینه (متر)	۱۰۰ کیلوگرم	۲۵۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم
	۰,۰۰۵۱۲	۰,۰۱۰۱۷	۰,۰۱۸۰۰	۰,۰۳۳۰

در جدول جابجایی بیشینه در اثر انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۱ متر از گره چهارم آورده شده است. با توجه به ثابت بودن فاصله، انتظار می‌رود، با افزایش جرم ماده منفجره، جابجایی در گوشه‌های مخزن افزایش یابد. در حالت ۵۰۰ کیلوگرم، با توجه به غلبه تخریب محلی بر خرابی توسعه‌یافته، انرژی زیادی صرف تغییر شکل در مرکز دیواره شده و مقدار جابجایی نسبت به اجرام دیگر تی‌ان‌تی کاهش یافته است. با افزایش جرم ماده منفجره، مجدداً این جابجایی افزایش یافته است (۱۰۰۰ کیلوگرم). رفتار مخزن در گوشه‌های آن، با توجه به هندسه مخزن و موج، به مراتب پیچیده‌تر از رفتار آن در مرکز دیواره‌ها است.

جدول ۱۲: بیشینه جابجایی گره چهارم در انفجار طولی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۱ متر

جابجایی بیشینه (متر)	۱۰۰ کیلوگرم	۲۵۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم
	۰,۰۳۴۰	۰,۰۴۰۶	۰,۰۳۴۳	۰,۱۰۹۰

تغییرات تنش مایزر نسبت به زمان در نمودار ۱۰ برای المان هفتم در فاصله ۴ متری ترسیم شده است. با افزایش جرم در این نمودار، زمان رسیدن به بیشینه کاهش و مقدار آن افزایش یافته است. در جدول بیشینه تنش‌ها نمایش داده شده‌اند.



نمودار ۱۰: نمودار تنش-زمان انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۴ متر از المان هفتم

جدول ۱۳: بیشینه تنش المان هفتم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۴ متر

بیشینه تنش (مگاپاسکال)	۱۰۰ کیلوگرم	۲۵۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم
	۳۶,۶	۷۲,۸	۱۱۸,۸	۲۱۱

جابجایی بیشینه گره هشتم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف در فاصله ۱ متر در جدول نمایش داده شده است. با توجه به نتایج، بیشینه جابجایی به ازای جرم ۲۵۰ کیلوگرم اتفاق افتاده است که به دلیل تخریب کمتر نسبت به حالت ۵۰۰ کیلوگرمی است. در واقع، با افزایش جرم به ۵۰۰ کیلوگرم، مقداری از انرژی صرف تخریب محلی شده و جابجایی کاهش یافته است.

جدول ۱۴: بیشینه جابجایی گره هشتم در انفجار عرضی تی‌ان‌تی با جرم‌های مختلف و در فاصله ۱ متر

جابجایی بیشینه (متر)	۱۰۰ کیلوگرم	۲۵۰ کیلوگرم	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم
	۰,۰۲۶۱	۰,۰۴۹۵	۰,۰۳۴۱	حذف المان

