مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 51-62

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی و عددی مخزن فلز - کامپوزیت تحت بار دینامیکی

علی اصغر معصومی[1]، غلامحسین رحیمی شعرباف مقدس[2*] غلامحسین لیاقت[2]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی 143-14115، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 بهمن 1394

پذیرش: 06 فروردین 1395

ارائه در سایت: 18 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

فشار متغییر

مخزن فلز کامپوزیت

تحلیل المان محدود

بار دینامیکی

آزمایش تجربی

چکیده

در این مقاله تحلیل تجربی و عددی مخزن فلز- کامپوزیت تحت بار دینامیکی بررسی می شود. برای این منظور یک نمونه از مخزن چند تکه استوانه‌ای جهت اندازه گیری فشار در نظر گرفته شده است جهت اندازه گیری فشار از سنسورهای پیزوالکتریک 1000 بار مدل کیستلر استفاده شده که برای نصب آن‌ها سوراخ هایی بر روی سطح بیرونی پوسته ایجاد شده است. برای تنظیم کردن سطح سنسورها در لایه داخلی استوانه از قطعات تقویتی استفاده شده که پس از نصب و تنظیم سنسورها آزمایش با بار ضربه ای ناشی از احتراق سوخت انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش توسط دیتالاگرهای سنسورها ثبت شده و بصورت نمودارهای فشار برحسب زمان بدست آمده است. هدف از این پژوهش رسیدن به وزن و مقاومت بهینه مخزن با روش سعی و خطا و با استفاده از تحلیل عددی در برابر بار دینامیکی ناشی از احتراق سوخت می باشد لذا جهت تحلیل عددی یک نمونه از مخزن چند تکه استوانه‌ای در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی شده و مورد تحلیل قرار می گیرد. بار اعمالی به مدل از نتایج استخراج شده در آزمایش‌های تجربی بوده که بصورت یک بار فشاری متغیر و دینامیکی با مخزن فلزی و مخزن فلز – کامپوزیت همزمان مورد تحلیل قرار می گیرد نتایج بدست آمده از تحلیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در نهایت مشخصات هندسی و مادی بخش فلزی و بخش کامپوزیتی مخزن برای حالت بهینه پیشنهاد می گردد.

Experimental and Numeral Analysis of Composite metal Vessel under Dynamic Loading

Ali Asghar Masoumi, Gholam Hosain Rahimi Sharbaf Moghadas*, Gholam Hosain Liyaghat

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115143, Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 December 2015
Accepted 25 March 2016
Available Online 07 May 2016

Keywords:
Variable pressure
Metal-composite vessel
Finite element analysis
Dynamic load
Experimental test

ABSTRACT

In this paper, numeral and experimental analysis of composite metal vessel is investigated under variable pressure loading. For this purpose, a sample of multi section cylindrical vessel is considered. The pizo electric 1000 bars sensors are used to measure pressure. The sensors are installed in the holes on the metal cylindrical vessel. The amplification parts are used to adjust sensors. The test is done under dynamic loading. The results are recorded by data logers in pressure-time chart. The aim of this study is to optimize the weight and strength of the vessel with using trial and error by numeral analysis inverse explosive loading. For this, a sample of multi section cylindrical vessel is analyzed with abaqus finite element software. The load in the vessel is derived by charts from experimental tests. The load obtained from experimental tests as a dynamic load is analyzed and compared with metal vessel and metal-composite vessel. The results obtained from abaqus finite element software discuss a different case. Finally, geometric and material properties of liner and composite are suggested for optimization of the weight and strength of the vessel.

1- مقدمه

یکی از مهمترین فرآیندهایی که در رابطه با رفتار مواد و بطور خاص فلزات اتفاق می افتد, بارگذاری ماده تحت نیروهای شدید دینامیکی است. به‌عنوان مثال در برخورد بین دو قطعه که دارای سرعت‌های بسیار بالا می‌باشند, تنش‌های فوق‌العاده زیادی در ماده ایجاد می‌گردد. مثال دیگر استفاده از نیروی حاصل از مواد منفجره در پروسه‌های مختلف صنعتی از جمله تغییر شکل دادن مواد مخصوصا فلزات برای اهداف مختلف است. از انرژی حاصل از انفجار می‌توان برای اهداف مختلف کمک گرفت، یکی از مهمترین کاربردهای انرژی انفجاری در صنایع نظامی است. پوسته‌هایی که تحت اثر انفجارات داخلی ناشی از مواد شدیدالانفجار گسیخته شده و به ترکش تبدیل می گردند دارای کاربرد بسیاری در سرجنگی و پرتابه‌های مختلف دارند، در آزمایشگاه-های انفجار نیز از پوسته‌های خاص جهت انجام آزمایشات مواد منفجره و شبیه‌سازی‌های انفجار استفاده می‌گردد. به هنگام انفجار ماده منفجره اعم از گازی یا شدیدالانفجار در داخل پوسته، امواج انفجاری با سرعت بسیار بالایی به بدنه وارد می‌شود، بنابراین پوسته در معرض بار فشاری متحرک قرار می-گیرد، در نتیجه این مسئله از ماهیت دینامیکی بالایی برخوردار است، لذا پیش‌بینی رفتار و تحلیل سازه تحت اثر این بارها به مراتب مشکل‌تر از بارگذاری فشار هیدرواستاتیک و حتی بارهای ضربه‌ای است. نتایج تحلیل

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A.A. Masoumi, Gh. H. Rahimi Sharbaf Moghadas, Gh. H. Liyaghat , Experimental and Numeral Analysis of Composite metal Vessel under Dynamic Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 51-62, 2016 (in Persian)

پوسته‌ها تحت اثر بارهای انفجاری را می‌وان علاوه بر سرجنگی‌ها برای تحلیل مخزن‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای در صنایع نظامی و صنعت به‌کار برد. به منظور طراحی سیستم‌های انفجاری لازم است که شناخت دقیق‌تری از نحوه آغاز و پیشروی موج انفجار درون ماده که می‌تواند به صورت جامد و یا گاز باشد ایجاد گردد. از طرف دیگر شناخت چنین پدیده ای می‌تواند در جهت جلوگیری از وقوع انفجارهای ناخواسته مورد استفاده قرار گیرد. محققان زیادی شکست پوسته‌های استوانه‌ای تحت اثر بارگذاری گذرا را مورد مطالعه و تحقیق قرار داده و این امر در کاربردهای مختلف نظامی و صنعتی نمود پیدا کرده است که در نتیجه مدل‌هایی نظری و آزمایشگاهی برای تشریح مکانیسم و شرایط شکست سازه‌ها تحت اثر بارگذاری انفجاری ارائه شده است لذا با گسترش تکنولوژی مواد مرکب به‌عنوان مواد مهندسی مناسب برای کاربردهای مختلف در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. سبکی مواد مرکب و کارآیی بسیار مناسب مقاومت به دانسیته و سختی به دانسیته این مواد باعث توسعه کاربرد این مواد در مقایسه با مواد دیگر شده است و در نتیجه جایگزین مناسبی برای فولاد و آلومینیوم در بسیاری از صنایع شده است. هدف از تحقیق حاضر جمع آوری، ایجاد اطلاعات و آگاهی لازم در جهت تحلیل و طراحی محفظه استوانه ای فلز کامپوزیت تحت اثر بارگذاری فشاری متغیر ناشی از انفجار ماده منفجره شدیدالانفجار است لذا در این تحقیق یک مخزن چند تکه تحت فشار بار متغییر ناشی از یک ماده منفجره مورد آزمایش تجربی قرار می گیرد فشار بدست آمده از این نتایج که حاصل یک بار فشاری انفجاری و داخلی می باشد بصورت یک بار دینامیکی با مخزن فلزی و مخزن فلز – کامپوزیت در نرم‌افزار المان محدود آباکوس[1] همزمان تحلیل و مقایسه می گردد و در نهایت مشخصات هندسی و مادی بخش فلزی و بخش کامپوزیتی مخزن برای حالت بهینه پیشنهاد می گردد.

