

## بررسی عددی اثر انفجار مواد منفجره قوی بر مخازن تحت فشار افقی، قائم و کروی

سید حامد خلیل پور<sup>۱</sup>، محمد فیاض<sup>۲</sup>، فریدون خسروی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دکتری مهندسی عمران، پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

### چکیده

تأسیسات نفت، گاز و پتروشیمی از تأسیسات استراتژیک در صنعت به شمار می‌روند و لزوم بررسی مسائل مربوط به پدافند غیرعامل در مورد تجهیزات به‌کاررفته در تأسیسات فوق از اولویت‌های هر کشوری می‌باشد. انفجار ناشی از اقدامات خرابکارانه و یا بمباران هوایی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر بررسی مسائل مربوط به پدافند غیرعامل در این تأسیسات به شمار می‌رود. در این تحقیق به بررسی اثر انفجار ناشی از مواد منفجره قوی بر مخازن تحت فشار مستقر در تأسیسات فوق پرداخته شده است. ابتدا صحت نتایج حاصل از به کار بردن روش کانوپ برای اعمال بار انفجار خارجی مورد اعتبار سنجی قرار گرفته و سپس جهت اعمال بار به بدنه مخازن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به طور کلی مخازن تحت فشار قائم آسیب‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به مخازن تحت فشار افقی و کروی در مقابل بار انفجار دارند و استفاده از این نوع از مخازن می‌تواند باعث کاهش میزان ایمنی در مقابل خطرات احتمالی باشد. همچنین مخازن تحت فشار افقی مقاومت و ایمنی بیشتری نسبت به مخازن تحت فشار کروی دارا می‌باشند. علاوه بر این، بدنه مخزن مقاومت بسیار خوبی در مقابل انفجارات خارجی دارد و محتمل‌ترین سناریو خطر، آسیب دیدن پایه‌ها و در نتیجه جابجایی جانبی مخزن می‌باشد. در ادامه فاصله مقیاس شده ایمن از منابع قابل انفجار، جهت استفاده در طراحی و جانمایی مخازن تحت فشار در تأسیسات نفتی و گازی ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: مخازن تحت فشار، انفجار مواد منفجره قوی، تأسیسات نفت و گاز، روش‌های محاسباتی عددی، پدافند غیرعامل.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.77655.1088	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.77655.1088	۱۳۹۷/۰۵/۳۰	۱۳۹۶/۰۴/۰۷	۱۳۹۶/۰۴/۰۷	۱۳۹۶/۰۳/۱۴	۱۳۹۵/۱۱/۲۹
فریدون خسروی					*نویسنده مسئول:	
ferydoonkhosravi@yahoo.com					پست الکترونیکی:	

# Numerical Analysis of High Explosive Explosion on Horizontal, Vertical and Spherical Pressure Vessels

S. H. Khalilpour<sup>1</sup>, M. Fayyaz<sup>2</sup>, F. Khosravi<sup>\*3</sup>

1- MSc of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- PhD, Department of Civil Engineering, Emam Hosein University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Emam Hosein University, Tehran, Iran

## ABSTRACT

*Oil, gas and petrochemical facilities are strategic industry facilities, and their passive defense issues are of high priority in every country. Explosions due to sabotage or aerial bombardments are of the most important factors in considering issues related to passive defense in the abovementioned facilities. In this study, the effect of blast loading on pressure vessels is investigated. In this regard, the results of ConWep method for applying an external blast load, are validated. Then, it is used as the loading method in the study. The results of this study clearly indicate that the vertical pressure vessels are more vulnerable than horizontal and spherical pressure vessels against the blast load. Therefore the use of these types of pressure vessels can reduce safety against potential hazard. The horizontal pressure vessels are more vulnerable than spherical pressure vessels against the blast load. In addition, the body of the pressure vessel shows splendid resistance against external explosions, and the most likely risk scenario is damage to the saddles which results in lateral displacement of the vessel. The following safe scaled distance from explosive sources of pressure vessels in oil and gas facilities offered.*

## ARTICLE INFO

Received: 17/02/2017

Revised: 04/06/2017

Accepted: 28/06/2017

### Keywords:

*Pressure Vessel*

*HE Explosion*

*Oil and Gas Facilities*

*Numerical Analysis*

*Passive Defense*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.77655.1088

\*Corresponding author: F. Khosravi.

Email address: ferydoonkhosravi@yahoo.com

## ۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش پتانسیل حمله به مناطق غیرنظامی و خسارت‌های سنگین ناشی از آن، بررسی ایمنی و پایداری سازه‌ها تحت اثر بارگذاری ناشی از انفجار یا ضربات تصادفی مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین شناخت پدیده انفجار و بررسی رفتار سازه‌ها در مقابل آن از ضروریات می‌باشد.

در سال ۱۹۷۰ Port Hudson، خرابی در یک خط لوله باعث آزاد شدن مقدار زیادی پروپان شد و در نتیجه انفجار ابر بخار حاصله، آثار تخریبی زیادی بر روی ساختمان‌ها و سازه‌های اطراف ایجاد گردید. در حادثه فوق میزان فشار اوج ایجاد شده ۱ بار تخمین زده می‌شود. چهار سال بعد در سال ۱۹۷۴ یک خرابی موقتی در یک لوله انتقال گاز موجب آزاد شدن حدود ۱۰۰ تن از سیکلوهگزان در Flixborough گردید که در نتیجه انفجار گازهای آزاد شده، خرابی‌های محسوسی بر روی سازه‌های درون سایت تأسیسات ایجاد گردید. در حادثه فوق مکانیسم انفجار شامل یک انتقال از سوزش سریع به تراک<sup>۱</sup> بود و فشار اوج در محدوده ۱ تا ۱۰ بار تخمین زده می‌شود.

یکی از حوادث بسیار مهم که در سکوه‌های دریایی رخ داده و مشاء تحقیقات بسیاری گردیده است، حادثه پایپر الفادر سال ۱۹۹۴ می‌باشد. در حادثه فوق ۱۶۷ نفر به دلیل آتش‌سوزی و یا تنفس کربن مونوکسید حبس شده درون اتاقک‌های استراحت کشته شدند.

در سال ۲۰۰۵ حادثه بسیار مهمی نیز در یک سایت مخازن نفتی در منطقه buncefield رخ داد. حادثه فوق به دلیل پر شدن بیش از حد یکی از مخازن با گاز و در نتیجه سرریز شدن از مخزن آغاز گردید. گاز سرریز شده در ترکیب با هوا تشکیل یک ابر بخار داد و در نتیجه انفجار ابر بخار ایجاد شده، حدود ۲۰ مخزن موجود در مزرعه مخازن دچار حریق و انفجارهای پی‌درپی (اثر دومینو) گردیدند که خسارات مالی و جانی بسیار زیادی را به همراه داشت.

رها شدن یک‌باره انرژی از یک فرآیند انفجار، ماده منفجره را به گازهای با فشار و دمای بسیار بالا تبدیل می‌کند. جبهه فشاری یک گاز با فشار بالا، به‌طور شعاعی در محیط اتمسفر به‌صورت یک موج شاک قوی منتشر می‌گردد که توسط گازهای داغ، رانده شده و پشتیبانی می‌شود. جبهه شاک، که موج انفجار نامیده می‌شود، توسط افزایش تقریباً آبی از فشار محیط به حداکثر فشار برخوردی ( $p_{so}$ ) مشخص می‌گردد. این افزایش فشار یا جبهه شاک، به‌طور شعاعی از نقطه انفجار با یک سرعت کاهش یابنده، حرکت می‌کند. با گسترش جبهه شاک به حجم‌های بزرگ‌تر در محیط انتشار، حداکثر فشار برخوردی در جبهه‌ها کاهش یافته و مدت تداوم فشار افزایش می‌یابد [۱].

