

بررسی انتشار امواج انفجار در محوطه مخازن پتروشیمی و اهمیت فاصله و آرایش مخازن

محمد رضا محمدی زاده^{۱*}، علی سیفی نیا^۲

۱-دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

۲-کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

*mrz_mohammadizadeh@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

چکیده

در حوادث اولیه مانند انفجار در یک محیط پتروشیمی، بسته به فاصله در نظر گرفته شده بین مخازن، انفجار می‌تواند مانند اثر دومینو به دیگر مخازن انتقال یابد. در این مطالعه با توجه به ابعاد بزرگ محوطه مخازن پتروشیمی، ابتدا مخازن درجانبی و فواصل مختلف از هم در مقیاس ۲۰۰ در نرم‌افزار Autodyn مدل‌سازی و به بررسی انتشار امواج انفجار و محصورشدگی فشار ۸ گرم TNT در محیط بین مخازن پرداخته شده است. در ادامه به بررسی تاثیر شکل دیوارهای ضد انفجار مختلف در کاهش فشار انفجار و چگونگی برخورد موج ناشی از ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله سرد ۲۰ متر به یک مخزن پتروشیمی در مقیاس واقعی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روابط نیمه‌تجربی آیین‌نامه UFC-0-340-02 در محیط‌های بسته به دلیل تشدید اضافه فشار انفجار غیر محافظه‌کارانه است. همچنین بهترین شیوه جانبی مخازن در این بررسی، آرایش زیگزاکی با در نظر گرفتن فاصله‌ای ۲ برابر فاصله ایمن بین مخازن از آیین‌نامه NFPA-30 است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد با ایجاد مانع در برابر انفجار می‌توان تا حد زیادی انفجار را کاهش داد اما شکل مانع تاثیر چندانی را ایجاد نمی‌کند.

واژگان کلیدی: انتشار، پالایشگاه پتروشیمی، Autodyn، موج انفجار، TNT

۱- مقدمه

در دهه اخیر حوادث صنعتی بسیاری به علت بروز انفجار در دنیا گزارش شده است. این حوادث شامل انفجارهای غیر عمد مانند انفجار ابربخار، خط لوله و یا به صورت عمدی و تروریستی است. مطابق برآوردهای بازار نفت و پتروشیمی در سراسر جهان برای دوره زمانی سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۳، حدود ۱۱۰۰ مورد حوادث بزرگ وجود داشته است که تقریباً ۳۲ میلیارد دلار (خسارت دارایی و قطع تجارت) از دست رفته است [1]. این به معنای این است که بطور متوسط در سال ۱۱۰ حادثه انفجار و آتش سوزی و معادل با ۲-۳ میلیارد دلار ضرر در سال است با چشم پوشی کردن از رخ دادن عمدی یا غیر عمدی بودن انفجار، به منظور افزایش ایمنی و به کمترین رساندن خسارات در برابر انفجار در محیط پالایشگاهی و صنعتی لازم است به درک درستی از میزان و چگونگی وارد شدن بار انفجار به سازه های موجود دست یافت. باید به این نکته اشاره کرد که تمامی فرآیندهای این صنعت وابسته به در ارتباط بودن قسمت های مختلف پتروشیمی است و از کار افتادن بخشی از آن خسارات اقتصادی زیادی را به همراه دارد. از این رو طراحی باید با دقت بیشتری انجام پذیرد و از تمامی ابزارهای لازم برای کاهش خسارت احتمالی استفاده شود. در بیشتر آیین نامه های مربوط به صنعت نفت و پتروشیمی بیشتر به اهمیت بار زلزله و باد برای طراحی مخازن نفتی پرداخته شده است و اهمیت کمتری برای بار انفجار قائل می شوند، ایمنی در برابر انفجار یکی از مؤلفه های مهم در حوزه عمومی پیشگیری و پدافند غیر عامل است. علاوه بر این، در آیین نامه انفجار UFC-3-340-02، نمودارها و روابط نیمه تجربی برای محاسبه فشار انفجار، فرض بر کروی بودن ماده منفجره (انفجار در هوا) یا نیم کره ۳ بودن ماده منفجره (انفجار روی سطح زمین) در میدان آزاد است و شکل های دیگر ماده منفجره، برای شارژ، نقطه شروع انفجار، درون ماده منفجره و اثر بازتاب ناشی از

فضای بسته را در نظر نمی گیرند [2]. تاکنون هیچ راه حل قطعی در برابر بارگذاری انفجار ارائه نشده است، اما ترکیبی از تکنیک های فعال و غیرفعال مانند استفاده کارآمد از سازمان های اطلاعاتی و امنیتی، افزایش فاصله مقیاس شده بین محل انفجار و ساختمان های هدف با ارائه موانع فیزیکی و استفاده از مواد شکل پذیر به منظور جذب انرژی و در عین حال با مقاومت بالا در ساخت سازه و تکنیک های مقاوم سازی مناسب سازه برای کاهش موثر آثار انفجار استفاده می شود [3]. در یک پالایشگاه پتروشیمی، مخازن نگهداری، در آرایش های مختلف و با فاصله های مختلف در کنار هم قرار می گیرند. در آیین نامه انجمن ملی حریق آمریکا جانمایی مخازن در یک سایت پتروشیمی به منظور کاهش خسارت احتمالی در آینده بر اساس دو فاصله مخازن از تاسیسات و سازه های مهم و فاصله بین مخازن تعیین می شود [4]. نوع مایع ذخیره شده بر حسب نقطه اشتعال، نوع حفاظت از مخزن، حجم ذخیره شده، نوع مخزن و بیشینه فشار مخزن در تعیین کمترین فاصله نقش مهمی ایفا می کنند. در این آیین نامه میعانات با قابلیت احتراق ۸ ذخیره شده در مخازن بر حسب نقطه اشتعال ۹ آنها به چهار کلاس I، II، III، IIIb تقسیم می شوند. در جدول (۱) نقطه اشتعال کلاس های مختلف ارائه شده است. هم چنین فاصله بین مخازن ذخیره مایعات پایدار ۱۰ کلاس I، کلاس II یا کلاس III باید برابر کمترین فاصله های ارائه شده در جدول (۲) باشد. همان گونه که جدول (۲) نشان می دهد، برای نمونه فاصله بین دو مخزن سقف ثابت مجاور حاوی میعانات کلاس I و II با قطر حداکثر ۴۵ متر برابر ۶ مجموع قطر دو مخزن و برابر ۱۵ متر در نظر گرفته می شود. این فواصل ممکن است در صورت وقوع انفجار به دلیل تراکم و فاصله اندک بین مخازن و افزایش فشار تولید شده از انفجار، تحت پدیده محصور شدگی در یک سایت پتروشیمی وقایع جبران ناپذیری را به وجود آورد، به همین دلیل بررسی بیشتری باید صورت پذیرد. همچنین به