2- پیشینه پژوهش

از سال 1940، محققان زیادی پوسته های استوانه ای تحت اثر بارگذاری گذرا را مورد مطالعه و تحقیق قرار داده و این امر در کاربردهای مختلف نظامی و صنعتی نمود پیدا کرده است. مدل هایی نظری و آزمایشگاهی برای تشریح مکانیسم و شرایط شکست سازه ها تحت اثر بارگذاری انفجاری ارائه شده است. تیلور [1] معیار شکستی را پیشنهاد نمود که براساس آن شکست نهایی تابعی از تنش تسلیم، ضخامت پوسته و فشار انفجار است. ایوانف [2] برای مواد ویسکو-الاستو-پلاستیک یک معیار انرژی پیشنهاد کرد، او فرض نمود که انرژی شروع ترک و رشد آن برابر انرژی کرنش الاستیک رها شده از برداشتن امواج الاستیک است. معیار او براساس کرنش شکست و نرخ آن می باشد، زیرا شکست های قابل توجه یا ماکرو شکست در اثر شکل‌گیری، رشد و همگرا شدن آسیب‌های ریز (مثلا حفره‌های ریز یا ترک‌های ریز) بوجود می آید. هوگات-ریچت [3] نظریه ای را ارائه نمود که براساس آن شکست پوسته متأثر از انفجار خرج میانی در اثر تنش های برشی و در صفحاتی که دارای زاویه 45 درجه با جهت شعاعی دارند اتفاق می افتد و با استفاده از روشی مشابه روش تیلور فشار مؤثر لازم برای تسلیم پلاستیک و شعاع جدایش مناطق کششی و فشاری هوپ را براساس شعاع لحظه ای پوسته در حال انبساط محاسبه نمود، در محاسبات وی اثرات کار سختی نیز لحاظ شده است. الحسنی و جانسون [4] مدل تیلور را برای پوسته های کروی نازک تعمیم دادند، آنها رابطه ای بدست آوردند که براساس آن شعاع شکست را بر حسب نرخ کرنش، چگالی، ضخامت پوسته و نمای انبساط آیزنتروپیک بیان می شود. جائو چونگیانگ و همکاران [5] براساس ایجاد و رشد حفره در پوسته متأثر از بار انفجاری برای مواد با رفتار مادی ویسکو پلاستیک کار سختی معیار آسیبی را برای تعیین شعاع و زمان شکست توسعه دادند. چائو و شفرد [6] با اعمال ضریب افزایش دینامیکی در معادلات حاکم، شکست پوسته های متأثر از بار انفجاری حاصل از انفجارات گازی را براساس روش های تنش تسلیم، روش انرژی و همچنین روش ضریب شدت تنش استاتیکی بصورت تحلیلی و تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. منجیت سینگ و همکاران [7] مطالعات آزمایشگاهی جامعی بر روی تغییر شکل شعاعی و کرنش گسیختگی استوانه های آلومینیومی و مسی با قطر و ضخامت مختلف که تحت بار ناشی از انفجار خرج میانی (نرخ کرنش بالا) انجام دادند. علاوه بر پدیده شکست پوسته های متأثر از انفجار خرج میانی موارد دیگری نیز از جمله سرعت و شکل ترکش بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. ویلسون و همکاران [8] فرآیند ترکش زایی طبیعی و مشخصات ترکش ها را در پوسته های استوانه ای متأثر از انفجار خرج میانی با روش های عددی و تجری مورد مطالعه قرار دادند. ژانگ و همکاران [9] با ارائه مدل تحلیلی ارتباط بین سرعت اولیه ترکش و شدت موج شوک ناشی از انفجار داخلی را برای ضخامت های مختلف پوسته مورد بررسی قرار دادند. دشتیان و همکاران [10-12] تحلیل پوسته های استوانه ای تحت بار انفجاری را با روش عددی ، تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج حاصله را با هم مقایسه کرده اند. معصومی و همکاران [13- 14] تحلیل شکست مایع و پخش ابر هوا- سوخت در مخزن استوانه‌ای تحت انفجار خرج میانی را به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار داده اند. ملایی و همکاران [15-17] طراحی، ساخت و تست میدانی سرجنگی هوا- سوخت تک مرحله‌ای و مطالعه تجربی اثر مخلوط ترمیتی در آغازش انفجار هوا- سوخت تک مرحله‌ای و همچنین موج شاک ناشی از دتونیشن مخلوط اکسیژن- استیلن را مورد بررسی قرار داده اند. ملکان و همکاران [18] مدل‌سازی رشد ترک در استوانه‌های جدار نازک آلومینیومی تحت بارگذاری دتونیشن گازی با استفاده از یک المان چسبنده را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق از روش المان محدود، تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده است. پریداگ و همکاران [19] مدل‌سازی شتاب استوانه‌های فلزی تحت بار انفجاری مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله از روش المان محدود، تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده است. گله داری و همکاران [20] رفتار دینامیکی سازه های کامپوزیتی تحت بار انفجار زیر آب را مورد بررسی قرار داده اند آن‌ها الگوریتمی ارائه کرده اند که بوسیله آن می توان با بهینه‌سازی زوایا و ضخامت صفحات کامپوزیتی، وزن صفحه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کاهش داد. ایکسمی و همکاران [21] مدل‌سازی و پاسخ دینامیکی استوانه های فلزی تحت بار انفجاری را مورد بررسی قرار داده اند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا[2] این مدل‌سازی انجام شده است. هوانگ و همکارانش [22] روی تست انفجار مخازن کامپوزیتی تحت فشار داخلی از جنس زیلن اپوکسی[3] به مطالعه پرداختند. هو کین و همکاران [23] بر روی تحلیل تئوری و تجربی یک مخزن ذخیره هیدروژن ساخته شده از یک لاینر فلزی با الیاف کربن و اپوکسی کار کرده اند نتایج هم از طریق المان محدود و هم تجربی مقایسه شده است. در این مطالعه چیدن لایه ها در سه زوایای 60، 55 و 60 با تعداد سه لایه در هر زاویه می‌باشد که مقدار زاویه