در خصوص اثرات انفجار، عمده داده‌های ارائه شده در راهنماها و آیین‌نامه‌ها مربوط به فشارهای حاصل از انفجار ماده تی ان تی کروی بدون روکش است. این داده‌ها را می‌توان برای دیگر مواد مستعد انفجار، با برقراری ارتباط بین انرژی انفجار وزن مؤثر خرج این مواد با مقادیر نظیر حاصل از وزنی معادل با تی ان تی تعمیم داد. علاوه بر انرژی حاصله، عوامل دیگری ممکن است بر معادل مواد در قیاس با تی ان تی اثر بگذارند. این عوامل شامل شکل ماده (مسطح، مربع، گرد و ...)، تعداد مواد (مختلف) منفجره، محصورشدگی ماده منفجره (غلاف، محفظه دربرگیرنده و غیره) و محدوده فشار مدنظر (محدوده نزدیک، متوسط، یا دور) می‌باشند [۱].

در منابع جهت بررسی اثر انفجار معمولاً ماده منفجره معیار TNT بوده و از نتایج حاصل از انفجار TNT استفاده می‌گردد. در این مراجع برای تعمیم دادن بررسی‌ها بر دیگر مواد منفجره از وزن TNT معادل استفاده می‌کنند. وزن TNT معادل برای مقدار معینی ماده منفجره برابر است با مقدار TNT مورد نیاز که انرژی برابر با آن مقدار ماده منفجره را ایجاد کند. اثرات انرژی آزاد شده حاصله از ماده منفجره با یک‌شکل خاص، نسبت به مقدار نظیر در تی ان تی با شکل مشابه، می‌تواند به‌صورت تابعی از حرارت انفجار مواد مختلف به حرارت انفجار TNT بیان گردد. جدول ۱ و رابطه (۱) این نسبت را برای مواد مختلف نشان می‌دهد. در این معادله  $H_{EXP}^d$ ,  $H_{TNT}^d$ ,  $W_{EXP}$ ,  $W_E$  به ترتیب برابر وزن TNT معادل، وزن ماده منفجره، حرارت انفجار تی ان تی و حرارت انفجار ماده منفجره می‌باشند.

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (1)$$

<sup>۱</sup> detonation

جدول ۱: ضرایب معادل تی ان تی [۲].

نوع ماده منفجره	ضریب تی ان تی معادل
Compound b	۱/۱۴۸
RDX(Ciklonit)	۱/۱۸۵
TNT	۱
C4	۱/۳۴

همچنین گزارش‌های آزمایشگاهی معمولاً (به جهت قابل استفاده و تعمیم بودن آن) بر مبنای فاصله مقیاس شده ارائه می‌گردد. رابطه (۲) تعریف فاصله مقیاس شده را نمایش می‌دهد. در رابطه فوق R فاصله ماده منفجره از سازه برحسب متر، W میزان تی ان تی معادل برحسب کیلوگرم و Z فاصله مقیاس شده از ماده منفجره می‌باشد.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

گیگلیو و همکاران [۳] به بررسی انفجار داخلی مخزن کرووی تحت فشار پرداخت. وی مدلی تحلیلی برای محاسبه تأسیسات مکانیکی فوق ارائه کرد. مظاهری و میرزایی [۴] تحقیقاتی را پیرامون اثر بار انفجار داخلی بر پاسخ گذرای لوله‌های تحت فشار صورت دادند. آن‌ها یک مدل تحلیلی برای شرایط فوق ارائه کردند. همچنین نتایج مدل تحلیلی فوق با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. میرزایی [۵] در مقاله‌ای به بررسی گسیختگی سیلندر گاز در شرایط انفجار داخلی پرداخته است. همچنین میرزایی تحقیقی دیگر [۶] به بررسی تقویت موج انفجار ناشی از انفجار داخل لوله تحت فشار پرداخته است وی در این تحقیق از مدل‌های تحلیلی و عددی بهره گرفته است.

جان دایر [۷] به بررسی اثر انفجار خارجی بر مخازن تحت فشار پرداخته و نکات مهم در مورد طراحی آن مخازن در مقابل انفجار را مورد بررسی قرار داده است. میرزایی و ملکان [۸] به بحث بررسی اثر انفجار داخلی بر مخزن تحت فشار سوخت CNG پرداخته‌اند. در تحقیق فوق از روش عددی اجزا محدود استفاده شده است. پاسری [۲] با انجام مطالعات آزمایشگاهی به ارائه رابطه‌ای جهت به دست آوردن توزیع فشار انفجار خارجی پیرامون مخازن تحت فشار قائم اقدام کرد.

تمرکز اصلی تحقیقات پیشین به پدیده انفجار داخلی در مخازن تحت فشار معطوف می‌باشد و بررسی مسئله اثر انفجار خارجی بر مخازن تحت فشار مورد غفلت مراکز تحقیقاتی و صنعتی واقع شده است. همچنین در تحقیقاتی که به پدیده انفجار خارجی پرداخته شده بررسی جامعی جهت بررسی تأثیر بار انفجار بر تکیه‌گاه‌های سازه‌ای مخازن تحت فشار افقی، عمودی و کرووی صورت نگرفته است؛ بنابراین هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر انفجار خارجی بر مخازن تحت فشار قائم، افقی و کرووی جهت به دست آوردن پاسخ دینامیکی و همچنین عملکرد مخزن و تکیه‌گاه سازه‌ای آن در مقابل بار انفجار خارجی ناشی از مواد منفجره قوی می‌باشد؛ بنابراین به‌عنوان نوآوری این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بررسی اثر انفجار خارجی تحت سناریوهای مختلف بر مخازن تحت فشار افقی، عمودی کرووی و مقایسه عملکرد آن‌ها

۲- معرفی حد خرابی و حد گسیختگی برای مخازن تحت فشار افقی، عمودی و کرووی

## ۲- روش تحقیق و اعتبارسنجی

### ۲-۱- مخازن تحت فشار

مخزن تحت فشار طبق تعریف آیین‌نامه انجمن مکانیک آمریکا (ASME SEC VIII) به مخازنی گفته می‌شود که فشار طراحی داخل آن بیش از ۱۵psi (و کمتر از ۳۰۰۰psi) باشد. این مخازن فلزی معمولاً استوانه‌ای یا کرووی برای نگهداری و یا انجام فرآیندهای شیمیایی

میعات و یا گازها می‌باشند که توانایی مقاومت در برابر بارگذاری‌های مختلف (فشار داخلی و یا فشار خارجی و خلأ در داخل) را دارا می‌باشند. استاندارد اصلی<sup>۱</sup> برای طراحی این مخازن توسط انجمن مهندسی مکانیک آمریکا تدوین شده و هر چهار سال یکبار مورد بازنگری قرار می‌گیرد. کاربرد عمده این مخازن در صنایع نفت و گاز می‌باشد. مخازن تحت فشار برای اینکه کارکردی ایمن داشته باشند در فشار و دمای ویژه‌ای طراحی می‌شوند که اصطلاحاً فشار طراحی و دمای طراحی گفته می‌شود. طراحی و ساخت این گونه تجهیزات تحت فشار بدون اصول و استفاده از کدها و استانداردهای طراحی بسیار خطرناک و حادثه‌آفرین خواهد بود.

در تئوری، هر ماده‌ای با تحمل تنش کششی بالا و خاصیت‌های کششی مناسب می‌تواند در ساخت مخازن به کار گرفته شود اما استانداردهای ساخت فهرستی از بهترین مواد و محدودیت دما و فشار آن‌ها را مشخص کرده است. علاوه بر استحکام مکانیکی مناسب، استانداردهای حال حاضر دنیا، شرکت‌ها را موظف می‌کند تا از آهنی با مقاومت بالا در مقابل ضربه استفاده شود و همچنین برای محیط‌ها و سیالاتی که موجب خوردگی کربن استیل می‌شوند لازم است که از موادی با قابلیت مقاومت در برابر خوردگی استفاده کرد. مخازن تحت فشار را از نظر شکل می‌توان به دو دسته مخازن استوانه‌ای و کروی تقسیم کرد.