6. Confined space
7. National Fire Protection Association
8. Combustible Liquid
9. Flash Point
10. Stable liquid

1. Unified Facilities Criteria
2. Spherical
3. Hemisphere
4. Free field
5. Point of detonation

انفجار از روابط تجربی موجود در آیین نامه UFC-3-340-02 استفاده می‌شود. در این روابط فرض می‌شود که هیچ مانعی بین ماده منفجره و هدف انفجار وجود ندارد. اما در واقعیت بار انفجار هم می‌تواند بر اثر موانع و ساختمان‌های مجاور کاهش یا افزایش پیدا کند. نتایج در این تحقیق نشان می‌دهد فشار بازتاب تحت اثر پدیده محصور شدگی سازه افزایش قابل توجهی پیدا می‌نماید. پس در صورتی که هدف طراحان، سازه ضد انفجار باشد باید این افزایش ناشی از محصور شدگی در نظر گرفته شود. در پژوهش دیگری توسط شی و همکاران [11] به بررسی سایز المان بندی در محیط اویلری به منظور دستیابی به جوابی بهینه و دقیق برای انتشار امواج انفجار و برخورد آن با سازه پرداخته شده است. بررسی شبیه سازی عددی انفجار نشان می‌دهد که اندازه المان بندی قابل قبول برای یک سناریوی انفجار ممکن است برای مورد دیگر مناسب نباشد. بر اساس نتایج عددی و مقایسه آنها با نتایج آزمون میدانی و نمودارهای طراحی در TM-5-1300 [12]. یک روش اصلاح عددی برای اصلاح تأثیر اثر اندازه المان بندی پیشنهاد شده است که با استفاده از این روش، می‌توان از یک اندازه المان بندی بزرگتر در شبیه سازی‌ها استفاده کرد که باعث کاهش چشمگیر زمان محاسباتی می‌شود. وسویچ و همکاران [13]. در پژوهشی دیگر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ۱۱ انفجار ابر بخار در یک محیط پتروشیمی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، یک رویکرد مناسب برای طراحان و مشاوران ایمنی ارائه شده است تا خطرات ناشی از انفجار ابربخار فرضی را که شامل آثار تشدید فشار انفجار می‌شود، با دقت بیشتری تعیین کنند. در تحقیقی توسط فدرووا و همکاران [۱۲] با استفاده از نرم افزار fluent مبتنی بر حل معادلات اویلری شبیه سازی عددی، انتشار موج انفجار بر یک جسم منشوری شکل مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با

منظور کنترل و مهار مواد هیدروکربنی نشت کرده موجود در محوطه استقرار مخازن می‌توان از بانودال ۱ یا خاکریز استفاده نمود. پس باید موضوع آثار کاهش یا افزایش فشار انفجار ناشی از استفاده از بانودال، خاکریز یا روش‌های دیگر مانند استفاده از دیوارهای ضد انفجار پیرامون مخزن را بررسی نمود. در دهه‌های گذشته فشار تولید شده از انفجار خرج‌های کروی و نیمه کروی در فضای آزاد با استفاده از روابط نیمه تجربی موجود در آیین نامه‌های مربوطه بدست آمده است. پژوهش‌های زینتلیس و همکاران ۲ و والی و همکاران ۳ نشان داد [5, 6]. محیط‌های بسته می‌تواند فشار انفجار را افزایش دهد. با پیشرفت تکنولوژی و امکان محاسبات پیچیده، استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به جای روابط نیمه تجربی به دلیل پیش بینی دقیق‌تر رفتار انفجار در برخورد با سازه، محبوبیت بیشتری بدست آورد. در یکی از تحقیق‌های اولیه یک مدل فضای شهری در مقیاس کوچک توسط فنگ و همکاران؛ در کالج سلطنتی بریتانیا به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت [7]. در سال‌های بعد اسمیت و همکاران به منظور بررسی انفجار در خیابان‌های شهری با استفاده از نرم افزار Autodyn درستی آزمایشی کار عددی خود را با مدل ارائه شده توسط فنگ و همکاران انجام دادند [8]. بیرنباوم و همکاران ۶ با استفاده از شبیه سازی انفجار به روش اویلری به تأثیر شبکه‌ای خیابان‌های شهری و محصور شدن موج و فشار انفجار در محیط شهری پرداختند. در این تحقیق محصور شدگی بار انفجار در محیط‌های شهری باعث افزایش فشار مبنای انفجار (اضافه فشار محیط در اثر عبور موج انفجار) ۷ و ضربه به ترتیب به میزان ۱۵۳٪ و ۳۴۰٪ نسبت به بار انفجار در محیط‌های آزاد گزارش شده است [9]. در تحقیق دیگری توسط رمینکو^۸ [10]. به بررسی تأثیر سازه‌های مجاور بر تشدید موج انفجار در محیط‌های شهری پرداخته شده است. معمولاً برای اندازه‌گیری بار

۸. Remenniko et.al.

۹. Shi, et.al.

۱۰. Wesevich et.al.

۱۱. Computational Fluid Dynamics

۱۲. Federova, et.al.

1. Bund wall

2. Zintilis, et.al.

3. Walley, et.al.

4. Feng, et.al.

5. Smith, et.al.

6. Birnbaum, et.al.

7. Peak incident Pressure

Table 1. Flash point classification of combustible liquids [4]

Fixed Roof Tanks		Floating Roof Tanks	Tank Diameter
Class IIIA Liquids	Class I or II Liquids		
sum of adjacent tank diameters	sum of adjacent tank diameters	sum of adjacent tank diameters	All tanks not over 45 meter in diameter
sum of adjacent tank diameters	sum of adjacent tank diameters	sum of adjacent tank diameters	tanks over 45 meter diameter

Table 2. Distance between tanks containing stable liquids [4]

در این مطالعه نتایج حاکی از آن بود روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌های تجربی مبتنی بر فرض TNT معادل برای مطالعه انفجار گازها مناسب نیستند. یکی از چالش‌های بررسی انتشار انفجار در مقیاس بزرگ در پژوهش‌های دهه اخیر کمبود سرعت لازم رایانه‌ها به منظور پردازش بوده است. ظهور پردازش موازی در فضای ابری ۳ فرصت‌های جدیدی را برای بررسی انتشار امواج انفجار در مقیاس بزرگ تر فراهم می‌آورد. هر چند تاکنون پژوهش‌هایی در خصوص انتشار امواج انفجار در محیط‌های شهری ۴ صورت گرفته اما پژوهش‌هایی که با رویکرد انتشار انفجار در محیط پتروشیمی بسیار اندک است. بنابراین این مطالعه، با کمک شبیه‌سازی انفجار به روش کوپل اویلری-لاگرانژی و پردازش موازی در قسمت اول به بررسی فاصله ایمن و آرایش (جانمایی) مخازن و در قسمت دوم اثر شکل مانع در کاهش فشار انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت اول مخازن پتروشیمی در آرایش‌های مختلف و فواصل مختلف از هم به صورت سه بعدی در مقیاس ۲۰۰ در نرم‌افزار Autodyn مدل‌سازی شده و به بررسی انتشار امواج انفجار ۸ گرم TNT و محصور شدگی در این محیط پرداخته

استفاده از سه روش بالن فشرده در نرم‌افزار fluent، روش تجربی (در مقیاس کوچک) و شبیه‌سازی به صورت اویلری-لاگرانژی در نرم‌افزار Autodyn برخورد انفجار به یک جسم منشوری شکل، یک بار بدون حفره و بار دیگر با ایجاد یک حفره در جلو جسم منشوری به منظور ایجاد یک مانع برای کاهش آثار موج اولیه انفجار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل عددی نشان داد که هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. در این پژوهش وجود حفره در جلوی منشور باعث کاهش ۸ تا ۱۰ درصدی اضافه فشار مبنای انفجار نسبت به حالت بدون حفره گزارش شده است [14]. شائوبو و همکاران ۱ یک مدل آمار و احتمالاتی برخورد انفجار با سازه‌ی گنبدی شکل را با استفاده از روش‌های تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. این نوع سقف بیشتر در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مطالعه نشان داد که انعکاس موج شوک می‌تواند باعث افزایش اثر موج انفجار در امتداد نیمه بالادست سقف گنبدی شود. همچنین در این تحقیق بار انفجار به منظور طراحی که به صورت نیمه تجربی بوسیله آیین نامه UFC در نرم‌افزار airblast ارائه شده است را نمی‌توان به عنوان یک مدل بار انفجار متوسط برای یک گنبد توصیه نمود. با این حال، روش دلخواه اویلری-لاگرانژی قادر به تعیین میزان میانگین فشار بیش از حد و ارزیابی تکانه توزیع شده روی سازه‌های گنبدی شکل است [15, 16]. شی و همکاران ۲ [17]. در یک مطالعه آثار چیدمان مختلف ساختمان بر تشدید فشار انفجار ابربخار (لوله انتقال) را مورد بررسی قرار دادند.