[1] ABAQUS

[2] LS-DYNA

55 درجه بهینه‌ترین حالت بوده که تا فشار 718 بار شکست حاصل شده و اختلاف بین محاسبات تحلیلی و تجربی حدود 16% بوده است. رحمتی و همکاران [24] یک روش بهینه سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با انواع اشکال کلگی شناخته شده مانند ژئودزیک و بیضوی را مورد بررسی قرار داده اند در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که زاویه پیچش 9 درجه بهترین عملکرد را دارد. همچنین کلگی بیضوی عموما عملکرد ضعیف‌تری نسبت به انواع کلگی ژئودزیک دارد. محمد صبور و همکاران [25] بر روی طراحی مخازن نیمه کامپوزیت با استفاده از روش فازی (روش غیر منظم الیاف) و المان محدود مورد بررسی قرار داده اند. آن‌ها با این روش از سه نوع الیاف کربن ، کولار و شیشه استفاده کرده اند و با استفاده از این روش توانسته اند ثابت کنند که الیاف کربن از الیاف ها ی دیگر دارای مقاومت بالاتر و همچنین وزن مخزن بهینه‌تر خواهد داشت. عزیز اوندر و همکاران [26] زاویه مطلوب الیاف در مخازن کامپوزیتی تحت فشار را مورد بررسی قرار داده اند. آن‌ها در پنج زاویه الیاف $[45/-45]_s$ ، $[55/-55]_s$ ، $[60/-60]_s$ ، $[75/-75]_s$ و $[88/-88]_s$ مخزن را مورد تحلیل تئوری، تجربی و عددی قرار داده اند. الیاف مورد بررسی آن‌ها الیاف شیشه بوده و بار اعمالی آن‌ها یک بار فشار داخلی همراه با افزایش دما بوده که بهینه‌ترین زاویه پیچش الیاف در زاویه پیچشی $[55/-55]_s$ درجه بدست آمده است. عبدلا و همکاران [27] حل خطی الاستیک آنالیز تنش و کرنش نسبت به ضخامت مخزن کامپوزیتی را تحت فشار داخلی از طریق نتایج تحلیلی و آزمایش تجربی مورد بررسی قرار داده-اند. که نتایج بدست آمده با نمودارهای تنش و کرنش برحسب ضخامت و در جهت های مختلف اعم از شعاعی ، محوری و محیطی ارائه شده است. یامار و همکاران [28] شبیه سازی مخزن کامپوزیتی تحت لایه های مختلف را مورد آنالیز عددی قرار داده اند. آن‌ها از معیار های سای-هیل ، سای-وو و هاشین جهت ارزیابی کار خود استفاده کرده‌اند. نتایج کار آنها بوسیله نمودار نسبت مقاومت برحسب تعداد لایه در معیارهای مختلف نشان داده شده است. چو و همکاران [29] اثر نرخ بارگذاری بر روی شکست مخازن کامپوزیت را مورد بررسی قرار داده اند. ویلیام و همکاران [30] مخازن ذخیره هیدروژن ساخته شده با الیاف کربن و لاینر آلومینیم را با روش المان محدود مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق فشار کاری مخزن 700 بار بوده که با ضریب اطمینان 2.3 زوایا و تعداد لایه‌های الیاف طراحی شده است. سولایمن و همکاران [31] آنالیز شکست مخازن آلومینیم تقویت شده با کامپوزیت مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق الیاف گرافیت و شیشه تحت زوایای 30، 45، 55، 65، 75 و 90 درجه بوسیله اپوکسی جهت تقویت مخزن استفاده شده که در نهایت بهینه‌ترین حالت در زاویه 55 درجه با الیاف شیشه بدست آمده است. دنگ و همکاران [32] با روش المان محدود، مخازن کامپوزیت استوانه‌ای را با روش مرگ و زندگی و همچنین ایجاد یک حفره ناشی از خوردگی مورد بررسی تحلیل خستگی قرار داده اند. زنگ و همکاران [33] مخازن ذخیره هیدروژن تقویت شده با الیاف کربن و اپوکسی را بروش تجربی مورد تحلیل خستگی قرار داده‌اند. در این آزمایش مخزن تحت فشار خستگی بیشینه 700 بار اعمال شده و حد مقاومت خستگی و تعداد سیکل طول عمر مخزن بدست آمده است. قاسمی و همکاران [34] مخازن اف جی ام[1] تقویت شده با کامپوزیت را بروش عددی و تحلیلی ، مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق با نرم‌افزار آباکوس[2] مخزن موردنظر مورد تحلیل قرار گرفته و با حل تحلیلی مقایسه شده است. حسینی و همکاران [35] مخازن استوانه ای با لاینر پلیمری تقویت شده با کامپوزیت تحت فشار داخل جهت ذخیره گاز سی ان جی[3] را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق چند لاینر پلیمری مورد آزمایش قرار گرفته است.

3-آزمایش تجربی

3-1- معرفی مدل

در طراحی محفظه های استوانه ای چند تکه مهمترین بخش این سیستم محفظه ای می باشد که به صورت مستقیم در ارتباط با احتراق و سوزش مواد ناریه بوده و تحت فشار و دمای بالای ناشی از احتراق به عنوان اصلی‌ترین قسمت در طراحی مطرح می‌باشد لذا این بخش تحت تأثیر بارهای دینامیکی و نیز در احتراق های متوالی از بارهای سیکلی قرار دارد که باعث بروز پدیده خستگی در سازه می‌گردد. وظیفه اصلی این محفظه تحمل فشار و دمای بالای ناشی از احتراق مواد ناریه می باشد. لذا در این تحقیق، اندازه گیری فشار در مخزن چند تکه مطابق شکل 1 مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

3-2- وسایل آزمایش

وسایل مورد نیاز جهت آزمایش عبارتند از:

1- مخزن

مطابق شکل 2 مخزنی فلزی برای این کار در نظر گرفته شده است نقاطی از مخزن جهت نصب سنسور فشار سوراخ شده و با قطعات رابط تقویتی بوسیله جوش آرگون بر روی پوسته جوش‌کاری انجام شده است.

2- سنسور فشار

برای اندازه‌گیری فشار از سنسورهای پیزوالکتریک 1000 بار مدل کیستلر[4] محصول کشور سوئیس استفاده شده است.

3- یو پی اس

از یو پی اس جهت تامین برق و ولتاژ سیستم های مورد نیاز در آزمایش استفاده شده است.

4- دیتا لاگرها

جهت تفسیر و باز خوانی داده های سنسور های فشار به کامپیوتر استفاده می شود.

5-کابل انتقال داده با نویز پایین

برای انتقال داده های سنسور به آمپلی فایر استفاده می شود.

