

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال ششم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، (سپتامبر): صص ۱۳-۲۴

بررسی اثر انفجار بر مخازن رو زمینی با سقف شناور

صفا پیمان^۱، سپند شبدیز^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۲

چکیده

مخازن فولادی روزمینی از جمله سازه‌ها و تجهیزات صنعتی هستند که نقش حساسی در ذخیره مواد نفتی و پالایشگاهی و همچنین تامین آب آشامیدنی دارند. دوران پس از انقلاب و بروز حوادث تروریستی و جنگ با عراق و حملات دشمن باعث بروز آسیب به زیرساخت‌های حیاتی کشور از جمله مخازن ذخیره‌سازی منابع نفت، گاز و آب گردید. این پیشینه دفاعی باعث ضرورت تقویت پدافند غیرعامل در ساخت این مخازن شده است. با توجه به آمار حملات انجام‌شده در طول جنگ تحمیلی و همچنین گزارشات حوادث و اتفاقات رخ داده در پالایشگاه‌ها، این مخازن جزو تاسیسات حساس و راهبردی می‌باشند و ممکن است در معرض بارگذاری انفجاری قرار گیرند. بر این اساس، مطالعات این نوع بارگذاری و بررسی آسیب‌های احتمالی برای سازه‌های مزبور ضرورت پیدا کرده است. در این تحقیق، بارگذاری انفجاری بر روی دو نمونه مخزن پرکاربرد با دو نوع سقف شناور بررسی شده است. تحلیل غیرخطی دینامیکی سازه تحت اثر بار ناشی از انفجار با استفاده از روش عددی و برای ۳۰ حالت متفاوت بار انفجاری صورت گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که بدنه مخازن مورد بررسی، در مقابل برخی از سناریوهای بارگذاری انفجاری آسیب‌پذیر بوده و بر اساس معیارهای خرابی استاندارد آئین نامه API650 آسیب خواهند دید. در ادامه، پیشنهادهای جهت جلوگیری از زیان‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و همچنین تدابیر لازم از قبیل مقاوم‌سازی، پدافند غیرعامل و مدیریت بحران پس از تخریب مورد بحث قرار گرفته است.

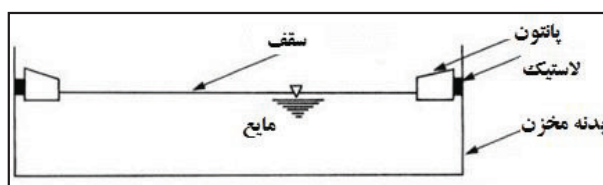
کلیدواژه: مخازن سوختی، سقف شناور، مدل‌سازی دینامیکی، انفجار

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

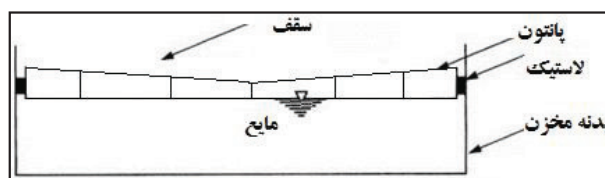
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعت آب و برق - Sepand_shabdiz@yahoo.com - نویسنده مسئول

۱- مقدمه

کل سقف، شناور می‌مانند. در شکل‌های (۱) و (۲) نمونه‌ای از سقف‌های شناور مخازن نشان داده شده است. از برتری‌های سقف شناور دولایه، صلب‌تر بودن و جلوگیری از اتلاف دمای مواد نفتی است. در سقف شناور مخازن، از لوله‌ای به نام گایدپل جهت جلوگیری از چرخش سقف درون مخزن استوانه‌ای و هدایت سقف در هنگام پر و خالی شدن مایع درون مخزن استفاده می‌شود [۴].



شکل ۱ - جزئیات سقف شناور تک‌لایه با پانتون [۵]



شکل ۲ - جزئیات سقف شناور دولایه با پانتون [۵]

شرایط تحلیل در حالت مخزن پر فرض شده و جنس فولاد مورد استفاده به گونه‌ای است که در عمر مفید مخزن (حدود ۳۰ سال) به خوبی عمل نماید و در برابر خوردگی نیز مقاومت کند.

طراحی پوسته مخازن با توجه به آئین‌نامه API 650 و بر اساس روش تنش نقطه‌ای انجام می‌شود. از مزایای این روش، سبک‌تر شدن مخزن به دلیل انتخاب ضخامت ورق مناسب در هر نقطه از بدنه مخزن می‌باشد [۵]. محاسبات اولیه بر اساس بارهای استاتیکی ناشی از وزن سازه و مایع و نیروهای هیدرواستاتیکی صورت می‌گیرد. سپس سناریوهای مطالعه اثر انفجار برای ۵ مقدار متفاوت ماده انفجاری در سه فاصله مختلف از بدنه مخزن بررسی می‌گردند.

۳- مدل‌سازی مخازن با سقف شناور

جزئیات مخزن با سقف شناور تک‌لایه در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به بیان است که ضخامت سقف، برابر ۵ میلی‌متر بوده که با نبشی‌های ۵٪*۵۰ تقویت گردیده است. جزئیات محاسبات مخزن با سقف شناور دولایه در جدول (۲) آمده است. ضخامت هر دولایه سقف شناور دولایه نیز برابر ۵ میلی‌متر می‌باشد.

۳-۱- معرفی خواص مواد

مخازن نفتی جزو مهم‌ترین سرمایه‌های ملی هر کشور می‌باشند و با توجه به نقش تعیین‌کننده آنها اغلب مورد هجوم دشمن و حملات تروریستی قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت حیاتی این سازه‌ها پژوهش‌هایی درباره بررسی اثر انفجار بر آنها انجام شده است. در زمینه تحلیل مخازن، گام‌های نخست توسط وسترگارد و همکاران برداشته شد [۱]. هاوزنر در سال ۱۹۶۰ نیروهای واردشده به مخازن را با فرض صلب بودن دیواره تحت بار دینامیکی به دست آورد [۲]. در سال‌های بعد، تحلیل دینامیکی مخازن توسط پژوهشگران زیادی مانند آبرامسون هارون و ولتسوس انجام گرفت [۳]. با این وجود، بررسی اثر انفجار بر مخازن نفتی رو زمینی نیازمند انجام پژوهش‌های بیشتری است. آنچه که در بررسی مخازن تحت اثر انفجار مهم است انواع مختلف حملات به این مخازن می‌باشد. به طور مثال، بمباران توسط هواپیماهای جنگی می‌تواند جزو حملات سنگین تلقی گردیده و بمب‌گذاری در خودرو و یا کیف‌های دستی از جمله حملات تروریستی سبک می‌باشد. هر کدام از این انفجارها در مدل‌سازی‌های صورت گرفته تأثیر متفاوتی دارند و میزان خرج هر کدام متفاوت است. عامل مهم دیگر، فاصله منبع وقوع انفجار است که هر چه به بدنه مخزن نزدیکتر باشد مسلماً آسیب‌ها بیشتر خواهند بود. در این پژوهش بارگذاری، تحلیل و طراحی سازه‌های روزمینی مخازن تحت اثر بارگذاری‌های انفجاری متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا دو نمونه مخزن با سقف شناور، تحت اثر انفجارهای متفاوت بررسی می‌شوند. تحلیل مخازن تحت اثر بارهای انفجاری متفاوت سبب شناخت رفتاری آنها تحت بار انفجاری کامل‌تر می‌شود.