الف- مخازن استوانه‌ای: اغلب به صورت یک استوانه با دو سر عدسی ساخته می‌شوند. این نوع مخازن رایج‌ترین نوع مخازن هستند. مخازن استوانه‌ای بلند ممکن است عمودی یا افقی باشند. اصولاً نیاز عملیاتی یک برج، تعیین‌کننده نوع افقی یا عمودی بودن آن است. برای مثال برج‌ها که نیاز به ثقل جهت جداسازی فازها دارند به صورت عمودی نصب می‌شوند در حالی که مبدل‌های حرارتی هم می‌توانند به صورت افقی و هم عمودی نصب گردند. در مورد مبدل‌های حرارتی این انتخاب عموماً به وسیله روش انتقال گرما صورت می‌گیرد. در مخازن ذخیره محل نصب عمدتاً عامل انتخاب می‌باشد (شکل ۱).

ب - مخازن کروی: به علت استحکام ذاتی شکل کروی این مخازن اصولاً برای فشارهای بالا به کار می‌روند. مخازن ذخیره بزرگ که تحت فشار متوسط قرار دارند معمولاً شکل کروی یا شبه کروی دارند (شکل ۱).

مخازن تحت فشار در انواع کاربردهای گوناگون استفاده می‌شود. این مخازن برای ذخیره هوای فشرده و مخازن آب داغ خانگی کاربرد دارد. نمونه‌های دیگر از کاربرد آن می‌توان مخازن تحت فشار غواصی، برج‌های تقطیر، اتوکلاو در پالایشگاه‌های نفت و پتروشیمی، راکتورهای هسته‌ای، زیردریایی و کشتی فضایی، مخازن پنوماتیکی و هیدرولیکی تحت فشار، مخازن کیسه هوای خودرو و مخازن ذخیره‌سازی گاز مایع، مانند آمونیاک، کلر، پروپان، بوتان و LPG نام برد. تعاریف اولیه در ساخت مخازن تحت فشار در ادامه ذکر می‌گردد.

فشار کاری<sup>۲</sup>: فشار و دمایی است که مخزن، تحت آن به عملکرد عادی خود می‌پردازد.

فشار طراحی<sup>۳</sup>: فشاری است که جهت تعیین حداقل ضخامت مجاز برای اجزاء مختلف مخزن تحت فشار در نظر گرفته می‌شود و معمولاً ۱۰٪ و یا ۳۰ psi (هرکدام که بزرگ‌تر باشد) بیشتر از فشار عملیاتی آن می‌باشد. چنانچه مخزن دارای ارتفاع قابل توجهی باشد (بیشتر از ۱۰ متر) لازم است که فشار استاتیکی ناشی از وزن سیال نیز به رقم مزبور اضافه گردد. در مورد مخازنی که به‌طور معمول در شرایط خلأ کار می‌کنند و یا این که امکان خلأ برای آن‌ها محتمل است باید طراحی با در نظر گرفتن پدیده خلأ کامل صورت پذیرد.

<sup>2</sup> Operation pressure

<sup>3</sup> Design pressure



شکل ۱: نمونه دو مخزن تحت فشار استوانه‌ای افقی، عمودی و کروی.

## ۲-۲- مقاومت سازه‌ای

هدف اصلی این بخش معرفی روش‌های تحلیل سازه‌ای در مقابل بار انفجار می‌باشد. معیارهای اصلی و مورد اعتماد موجود به شرح زیر می‌باشند:

### ۱- محدود شده توسط مقاومت

زمانی که نیرو وارد بر اعضا مبنای طراحی قرار می‌گیرد، گسیختگی به مفهوم وضعیتی است که بار طراحی یا تأثیرات آن به بیش از مقاومت طراحی برسد. برای مثال در شرایط طراحی بر مبنای تنش، حداکثر تنش محدود می‌شود به درصدی از تنش جاری شدگی. برای مثال در طراحی فشاری مقاطع فولادی، حداکثر تنش محدود می‌شود به ۶۰٪ تنش جاری شدگی فولاد ( $F_y$ ).

### ۲- محدود شده توسط تغییر شکل‌ها

تغییر شکل دائمی می‌تواند معیار مناسبی برای طراحی باشد. در این حالت باید دو شرط اصلی برآورده شود. اول اینکه هیچ بخشی از سازه با دیگر سازه‌ها و تجهیزات حساس برخورد نداشته باشد. شرط دوم این است که تغییر شکل‌ها باعث از بین رفتن تأسیسات حیاتی که امکان فرار از محل وقوع حادثه را فراهم می‌کند، نشوند. محدوده تغییر شکل‌ها می‌تواند بر مبنای حداکثر کرنش یا جابجایی مطلق تعریف شود.

### ۳- محدود شده توسط کرنش

اکثر تجهیزات فولادی در محیط‌های صنعتی دارای حداقل ظرفیت کرنش حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد می‌باشند البته در شرایط بارگذاری با نرخ کرنش پایین [۹]. آیین‌نامه API برای حد کرنش معادل پیشنهادی جدول (۲) را ارائه کرده است. همچنین آیین‌نامه فوق حد کرنش گسیختگی ۲۰ درصد را برای تجهیزات فولادی در تأسیسات نفت و گاز پیش‌بینی کرده است [۱۰].

جدول ۲: محدوده مجاز کرنش پلاستیک [۱۰].

شرایط بارگذاری و مقطع	محدوده کرنش
کشش، فشار، خمش	٪۵
مقطع شکل پذیر	٪۵
مقطع فشرده	٪۳
دیگر مقاطع	کمتر از کرنش جاری شدگی

آیین نامه SCI نیز برای حد کرنش معادل پیشنهادی میزان ۵ درصد را ارائه کرده است و پیشنهاد کرده است که طراحان، حداکثر کرنش معادل پلاستیک را در محدوده ۵ درصد نگه دارند. همچنین حداکثر کرنش گسیختگی ۱۵٪ برای وقوع گسیختگی در نظر گرفته شده است [۱۰، ۱۱].

به این دلیل که بار انفجار، احتمال وقوع کمتری نسبت به دیگر بارگذاری‌های معمول (بار زنده، مرده و باد و ...) دارد، استفاده از ظرفیت پلاستیک مقاطع فولادی امری متداول و معقول می‌باشد. جهت استفاده از ظرفیت پلاستیک مقاطع بهترین راه، محدود کردن کرنش‌ها به معیارهای حداکثر کرنش پلاستیک ذکر شده در آیین نامه‌ها می‌باشد.

در تحقیق حاضر معیار طراحی، محدود شدن میزان کرنش پلاستیک به ۵ درصد می‌باشد. همچنین حد کرنش گسیختگی به صورت محافظه کارانه ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۳- مخازن مورد مطالعه

یکی از مخازن مورد مطالعه در این تحقیق مخزن جداکننده<sup>۴</sup> به قطر ۲ متر و طول ۶/۰۶۵ متر می‌باشد. مخزن از نوع استوانه افقی<sup>۵</sup> می‌باشد. مخزن فوق در عرشه سکوی دریایی پروژه پارس جنوبی کار جداسازی ترکیبات استخراج شده از چاه را به عهده دارد. مخزن بر روی دو پایه<sup>۶</sup> که به فاصله ۳ متر از هم جوش شده‌اند قرار گرفته است. پایه‌های فوق بر روی تیرهای عرشه سکو به صورت ثابت<sup>۷</sup> قرار گرفته‌اند (شکل ۲). مخزن دوم یک مخزن استوانه‌ای عمودی به قطر ۱/۷۵ و ارتفاع ۴/۵۱۲ می‌باشد که بر روی ۴ پایه بر روی زمین قرار گرفته است (شکل ۳). مخزن تحت فشار فوق در صنایع پتروشیمی پر کاربرد می‌باشد. و مخزن سوم که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است مخزن کرووی به قطر ۳ متر می‌باشد (شکل ۴). مخزن فوق بر روی چهار پایه استوار است. مخزن کرووی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد کاربرد می‌باشد.