6- کابل های کواکسیال کابل های کواکسیال برای انتقال داده های آمپلی فایر به دیتا لاگر می باشد.

7-کامپیوتر

جهت ثبت نتایج و نمودار تغییرات فشار - زمان سنسورها استفاده می شود.

3-3- شرح روش آزمایش

جهت آزمایش یک نمونه از مخزن موردنظر در شکل 1 را در نقاط خاصی با مته سوراخ می‌شود این نقاط با توجه به این‌که از نظر بررسی فشار تا چه

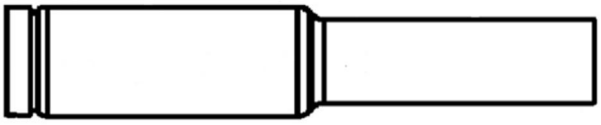

Fig. 1 Vessel model

شکل 1 مدل مخزن

[1] FGM
[2] ABAQUS
[3] CNG
[4] Kistler

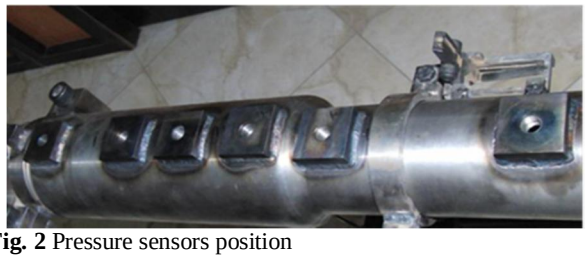

Fig. 2 Pressure sensors position

شکل2 موقعیت سنسورهای فشار

اندازه دارای اهمیت می‌باشد انتخاب خواهد شد. پس از این مرحله قطعات تقویتی اتصال رابط (شکل3) به نقاط سوراخ شده با جوش آرگون جوش‌کاری می‌شود. پس از این مرحله سنسور و کابل‌های مربوطه به قطعات تقویتی بر روی مخزن با اتصال پیچ و رزوه به هم متصل می‌شود (شکل4). در راستای طولی مخزن هشت نقطه جهت نصب سنسور مشخص شده و شرایط کار برای دیتا برداری آماده است ولی با توجه به محدودیت کانال اتصال سنسور در دیتا لاگر (دیتا لاگر شش کاناله) به ناچار در آزمایش برای بستن مجراهای باز با یک درپوش (کورکن) این مجراها بسته می‌گردد (شکل5). وضعیت قرار گیری و چیدمان سنسورها در شکل 6 و جدول 1 نشان داده شده است.

Fig. 3 Pieces of reinforcement

شکل3 قطعات تقویتی

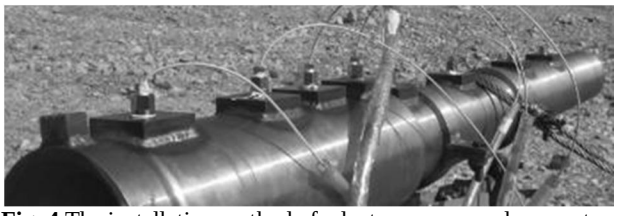

Fig. 4 The installation method of adaptor, sensor and connector cables

شکل4 نحوه نصب آدابتور، سنسور و کابل‌های رابط

Fig. 5 The installation position of caps upon the vessel

شکل5 موقعیت نصب درپوش‌ها بر روی مخزن

جدول 1 موقعیت‌های نصب سنسورهای فشاری

Table 1 The installation positions of pressure sensors

شماره سنسور	موقعیت مکانی (mm)
1	70
2	200
3	274.5
4	360
5	430
6	605
7	843.07
8	1020.07

جهت ثابت نگه داشتن مخزن در هنگام آزمایش مطابق شکل **7** از سه پایه و کابل‌های مهار شده به سطح زمین استفاده شده است.

جهت بارگذاری در این آزمایش از 800 گرم ماده منفجره استفاده شده است شکل‌های 8 و 9 پکیج این ماده، نحوه جاگذاری و اتصال کابل های رابط را نشان می‌دهد. جهت بالا رفتن فشار اولیه در محفظه احتراق ابتدا و انتهای خرج با درپوش مناسب طراحی شده برای این کار بسته شده است. شکل10 یک نمونه از این درپوش را نشان می‌دهد. برای ثبت نتایج از سنسورهای پیزوالکتریک 1000 بار مدل کیستلر[1] محصول کشور سوئیس استفاده گردیده است. کابل‌های ده متری نویز پایین اطلاعات را از سنسورها به شارژ آمپلی-فایر مدل 5015A100 (از شرکت مذکور) متصل می‌کند. شارژ آمپلی‌فایرها نیز توسط کابل‌های کواکسیال به سیستم دیتالاگرها متصل می‌گردد تا اندازه-گیری‌های مربوط به فشار- زمان توسط کامپیوتر ذخیره گردد.

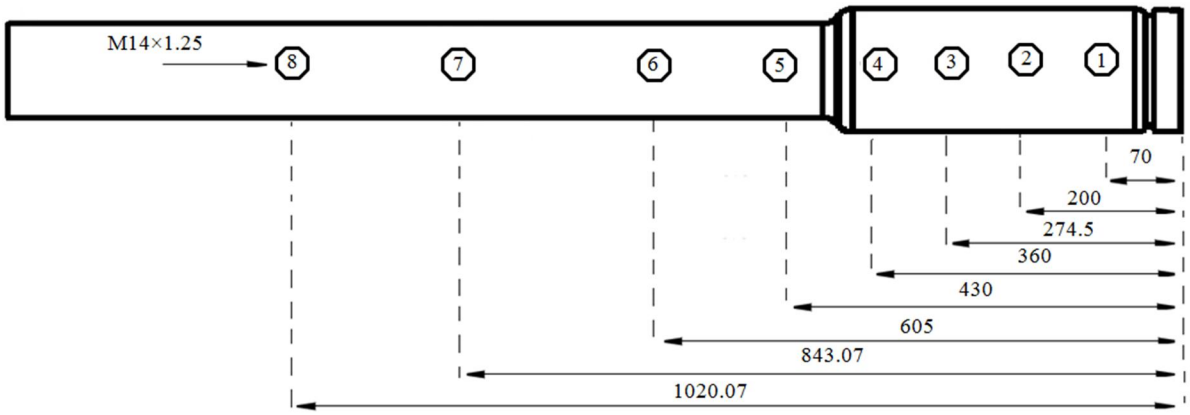

Fig. 6 Vessel schematic and the arrangement position of pressure sensors (dimensions in mm) (numbered points show the arrangement of sensors)

شکل6 شماتیک مخزن و نحوه قرار گیری سنسورهای فشاری ابعاد به میلیمتر می باشد.(نقاط شماره گذاری شده ترتیب قرار گیری سنسورها می‌باشد)