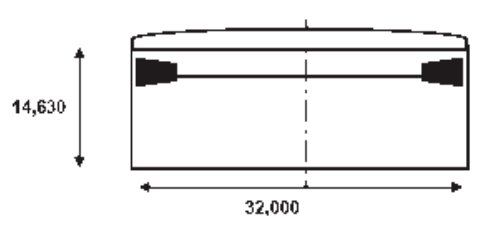
۲- بیان مسئله

مخازن مورد بررسی از نوع مخازن استوانه‌ای قائم دارای سقف شناور خارجی می‌باشند. مخازن با سقف شناور به دو دسته مخازن با سقف شناور تک‌لایه و دولایه تقسیم می‌شوند. علت استفاده از سقف شناور، جلوگیری از تبخیر مواد نفتی در داخل مخزن است، که به حفظ محیط زیست و جلوگیری از هدر رفتن مواد نفتی کمک می‌کند. به‌طور خلاصه می‌توان گفت در مخازن با سقف شناور، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر بوده و هزینه نگهداری و تعمیرات کمتر است.

مخازن با سقف شناور تک‌لایه، به دلیل وجود پانتون‌ها در دور سقف و مخازن با سقف شناور دولایه به دلیل وجود پانتون در

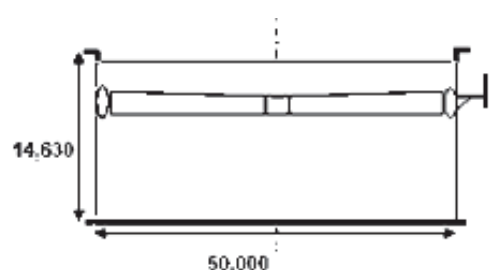
جدول ۱ - محاسبات مخزن سقف شناور تک لایه

Specific Gr=0.643 g/cm ³		Diameter = 32000 mm		A573-Gr70 (28000, 30000)
Max Liquid Level=13,760 mm		Length = 14,630 mm		A283-Gr C (20000, 22500)
Course	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Material
Bottom	-	۳۲,۰۰۰	۸	A283-Gr C
Course one	۲,۵۰۰	۳۲,۰۰۰	۱۲	A573-Gr70
Course two	۲,۵۰۰	۳۲,۰۰۰	۱۰	A573-Gr70
Course three	۲,۵۰۰	۳۲,۰۰۰	۸	A573-Gr70
Course four	۲,۵۰۰	۳۲,۰۰۰	۶	A283-Gr C
Course five	۱,۸۰۰	۳۲,۰۰۰	۶	A283-Gr C
Course six	۱,۸۰۰	۳۲,۰۰۰	۶	A283-Gr C
Course seven	۱,۰۳۰	۳۲,۰۰۰	۶	A283-Gr C
Total Length = 14,630 mm				



جدول ۲ - محاسبات مخزن با سقف شناور دولایه

Specific Gr=0.786 g/cm ³		Diameter = 50,000 mm		A573-Gr70 (28000, 30000)
Max Liquid Level=13,890 mm		Length = 14,630 mm		A283-Gr C (20000, 22500)
Course	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Material
Bottom	-	۵۰,۰۰۰	۸	A283-Gr C
Course One	۲,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۱۸	A573-Gr70
Course Two	۲,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۱۴	A573-Gr70
Course Three	۲,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۱۲	A573-Gr70
Course Four	۲,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۱۰	A573-Gr70
Course Five	۲,۰۰۰	۵۰,۰۰۰	۸	A573-Gr70
Course Six	۱,۸۰۰	۵۰,۰۰۰	۸	A283-Gr C
Course Seven	۱,۸۰۰	۵۰,۰۰۰	۸	A283-Gr C
Course Eight	۱,۰۳۰	۵۰,۰۰۰	۸	A283-Gr C
Total Length = 14,630 mm				



جدول ۳ - خواص فولاد [۸]

ρ (kg/m ³)	۷۸۵۰
E(Gpa)	۲۱۰
ν	۰/۳
پارامترهای جانسون کوک [۹][۱۴]	
A(Mpa)	۲۱۷
B(Mpa)	۲۳۴
n	۰/۶۴۳
m	۰/۸۰۷
c	۰/۰۷۶
ضریب کرنش شکست	۰/۴
ضریب تنش سه محوری	۰/۸
پارامترهای آسیب برشی فولاد	
Ks	۰/۳
ضریب کرنش شکست	۰/۴
نسبت تنش برشی	۲/۲

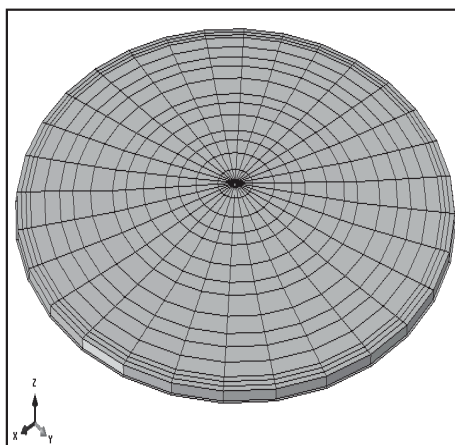
اجزای تشکیل دهنده مدل، شامل کف و بدنه مخزن و سقف شناور از جنس فولاد می باشند، که ضخامت متفاوت دارند. خواص مواد آن در جدول (۳) ارائه شده است. میزان میرایی در فولاد برابر ۳ درصد لحاظ شده می باشد. از طرفی مایع درون مخزن که جنس آن نفت است در مدل سازی وارد می گردد. خصوصیات مایع بر طبق معادلات پایداری جریان (Equation of State) مدل شده است. در معادله پایداری میان سرعت ذرات مایع و سرعت تحریک کننده (شوک) رابطه خطی به صورت زیر وجود دارد.

$$U_s = C_0 + sU_p \quad (1)$$

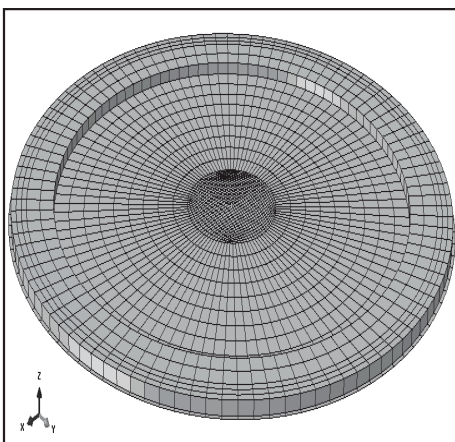
در این رابطه، U_s سرعت شوک، U_p سرعت ذرات و C_0 و s ضرایب می باشد که بر حسب شرایط متفاوت است [۶].

در این تحقیق، بر حسب فرضیات مرجع [۷] برای نفت سنگین مقدار C_0 برابر ۴۸، s برابر صفر و مقدار ویسکوزیته مایع برابر ۰/۰۴۲ در نظر گرفته شده اند. برای لاستیک میان سقف شناور و

برای مخزن با سقف شناور دولایه، ۱۱۷۶ المان استفاده شده است. تعداد المان مورد استفاده برای مایع درون مخزن با سقف شناور تک‌لایه، ۱۲۸۸۰ المان و برای مخزن با سقف شناور دولایه برابر ۴۰۱۸ المان بوده است. شکل‌های (۴) و (۵) المان‌بندی مخزن با سقف شناور تک‌لایه و دولایه را نشان می‌دهند. سقف‌های شناور تک‌لایه و دولایه به ترتیب دارای ۳۰۷۰ و ۱۴۶۶ المان می‌باشند.