## ۲-۴- مشخصات مصالح

برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در رفتار مواد، مدل رفتاری جانسون-کوک برای شبیه‌سازی رفتار غیر ارتجاعی فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل رفتاری تنش تسلیم به صورت تابعی از کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما تعیین می‌شود. معادله مربوط به این مدل رفتاری با صرف نظر از ترم حرارتی در رابطه (۳) بیان شده است.

$$\sigma = (A + B(\epsilon_p)^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (3)$$

در این رابطه A، B، C، n ثابت‌های مربوط به ماده هستند که از آزمایش قابل تعیین می‌باشند. پارامتر  $\sigma$  نشان دهنده تنش تسلیم و پارامتر  $\epsilon_p$  بیانگر کرنش پلاستیک معادل است.  $\dot{\epsilon}$  پارامتر نرخ کرنش نرمالیزه شده است. در جدول ۳ مقادیر به کار رفته برای فولاد قابل مشاهده است.

<sup>4</sup> Test separator

<sup>5</sup> Horizontal pressure vessel

<sup>6</sup> Saddle

<sup>7</sup> Fixed

## ۲-۵- مدل سازی

در ادامه سه نمونه مخزن از ابعاد معمول مورد استفاده در صنعت با مشخصات گزارش شده در جدول ۴ در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل سازی گردیده است. فشار طراحی مطابق با نقشه ها به صورت یکنواخت به سطح داخلی مخزن اعمال گردید. بار انفجاری هم به روش ConWep به مخزن اعمال گردیده است.

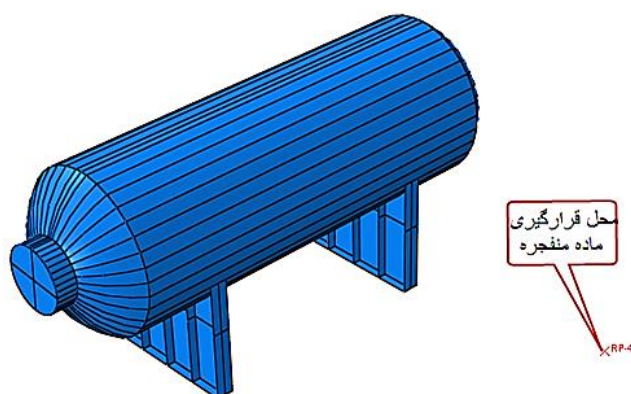
محل ماده منفجره در فاصله ۴ m از بدنه مخزن فرض گردیده است و با تغییر تی ان تی از ۱۵ kg تا ۳۰۰۰ kg، در مجموع ۱۸ سناریو بارگذاری برای مخزن قائم، ۱۴ سناریو برای مخزن افقی و ۱۵ سناریو برای مخزن کروی مورد بررسی قرار گرفته است. رنج بارگذاری طوری انتخاب گردیده است تا تمام حالات ممکن شامل عدم ایجاد تغییر شکل های پلاستیک تا گسیختگی مخزن را در نظر بگیرد. برای مدل سازی مخزن و پایه ها از المان پوسته ای چهار گرهی<sup>۸</sup> استفاده شده است.

جدول ۳: پارامترهای مدل جانسون-کوک استفاده شده.

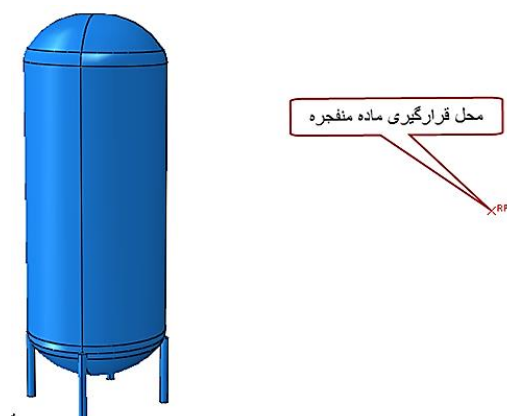
A(mpa)	B(mpa)	n	c	m
۲۶۵	۲۷۵	۰/۳۶	۰/۰۲۲	۰

جدول ۴: مشخصات فیزیکی مخازن مورد بررسی.

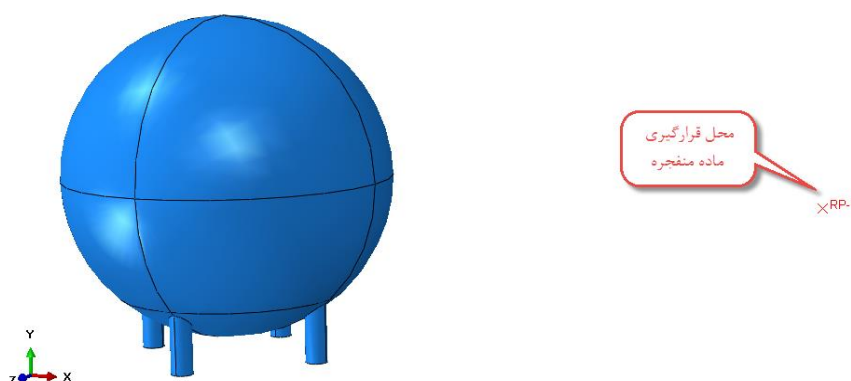
نوع	قطر(متر)	طول(متر)	ضخامت(متر)	فشار داخلی(بار)
استوانه ای افقی	۲	۶/۰۶۵	۰/۰۷	۱۲۴
استوانه ای عمودی	۱/۷۵	۴/۵۱۲	۰/۰۷	۱۲۴
کروی	۳	-	۰/۰۵	۱۲۴



شکل ۲: مخزن استوانه ای افقی مدل سازی شده در نرم افزار.



شکل ۳: مخزن استوانه ای قائم مدل سازی شده در نرم افزار.



شکل ۴: مخزن کروی مدل سازی شده در نرم افزار.

<sup>۸</sup> S4R



## ۲-۶- اعتبار سنجی روش اعمال بار انفجار

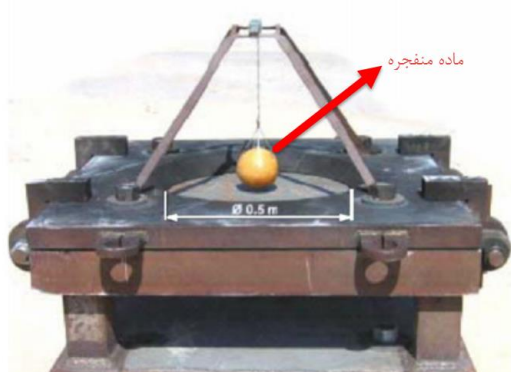
ConWep در واقع نام نرم‌افزار مستقلی می‌باشد که توسط ارتش آمریکا جهت محاسبات و اعمال بار انفجار و همچنین مسئله برخورد ترکش، استفاده می‌گردد. اخیراً روش محاسباتی فوق برای به دست آوردن و اعمال بار انفجار به نرم‌افزارهای مختلف از جمله LS-Dyna و Abaqus افزوده گردیده است. مبنای روش کانوپ محاسبه منحنی فشار-زمان به‌دست‌آمده از مجموعه روابط و گراف‌های ارائه‌شده در دستورالعمل TM5-855-1 برای هر نقطه از سازه مورد بررسی می‌باشد [۱۲]. وزن معادل خرج تی‌ان‌تی کروی به همراه فاصله سازه از خرج انفجاری مشخص‌کننده منحنی فشار زمان اعمالی بر سازه می‌باشد.

جهت بررسی صحت مدل‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار Abaqus و همچنین بررسی صحت اعمال بار انفجار در روش ConWep در نرم‌افزار فوق در این مقاله سعی شد با انجام شبیه‌سازی عددی یک کار آزمایشگاهی، صحت روش اعمال بار انفجار و همچنین پاسخ‌های سازه‌ای به‌دست‌آمده اثبات گردد. برای این منظور از کار آزمایشگاهی که توسط نیوبرگر و همکاران [۱۳] صورت گرفته بود استفاده گردید.