[1] Kistler

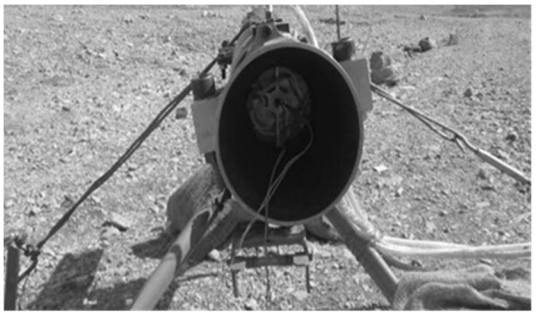

Fig. 7 Vessel harnessing method in the test

شکل7 نحوه مهار مخزن در هنگام آزمایش

Fig. 8 Fuel package with end cap

شکل8 پکیج سوخت به همراه درپوش انتهایی

Fig. 9 Installation and placement of fuel

شکل9 نحوه نصب و جاگذاری سوخت

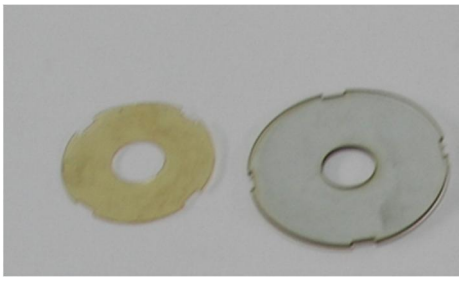

Fig. 10 A sample of fuel lid

شکل10یک نمونه از درپوش سوخت

3-4- تشریح نتایج

پس انجام مراحل آماده‌سازی ، آزمایش با چیدمان سنسور متفاوت در چهار مرحله صورت گرفت در آزمایش شماره 1 سنسورهای فشاری بر روی موقعیت‌های شماره 3 و شماره 5 قرار گرفته‌اند، همان‌طور که شکل شماره 6 نشان می‌دهد، بدلیل اینکه موقعیت هر دو سنسور بطور مستقیم با فشار حاصل از سوزش ماده منفجره قرار دارند، رفتار مشابهی را از خود نشان می-دهند. شکل 11 نمودار فشار زمان این دو سنسور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می شود فشار از نقطه صفر که فشار کالیبره شده اتمسفر می‌باشد شروع شده و با شیب نسبتا زیادی افزایش می‌یابد. بعد از 2 میلی ثانیه، فشار محفظه احتراق به مقدار50 بار می‌رسد. با تمام شدن سوزش ماده منفجره در زمان 6 میلی ثانیه مقدار فشار در قسمت وسط محفظه

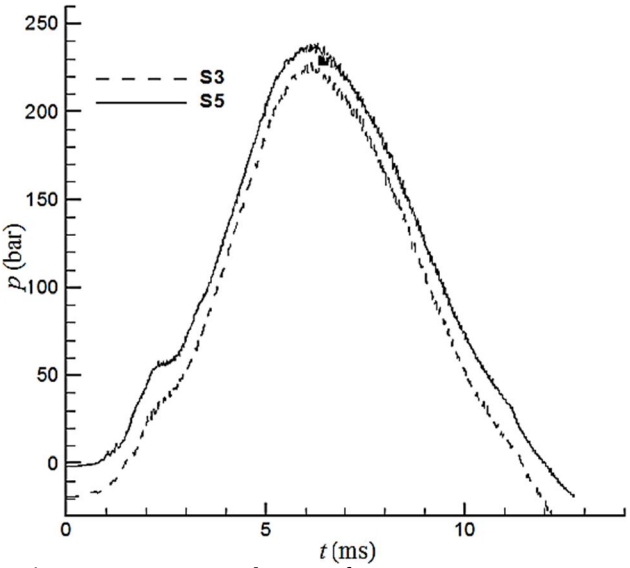

Fig. 11 Pressure – time diagram of experiment # 1

شکل 11 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 1

(سنسور شماره 3) به بالاترین مقدار و برابر 238 بار و در این زمان سنسور شماره 5 به بالاترین مقدار و برابر 243 بار می‌رسد. با پاره شدن درپوش دو سر خرج سوخت و تخلیه گازهای حاصل از سوزش از انتهای مخزن شیب نمودار کاسته می‌شود. بعد از خروج گازها از دو طرف مخزن ، فشار بطور شدید کاهش یافته و در محفظه با بوجود آمدن خلاء فشار داخل مخزن افت شدیدی پیدا کرده و به مقدار 20- بار می‌رسد. برای آزمایش دوم شش سنسور بر روی موقعیت‌های تعبیه شده 1 تا 6 مطابق شکل 6 نصب گردیده است. شکل 12 نمودار فشار-زمان این آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان می‌دهد، فشار در ابتدای سوزش از صفر شروع شده و بعد از 2 میلی ثانیه با شیب ملایم‌تری (نسبت به تست شماره 1) در 5 سنسور ابتدائی افزایش یافته و به مقدار 20 بار می‌رسد. بدلیل عدم تماس سنسور شماره 6 با فشار حاصل از سوزش در محفظه احتراق تا زمان 6.5 میلی ثانیه فشار در این موقعیت صفر می‌باشد.