۵- نتیجه‌گیری

- با بررسی اثر فاصله و جرم ماده منفجره بر روی میزان خرابی، تنش معادل و مقدار جابجایی نتایج ذیل به اختصار ارائه می‌شود:
- ۱- با افزایش جرم ماده منفجره، میزان خرابی در مرکز دیواره‌ها افزایش یافت؛ این اثر در گوشه‌های مخزن پیچیده‌تر بود و به میزان توسعه‌یافتگی موج فشاری و تخریب محلی اولیه وابسته بود. در مناطقی از مخزن که خرابی محلی رخ نمی‌داد، با افزایش جرم، تنش معادل افزایش یافت؛ در صورتی که انرژی موج به دلیل خرابی کاهش یافته بود، این تنش می‌توانست به ازای افزایش جرم به مقداری خاص، کاهش یابد، اما با افزایش دوباره جرم، روند افزایش ادامه پیدا می‌کرد.
 - ۲- با تغییر فاصله، به فاصله‌ای می‌توان دست یافت که بیشینه جابجایی در سراسر دیواره مخزن رخ می‌دهد. این فاصله، تابع توسعه‌یافتگی موج فشار کروی بود. به طور مثال، در مخزن مورد مطالعه در پژوهش حاضر، این فاصله در حدود ۲ متر بود. به طور معمول، در مناطقی از مخزن که خرابی محلی رخ نمی‌داد، با افزایش فاصله، تنش معادل کاهش می‌یافت.
 - ۳- تاثیر توسعه‌یافتگی، با توجه به ابعاد سازه، در طول و عرض آن متفاوت بود و به میزانی که طول بیشتر بود، فاصله‌ای که توسعه‌یافتگی بیشینه می‌شد، افزایش می‌یافت.

مراجع

- [1] Y. Kivity, C. Florie, and H. Lenselink, "Response of protective structures to internal explosions with blast venting," in *MSC World Users Conference*, Arlington, VA, 1993.
- [2] J.-M. Kim, S.-H. Chang, and C.-B. Yun, "Fluid-structure-soil interaction analysis of cylindrical liquid storage tanks subjected to horizontal earthquake loading," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 13, pp. 615-638, 2002.
- [3] A. Mansouri and B. Aminnejad, "Investigation of oil reservoir vibration under the impact of earthquake in proper and corrosion-occurred tanks," *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 1, pp. 181-199, 2013.
- [4] Y. Dong, W. Song, and F. Hu, "LPG Storage Tank Fire and Explosion Accident," in *Proceedings of the International Conference on Information Engineering and Applications (IEA) 2012*, 2013, pp. 791-797.
- [5] J. Son and H.-J. Lee, "Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading," *Engineering Structures*, vol. 33, pp. 1133-1148, 2011.
- [6] W. E. Baker, P. Cox, J. Kulesz, R. Strehlow, and P. Westine, *Explosion hazards and evaluation vol. 5*: Elsevier, 2012.
- [7] V. Adamik, W. Trzeciński, R. Trębiński, and S. Cudziło, "Investigation of the behaviour of steel and laminated fabric plates under blast wave load," in *V International Armament Conference*, Waplewo, 2005.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. Available: <http://www.lstc.com/>
- [9] A. Alia and M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," *Applied thermal engineering*, vol. 26, pp. 1032-1042, 2006.
- [10] A. G. Razaqpur, A. Tolba, and E. Contestabile, "Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates," *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, pp. 535-546, 2007.
- [11] J. Hallquist, "LS-DYNA® Version 971 User's Manual," Livermore Software Technology Corp, 2007.
- [12] A. K. Maji, J. Brown, G. Lacidogna, and A. Carpinteri, "Analysis of a full-scale blast test and retrofit design," in *ICF11, Italy 2005*, 2013.
- [۱۳] ا. ع. بافرانی، ق. د. اشکذری و ف. پیچگاه، "بررسی تاثیر اندرکنش سازه- سیال- خاک در مخازن بتنی مسلح مدفون تحت اثر بارناشی از انفجار سطحی"، فصلنامه انجمن علمی پدافند غیر عامل ایران، ج. ۱، ۱۳۹۲.
- [۱۴] ا. قلی‌زاد و م. ر. بهنمیری، "بررسی اثر انفجار بر روی مخازن فولادی ذخیره سوخت"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران، ۱۳۹۱.
- [۱۵] م. شهبازی و ح. کرمی، شبیه سازی پدیده های ضربه، انفجار، شکل گیری و نفوذ به کمک نرم افزار *Autodyn* ج. اول: انتشارات سرونگار، ۱۳۹۲.
- [۱۶] م. شهری و ا. ر. علایی، آنالیز دینامیک غیرخطی به کمک نرم افزار *LS-DYNA*: انتشارات فدک ایساتیس، ۱۳۹۳.