شکل ۴- المان‌بندی سقف شناور دولایه



شکل ۵- المان‌بندی سقف شناور تک‌لایه

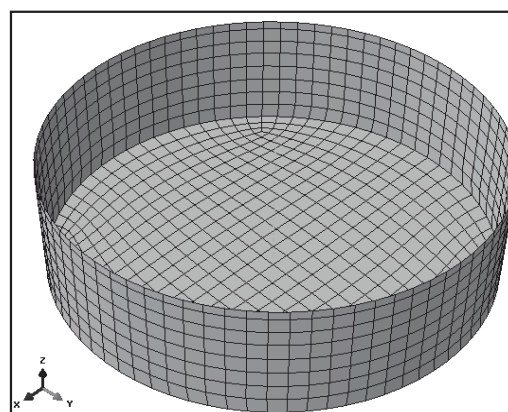
مشخصات انفجارهای وارد به مخازن

هر بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط ۳ پارامتر شکل موج، حداکثر اضافه فشار و زمان تداوم موثر تعیین می‌شود. بر حسب منشأ انفجار، موج‌های ناشی از آن به دو شکل موج ضربه و موج فشار تقسیم می‌گردند که با توجه به اینکه ماده منفجره مورد بحث در این تحقیق TNT می‌باشد، موج ضربه‌ای غالب است. در موج ضربه‌ای، مواد منفجره جامد بوده و در آن، فشار گازهای شکل گرفته از انفجار، با انتشار از چشمه انفجار، گسترش و تا فشار مینمای P_s .

بدنه مخزن، وزن مخصوص ۸۰۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ برابر ۲/۴ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۲۳ فرض گردیده است.

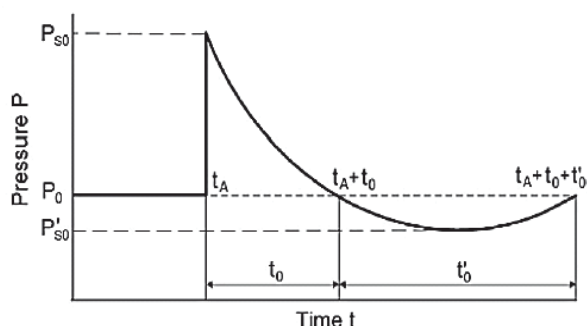
۳-۲- حل عددی

تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و به روش تحلیل دینامیکی صریح انجام می‌گیرد. در حل عددی، اندرکنش میان مایع و سازه به‌صورتی است که در جهت برخورد عمودی، مایع و بدنه مخزن برخورد سخت انجام داده و اجازه جدا شدن مایع از سازه وجود دارد. برخورد مماسی مایع و سازه به‌صورت بدون اصطکاک است. فرضیات اندرکنش در این بخش بر کل مدل مخزن وارد شده و مایع درون مخزن از المان‌های مخزن عبور نمی‌کنند. سقف شناور بر روی مایع قرار می‌گیرد و درون مایع غرق نمی‌شود. شرایط مرزی در کف مخزن به‌صورت کاملاً گیردار می‌باشد. انفجار به‌صورتی وارد شده که مستقیماً بر بدنه مخزن اثر می‌گذارد و انفجارها در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهند. مدل‌سازی گایدپیل کنترل‌کننده سقف، به‌صورت شرایط مرزی بر روی سقف شناور لحاظ گردیده و در محل آن، سقف تنها می‌تواند حرکت آزاد به بالا و پائین داشته باشد. المان‌های در نظر گرفته‌شده برای بدنه مخزن و سقف شناور به‌صورت المان‌های Explicit می‌باشند. همچنین المان‌های مایع در فضای سه‌بعدی به‌صورت تحلیل صریح فرض شده است. شبکه‌بندی استفاده‌شده بر روی سقف شناور به‌صورت Sweep و بدنه مخزن، Structural بوده و کف مخزن به‌صورت Free المان‌بندی شده است.



شکل ۳- المان‌بندی مخزن

در شکل (۳) نمونه‌ای از المان‌بندی بدنه مخزن نشان داده شده است. برای مدل‌سازی مخزن با سقف شناور تک‌لایه، ۲۵۲۴ المان و



شکل ۷- نمودار فشار بر حسب زمان موج انفجار

می شود و پس از مدت زمان موثر، موجی خلاف موج اولیه ایجاد شده و به سمت منبع انفجاری باز می گردد که مقدارش ناچیز است.

بر اساس روابط براد بیش فشار برابر است با:

$$P_{s0} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019, 0.1 < P_{s0} < 10 \text{ bar} \quad (3)$$

$$P_{s0} = \frac{6.7}{Z^2} + 1 \quad P_{s0} > 10 \text{ bar} \quad (4)$$

رابطه بیشینه فشار به دست آمده از انفجار، یک تابع ضابطه دار است؛ در واقع پس از محاسبه مقدار رابطه، حدود معین شده باید کنترل گردد. در این روابط، پارامتر Z پارامتر خصوصیات انفجار است که خود از رابطه (۵) محاسبه می گردد.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (5)$$

در رابطه فوق، R نشان دهنده فاصله منبع انفجار تا سطح سازه و W نشان دهنده وزن ماده انفجاری TNT بر حسب کیلوگرم می باشد. مدت زمان اعمال بار، پارامتر مهمی در محاسبه پاسخ سازه می باشد. مدت زمان فاز مثبت یا مدت زمان موثر انفجار با توجه به روابط (۶) و (۷) که توسط ایزدی فرد و ماهری ساده سازی شده اند و از آئین نامه TM5-1300 استخراج گردیده می باشد [۱۱].

$$\log \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 2.5 \log(z) + 0.28 \quad Z < 1 \quad (6)$$

$$\log \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 0.31 \log(z) + 0.28 \quad Z > 1 \quad (7)$$

جدول (۴)، ۱۵ حالت مختلف انفجاری را نمایش می دهد که بر روی دو نمونه مخزن با سقف شناور تک لایه (قطر ۳۲ متر) و سقف شناور دولایه (قطر ۵۰ متر) وارد آمده است. با توجه به بررسی های اثر فاصله در روابط موجود مشخص شد که به السمانی که در نزدیکترین فاصله به منبع انفجاری است بیشترین فشار وارد شده و سپس در دو امتدادی که سطح مخزن از منبع انفجاری دورتر می شود با تابع درجه دوم بر حسب فاصله مقدار تاثیر انفجار کاهش

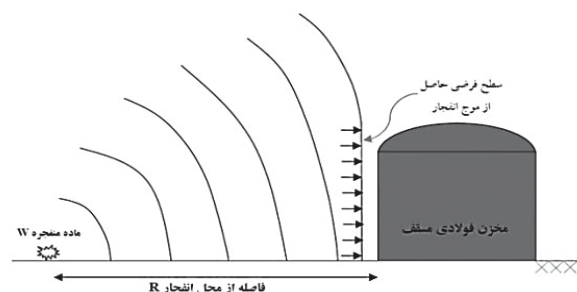
افزایش و سپس تا فشار محیطی کاهش می یابد که به این مرحله، فاز مثبت می گویند. انفجارهای وارده به سازه جزو انفجارهای خارجی است که در نزدیکی سطح زمین این اتفاق صورت می گیرد [۱۰-۸].