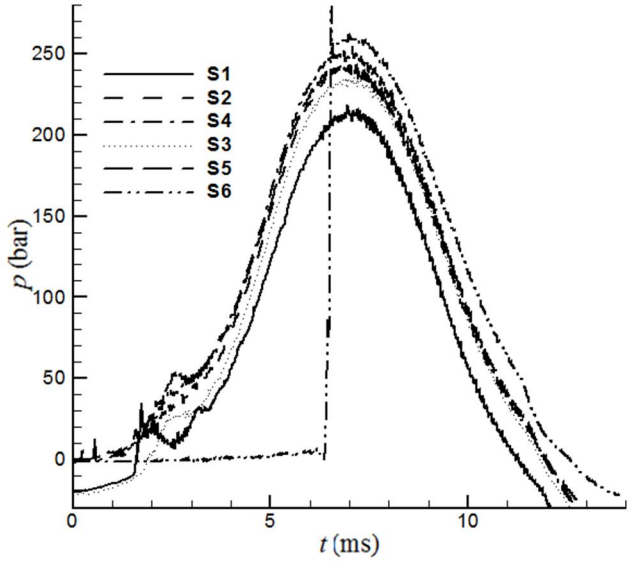

Fig. 12 Pressure – time diagram of experiment # 2

شکل 12 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 2

بعد از 1.8 میلی ثانیه، فشار در سنسور شماره 1 (نزدیکترین سنسور به درپوش محفظه مخزن) بدلیل تجمع گازهای حاصل از احتراق و اشباع تقریبی محفظه، مقدار فشار بر روی این سنسور نسبت به سایر سنسورها افزایش بیشتری یافته و به مقدار 50 بار می رسد. با توجه به کاهش مختصری از فشار در این زمان احتمال ایجاد منفذ در درپوش محفظه و یا نویز سیستم وجود دارد که نتیجه آن رسیدن فشار به مقدار 25 بار در زمان 2.6 میلی ثانیه می‌باشد. در 4 سنسور بعدی همانند آزمایش 1 مراحل افزایش و کاهش نمودار فشار - زمان تکرار می‌شود. با حرکت گازهای محفظه احتراق به سمت جلو مخزن در زمان 6.5 میلی‌ثانیه پس از آغاز سوزش، به سنسور شماره 6 رسیده و فشار این سنسور در اثر شاک ناگهانی ناشی از تغییر فشار به بیشینه مقدار در این آزمایش و برابر 280 بار رسیده و در همان زمان یا فاصله بسیار کم زمانی پس از عبور موج شاک دوباره بمقدار 250 بار بر می‌گردد. 280 بار بیشینه فشار ثبت شده می باشد که دلیل نوسان آنرا می‌توان به اعمال فشار لحظه ای ارتباط داد. این سنسور سپس رفتاری مشابه رفتار سنسورهای 1 تا 5 پیدا می کند و همانند آزمایش 1 سیر نزولی کاهش فشار ادامه می‌یابد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود سنسورهای 1 ، 4 ، 5 و 6 مانند آزمایش1 دارای رفتار مشابه می‌باشد و نشان می‌دهد رفتار فشار مخزن تکرار پذیر می باشد. اما نکته‌ای که در مقایسه رفتار سنسورهای این آزمایش با آزمایش 2 مشاهده می شود رفتار نمودار سنسور 1 می باشد که در قسمت قبل مطرح شد که به‌دلیل تجمع گازهای حاصل از احتراق و اشباع تقریبی محفظه، مقدار فشار بر روی این سنسور نسبت به سایر سنسورها افزایش بیشتری یافته و به مقدار 50 بار می‌رسد و با توجه به کاهش مختصری از فشار در این زمان احتمال ایجاد منفذ در درپوش محفظه و یا نویز سیستم وجود دارد که نتیجه آن رسیدن فشار به مقدار 25 بار در زمان 2.6 میلی ثانیه می باشد.

در آزمایش‌های سوم نحوه چیدمان سنسورها بترتیب بر روی موقعیت های 1، 4، 5 ، 6 ، 7 و 8 نصب گردید. شکل 13 نمودار فشار- زمان این آزمایش را نشان می‌دهد. در صورتی که در این آزمایش مشابه رفتار قبل تکرار شد که فشار در این مرحله به حدود 37 بار رسیده و سپس به مقدار 25 بار کاهش یافته است که از این مطلب دو نتیجه می‌توان گرفت اول این‌که این تغییر مسیر نمودار ناشی از نویز نمی باشد چون که اگر نویز سبب این عامل بود در این آزمایش نباید عینا همان رفتار تکرار شود و نتیجه دوم در مقدار فشار بیشینه باز شدن درپوش این آزمایش با آزمایش قبلی می باشد و چون در این آزمایش زودتر در درپوش انتهای مخزن منفذ ایجاد شده است لذا مقدار فشار از 50 بار به 37 بار کاهش یافته است. پس از باز شدن درپوش های جلو و عقب مخزن و با حرکت گازهای محفظه احتراق به سمت جلو مخزن در زمان های 7.5، 9.5 و 10.5 میلی ثانیه فشار به سنسورهای شماره 6 ، 7 و 8 رسیده و فشار این سنسورها در اثر شاک ناگهانی ناشی از تغییر فشار به بیشینه مقدارهای خود رسیده و در همان زمان یا فاصله بسیار کم زمانی پس از عبور موج شاک دوباره به مقدارهای پایدار خود برمی گردد و ادامه مسیر حرکت را مانند آزمایش 2 و با تفاوت اندکی ادامه می یابد. از مقایسه نمودار سنسور شماره 6 این آزمایش با آزمایش 2 می توان گفت که فقط تفاوت در زمان رسیدن موج شاک می باشد که در آزمایش 2 در زمان 6.5 میلی ثانیه موج شاک به این سنسور رسیده ولی در این آزمایش در زمان 7.5میلی ثانیه می باشد که این اختلاف می تواند ناشی از عدم همزمان باز شدن درپوش های موقت افزایش فشار در جلو و عقب محفظه احتراق و یا خطا در نحوه سوزش سوخت و رفتار آن در دو آزمایش باشد. جهت تکرار پذیری رفتار سنسورها آزمایش چهارم مانند آزمایش سوم و با همان چیدمان سنسور انجام شد. شکل 14 نمودار فشار- زمان این آزمایش را نشان می دهد.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تمامی سنسورها با اندکی تفاوت دارای رفتار مشابه آزمایش 3 می‌باشد. از مقایسه نمودار سنسورهای شماره 6، 7 و 8 این آزمایش با آزمایش 3 می‌توان گفت که فقط تفاوت در زمان رسیدن موج شاک می‌باشد که در آزمایش 3 در زمان‌های 7.5، 9.5 و 10.5 میلی ثانیه موج شاک به این سنسورها رسیده ولی در این آزمایش در زمان‌های 8.5، 10.5 و 11.5 میلی ثانیه می‌باشد تفاوت دیگری که در مقایسه این نمودارها مشاهده می‌شود مقدار بیشینه فشار می باشد که فقط در سنسور شماره 6 مقدار آن در دو آزمایش متفاوت می‌باشد که این اختلاف ها می تواند ناشی از عدم همزمان باز شدن درپوش‌های موقت افزایش فشار در جلو و عقب محفظه احتراق و یا خطا در نحوه سوزش سوخت و رفتار آن در دو آزمایش باشد.