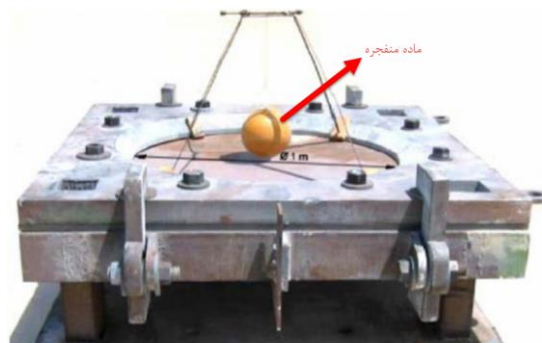
نیوبرگر و همکاران به بررسی اثر انفجار در هوای آزاد بر روی ورق فولادی پرداختند. آن‌ها دو آزمایش صورت دادند که در آزمایش اول ورق فولادی به قطر ۰/۵ متر، در فاصله ۰/۱ متری از ماده منفجره و در آزمایش دوم ورق فولادی به قطر ۱ متر و در فاصله ۰/۲ متری از ماده منفجره قرار گرفته است (شکل ۵ و ۶). در آزمایش اول وزن ماده منفجره ۰/۴۶۸ kg و در آزمایش دوم وزن ماده منفجره ۳/۷۵ kg در نظر گرفته شده است. مشخصات دو آزمایش فوق در جدول ۵ ارائه گردیده است. مطابق با آزمایش‌های فوق دو مدل اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus ساخته شد و برای بارگذاری انفجاری از روش ConWep استفاده گردید. حداکثر جابجایی ایجادشده در مرکز ورق فولادی در کار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مقایسه گردید که نتایج فوق در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین شکل ۷ تغییر شکل ایجادشده در صفحه فولادی قبل و بعد از انفجار را در دو آزمایش فوق نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی.

شماره آزمایش	۲	۱
ضخامت ورق (m)	۰/۰۲	۰/۰۱
قطر ورق (m)	۱	۰/۵
وزن ماده منفجره (kg)	۳/۷۵	۰/۴۶۸
فاصله از ماده منفجره (m)	۰/۲	۰/۱
حداکثر جابجایی مرکز ورق-آزمایشگاهی (m)	۰/۰۵۴	۰/۰۲۶
حداکثر جابجایی مرکز ورق-عددی (m)	۰/۰۵۲۸	۰/۰۲۵۹۶



شکل ۵: دستگاه انجام آزمایش برای ورق با قطر ۰/۵ متر [۱۳].



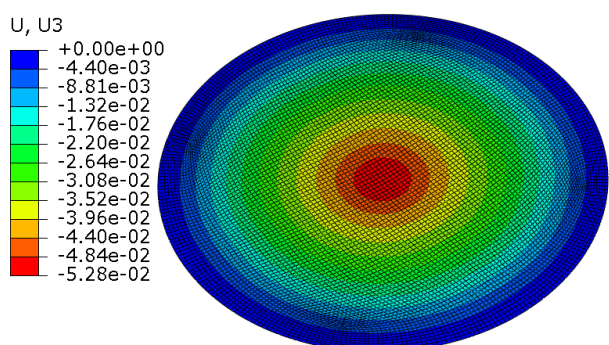
شکل ۶: دستگاه انجام آزمایش برای ورق با قطر ۱ متر [۱۳].

شکل ۸ حداکثر تغییر شکل ناشی از انفجار  $3/75 \text{ kg}$  ماده منفجره در شبیه‌سازی عددی را نمایش می‌دهد. و شکل ۹ نیز حداکثر تغییر شکل ایجاد شده ناشی از انفجار  $0/468 \text{ kg}$  ماده منفجره را در شبیه‌سازی عددی به نمایش می‌گذارد. مطابق با نتایج عددی و آزمایشگاهی بیشترین تغییر شکل‌ها در مرکز ورق ایجاد شده است.

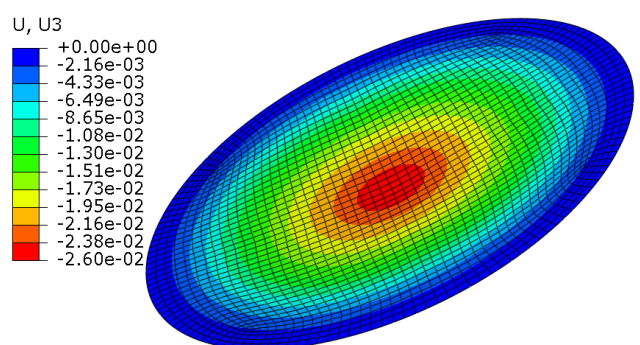
همان‌طور که از جدول ۵ و اشکال ۷ و ۸، مشخص است استفاده از نرم‌افزار Abaqus و قابلیت ConWep نتایج بسیار قابل قبولی را ارائه کرده است و استفاده از روش فوق برای تحلیل‌های آتی مورد پذیرش می‌باشد.



شکل ۷: ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک ورق با قطر ۰/۵ متر (چپ) و قطر ۱ متر (راست) در کار آزمایشگاهی [۱۳].



شکل ۸: ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک ورق با قطر ۱ متر در مدل‌سازی عددی.

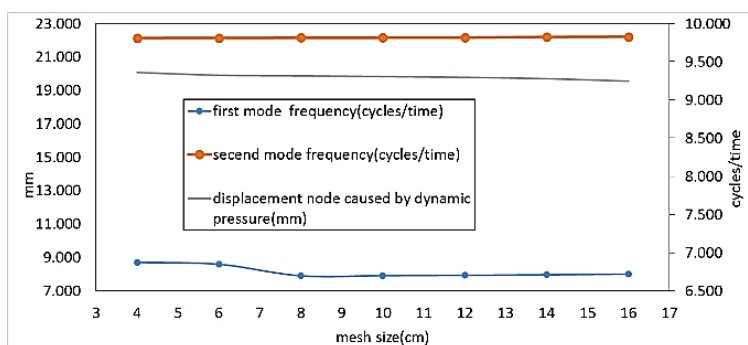


شکل ۹: ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک ورق با قطر ۰/۵ متر در مدل‌سازی عددی.

## ۲-۷ حساسیت سنجی ابعاد المان

جهت بررسی ابعاد مش مناسب سه نوع تحلیل بر مبنای فرکانس مود اول، فرکانس مود دوم و همچنین بیشترین جابجایی رخ داده در راس مخزن تحت فشار مورد بررسی تحت بار انفجار مشخص، صورت گرفته است.

نمودار شکل ۱۰ بررسی فوق را برای مخزن تحت فشار افقی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص می‌باشد در تمامی ابعاد المان‌ها تغییرات نتایج بسیار اندک بوده و کمتر از پنج درصد اختلاف وجود دارد، بنابراین با هدف کاهش هزینه محاسباتی ابعاد المان در حدود ۶cm برای رسیدن به پاسخ‌های دقیق کفایت می‌کند. همچنین تحلیل‌های مشابهی نیز برای مخزن تحت فشار قائم و کروی صورت گرفته است که ابعاد اسمی المان ۵cm برای مخزن قائم و ابعاد اسمی المان ۴cm برای مخزن کروی مناسب تشخیص داده شد.



شکل ۱۰: حساسیت سنجی نسبت به ابعاد مش برای مخزن استوانه‌ای افقی.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش به چند سؤال پیرامون پایداری مخزن تحت فشار در مقابل انفجار خارجی پاسخ داده می‌شود.

در چه بزرگی از انفجار خارجی کرنش‌های پلاستیک به صورت مؤثر وارد می‌گردد و تغییر شکل‌های دائمی در اجزاء اصلی مخزن تحت فشار ایجاد می‌شود.

در چه بزرگی از انفجار خارجی در پایه‌های مخزن کرنش‌های بیشتر از ۵ درصد ظاهر گردیده و پایه‌ها و مخزن غیرقابل استفاده می‌گردد.

در چه بزرگی از انفجار خارجی گسیختگی در اجزاء اصلی مخزن رخ می‌دهد.