جدول ۱. کلاس‌بندی نقطه اشتعال مایع‌های قابل احتراق [۴]

Flash point	Liquid class
Any liquid that has a closed-cup flash point below 100°F (37.8°C)	I
Any Liquid that has a flash point at or above 100°F (37.8°C) and below 140°F (60°C)	II
Any liquid that has a flash point at or above 140°F (60°C), but below 200°F (93°C);	III

۴. Urban Area

5. Coupled Euler-Lagrange method

6. Trinitrotoluene

۱. Shaobo, et.al.

۲. Shi et.al.

۳. Parallel Processing in Cloud Space

برای طراحی سازه معمولا از تاریخچه مثلثی فشار بازتاب استفاده می‌شود. معمولا فاز منفی فشار بازتاب برای طراحی سازه در برابر انفجار مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. زیرا بیشتر خرابی سازه مربوط به فاز مثبت فشار است. همان‌گونه که از شکل (۱) مشاهده می‌شود، فشار ناشی از انفجار مثبت به صورت نمایی کاهش می‌یابد. برای تعیین پارامترهای انفجار استفاده از روابط و نمودارهای تجربی در آیین نامه انفجار UFC-3-340-02 نمی‌تواند همیشه مورد اعتماد باشد. با بیان این نکته که روابط تجربی در آیین‌نامه بر اساس انفجار در میدان آزاد بدست آمده و در محیط شهری یا در محیط‌های بسته مقدار فشار، افزایش و یا حتی ممکن است کاهش پیدا کند. پس در صورت افزایش فشار، سازه‌هایی که با روابط تجربی طراحی شده‌اند، فشار بیشتری را متحمل می‌شوند که به خرابی سازه منجر می‌شود. با پیشرفت نرم‌افزارها و هیدروکدهایی مانند Autodyn این امکان فراهم شده تا انتشار امواج انفجار در محیط‌های بسته به صورت کوپل اویلری-لاگرانژی مورد بررسی قرار گیرد. این هیدروکد با استفاده از حل سه معادله پرش رنگین-هوگونیوت مبتنی بر معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی انتشار امواج انفجار در محیط اویلری را بررسی می‌کند. رابطه ۱ تا ۳ به ترتیب فرم کلی معادله بقای جرم، تکانه و پایداری انرژی را نشان می‌دهد [19].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u v) + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) + \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w v) + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E + P)v) = 0 \quad (3)$$

در این رابطه‌ها ρ چگالی، v سرعت، P فشار، u, v, w اجزا سرعت در جهت‌های x, y, z در مختصات کارتزین و E انرژی

شده است. در قسمت دوم اثر شکل موانع ۱ یا دیوار ضد انفجار در کاهش اضافه فشار بازتاب چگونگی برخورد موج ناشی از ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT با مخزن پتروشیمی در مقیاس واقعی پرداخته می‌شود.

۲- بار انفجار

شکل (۱) نمایه ایده‌آل فشار نسبت به زمان برای موج انفجار برای یک نقطه در فاصله مشخص از انفجار را نشان می‌دهد. فشار محیط در این نقطه قبل از وقوع انفجار ابتدا برابر با P_0 ، و در لحظه t_A هنگامی که موج شوک به آن نقطه می‌رسد، یک فشار ناگهانی به اندازه P_{so} تجربه می‌کند. فشار اوج P_{so} همچنین به عنوان بیشینه فشار جانبی یا فشار مبنای انفجار شناخته می‌شود. با افزایش فاصله از مرکز انفجار، مقدار فشار مبنای انفجار و همچنین سرعت انتشار موج شوک کاهش می‌یابد و پس از مقدار اوج آن، فشار با سرعت نمایی کاهش می‌یابد تا زمانی که به فشار محیط در زمان $t_A + t_0$ برسد که به آن مرحله فاز مثبت گفته می‌شود. پس از مرحله مثبت نمودار فشار زمان، مقدار فشار محیط کوچکتر می‌شود (از آن به عنوان فشار منفی یاد می‌شود) و در آخر به صفر باز می‌گردد. مرحله منفی طولانی‌تر از مرحله مثبت است. کمترین مقدار فشار آن با P_{so}^- و مدت زمان آن با t_0^- مشخص شده است موج انفجار تا قبل از برخورد به یک مانع در هر نقطه که عبور می‌کند برابر فشار مبنای انفجار است. بعد از برخورد فشار مبنای انفجار افزایش یافته و به فشار بازتاب P_r می‌رسد [18].

شکل ۱. نمودار فشار-زمان ایده‌آل بار انفجار

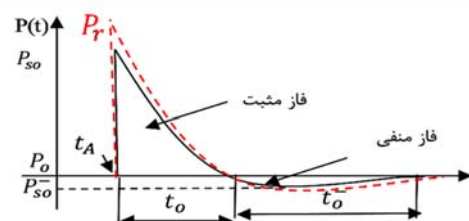


Fig. 1. Pressure-Time History of Explosion

۴. Peak Incident Pressure

۵. Side on Pressure

۶. Rankine-Hugoniot Jump Equation

1. Barrier

2. Ambient pressure

۳. Time arrival

(JWL) پیش‌بینی می‌شود. این معادله فشار ناشی از انرژی شیمیایی در یک انفجار را به بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌کند:

$$P = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v'}\right) e^{-R_1 v'} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v'}\right) e^{-R_2 v'} + \frac{\omega E''}{v'} \quad (6)$$

که در آن v' حجم مخصوص محصولات انفجار در یک حجم واکنش نداده انفجار، E'' انرژی مخصوص داخلی و پارامترهای $C_1, C_2, R_1, R_2, \omega$ ثابت ماده هستند. این ضرایب از آزمایشات تست استوانه بدست می‌آید و برای TNT به عنوان ماده منفجره استاندارد و مرتبط با آنها در جدول (۳) آورده شده است. ρ_0 چگالی ماده منفجره و تمامی ضرایب در کتابخانه نرم‌افزار موجود است.

جدول ۳. ضرایب معادله JWL

C_1	C_2	R_1	R_2	ω	ρ_0
373.7	3.74	4.15	0.9	0.35	1630

Table 3. JWL Constant Parameter

۲-۲ شبیه‌سازی انفجار

نرم‌افزار Autodyn برای حل معادلات حاکم در انفجار (معادلات ۱ تا ۶) از روش‌های اجزا محدود و تفاضل محدود استفاده می‌کند. شکل (۲) شبیه‌سازی انفجار در Autodyn را نشان می‌دهد. مدل‌سازی انفجار در Autodyn در دو مرحله انجام می‌گیرد. در اولین گام محصولات انفجار در یک گسترش زود هنگام در محیط یک بعدی یا دوبعدی تا رسیدن به نزدیکی اولین سطح بازتاب گسترش می‌یابد. سپس خروجی تحلیل (بردار سرعت، فشار) کمیت اسکالر) و چگالی (کمیت اسکالر)) در گام اول به فضای سه بعدی منتقل می‌شود. انتقال از محیط یک بعدی به سه بعدی با استفاده از تکنولوژی نگاشت صورت می‌گیرد. تکنولوژی نگاشت؛ این امکان را می‌دهد تا از شبکه‌بندی با تعداد المان‌های بالاتر در تجزیه و تحلیل مراحل اولیه گسترش موج انفجار استفاده شود.

شکل ۲. الف) گوه حاوی TNT (ب) کانتور فشار (ج) نگاشت یک

بعدی به سه بعدی

کل در واحد حجم که از رابطه (۴) بدست می‌آید که در این رابطه e_1 بیانگر انرژی داخلی ویژه است.

$$E = \rho \left(e_1 + \frac{\|v\|^2}{2} \right) \quad (4)$$

برای حل این معادلات به یک معادله کمکی و مشخص بودن مقدار یکی از پارامترها نیاز است. معادله کمکی همان معادله حالت ماده (EOS) است.