انفجارهای وارد بر دو نوع مخزن توسط مدل AirBlast در نرم افزار مدل گردیده و بر اساس روابط براد بررسی گردیده است. بدین صورت که در زمان وقوع انفجار، بیش فشاری بر بدنه مخزن (سطحی از مخزن که به منبع انفجار نزدیک است) وارد می آید.

سناریوهای انفجار وارد آمده بر مخازن بر حسب دو پارامتر فاصله و مقدار خرج انفجاری می باشد که در فواصل ۵، ۱۵ و ۲۵ متر از نزدیکترین نقطه بدنه مخزن تا منبع انفجار فرض شده است. مقدار خرج انفجاری بر حسب نوع حمله در ۵ حالت وزن TNT برابر مقادیر ۵، ۲۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم لحاظ گردیده که می توان آن را به ترتیب به حملات تک نفره و حمل خرج انفجاری در خودرو سبک و سنگین و تریلر حامل مواد منفجره دسته بندی کرد.

روابط حاکم بر انفجار در هوا [۴]

فشار ناشی از موج ضربه یا موج فشار با افزایش فاصله جبهه موج، کاهش یافته و به فشار محیطی میل می کند و سرانجام پس از



شکل ۶- اثر فشار مثبت انفجار سطحی در نزدیکی سازه [۸]

رسیدن وضعیت به فشار طبیعی، فشار منفی باعث بازگشت هوا به مرکز انفجار می گردد. انفجار صورت گرفته بر اساس رابطه پیشنهادی براد، مقدار فشار بر حسب زمان به شرح زیر است [۴]:

$$P_{s0}(t) = P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) e^{-t/t_0} \quad (2)$$

در این رابطه، P_{s0} بیش فشار وارده و t زمان و t_0 مدت زمان موثر انفجار می باشد. نمودار رابطه (۲) مطابق شکل (۷) است. این نمودار دارای بخش فشار مثبت و بخشی ناچیز از فشار منفی می باشد؛ در واقع پس از اینکه امواج در هوا به صورت کروی گسترده

جدول ۴- پارامترهای انفجاری مدل سازی شده

W(Kg)	R(m)	Z	T _d (s)
۵	۵	۲/۹۳	۳
۵	۱۵	۸/۷۸	۴
۵	۲۵	۱۴/۶۳	۴
۲۰	۵	۱/۸۵	۴
۲۰	۱۵	۵/۵۳	۵
۲۰	۲۵	۹/۲۲	۵
۱۰۰	۵	۱/۰۸	۷
۱۰۰	۱۵	۳/۲۴	۸
۱۰۰	۲۵	۵/۳۹	۸
۵۰۰	۵	۰/۶۳	۷
۵۰۰	۱۵	۱/۸۹	۱۲
۵۰۰	۲۵	۳/۱۵	۱۳
۱۰۰۰	۵	۰/۵	۷
۱۰۰۰	۱۵	۱/۵	۱۴
۱۰۰۰	۲۵	۲/۵	۱۵

بسیار خوبی در این زمینه دارد [۱۲] و [۱۳].

۴- نتایج:

جدول (۵) نتایج نمودارهای پوش تنش خروجی بر حسب انفجار وارده بر روی بدنه مخزن می باشد. زمان تحلیل ها برابر زمان موثر انفجار بوده و تمامی کانتورهای نشان داده شده، در آخرین زمانی است که تحلیل پیش رفته است. تمامی شکل ها وضعیت مخزن پس از پشت سر گذاشتن انفجار می باشد. وضعیت مخزن در ۳ حالت تقسیم بندی شده است: (۱) مخزن با تغییر شکل الاستیک به حالت اولیه خود بازگشته است. (۲) مخزن تغییر شکل پلاستیک انجام داده و نیاز به تعمیر دارد. (۳) المان هایی از مخزن منهدم شده و در زمان های اولیه تحلیل به دلیل شدت انفجار بالا مخزن به کلی از بین رفته است.

شماره گذاری نحوه عملکرد سازه در جداول (۵) و (۶) مشخص گردیده است. مخازن با خرج انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در زمان کوتاهی (حدود ۰/۰۱ ثانیه) منهدم شده که البته در تحلیل صریح (Explicit) و با فرضیات مدل پلاستیک فولاد، زمانی که المان ها نتوانند تنشی را تحمل نمایند عمل حذف المان صورت می گیرد. تطابق شکل آخرین وضعیت تحلیل با شکل های (۸) الی (۱۲) این گفته را واضح تر نشان می دهد.

جدول (۶) نتایج کانتورهای تنش بر روی مخزن با سقف شناور دولایه را نشان می دهد.

شکل های درون جدول (۶) نشان می دهد که مخازن با سقف شناور دولایه وضعیت رفتاری بهتری دارد. این مقاومت بیشتر به سبب قطر بیشتر مخزن و حجم بیشتر مایع انبار شده می باشد که همانند فنر و دمپر عمل نموده و المان های تشکیل دهنده مایع، انرژی ورودی را دفع می نمایند. وجود سقف شناور دولایه خود باعث می شود که کنترل اسلاشینگ مایع درون مخزن بهتر صورت گیرد و سقف شناور دولایه سنگین تر بوده و از به وجود آمدن موج های کوچک و ناهماهنگ درون مخزن جلوگیری به عمل می آورد. با توجه به گفته ها و نتایج تحلیل ها نتیجه می شود که مخازن با سقف شناور دولایه و به طور کلی مخازن بزرگتر، دافع بهتری در برابر انفجار هستند.

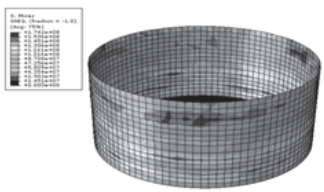
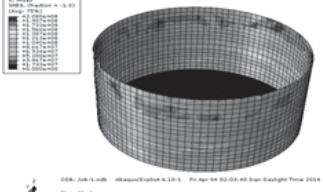
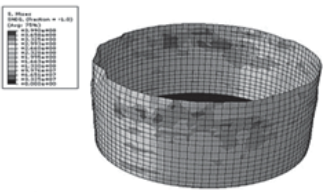
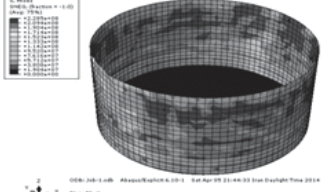
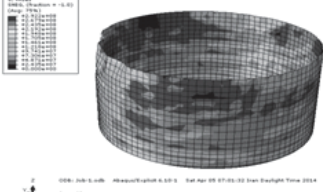
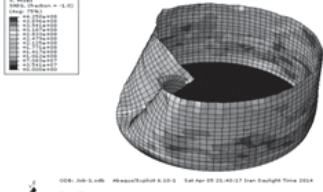
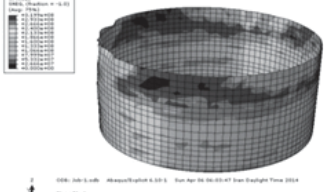
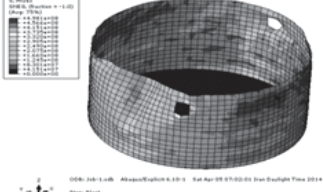
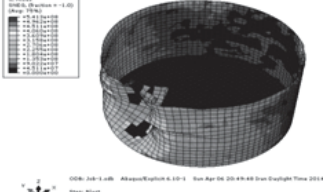
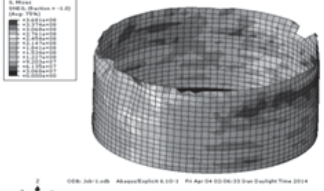
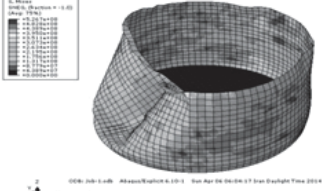
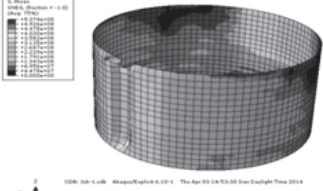
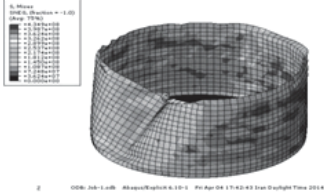
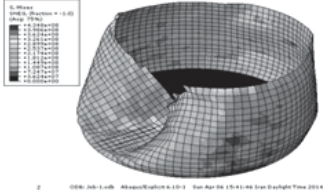
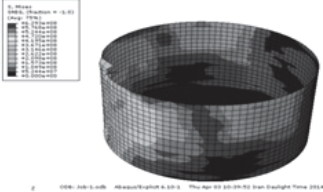
در بعضی موارد، مانند حالتی که ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره در فاصله ۲۵ متری مخزن عمل کرده، فشار موج انفجار بسیار زیاد بوده و چند المان از سازه از بین رفته و تحلیل متوقف گردیده و