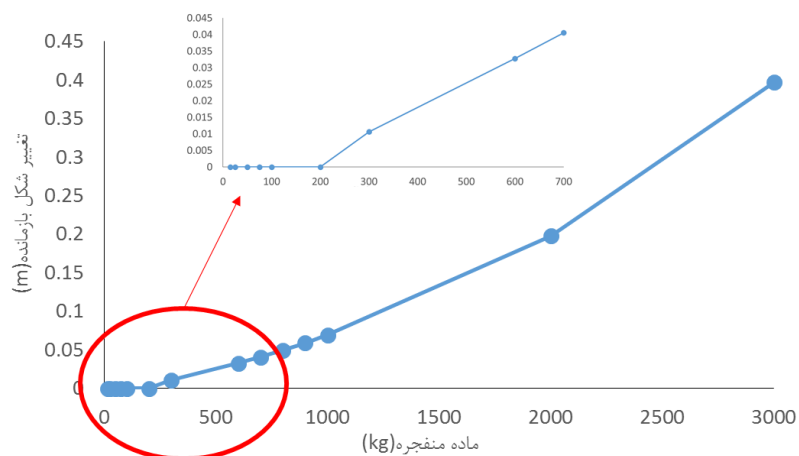
#### ۳-۱- مخزن استوانه‌ای افقی تحت بار انفجار

مخزن تحت فشار افقی را در ۱۴ میزان تی‌ان‌تی مختلف مورد بررسی قرار داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص می‌باشد میزان تی‌ان‌تی از ۱۵ kg تا ۳۰۰۰ kg می‌باشد.

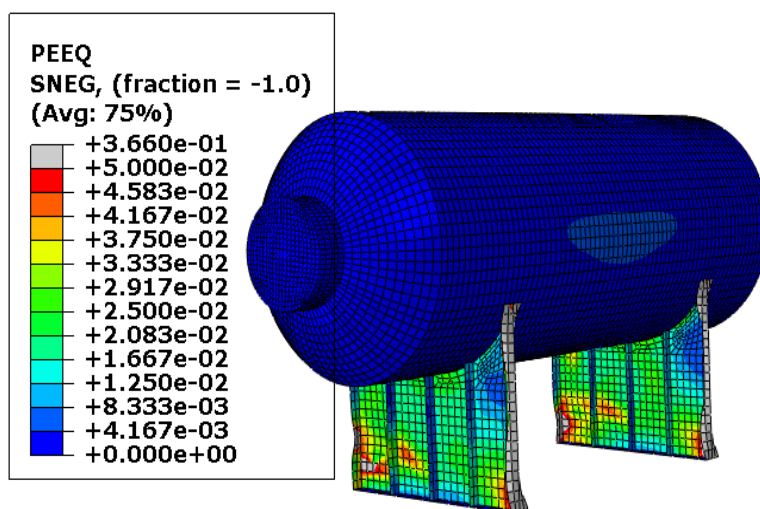
مطابق با شکل ۱۱ از حدود ۳۰۰ kg ماده منفجره تغییر شکل‌های پلاستیک به صورت مؤثر وارد می‌گردد و تغییر شکل‌های همیشگی در اجزاء اصلی مخزن تحت فشار مورد مطالعه ایجاد می‌شود. مطابق با شکل ۱۲ در محدوده ۱۱۰۰ kg در پایه‌های مخزن کرنش‌های بیش از ۵ درصد ظاهر گردیده و پایه‌های مخزن به عنوان یکی از اجزاء اصلی، غیرقابل استفاده و اعتماد می‌گردند.

همچنین مطابق با شکل ۱۳ در محدوده ۲۰۰۰ kg ماده منفجره، کرنش معادل پلاستیک از محدوده ۰/۱۵ بیشتر می‌شود و این موضوع به مفهوم آغاز گسیختگی پایه‌ها می‌باشد. در واقع در میزان ماده‌های منفجره بیش از ۲۱۰۰ kg مخزن به طور کامل از پایه جدا می‌شود. این جدا شدن مخزن از پایه به دلیل وزن بسیار بالا و شتابی که ناشی از پرت‌شدگی به خود می‌گیرد و همچنین احتمال انفجار خود مخزن خطرات بسیار زیادی را برای محیط اطراف ایجاد می‌نماید.

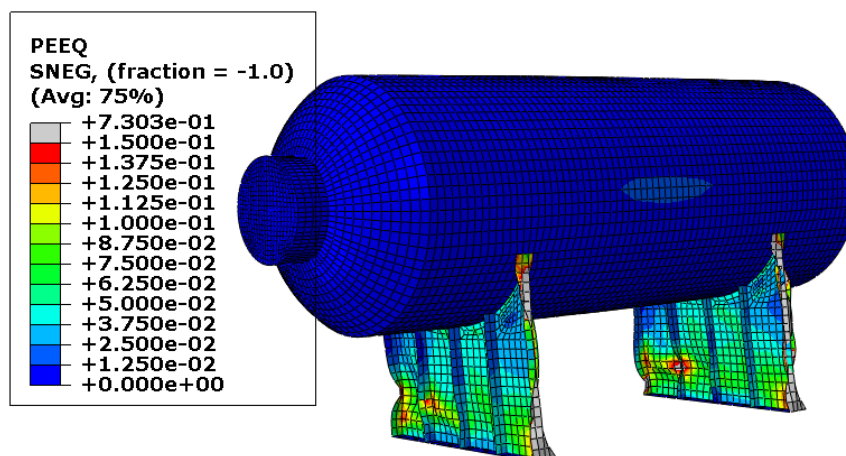
به بیانی دیگر فاصله مقیاس شده  $(Kg/m^{1/3})$  ۰/۶ باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک، فاصله مقیاس شده  $(Kg/m^{1/3})$  ۰/۳۹ باعث گذر از حدود آیین‌نامه‌ای و فاصله مقیاس شده  $(Kg/m^{1/3})$  ۰/۳۲ باعث آغاز گسیختگی در مخزن تحت فشار افقی می‌شود.



شکل ۱۱: تغییر شکل بازمانده در رأس مخزن افقی (محل اتصال به سیستم لوله‌کشی).



شکل ۱۲: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۱۱۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن افقی.



شکل ۱۳: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۲۰۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن افقی.

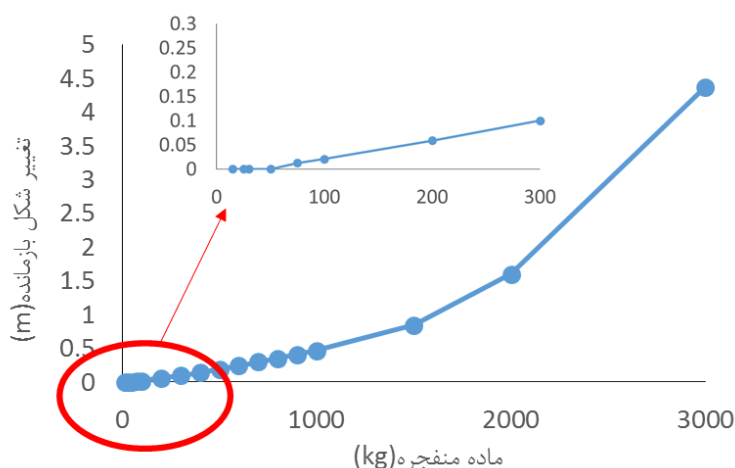
## ۲-۳- مخزن استوانه‌ای قائم تحت بار انفجار

مخزن تحت فشار قائم را در ۱۸ میزان تی ان تی مختلف مورد بررسی قرار داده شده است. همان طور که از شکل ۱۴ مشخص می‌باشد میزان تی ان تی از ۱۵ kg تا ۳۰۰۰ kg می‌باشد.