۱-۲-۱- معادلات حالت

در یک فرایند شیمیایی و ترمودینامیک رابطه بین متغیرهای فشار، دما و حجم تحت اثر شرایط فیزیکی مختلف با معادله حالت نشان داده می‌شود. معادلات حالت مختلفی برای مواد مختلف در کتاب‌های ترمودینامیک یافت می‌شود.

۱-۲-۱-۱- معادلات حالت گاز ایده آل [۱۹]

به منظور بررسی اثر فشرده شدن هوا و افزایش دمای آن تحت بار انفجار به تعریف معادله حالت باری محیط اولیری هوا نیازمندیم. برای این منظور از معادله حالت گاز ایده آل که همان قانون گاما برای گاز ایده آل است استفاده شده است. رابطه (۵) معادله حالت هوا را بیان می‌کند:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{E''} E'' \quad (5)$$

که در آن E'' انرژی ویژه برای هوای استاندارد $253.5 \left(\frac{kJ}{m^3} \right) \rho_0$ ، γ نسبت فشار ثابت به گرمای ویژه حجم ثابت (برابر ۱.۴ برای هوا)، ρ_0 چگالی اولیه برابر با $1.225 \times 10^{-3} \frac{g}{cm^3}$ و ρ میزان چگالی فعلی هوا است.

۱-۲-۱-۲- معادلات حالت JWL [20, 21]

مواد منفجره تحت یک واکنش سریع با تولید گاز و مواد حاصل از انفجار، انرژی شیمیایی موجود در ماده منفجره را به امواج گرما و مکانیکی تبدیل می‌کند. فرایند تبدیل انرژی با دقت قابل قبول با تعریف معادله حالت مانند معادله جونز، ویلکینز و لی

۳. Jones-Wilkins-Lee

۴. Mapping

۱. Equation of state

۲. Ideal gas

(۴) برای هر کدام از انفجارهای ۸ گرم و ۱۰۰۰ کیلوگرم انتخاب شده است. فشار مبنای انفجار در اثر انفجار ۸ گرم و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در هر مرحله با قرار دادن کرنش سنج در فاصله ۴۰ میلی‌متر برای خرج ۸ گرم و ۱۹ متری برای خرج ۱۰۰۰ کیلوگرم نسبت به مبدا شروع انفجار، بدست می‌آید. فشار مبنای انفجار بدست آمده از نمودار آیین‌نامه UFC-3-340-02 برای انفجار ۸ گرم در فاصله ۴۰ میلیمتر برابر ۱۷۳۴۰ کیلوپاسکال و برای انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۹ متری ۳۱۹ کیلو پاسکال است. نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. با مقایسه نتایج با مقادیر آیین‌نامه UFC-3-340-02 مشخص می‌شود شبکه‌بندی با سایز ۰/۱۲۵ میلی‌متر برای انفجار ۸ گرم و المان ۱ میلی‌متر برای ۱۰۰۰ کیلوگرم همگرایی خوبی با مقادیر فشار بدست آمده از آیین‌نامه وجود دارد. همچنین برای نمونه در انفجار ۸ گرم TNT نتایج نشان می‌دهد با کاهش سایز المان‌بندی از ۱ به ۰/۱۲۵ میلی‌متر، بیشینه فشار حداکثر به صورت تقریبی از ۹۰۰۰ به ۱۷۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش و خطا نسبت به مقادیر آیین‌نامه از ۴۰ درصد به ۱ درصد کاهش می‌یابد. بعد از انجام آنالیز حساسیت برای انفجار یک بعدی ۸ گرم و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، برای هر سناریو مورد بررسی، (برای انفجار ۸ گرم با اندازه المان ۰/۱۲۵ میلی‌متر و انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم با اندازه المان ۱) شبیه‌سازی یک بعدی تا اولین سطح بازتاب موجود در هر سناریو انجام و به روی دامنه سه بعدی نگاشت می‌شود.

جدول ۴. نتایج آنالیز حساسیت المان

UFC-3-340-02	Mesh size(mm)			Explosion weight(g)
	0.125	0.25	1	
	Pressure(kPa)			
17304	17340	13540	9000	8
	Mesh size(mm)			Explosion weight(Kg)
-	1	10	100	
	Pressure(kPa)			
319	325	250	186	1000

Table 4. Results of mesh sensitivity analysis

۳-درستی آزمایشی

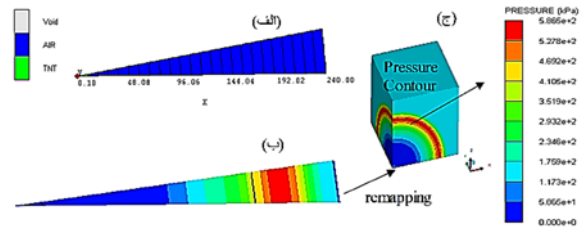


Fig. 2. a TNT in wedge domain b) Pressure contour c) 1D to 3D remapping

به منظور شبیه‌سازی انفجار، ماده منفجره با استفاده از معادله حالت JWL و هوا به عنوان یک گاز ایده‌آل با فشار اولیه ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال مدل سازی می‌شود. همچنین از حل‌گر اوپلری چندماده‌ای، هم برای مواد منفجره و هم برای هوا استفاده شد. در این مطالعه از انفجار ۸ گرم TNT در بررسی آرایش مخازن و بررسی پدیده محصور شدگی فشار انفجار در محیط بسته و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در بررسی اثر شکل‌های مختلف دیوار ضد انفجار استفاده شده است. برای آنالیز یک بعدی انفجار از یک "گوه" پر شده از هوا و TNT با تقارن محوری در محیط Autodyn-2D) استفاده شده است. شکل (۳-الف) گوه هوا پر شده از ماده منفجره را نشان می‌دهد. شعاع ماده منفجره برای ۸ گرم و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT به ترتیب برابر ۱۲ و ۵۲۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. این شعاع بر حسب چگالی ماده منفجره برای یک خرج کروی بدست می‌آید. طول گوه برابر با فاصله شروع انفجار تا اولین سطح بازتاب برابر ۵۰ میلی‌متر در انفجار ۸ گرم TNT و ۲۰ متر در انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده است. نقطه شروع گوه ۰/۱ میلی‌متر از مبدا مختصات فاصله می‌گیرد تا از تشکیل المان طول صفر در مبدا مختصات جلوگیری شود. اگرچه این تصحیح باعث کاهش حجم مواد منفجره می‌شود، اما این میزان قابل گذشت است.

۲-۱- آنالیز حساسیت شبیه‌سازی بار انفجار یک بعدی

قبل از اقدام به آنالیز سه بعدی، آنالیز حساسیت المان‌بندی (شبکه) در محیط یک بعدی اوپلری به منظور بررسی تاثیر اندازه المان‌ها بر میزان فشار و زمان رسیدن موج انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. سه المان‌بندی با اندازه مختلف در جدول

کناری) انجام سپس روی سه بعد نگاشت می شود. با توجه به حجم بالای محاسبات از سیستم محاسبات سریع به صورت پردازش موازی ۲ در فضای ابری ۳، برای این مدل استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در جدول (۵) و شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که نتایج بدست آمده از کار عددی دارای هماهنگی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی است. همچنین با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج نمودارهای آیین نامه TM 5-1300 [۱۲] می توان دریافت که استفاده از روابط تجربی آیین نامه در محیط های بسته محافظه کارانه نیست.

جدول ۵. مقایسه درستی آزمایشی عددی با کار آزمایشگاهی انجام شده توسط [۷] Feng, et.al.