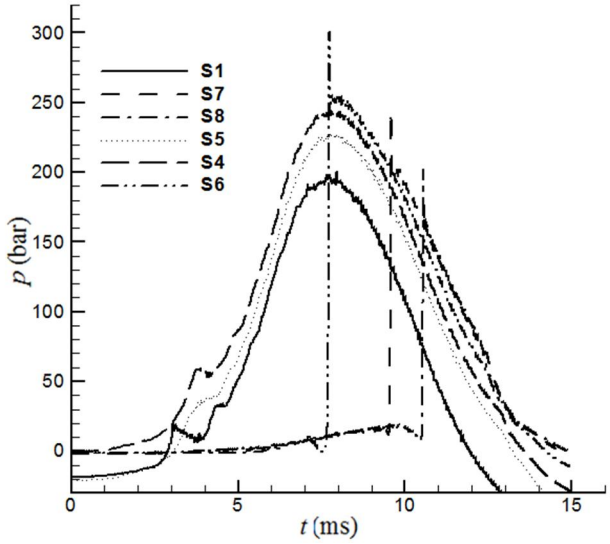

Fig. 13 Pressure – time diagram of experiment # 3

شکل 13 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 3

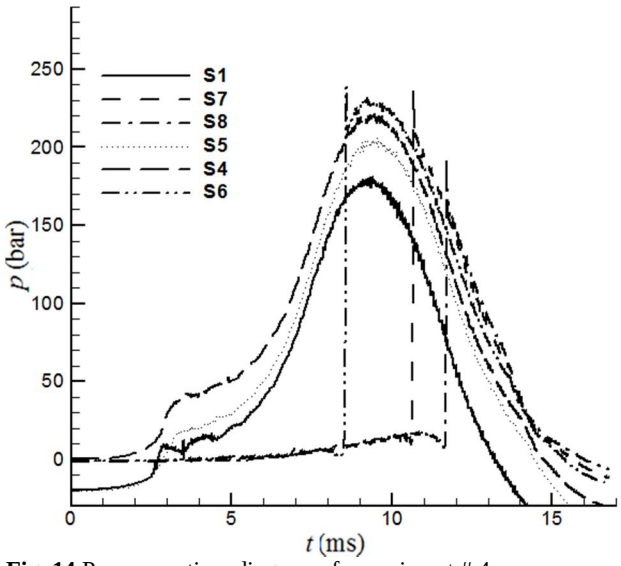

Fig. 14 Pressure – time diagram of experiment # 4

شکل 14 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 4

4- تحلیل عددی

4-1- مدل هندسی مخزن

فرم هندسی مخزن مورد مطالعه مطابق شکل 15 به صورت دو استوانه تو خالی به هم متصل شده می‌باشد. ابعاد مخزن مطابق جدول 2 می باشد.

لازم بذکر است مخزن شماره 1 مخزن با شعاع بزرگتر و مخزن شماره 2 مخزن با شعاع کوچکتر می‌باشد. مدل اولیه مخزن با مشخصات ارائه شده در این بخش می باشد. با توجه به این‌که بهینه کردن استحکام به وزن مخزن در این تحقیق موردنظر می‌باشد لذا مخزن به دو بخش لاینر فلزی و لایه کامپوزیت تقسیم بندی می‌شود که در ادامه به معرفی و طراحی این بخش ها پرداخته می شود.

4-2- مدل فیزیکی و مکانیکی

4-2-1- مدل فیزیکی و مکانیکی لاینر

در لوله مخازن تحت بار دینامیکی استفاده از آلیاژهای فولادی مورد توجه بسیاری از سازندگان می‌باشد. هر چند در انتخاب جنس لاینر می‌توان از تیتانیم نیز بهره جست، اما فولاد به خاطر مقاومت بالایی که در برابر خوردگی و سایش دارد همچنان به‌عنوان جنس مناسب برای لاینرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق جنس لاینر از فولاد 4340 استفاده شده که مشخصات این فولاد در جدول 3 آمده است.

4-2-2- مدل فیزیکی و مکانیکی پوشش کامپوزیتی

مدل فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت استفاده شده در این تحقیق از الیاف کربنی تی 700[1] با رزین اپوکسی می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن در جدول 4 بیان شده است.

4-3- مدل سازی المان محدود

4-3-1- المان بندی

جدول 2 ابعاد و اندازه مخزن مورد آزمایش

Table 2 Vessel dimensions of test

کمیت هندسه	مخزن بزرگتر	مخزن کوچکتر	محل اتصال
شعاع داخلی (mm)	62.5	46.5	-----
ضخامت (mm)	5.5	5.5	5.5
طول (mm)	908	362	25

Fig. 15 Vessel of modeling in software

شکل15 مخزن مدل سازی شده در نرم افزار

برای المان‌بندی لاینر فلزی و همچنین پوشش کامپوزیتی از المان 4 گرهی شل[2] به تعداد 6563 المان استفاده شده است. نرم‌افزار آباکوس کاربر را برای انتخاب نوع المان، با یک مجموعه بزرگ از المان‌ها با قابلیت‌های مختلف روبرو نمی‌کند، بلکه تعداد محدودی و در برخی کاربردها تنها یک المان متناسب با زمینه انجام تحلیل در اختیار می‌گذارد و به‌طور خودکار، قابلیت‌های المان را با ویژگی‌هایی که کاربر در بخش‌های مختلف مدل‌سازی مانند تعریف خواص ماده، نوع بارگذاری و ... تعیین نموده است، منطبق می‌کند. نمایی از مدل مش‌بندی شده مخزن توسط المان‌های مذکور در شکل 16 دیده می‌شود.

4-3-2- زاویه پیچش کامپوزیت

به دلیل تفاوت خواص کامپوزیت در راستاهای مختلف تغییر زاویه پیچش اثرات زیادی در نتایج تحلیل و تنش های وارده بر مدل ایجاد می‌کند به همین دلیل در این پژوهش یکی از پارامتر های طراحی زاویه پیچش کامپوزیت در نظر گرفته شده است زاویه پیچش کامپوزیت زاویه‌ای است که الیاف کامپوزیت با محور مخزن می‌سازد و در لایه‌های مختلف می‌تواند مقادیر مختلفی در نظر گرفته شود. در شکل 17 زاویه پیچش لایه‌های مختلف کامپوزیت در حالت (90,+45,-45,90) نشان داده شده است.

جدول 3 خواص مکانیکی و حرارتی فولاد 4340[36]

Table 3 Mechanical and thermal properties of 4340 steel

کمیت	مقدار
مدول یانگ E (GPa)	210
ضریب پواسون ν	0.3
جرم حجمی ρ (kg m^{-3})	7800
گرمای ویژه cp (J kg^{-1} K^{-1})	460
هدایت گرمایی λ (W m^{-1} K^{-1})	40
ضریب انبساط گرمایی αT (1/K)	0.000015
ضریب انتشار گرمایی α (m^2 s^{-1})	0.000117

جدول 4 خواص کامپوزیت تی 700 با درصد حجمی الیاف پنجاه درصد [37]

Table 4 Composite properties T700/LY5052 with fiber volume fraction of 50%

کمیت	مقدار
مدول یانگ E_1 (GPa)	161.3
مدول یانگ E_2, E_3 (GPa)	8.85
مدول برشی G_{12}, G_{13} (GPa)	5.331
مدول برشی G_{23} (GPa)	2.744
ضریب پواسون ν_{12}, ν_{13}	0.33
ضریب پواسون ν_{23}	0.45
جرم حجمی ρ (Kg m^{-3})	1600
مقاومت کششی طولی X_t(MPa)	2300
مقاومت فشاری طولی X_c(MPa)	1080
مقاومت کششی عرضی Y_t(MPa)	30
مقاومت فشاری عرضی Y_c(MPa)	70
ضریب گرمای ویژه J/kg.k	800

[1] T700

[2] Shell (S4R)

4-3-3- بارگذاری و شرایط مرزی

4-3-3-1- بارگذاری

بار اعمالی به مدل مطابق نمودارهای بدست آمده از تست‌های تجربی ذکر شده در شکل‌های 11 الی 14 می‌باشد فشار بدست آمده از نتایج این شکل ها که حاصل یک بار فشاری ضربه‌ای و داخلی می‌باشد بصورت یک بار دینامیکی به مدل در نرم افزار المان محدود آباکوس اعمال شده است.