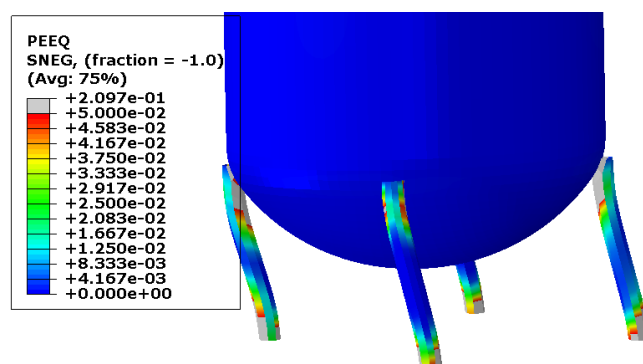
همان طور که در شکل ۱۴ اشاره شده است، از حدود ۷۵ kg ماده منفجره وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک به صورت مؤثر آغاز می‌گردد و تغییر شکل‌های همیشگی در اجزاء اصلی مخزن تحت فشار مورد مطالعه رخ می‌دهد. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که در محدوده ۶۰۰ kg در پایه‌های مخزن کرنش‌های بیش از ۵ درصد ظاهر شده و پایه‌های مخزن به عنوان یکی از اجزاء اصلی غیر قابل استفاده و اعتماد می‌شوند.

همچنین مطابق با شکل ۱۶ در محدوده ۱۰۰۰ kg ماده منفجره، کرنش معادل پلاستیک از محدوده ۰/۱۵ بیشتر می‌شود و این موضوع به مفهوم آغاز فرآیند گسیختگی پایه‌ها می‌باشد. در واقع در میزان ماده‌های منفجره بیش از ۱۰۰۰ kg مخزن به طور کامل از پایه جدا می‌شود. این جدا شدن مخزن از پایه به دلیل وزن بسیار بالا و شتابی که ناشی از پرت شدگی به خود می‌گیرد و همچنین احتمال انفجار خود مخزن، خطرات بسیار زیادی را برای محیط اطراف ایجاد می‌نماید.

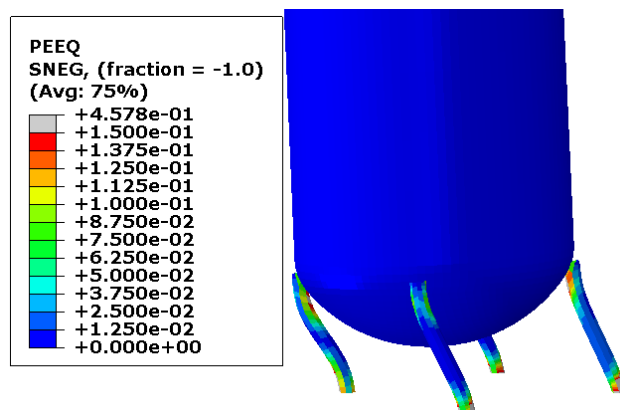
به بیانی دیگر فاصله مقیاس شده  $0/95 (Kg/m^{1/3})$  باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک، فاصله مقیاس شده  $0/47 (Kg/m^{1/3})$  باعث گذر از حدود آیین‌نامه‌ای و فاصله مقیاس شده  $0/4 (Kg/m^{1/3})$  باعث آغاز گسیختگی در مخزن تحت فشار قائم می‌شود.



شکل ۱۴: تغییر شکل بازمانده در رأس مخزن قائم.



شکل ۱۵: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۶۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن قائم.



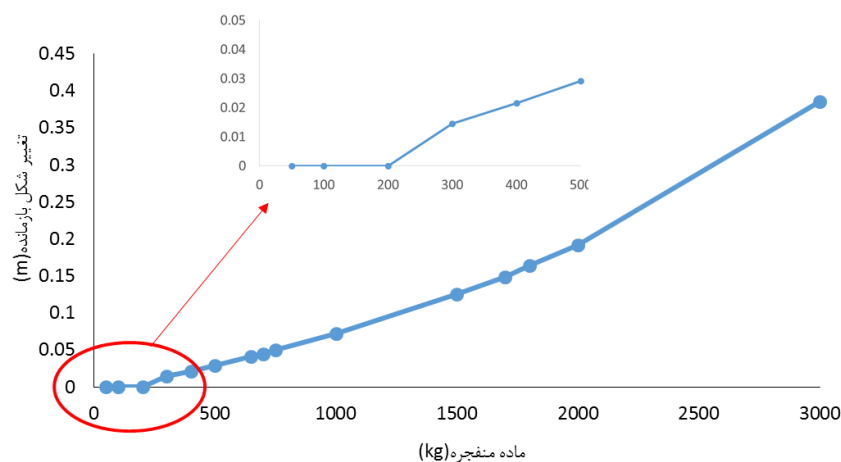
شکل ۱۶: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۱۰۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن قائم.

### ۳-۳- مخزن کروی تحت بار انفجار

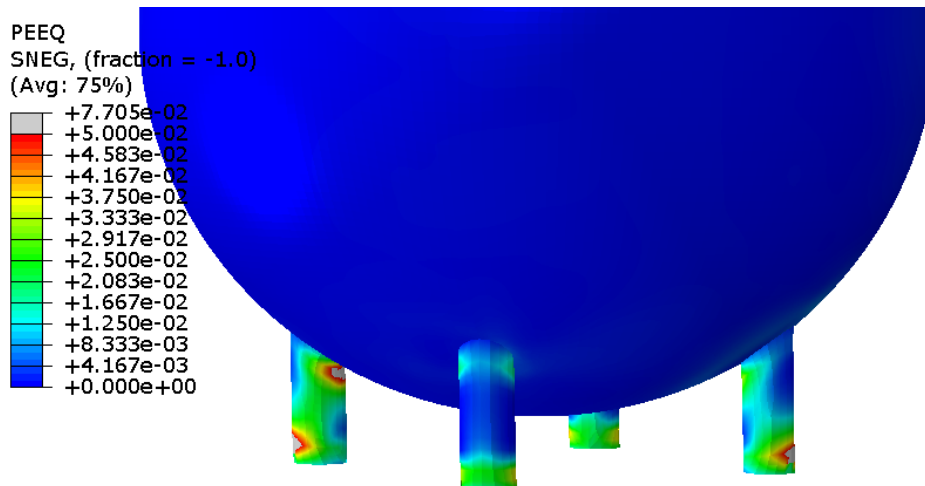
مخزن تحت فشار کروی را در ۱۵ میزان تی ان تی مختلف مورد بررسی قرار داده شده است. همان طور که از شکل ۱۷ مشخص می‌باشد میزان تی ان تی از ۵۰ kg تا ۳۰۰۰ kg می‌باشد.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که از حدود ۳۰۰ کیلوگرم ماده منفجره، تغییر شکل‌های پلاستیک به صورت مؤثر وارد شود و در نتیجه تغییر شکل‌های ماندگار در اجزای اصلی مخزن تحت فشار مورد مطالعه رخ می‌دهد. مطابق با آنچه در شکل ۱۸ نمایش داده شده، در محدوده ۷۰۰ کیلوگرم در پایه‌های مخزن کرنش‌های بیشتر از ۵ درصد ظاهر گردیده و پایه‌های مخزن غیرقابل اعتماد و استفاده می‌گردند. علاوه بر این مطابق با شکل ۱۹ در محدوده ۱۷۰۰ کیلوگرم ماده منفجره، کرنش معادل پلاستیک از محدوده ۰/۱۵ بیشتر می‌شود و این موضوع به مفهوم آغاز گسیختگی پایه‌ها می‌باشد.