Reflected Pressure (KPa)	test
295.8	Experimental
242.9	Numerical Autodyn
83.65	TM 5-1300 Code

Table 4. Comparison of reflection pressure in Autodyn, Experimental results of Feng et al [7]

شکل ۳: الف) نمای روبرو مدل صحت سنجی ب) المان بندی محیط اویلری ج) موقعیت انفجار و سنجه

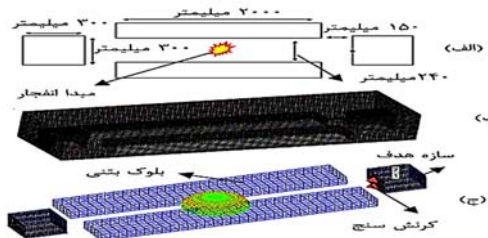


Fig. 3. a) Top view of the validation model b) Eulerian mesh c) Explosion position and Gauges

شکل ۴. مقایسه فشار بازتاب در نرم افزار Autodyn و نتایج آزمایشگاهی فنگ و همکاران [۷]

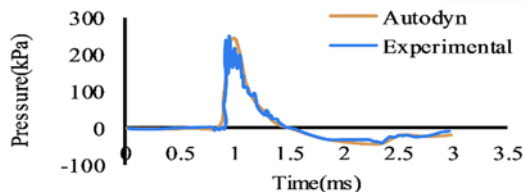


Fig. 4. Comparison of reflection pressure in Autodyn and Experimental results of Feng et al [7]

اولین گام در روش های عددی به منظور اعتبار سنجی داده ها درستی آزمایشی است. به منظور اعتبار سنجی مدل سازی سه بعدی انجام شده در این مطالعه، ابتدا یک مطالعه آزمایشگاهی که مورد بررسی قرار گرفته است به صورت عددی مدل سازی شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی مقایسه شده است. فنگ و همکاران [۷] یک مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی تشدید فشار انفجار در محیط های بسته شهری را در دانشکده علوم نظامی سلطنتی بریتانیا مورد بررسی قرار دادند. این آزمایش در مقیاس ۵۰ و ماده منفجره استفاده شده معادل ۸ گرم TNT که در مرکز خیابان قرار گرفته است، است. شکل (۳-الف) نمایی از مدل درستی آزمایشی که بیان کننده یک مدل ساده خیابان شهری است، نشان می دهد. در این شکل دو بلوک بتنی به ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ میلی متر در دو انتهای این خیابان قرار گرفته اند. دو بلوک بتنی دیگر به ابعاد ۲۰۰×۱۵۰ میلی متر در دو طرف دیگر برای محصور کردن بار انفجار قرار گرفته است. این آزمایش یک بار با در نظر گرفتن بلوک های کناری و بار دیگر در غیاب بلوک های کناری انجام شده است. در حالت اول فشار بازتاب ۲۹۳ کیلو پاسکال و در حالت دوم در غیاب بلوک های بتنی ۷۴ کیلو پاسکال از آزمایش بدست می آید. نتایج آزمایش نشان می دهد فشار بازتاب در وجه روبرو ساختمان در حالت قرارگیری بلوک ها به دلیل اثر محصورشدگی موج انفجار ۲۵۵ درصد نسبت به حالتی که بلوک های بتنی حضور ندارند افزایش می یابد. برای انجام این درستی آزمایشی از ۱ میلیون المان بندی اویلری استفاده شده است. شکل (۳-ب) المان های محیط اویلری را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۳-ج) نشان داده شده است، یک فشارسنج روی یکی از نماهای ساختمان انتهای خیابان در فاصله ۱۱۵۰ میلی متری از مرکز انفجار قرار گرفته است. مرکز انفجار در وسط این خیابان در ارتفاع ۳۰ میلی متر از کف زمین در نظر گرفته شده است. شبیه سازی انفجار ۸ گرم TNT ابتدا با المان ۰/۱۲۵ به صورت یک بعدی تا اولین سطح بازتاب (۱۵۰ میلی متر از بلوک های

۴- بررسی آرایش و فاصله مخازن در مقیاس ۲۰۰^۱ در

یک پالایشگاه پتروشیمی و اثر شکل مانع در مقیاس واقعی با استفاده از آنالیز عددی:

بعد از انجام درستی آزمایشی، در ابتدا اثر بار انفجار بر مخازن و همچنین اثر محصورشدگی فشار انفجار بین مخازن در آرایش‌ها و فاصله‌های مختلف در ابعاد ۲۰۰ براساس موقعیت‌های مختلف انفجار و سپس اثر ایجاد مانع در مسیر بار انفجار به منظور کاهش فشار انفجار به روش کوپل اویلری-لاگراژی در مقیاس واقعی بررسی می‌شود. وقتی موج انفجاری که از طریق محیطی مانند هوا یا آب در حال انتشار است به یک سطح جامد می‌رسد، منعکس می‌شود و در نتیجه باعث برهم‌کنش ساختار سیال و انتقال انرژی از موج به سطح می‌شود. برای مدل‌سازی صحیح این رفتار، باید حلگرهای لاگراژی و اویلری را به هم پیوند داد تا پاسخ‌های سیال و سازه را بدست آورده شود. در روش کوپل اویلری-لاگراژی، جرم، انرژی و تکانه از المان بندی اویلری به المان بندی لاگراژی و بالعکس، به صورت شرایط مرزی منتقل می‌شود. در جدول (۶) جزئیات سناریوهای مختلف ارائه شده است. همچنین مختصات محل انفجار و سنجه‌ها از مبدا مختصات در جدول (۷) ارائه شده است. در این پژوهش قطر و ارتفاع مخازن پتروشیمی در مقیاس واقعی برای بررسی اثر شکل مانع در کاهش فشار انفجار ترتیب ۳۰ و ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. قطر مخازن در سناریوها با مقیاس ۲۰۰ برابر ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی، مخازن پتروشیمی به صورت یک جسم صلب^۱ در نظر گرفته شده است. در محیط نرم افزار Autodyn جسم صلب یک جسم بدون تغییر شکل که دارای جرم، اینرسی و حرکت باشد تعریف می‌شود. به طور پیش فرض، حرکت یک جسم صلب در Autodyn به نیروهای و لنگرهای وارد به آن در اثر تعامل با سایر قطعات مدل بستگی خواهد داشت. استفاده از جسم صلب این امکان را می‌دهد که در اثر برخورد موج انفجار با مخازن بازتاب کامل رخ دهد. این فرض در انفجار

عادی رخ نمی‌دهد و مقداری از انرژی انفجار توسط پوسته مخازن جذب می‌شود اما استفاده از این حالت درک درستی از انتشار امواج در محیط در مدت زمان کمتری را ارائه می‌دهد. به منظور جلوگیری از بازتاب موج انفجار و بازگشت موج به دامنه هوا، در مرز محیط اویلری از شرایط مرزی flow-out استفاده شده است. شکل (۵) محل قرار گیری سنجه‌ها و شرایط مرزی flow-out مخزن تک در محیط اویلری را نشان می‌دهد. شکل (۶) سناریوهای مختلف انفجار، جانمایی مختلف مخازن، موقعیت‌های متفاوت انفجار و محل قرار گیری کرنش سنجه‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۷) انتشار موج انفجار و اثر محصور شدگی انفجار بین مخازن را نشان می‌دهد. در جدول (۸) مقادیر مختلف فشار بازتاب و اوج در سناریوهای مختلف ارائه شده است. محیط اویلری هوا در این بررسی به ابعاد ۶۰×۴۰×۲۰ متر در نظر گرفته شده است. حدود ۱ میلیون المان اویلری برای این محیط در نظر گرفته شده است. ارتفاع موانع در نظر گرفته شده در تمامی سناریوها برابر ۵ متر و فاصله مرکز تمامی موانع با شکل‌های مختلف تا پوسته مخزن برابر ۷ متر است. انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متری از مرکز مخزن قرار گرفته قرار می‌گیرد. در سناریو ۱۱ بار انفجار بدون در نظر گرفتن مانع به مخزن برخورد می‌کند. شکل (۸) تاریخچه فشار-زمان برای برخورد انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲۰ متر به مخزن در مقیاس واقعی را نشان می‌دهد. شکل (۹) کانتور فشار برخورد موج با مخزن را نشان می‌دهد. در شکل (۹) جبهه موج فرودی، جبهه موج بازتاب شده و نقطه سه گانه (محل برخورد موج فرودی و بازتاب شده از سازه) قابل مشاهده است. شکل (۱۰) ضربه بازتاب شده از سطح مخزن برای سناریو ۱۱ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نتایج بدست آمده از جدول نشان می‌دهد قرار دادن مانع در مسیر انفجار تاثیر زیادی در کاهش فشار انفجار دارد. همچنین شکل (۱۱) لحظه برخورد موج انفجار با مانع مستطیلی شکل را نشان می‌دهد.