یافته تا به مقدار صفر برسد.

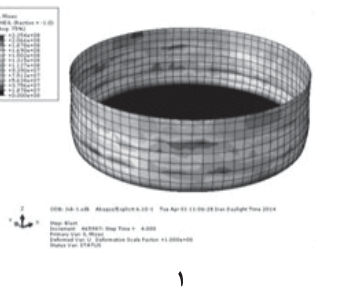
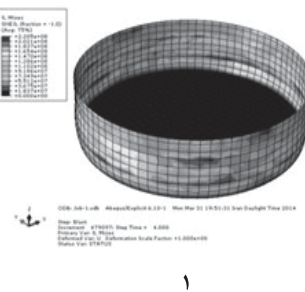
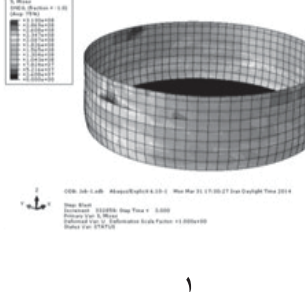
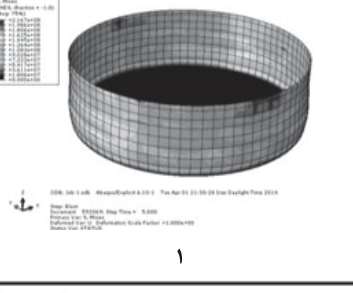
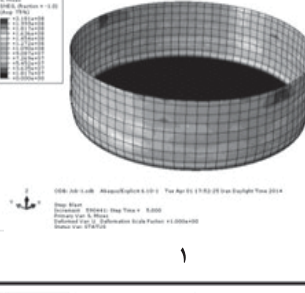
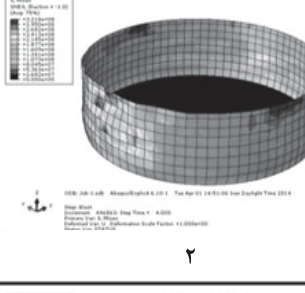
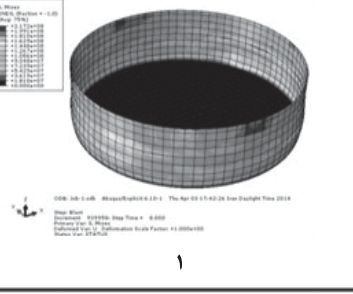
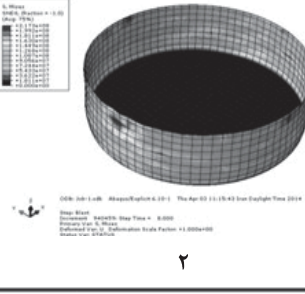
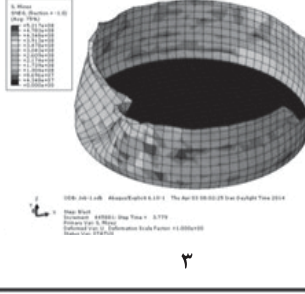
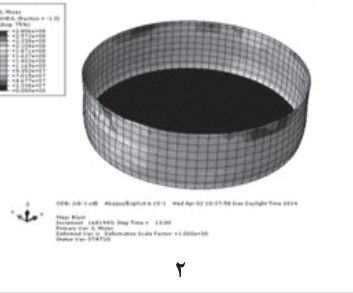
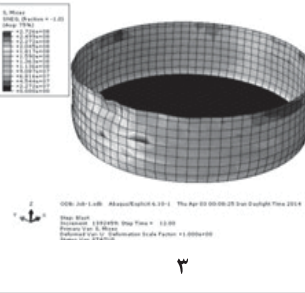
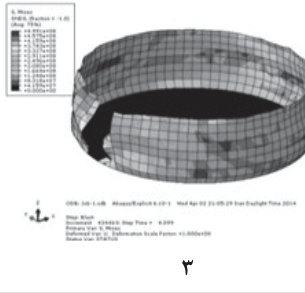
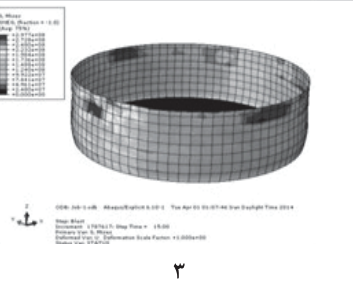
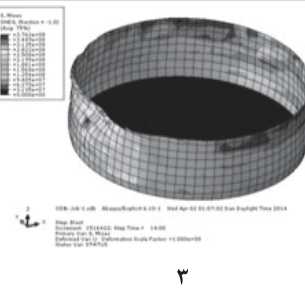
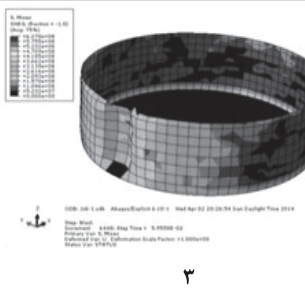
کنترل صحت مدل مخزن، یکی از مهم ترین بخش های مدل سازی می باشد که به خوبی توجه شده است. تمامی اجزاء از قبیل فولاد در بدنه و کف مخزن و سقف شناور مطابق فولاد مورد استفاده در ساخت بوده و فولاد مطابق مقاله ای که طراحان مخازن نفتی در دانشگاه کانادا مدل کرده اند تطابق دارد [۱۱]. مایع درون مخزن مطابق با مدل نفت مقاله محقق از شرکت آباکوس در رابطه با مخازن روی ناوهای حمل نفت می باشد. اندرکنش میان سازه و مایع بر اساس خصوصیات فیزیکی مایعات انجام شده است. [۷]