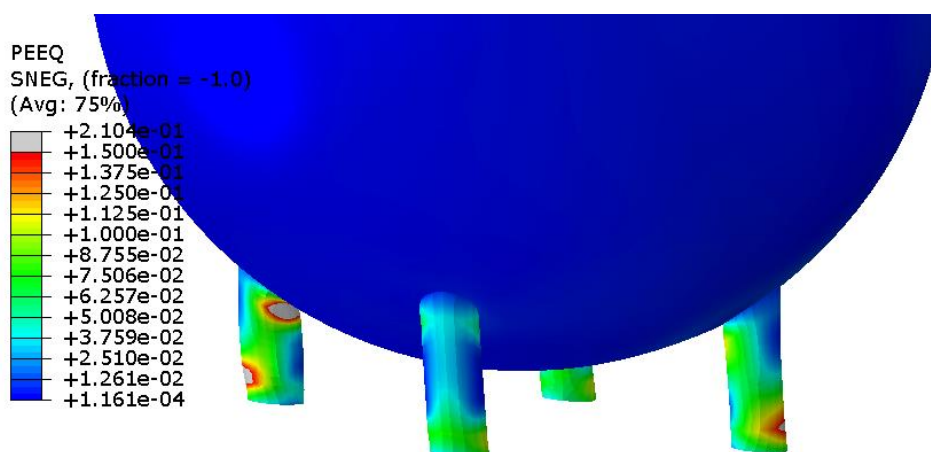
درواقع در میزان ماده‌های منفجره بیش از ۱۷۰۰ kg مخزن به طور کامل از پایه جدا می‌شود. این جدا شدن مخزن از پایه به دلیل وزن بسیار بالا و شتابی که ناشی از پرت شدگی به خود می‌گیرد و همچنین احتمال انفجار خود مخزن، خطرات بسیار زیادی را برای محیط اطراف ایجاد می‌نماید. به بیانی دیگر فاصله مقیاس شده  $0/6 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$  باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک، فاصله مقیاس شده  $(\text{Kg/m}^3)$   $0/45$  باعث گذر از حدود آیین‌نامه‌ای و فاصله مقیاس شده  $(\text{Kg/m}^3)$   $0/335$  باعث آغاز گسیختگی در مخزن تحت فشار کروی می‌شود.



شکل ۱۷: تغییر شکل بازمانده در رأس مخزن کروی.



شکل ۱۸: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۷۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن کروی.



شکل ۱۹: کرنش معادل پلاستیک تحت انفجار ناشی از ۱۷۰۰kg در فاصله ۴ متری از مخزن کروی.

#### ۴- نتیجه گیری

تأسیسات نفت، گاز و پتروشیمی از تأسیسات بسیار حساس و گران قیمت به شمار می‌روند و لزوم بررسی مسائل مربوط به پدافند غیرعامل در مورد تجهیزات به کاررفته در تأسیسات فوق از مسائل بسیار بااهمیت می‌باشد. مخازن تحت فشار به دلیل اینکه در صورت خرابی و انفجار خود می‌توانند باعث ایجاد خرابی‌های متعدد گردند از اهمیت خاصی بهره‌مند می‌باشند.

انفجار ناشی از اقدامات خرابکارانه و یا بمباران هوایی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در بررسی مسائل مربوط به پدافند غیرعامل در تأسیسات فوق می‌باشد. در این تحقیق به بررسی اثر انفجار ناشی از مواد منفجره قوی مانند کلاهی‌های جنگی، تی‌ان‌تی و... بر دو نوع از متداول‌ترین مخازن تحت فشار در تأسیسات نفتی ایران پرداخته شده است.

در تحقیق فوق از قابلیت کانوپ جهت اعمال بار انفجار استفاده گردیده است.

مخزن تحت فشار افقی، قائم و کروی تحت ۴۷ سناریو مختلف انفجاری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد مخزن افقی در حالتی که ماده منفجره در فاصله مقیاس شده ۰/۶ از مخزن قرار گرفته است، بخش‌هایی از پایه مخزن وارد محدوده پلاستیک شده و تغییر شکل‌های بازمانده در بخش‌های اصلی پایه مخزن ایجاد می‌گردد. در صورتی که ماده منفجره در فاصله مقیاس شده ۰/۳۹ از مخزن فوق باشد

نیز کرنش پلاستیک معادل در بخش‌هایی از پایه مخزن افقی از محدوده مجاز آیین‌نامه‌ها (۵٪) فراتر رفته است. همچنین مشخص گردید در صورت قرارگیری ماده منفجره در فاصله مقیاس شده ۰/۳۲ از مخزن افقی کرنش معادل پلاستیک در بخش‌هایی از پایه مخزن بیش از ۱۵٪ گردیده و در واقع پایه مخزن افقی در شرایط فوق شروع به گسیختگی می‌کند.

وقایع فوق برای مخزن تحت فشار قائم جهت ایجاد تغییر شکل‌های بازممانده، ۰/۹۵ و برای عبور میزان کرنش پلاستیک از حد آیین‌نامه‌ای رقم ۰/۴۷ معین گردیده است. همچنین مشخص شد قرارگیری ماده منفجره در فاصله مقیاس شده ۰/۴ از مخزن تحت فشار قائم می‌توان باعث آغاز گسیختگی در پایه‌ها گردد.

همچنین وقایع فوق برای مخزن تحت فشار کروی جهت ایجاد تغییر شکل‌های بازممانده، ۰/۶ و برای عبور میزان کرنش پلاستیک از حد آیین‌نامه‌ای رقم ۰/۴۵ معین گردیده است. همچنین مشخص شد قرارگیری ماده منفجره در فاصله مقیاس شده ۰/۳۳۵ از مخزن تحت فشار کروی می‌توان باعث آغاز گسیختگی در پایه‌ها گردد.

نتایج فوق حاکی از آن است که به‌طور کلی مخازن تحت فشار قائم آسیب‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به مخازن تحت فشار افقی و کروی در مقابل بار انفجار دارند و استفاده از این نوع از مخازن می‌تواند باعث کاهش ضریب ایمنی در مقابل خطرات احتمالی باشد. همچنین مخازن تحت فشار افقی مقاومت ایمنی بیشتری نسبت به مخازن تحت فشار کروی دارا می‌باشند

بعلاوه مشخص گردید، به دلیل وجود فشار داخلی بسیار بالا در مخازن تحت فشار، خود مخزن مقاومت بسیار خوبی در مقابل انفجارات خارجی دارد، و خطرناک‌ترین احتمال ممکن جابجایی جانبی آن‌ها و جدایی سیستم‌های لوله‌کشی از بدنه مخزن می‌باشد. همچنین در صورت ایجاد گسیختگی کامل در پایه‌ها و جدا شدن مخزن از پایه‌ها امکان پرتاب شدن مخزن و برخورد آن با تجهیزات پیرامون و تخریب‌های بسیار گسترده‌تر وجود دارد.

## مراجع

- [1] U.S. Army Corps of Engineers, (2008). Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions. Washington: Department of Defense, 50-100.
- [2] Yasseri, S. (2015). Blast Pressure Distribution Around Large Storage Tanks. Blast information Group, 67,133-144.
- [3] Giglio, M. (1997). Spherical Vessel Subjected To Explosive Detonation Loading. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 74, 83-88.
- [4] Mazaheri, K.; Mirzaei, M. and Biglari, H. (2006). Transient Dynamic Response Of tubes To Internal Detonation Loading. Journal of Sound and Vibration, 297, 106-122.
- [5] Mirzaei, M. (2008). Failure Analysis of an Exploded Gas Cylinder. Engineering Failure Analysis, 15, 820-834
- [6] Mirzaei, M. (2008). On Amplification Of Stress Waves In Cylindrical Tubes Under Internal Dynamic Pressures. International Journal of Mechanical Sciences, 50, 1292-1303.
- [7] Dyer, J. N. ; Raibagkar, A.; Kolbe, M. ; Salzano, E. (2012). Blast Damage Considerations for Horizontal Pressure Vessel and Potential for Domino Effects. Chemical Engineering Transactions. 26, 87-93.
- [8] Mirzaei, M.; Malekan, M.; Sheibani, E. (2013). Failure Analysis and Finite Element Simulation of Deformation and Fracture of an Exploded CNG Fuel Tank. Engineering Failure Analysis, 30, 91-98.
- [9] American Petroleum Institute, (2006), recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design. Washington: API, 30-100
- [10] American Petroleum Institute, (2006), Recommended Practice for The Design of Offshore Facilities Against Fire and Blast Loading. Washington: API, 75-100
- [11] Brewerton, R.(1999). Explosion Resistant Design of Offshore Structures—Technical Note 4; London: Blast Information Group, 50-75.
- [12] Chen, A.(2012). Structural response to vapour cloud explosions. Doctor of Philosophy, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.
- [13] Neuberger, A.; Peles, S.; Rittel, D. (2007). Scaling The Response of Circular Plates Subjected To Large and Close-Range Spherical Explosions. Part I: Air-Blast Loading. International Journal of Impact Engineering, 34, 859-87.