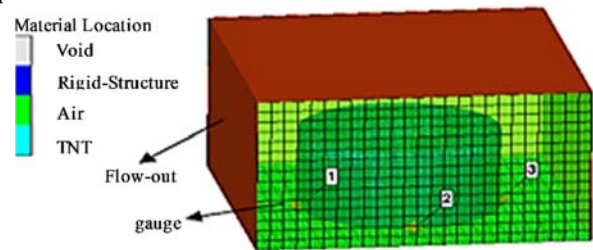
شکل ۵. شرایط مرزی و موقعیت قرار گیری کرنش سنجه‌ها

جدول ۶. جزئیات سناریوهای انفجار

Arrangement of Storage Tank Scale $\sqrt{200}$							
Shell to shell distance (mm)	Distance between tanks in y direction (mm)	Distance between tanks in x direction (mm)	Gauge Number	Explosion Position	Explosion Weight (g)	Arrangement	scenario
-	-	-	1,2,3,4	1	8	Single(circle)	1
-	-	-	5	2	8	Single(circle)	2
-	50	50	5,6	2	8	Rectangle-shaped	3
-	100	50	5,6	2,3	8	Rectangle-shaped	4
-	100	100	5,7	2,3	8	Rectangle-shaped	5
50	-	-	5,6,8	2	8	Zigzag	6
100	-	-	5,6,8	2	8	Zigzag	7
-	-	50	5,6	2	8	column-shaped	8
-	-	100	5,6	2	8	column-shaped	9
-	-	-	1,2,3,4	1	8	Single(Rectangle)	10
Shape of Barrier Real Scale							
Barrier elevation(mm)	Barrier to tank Distance(mm)	Gauge Number	Explosion Position	Explosion Weight (kg)	Shape of Barrier	scenario	
-	-	9-18	4	1000	No Barrier	11	
5000	7000	17	4	1000	Rectangle	12	
5000	7000	17	4	1000	Semi- circle	13	
5000	7000	17	4	1000	Triangle	14	
5000	7000	17	4	1000	Triangle	15	

Table 6. Details of Explosion scenarios

Fig. 5. Boundary conditions and location of strain gauges



-	-	2500 mm from Gauge 9 in x Direction	9-15
-	-	4000 mm from Gauge 15 in y direction	15-18

Table 7. Coordinates of detonation point and strain gauges from origin (0, 0)

شکل ۶. پلان سناریوهای مختلف انفجار

جدول ۷. مختصات مبدا انفجار و کرنش سنج ها از مبدا مختصات (۰,۰)

y distance (mm)	x distance (mm)	Distance between Gauges	Explosion position
125	0	-	1
225	0	-	2
250	0	-	3
20000	0	-	4
y distance (mm)	x distance (mm)	Distance between Gauges	Gauge Number
50	50	-	1
50	125	-	2
125	125	-	3
125	200	-	4
200	125	-	5
200	325	-	6
200	375	-	7
400	200	-	8
0	5000	-	9
0	20000	-	15

Fig.6. Plan of different explosion scenarios

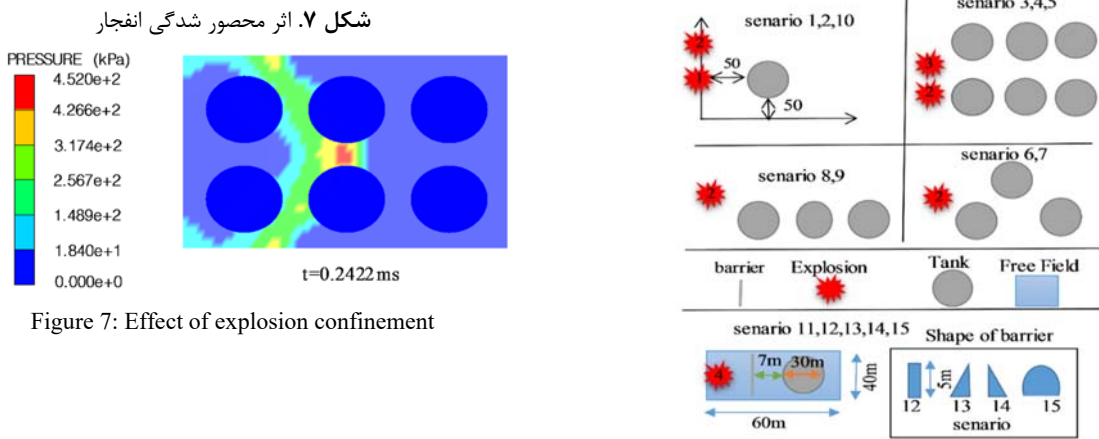


Figure 7: Effect of explosion confinement

شکل ۸. تاریخچه فشار-زمان (سناریو ۱۱)

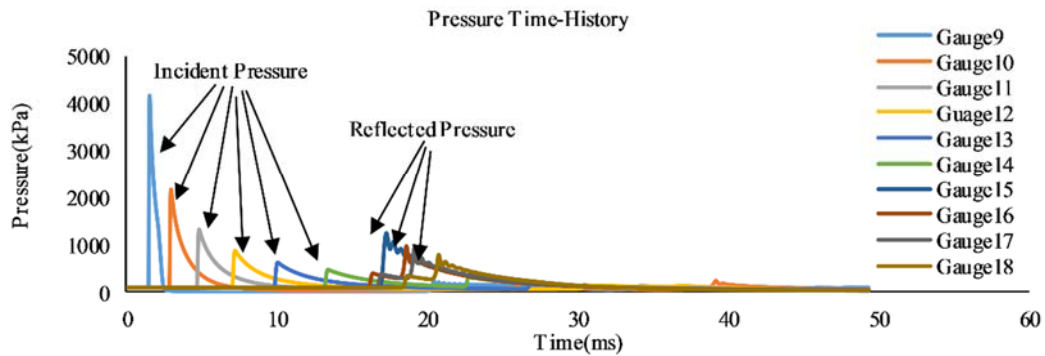


Fig. 8. Pressure Time-History (Scenario 11)

شکل ۹. کانتور فشار (سناریو ۱۱)، الف) زمان نگاشت ب) لحظه برخورد موج ج) بازگشت جبهه موج

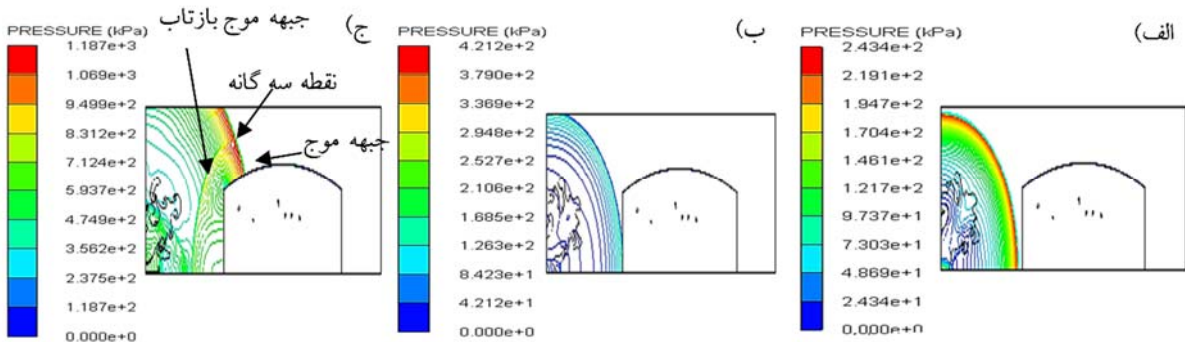


Fig. 9. Pressure contour (Scenario 11), a) Remapping time b) Moment of collision c) The return of the wave front