خروجی های برنامه با روابط ارائه شده در آئین نامه API650 کنترل گردیده؛ بدین صورت که بیشترین شتاب زلزله که امکان وقوع در تهران را دارد مطابق آئین نامه به مدل وارد گردیده و میزان اسلاشینگ مایع (تلاطم سطح مایع تحت اثر موج وارده) در مدل برابر ۱۶/۱ متر و در محاسبات برابر ۱/۳۹ متر برای مخازن رو باز به دست آمده که مسلماً این مقدار با وجود سقف شناور کاهش یافته و خطایی کمتر از ۱۰ درصد در مدل مایع دارد [۶]. انطباق مدل Airblast در نرم افزار آباکوس با روابط مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان، کنترل دیگری می باشد که نتایج به مقادیر آئین نامه نزدیک است. این صحت از کنترل فشار وارده بر بدنه مخزن در ابتدای تحلیل در دو حالت بارگذاری با روابط آئین نامه و مدل انفجار در نرم افزار به دست آمده و نرم افزار آباکوس نیز راهنمای

جدول ۵ - کانتورهای تنش مخزن با سقف شناور تک لایه

فاصله انفجار ۲۵ متر	فاصله انفجار ۱۵ متر	فاصله انفجار ۵ متر	
 <p>۱</p>	 <p>۱</p>	 <p>۲</p>	۵ کیلوگرم
 <p>۱</p>	 <p>۲</p>	 <p>۳</p>	۲۰ کیلوگرم
 <p>۲</p>	 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	۱۰۰ کیلوگرم
 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	۵۰۰ کیلوگرم
 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	۱۰۰۰ کیلوگرم

جدول ۶ - کانتورهای تنش مخزن با سقف شناور دولایه

فاصله انفجار ۲۵ متر	فاصله انفجار ۱۵ متر	فاصله انفجار ۵ متر	
 <p>۱</p>	 <p>۱</p>	 <p>۱</p>	۵ کیلوگرم
 <p>۱</p>	 <p>۱</p>	 <p>۲</p>	۱۰ کیلوگرم
 <p>۱</p>	 <p>۲</p>	 <p>۳</p>	۱۰۰ کیلوگرم
 <p>۲</p>	 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	۵۰۰ کیلوگرم
 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	 <p>۳</p>	۱۰۰۰ کیلوگرم

با سقف شناور تک لایه را نشان می‌دهد که در هیچ حالتی از فاصله خرج انفجاری، این فشارها قابل دفع توسط سازه نمی‌باشد و سازه به کلی منهدم می‌گردد.

سقف شناور دولایه

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که مخزن با سقف شناور دولایه، رفتار بهتری نسبت به مخزن با سقف شناور تک لایه داشته و از طرفی این مخازن قطر بزرگتری دارند. از نمودارهای فوق به نظر می‌رسد که سازه مورد نظر در انفجار ۵ کیلوگرم در فاصله ۵ متری تا حدودی دچار آسیب می‌شود زیرا از حد تغییر شکل‌های الاستیک گذشته و بخش‌هایی از آن پلاستیک شده است.

شکل (۱۴)، تحت اثر انفجار ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره در فاصله ۵ متری است که مخزن دچار مشکلاتی می‌شود و تغییر شکل‌های بزرگی را تجربه می‌کند و مایع درون مخزن تا حد زیادی خارج می‌شود ولی در فواصل بیشتر انفجاری، مخزن به خوبی مقاومت نموده و تنها لبه‌های بالایی بدنه مخزن، تغییر شکل‌های بزرگ و ماندگار که قابلیت تعمیر و بازیابی دارد نشان می‌دهد.

شکل (۱۵) نشان می‌دهد ماده منفجره ۱۰۰ کیلوگرمی می‌تواند در فاصله ۵ متری به مخزن آسیب زیادی وارد آورد که مخزن از دست می‌رود ولی در فواصل ۱۵ یا ۲۵ متر، اثرات انفجار به حدی کاهش می‌یابد که بر روی مخزن تاثیر آنچنانی ندارد و اثرات وارده قابل تعمیر خواهد بود.

شکل (۱۶)، اثر ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره بر سازه در فاصله ۵ متری از مخزن قابل تحمل توسط مخزن نبوده ولی در فاصله ۱۵ متری تا حدودی تحمل می‌شود که در نهایت، بدنه مخزن از بین می‌رود. جالب توجه است که در فاصله ۲۵ متری، مخزن بار انفجاری کمتری را تجربه می‌کند و تغییر شکل‌های ماندگار بزرگتری نسبت به حالت انفجاری ۱۰۰ کیلوگرم ماده انفجاری دارد.

شکل (۱۷) تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم مواد منفجره، در فاصله ۵ متری بدنه مخزن به هیچ وجه سالم نمی‌ماند و در فاصله ۱۵ متری، تغییر شکل‌ها به حدی زیاد است که مخزن به گسیختگی رسیده و در فاصله ۲۵ متری مخزن به قدری تحمل می‌کند که تغییر شکل‌های تا حدود ۲ متر را تجربه کرده و قابلیت بهره‌برداری ندارد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده شامل موارد ذیل است.

مخزن تحمل انفجار را نداشته است. تطابق شکل آخرین وضعیت تحلیل مخزن با شکلهای (۱۳) الی (۱۷) این گفته را واضح تر نشان می‌دهد.

نمودارهای پوش تنش و جابجایی بدنه مخزن

همانطور که گفته شد، در تمامی نمودارها یک ثانیه اول مربوط به بارگذاری تحت اثر وزن سازه می‌باشد. نام‌گذاری‌های صورت گرفته بدین صورت است که در عبارتی مانند DD, DD- Δk - Δm نشان‌دهنده سقف شناور دولایه (Double-Deck) بوده و برای سقف شناور تک لایه (Single-Deck) SD به کار برده شده و منظور از Δk وجود ۵ کیلوگرم خرج انفجاری است و عبارت عددی بعدی به صورت Δm نشان‌دهنده فاصله خرج انفجاری تا نزدیکترین نقطه بدنه مخزن می‌باشد. در مواردی که نمودار به یک باره به صفر رسیده بدین معنی است که تحلیل به دلیل از بین رفتن المان‌ها متوقف گردیده است.

نتایج سقف شناور تک لایه

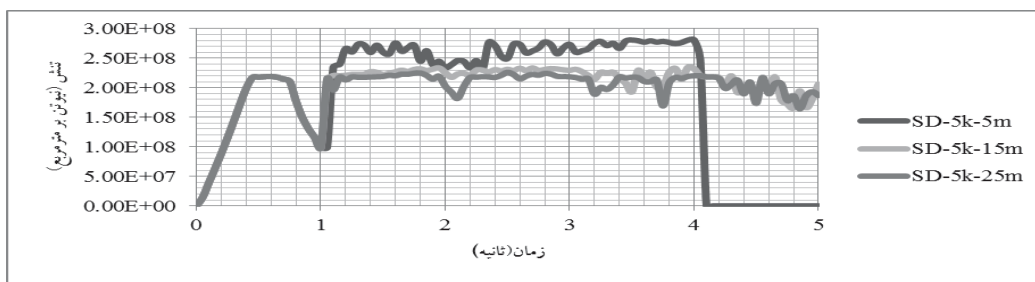
شکل (۸) نشان می‌دهد که مخزن با سقف شناور یک لایه تحت اثر انفجار ۵ کیلوگرم در فاصله ۵ متر آسیب پذیر می‌باشد و از بین می‌رود ولی در فواصل دورتر انفجار، به خوبی انفجار را پشت سر گذاشته شده است.

شکل (۹) نشان‌دهنده اثر انفجار در سقف شناور یک لایه با ۲۰ کیلوگرم ماده منفجره است. اگر فاصله مواد ۵ متر باشد مخزن از بین می‌رود و اگر فاصله ۱۵ متر باشد، کمی آسیب دیده که پس از انفجار ممکن است تا بخشی از مخزن خالی شده باشد ولی در فاصله ۲۵ متری، آسیبی متوجه مخزن نخواهد شد و تغییر شکل‌ها الاستیک است.

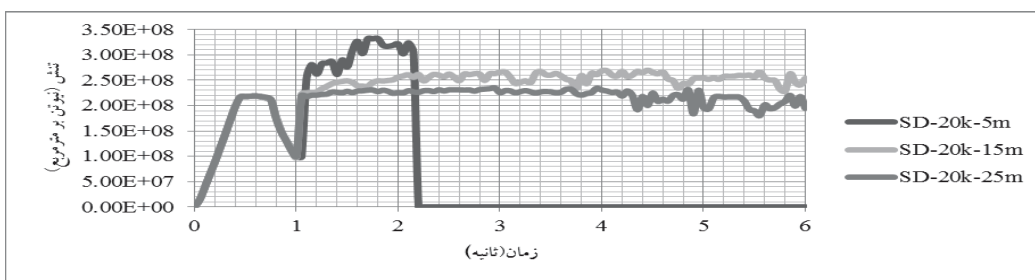
شکل (۱۰) نشان می‌دهد که مخزن تحت اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم، در فاصله ۵ و ۱۵ متر آسیب می‌بیند و به شدت خسارت می‌بیند. این تاثیر به حدی است که مایع درون مخزن باقی نمی‌ماند. ولی در انفجار فاصله ۲۵ متر، مخزن تغییر شکل‌های بزرگی را تجربه می‌کند.

شکل (۱۱) نشان‌دهنده مخازن با سقف شناور یک لایه بوده که تا حدودی تغییر شکل پیدا می‌کنند و سعی بر مقاومت دارند ولی بعد از حدود یک ثانیه در حین اعمال فشار بار انفجاری، از بین می‌روند و تحمل نمی‌کنند.

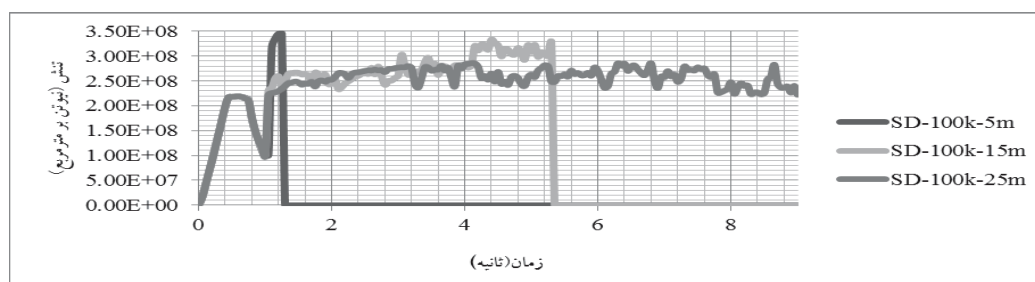
شکل (۱۲) انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم ماده انفجاری وارد به مخازن



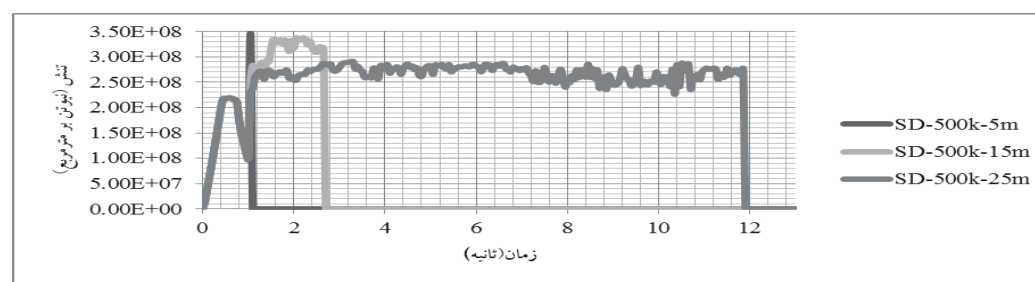
شکل ۸ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور تک لایه تحت اثر انفجار ۵ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



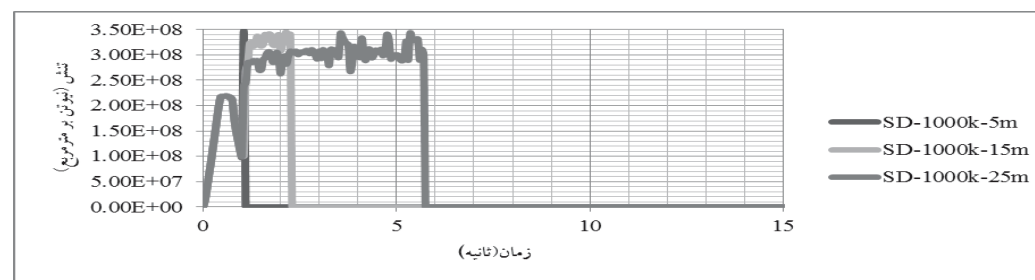
شکل ۹ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور تک لایه تحت اثر انفجار ۲۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



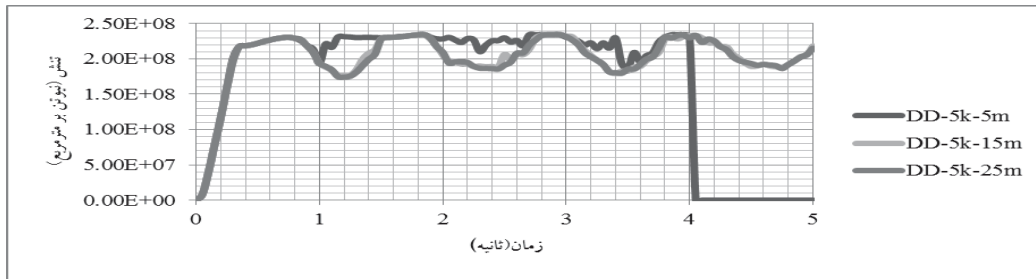
شکل ۱۰ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور تک لایه تحت اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



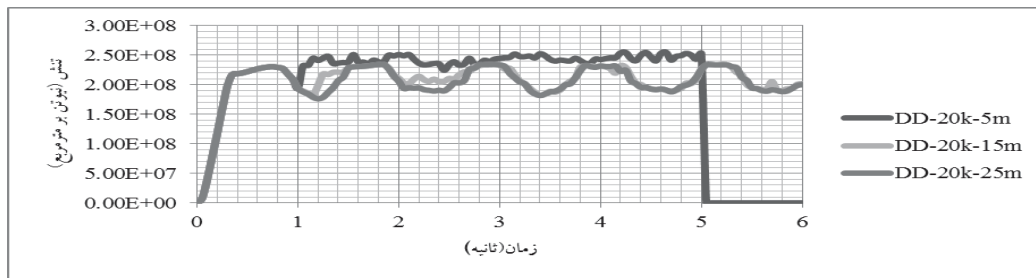
شکل ۱۱ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور تک لایه تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