جدول ۸. مقادیر فشار اوج و بازتاب برای سناریوهای مختلف

Pressure (kPa)								Blast Position	scenario	Arrangement
Gauge 8	Gauge 7	Gauge 6	Gauge 5	Gauge 4	Gauge 3	Gauge 2	Gauge 1			
-	-	-	-	587	700	1447	115870	1	1	Single
-	-	-	3024	-	-	-	-	2	2	
-	-	-	-	545	712	1320	125644	1	13	
-	-	450	4805	-	-	-	-	2	3	Rectangle-shaped
-	-	420	3345	-	-	-	-	2	4	
-	-	400	2346	-	-	-	-	3	3	
-	329	-	3345	-	-	-	-	2	5	

-	300	-	2346	-	-	-	-	3	
258	-	1450	3024	-	-	-	-	2	6
200	-	1450	3024	-	-	-	-	2	7
-	-	377	3105	-	-	-	-	2	8
-	-	300	3105	-	-	-	-	2	9
Pressure (kPa)									
	Gauge 18		Gauge 17	Gauge 16	Gauge 15	Blast Position	scenario	Barrier shape	
	295		778.4	908.7	964.12	4	11	No Barrier	
	-		489.08	-	-	4	12	Rectangle	
	-		536.27	-	-	4	13	Semi- circle	
	-		571.5	-	-	4	14	Triangle	
	-		496	-	-	4	15	Triangle	

Table 8. values of peak pressure and reflected pressure for different scenarios

بین مخازن عبور میکند به دلیل محصور شدگی و بازتاب موج از بدنه مخازن در کرنش سنج ۵ و ۶ بیشینه فشار اوج افزایش می یابد و به ترتیب به ۴۸۰۵/۶ و ۴۵۰ کیلو پاسکال می رسد. با توجه به جدول (۸) برای همین موقعیت انفجار در سناریو ۸ مقدار فشار در کرنش سنج ۵ برای آرایش ستونی که اثر محصور شدگی در محیط های بسته را تجربه نمی کند برابر ۳۱۰۵ کیلو پاسکال است. مقدار بیشینه فشار اوج بر اساس نمودارهای آیین نامه UFC-3-340-02 برای همین فاصله از انفجار برابر ۳۳۰۰ کیلو پاسکال بدست می آید. این نشان می دهد فاصله در نظر گرفته شده بین مخازن تاثیر زیادی در کنترل فشار انفجار دارد. در سناریو ۴ فاصله بین مخازن در جهت Y تا دو برابر مقدار آیین نامه در مقیاس ۲۰۰ افزایش می یابد. زمانی که موج انفجار در فاصله بین مخازن حرکت می کند اثر محصور شدگی فشار کمتری را تجربه می کند و فشار تقریباً برابر با فشار اوج آیین نامه انفجار می شود. این نشان می دهد در ابعاد واقعی فاصله بین مخازن بر اساس آیین نامه انجمن حریق ایالات متحده محافظه کارانه نیست و برای کاهش خسارات احتمالی باید فاصله ای بیشتر از فاصله در نظر گرفته شده در آیین نامه لحاظ شود یا بررسی های بیشتری صورت پذیرد. نتایج جدول (۹) برای آرایش زیگزاگی کمترین فشار را نشان می دهد. همچنین با افزایش فاصله پوسته تا پوسته مخازن تا دو برابر مقدار آیین نامه در مقیاس ۲۰۰ (۱۰۰ mm) فشار اوج به کمترین مقدار خود می رسد. بعد از بررسی محصور شدگی فشار، فاصله مخازن و آرایش آنها به منظور یافتن بهترین راه های کاهش خطر

شکل ۱۰. نمودار ضربه بازتاب-زمان (سناریو ۱۱)

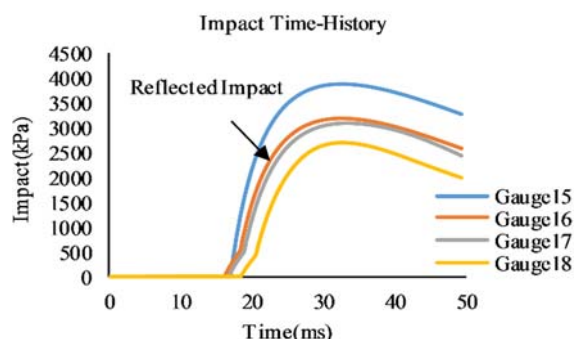


Fig. 10. Impact Time-History (scenario 11)

شکل ۱۱. لحظه برخورد موج انفجار با مانع مستطیلی (۲ میلی ثانیه)

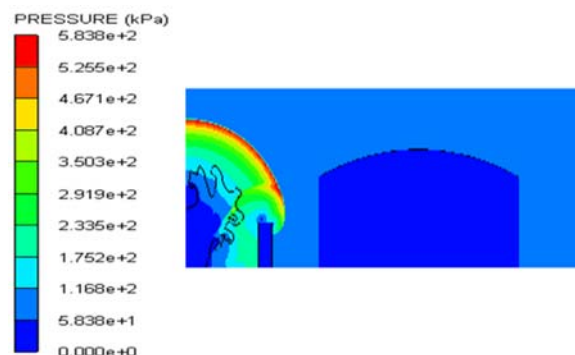


Fig. 11. Moment of blast wave hitting a rectangular barrier (2 milliseconds)

۵- بحث

همان گونه که از جدول (۸) مشخص است با مقایسه بیشینه فشار بازتاب در سازه مستطیلی و دایره در پلان، در وجه رو به انفجار و برای یک موقعیت انفجار، سازه مستطیلی فشار بازتاب بیشتری حدود ۷ درصد را نسبت به سازه دایره تحمل می کند. این افزایش می تواند به دلیل مساحت بیشتر وجه رو به انفجار سازه مستطیلی باشد. در شکل (۷) وقتی موج انفجار از فاصله

پس برای جانمایی ایمن مخازن در محیط پتروشیمی نیاز به مطالعات بیشتر است. در بررسی مانع در مسیر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT موانع با شکل‌های مختلف می‌توانند تا حدود ۲۶ تا ۳۷ درصد فشار انفجار را کاهش دهند. با توجه به اینکه بررسی تجربی در مقیاس واقعی قابل اجرا نبوده و یا بسیار پرهزینه است، روش آنالیز عددی سه بعدی به منظور بررسی نقاط ضعف، تحلیل خطر و ارزیابی نقاط خطر در برابر انفجار، یک روش کارآمد به حساب می‌آید.

۷- منابع

- [1] Nolan DP. Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities. William Andrew; 2014.
- [2] United state Department of Defence. Structures to resist the effects of accidental explosions. UFC 3-340-02. 2008;
- [3] Badshah E, Naseer A, Ashraf M, Shah F, Akhtar K. Review of blast loading models, masonry response, and mitigation. Shock Vib. 2017;2017.
- [4] Association NFP. Flammable and Combustible Liquids Code...: NFPA 30. National fire protection Association; 2014.
- [5] Zintilis GM, Fairlie GE. Protection of commercial buildings against blast and ballistic threats. In: 7th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Mannheim. 1995. p. 13-22.
- [6] Walley F. The Effect of Explosions on structures. Proc Inst Civ Eng Build. 1994;104(3):325-34.
- [7] Feng LJ. Modelling blast in urban area. Cranf Univ Weapons Eff Struct MSc Proj R Mil Coll Sci Shirivenham, UK. 1997;
- [8] Smith PD, Whalen GP, Feng LJ, Rose TA. Blast loading on buildings from explosions in city streets. Proc Inst Civ Eng Build. 2001;146(1):47-55.
- [9] Birnbaum NK, Clegg RA, Fairlie GE, Hayhurst CJ, Francis NJ. Analysis of blast loads on buildings. In: Century Dynamics Incorporated, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Structures Under Extreme Loading Conditions. 1996.
- [10] Remennikov AM, Rose TA. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries.