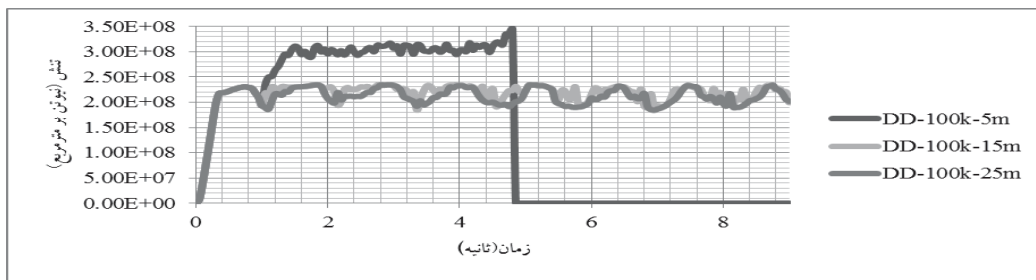
شکل ۱۲ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور تک لایه تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله



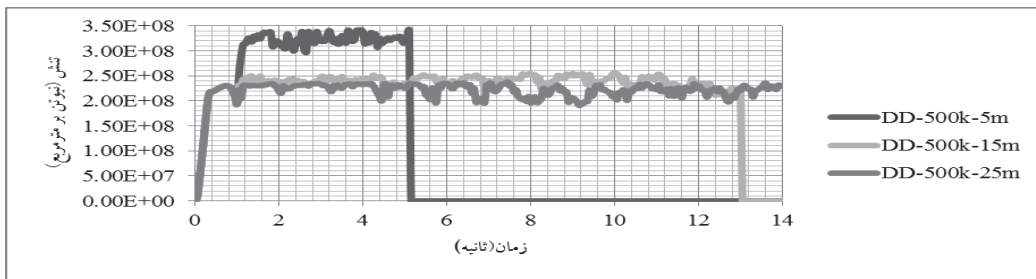
شکل ۱۳ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور دولایه تحت اثر انفجار ۵ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



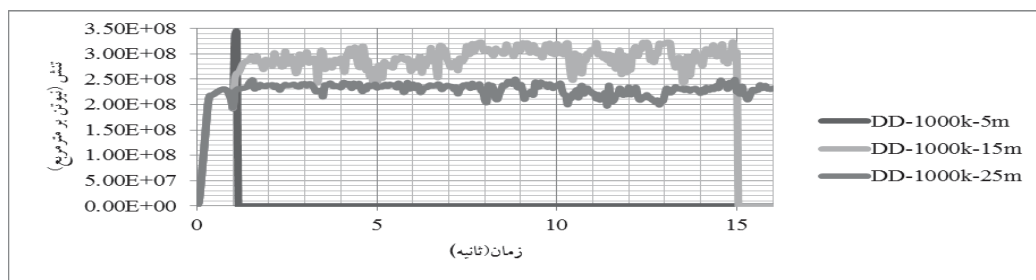
شکل ۱۴ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور دولایه تحت اثر انفجار ۲۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



شکل ۱۵ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور دولایه تحت اثر انفجار ۱۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



شکل ۱۶ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور دولایه تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف



شکل ۱۷ - تنش بدنه مخزن با سقف شناور دولایه تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم در ۳ فاصله مختلف

ملی مهندسی ساخت و تولید دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، (۱۳۸۶).

4. Brode H. L., "Numerical solutions of spherical blast waves," *Journal of Applied Physics*, Vol.26, No.6, pp766-776, (1955).
5. Kuan, Siew Yeng, Design, Construction and Operation of the Floating Roof Tank, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, (2009).
6. API Standard 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute.
7. N. Trevino, O. Zapata, and M. Guerrero, Structural simulation of a Horizontal Pressure Vessel for predicting stress under extreme weather conditions, SIMULIA Customer Conference, (2010).
8. Dr. Sudeep Kumar Lahiri, Dr. Lee Ho, Simulation of Rapid Structural Failure due to Blast Loads from Conventional Weapons, Blast Loading due to Conventional Weapons (CONWEP).
9. T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta & J. Ramsay, Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview, The University of Melbourne, Australia, EJSE, (2007).
10. Phillip E. Prueter, David J. Dewees, P.E., Using Explicit Finite Element Analysis to Simulate the Effects of External Chemical Explosions on Single and Double-Walled Storage Tanks, American Institute of Chemical Engineers, 9th Global Congress on Process Safety, San Antonio, Texas.
11. R J Rogers, J E S Venart, The Blast Failure of Buncefield Fuel Storage Tanks T910 and T601, Mechanical Engineering, University of New Brunswick, Fredericton NB Canada.
12. Stress Wave Propagation in a Bar under Blast Load, Abaqus 6.10.
13. Manual of Abaqus 6.10, SIMULIA Co.

- مخازن با سقف شناور دولایه نسبت به مخازن با سقف شناور تک‌لایه، در برابر انفجار رفتار بهتری دارند و با توجه به استحکام بیشتر، مایع ارزشمند را بهتر محافظت می‌کند.

- مخزن‌ها در بعضی سناریوهای انفجار، از حالت الاستیک گذشته و به پلاستیک رسیده و به دلیل شکل‌پذیری و مقاومت بالای فولاد، تحمل تنش‌های بالا در حدود ۳۲۰ مگاپاسکال را داشته است.

- از میان دو نوع مخزن ارائه‌شده، مخزن با قطر ۵۰ متر نسبت به مخزن با قطر ۳۲ متر رفتار مناسب‌تری در جهت جذب انرژی وارده و دفع انرژی دارد؛ زیرا رفتار مخزن بزرگتر به خاطر حجم مایع بیشتر، (به‌عنوان دفع‌کننده انرژی) بهتر است.

- فشار وارده بر المان‌های مخزن با فاصله گرفتن از محل انفجار با توان دوم فاصله، کاهش می‌یابد.

- رفتار مخازن در فاصله حدود ۵ متر بسیار حساس است و تا این فاصله، انفجارهای کمتر از ۵ کیلوگرم قابل تحمل می‌باشد. در نتیجه، مخازن رو زمینی در برابر حملات تروریستی سبک تا حدودی مقاوم هستند؛ البته اگر خرج انفجاری بر روی بدنه مخزن وارد آید مخزن سوراخ شده و حفظ مواد نفتی درون مخزن به خطر می‌افتد. اگر فاصله خرج انفجاری کمتر از ۵ متر باشد نیاز به استحکامات (دیوار کشی و...) و سیم‌های خاردار و فنس‌کشی جهت مقابله با نزدیک شدن افراد به مخازن ضروری می‌باشد.

مراجع:

۱. روستائی، جواد؛ نیری، آرش؛ زرنگاریان، ابوالفضل؛ تحلیل پایداری مخازن نفتی روزمینی مهارنشده در برابر بارگذاری انفجاری (مطالعه موردی، مخزن نفتی در جنوب کشور)، نخستین همایش ملی و بین‌المللی مدیریت بحران در خطوط لوله و تاسیسات (۱۳۹۰).
۲. میسمی، حسین؛ رفیعی، سید احمد؛ اصول طراحی و بهره‌برداری مخازن ذخیره زمینی و هوایی بر اساس اصول پدافند غیرعامل (استتار، فریب، مکانیابی، تفرقه و پراکندگی).
۳. جوابور، داریوش؛ علوی‌نیا، علی؛ علی‌پور، روزبه؛ شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی انفجاری پوسته‌های کرومی شکل با پیش ساختار چهار مخروطی، کنفرانس