و خسارت انفجار در محیط پتروشیمی استفاده از پستی و بلندی زمین، خاکریز یا دیوار به عنوان مانع در برابر انفجار به عنوان ارزان‌ترین راهکار می‌توان فشار انفجار را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. برای نمونه در بررسی اثر شکل مانع بر انفجار نتایج نشان می‌دهد بعد از برخورد فشار انفجار با مانع کاهش چشم گیری پیدا می‌کند. همچنین بهترین شکل مانع با توجه به نتایج جدول (۸) مانع مستطیلی است که فشار انفجار هنگام برخورد به سازه تا میزان ۳۷٪ کاهش داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد درصد اختلاف کاهش فشار انفجار (بین بیشترین مقدار کاهش و کمترین مقدار کاهش) موانع با شکل مختلف در حدود ۱۱٪ درصد است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه ابعاد بزرگ محیط مورد بررسی، انتشار انفجار در محوطه مخازن با آرایش‌های مختلف در مقیاس ۲۰۰ و اثر شکل موانع در کاهش فشار انفجار در مقیاس واقعی با استفاده از پردازش سریع مورد بررسی قرار گرفت. فاصله بین مخازن، آرایش مخازن و ایجاد مانع می‌تواند در طراحی یک سایت پتروشیمی به عنوان یک راهکار اولیه برای کاهش فشار انفجار و خسارات احتمالی استفاده شود. در این مطالعه نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن فاصله لازم بین مخازن با استفاده از آیین‌نامه انجمن ملی حریق آمریکا به دلیل در نظر نگرفتن تشدید فشار انفجار و امکان انفجار دومینویی مخازن محافظه کارانه نیست. برای نمونه با در نظر گرفتن فاصله لازم بین مخازن بر اساس آیین‌نامه انجمن ملی حریق آمریکا در آرایش مستطیل سازه تا ۳۰ درصد فشار حادثه بیشتری نسبت به آرایش مستطیلی با در نظر گرفتن فاصله بین مخازن تا دو برابر فاصله مجاز آیین‌نامه به علت پدیده محصورشدگی موج انفجار تجربه کند. با افزایش فاصله تا میزان دو برابر آیین‌نامه در مقیاس ۲۰۰ اثر تشدید فشار انفجار ناشی از بسته بودن محیط بین مخازن از بین می‌رود. همچنین بهترین آرایش مخازن با توجه نتایج بدست آمده آرایش زیگزاگی است. به نظر می‌رسد استفاده از این آرایش می‌تواند ریسک انفجار دومینویی مخازن را کاهش دهد.

- [19] Nellis WJ, Mitchell AC, Ree FH, Ross M, Holmes NC, Trainor RJ, et al. Equation of state of shock-compressed liquids: Carbon dioxide and air. *J Chem Phys.* 1991;95(7):5268–72.
- [20] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives. Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States); 1973.
- [21] Val'ko VV, Obraz OP, Gasilov VA, Solovyova VS, Savenko NO. Equations of state for detonation products of explosives. *Keldysh Inst Prepr.* 2021;(51):1–38.
- Comput Struct. 2005;83(27):2197–205.
- [11] Shi Y, Li Z, Hao H. Mesh size effect in numerical simulation of blast wave propagation and interaction with structures. *Trans Tianjin Univ.* 2008;14(6):396–402.
- [12] Army TM, Force A. TM 5-1300. Struct to Resist Eff Accid Explos. 1990;
- [13] Wesevich J, Hassig P, Nikodym L, Nasri V, Mould J. Accounting for channeling and shielding effects for vapor cloud explosions. *J Loss Prev Process Ind.* 2017;50:205–20.
- [14] Fedorova NN, Valger SA, Zakharova Y V. Simulations of blast wave propagation in open and closed space. In: *ECCOMAS Congress 2016-Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering.* 2016. p. 7557–71.
- [15] Qi S, Zhi X, Fan F, Flay RGJ. Propagation behaviour of a hemispherical blast wave on a dome roof. *Eng Struct.* 2020;212:110524.
- [16] Qi S, Zhi X, Fan F, Flay RGJ. Probabilistic blast load model for domes under external surface burst explosions. *Struct Saf.* 2020;87:102004.
- [17] Chi M, Jiang H, Lan X, Xu T, Jiang Y. Study on overpressure propagation law of vapor cloud explosion under different building layouts. *ACS omega.* 2021;
- [18] Bangash MYH. Shock, impact and explosion. Springer Berlin Heidelberg; 2009.

Investigation propagation of blast waves on storage tank farm and the importance of safe distance and position of storage tank

M.R. Mohammdiezadeh^{1*}, A. Seifinia²

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2- M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Abstract

The most important danger that threatens a petrochemical refinery is an explosion, which is followed by a fire or vice versa. In fact, the occurrence of initial events such as explosions and fires spread from one part to another like the domino effect if the distance between the storage tanks is not sufficiently considered. Therefore, the distance and arrangement of petrochemical storage tank can play an important role in reducing the damage of initial accidents. So far, due to the explosion uncertainties, no definitive solution has been offered, but a combination of active and passive techniques such as the efficient use of intelligence and security organizations, increasing the scaled distance between the detonation point and the target buildings or providing physical barriers, the use of deformable materials to absorb energy, and the use of appropriate retrofit structural techniques can reduce the effects of explosions. As it turns out, it is virtually impossible to study the propagation of blast waves experimentally on a large scale due to financial constraints and potential hazards. Therefore, to solve this problem, two solutions are proposed: the use of small-scale laboratory methods and the use of numerical methods. Three-dimensional numerical analysis is an efficient method for investigating structural weaknesses, hazard risk analysis, and evaluating of explosion hazard points. In this study, with the help of explosion simulation by Eulerian-Lagrangian coupling method, the research has been surveyed in two parts. In the first part, petrochemical tanks in different arrangements, and, at different distances from each other are modeled in 3D on Autodyn software on the scale of $1/200$ and the propagation of explosion waves and the confinement of 8g of TNT pressure in the environment between the tanks are investigated. In the second part, the effect of barrier shape on reducing the blast pressure of 1000 kg of TNT on a real scale has been investigated. The results show that the use of semi-empirical relation in UFC-0-340-02 to determine the blast pressure is applicable only to open environments, and it is not precise in closed environments due to the confinement of the blast pressure. Moreover, the results show that it is not conservative to use the required distance between tanks considering the amounts proposed by the regulations. As a result, increasing the distance up to twice the amount proposed by the regulations, the effect of explosion pressure confinement is eliminated. The best way to position the tanks in this study is a zigzag pattern with a distance equal to twice the safe distance between the tanks in accordance with NFPA-30. In addition, the results show that by creating

a barrier against the explosion, the explosion over-pressure can be greatly reduced, but the shape of the barrier does not have much effect. Although, using the Eulerian-Lagrangian coupling method requires considerable time and appropriate software to perform the calculations, it provides a comprehensive understanding of the blast wave interaction with structures. With the advancement of technology and the use of parallel processing in the cloud space, and the mapping technology it is possible to evaluate the different structures on a real scale against the explosion.

Keywords: Propagation, Petrochemical facilities, Autodyn, Blast-wave, TNT