4-3-3-2- شرایط مرزی

در تحلیل فشار به دلیل تقارن مدل تنها شرط مرزی در نقطه اتصال مخزن به بدنه می باشد به صورتی که از جا به‌جایی و چرخش محوری جلوگیری بکند برای این منظور از شرط مرزی تقارن محوری در راستای محور مخزن استفاده شده است.

4-4- بحث و تحلیل نتایج عددی

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از تحلیل حالت‌های مختلف مخزن پرداخته شده و انتخاب بهینه‌ای از بین تمام حالت‌های تحلیل صورت می‌گیرد. در ابتدا مخزن اصلی که به صورت تمام فلزی ساخته شده است تحلیل می‌شود لذا با در نظر گرفتن تنش تسلیم 1200 مگاپاسگال برای فولاد 4340 و خواص فیزیکی و مکانیکی عنوان شده در جدول 3 برای مخزن و نتایج حاصل از تحلیل تنش در این بخش تنش بیشینه، وزن و ضریب اطمینان در جدول 5 بدست آمده است.

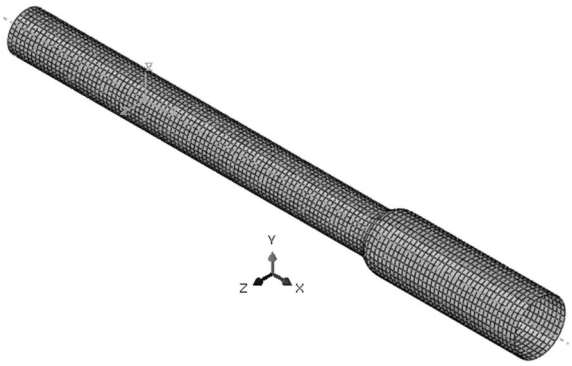

Fig. 16 Vessel meshed model

شکل16 مدل مش بندی شده مخزن

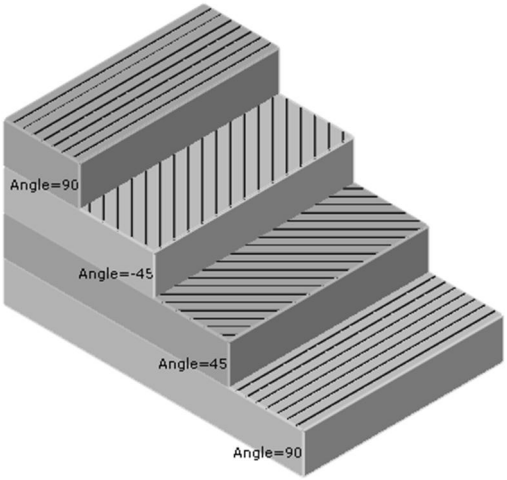

Fig. 17 Composite torsion angle in mode (90,+45,-45,90)

شکل17 زاویه پیچش کامپوزیت در حالت (90,+45,-45,90)

جدول 5 نتایج بدست آمده با مخزن تمام فلزی

Table 5 The results obtained with metal vessel

	جنس مخزن	ضخامت (mm)	بیشینه تنش (MPa)	ضریب اطمینان	وزن (kg)
مخزن1	فولاد	5.5	512	2.34	16.96
مخزن2			433		

همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود در قسمت مخزن 1 به دلیل بیشتر بودن شعاع تنش بیشتری ایجاد می‌شود، در شکل 18 نمودار گرافیکی و شکل 19 نمودار تغییرات تنش ون میسز در طول مخزن را نشان می دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تنش در مخزن 1 بیشتر بوده و در محل تقاطع دو مخزن با تغییرات ناگهانی دوباره روند نزولی تنش در مخزن 2 ادامه می‌یابد. در ادامه نتایج تحلیل تنش با تغییرات سه پارامتر ضخامت لاینر، ضخامت کامپوزیت و زاویه پیچش کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تنش های حاصل، وزن و ضریب اطمینان به دست آمده در مدل‌ها با هم در جدول 6 مقایسه شده است تا بتوان بهترین مدل را برای طراحی مخزن انتخاب کرد.

با توجه به نتایج به دست آمده برای تحلیل تنش حالت‌های مختلف، از بین 24 حالت تحلیل شده که در ادامه به بحث و بررسی این تحلیل‌ها پرداخته می شود در مدل شماره 18 بهترین ضریب اطمینان و کمترین وزن را در بین مدل ها دارا می باشد لازم بذکر است که ضرایب اطمینان مدل ها در هر تحلیل ملاک کمترین ضریب اطمینان بدست آمده در مدل می‌باشد و مدل فلزی با معیار ون میسز و مدل کامپوزیت با معیار بیشینه تنش محاسبه شده است لذا از دیدگاه وزن و ضریب اطمینان این مدل بهترین مدل می باشد ولی با توجه به ماهیت فیزیک مسئله و داشتن گازهای داغ ناشی از سوخت و احتمال نفوذ این گازها در لایه‌های کامپوزیت داشتن لاینر فلزی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [38] در نتیجه این مدل نمی‌تواند مدل انتخابی باشد. مدل شماره 6 در بین مدل‌های دارای لاینر فلزی دارای کمترین وزن و بیشترین ضریب اطمینان می‌باشد بنابراین این مدل می‌تواند به عنوان بهترین مدل در مقایسه با مدل اولیه فلزی مطابق جدول 6 انتخاب شود ولی با توجه به این‌که تمام لایه‌های آن به ضخامت 4.5 میلی‌متر با زاویه 90 درجه روی هم پیچیده شده از دیدگاه ساخت مدل و بحث سر خوردن لایه ها در زیر بار، مناسب نمی‌باشد [38] لذا مدل 24 با توضیحاتی که داده شد به عنوان بهترین حالت طراحی انتخاب می‌شود.

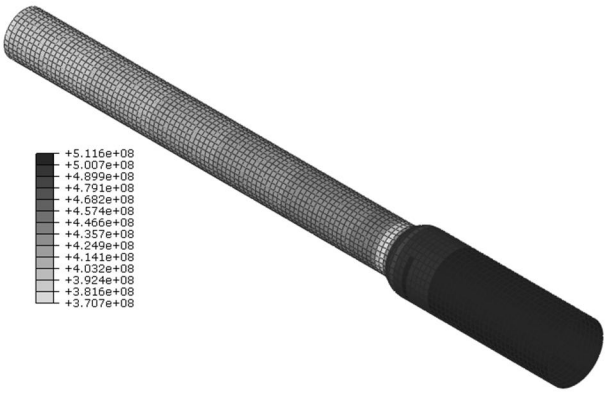

Fig. 18 Von Mises stress of metal vessel caused by pressure load at the time of 7 milliseconds per unit Pascal

شکل18 تنش ون میسز مخزن تمام فلزی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال

جدول6 نتایج تحلیل تنش برای حالتهای مختلف از زاویه پیچش کامپوزیت ، ضخامت لاینر و ضخامت کامپوزیت

Table 6 The results of stress for different modes of composite torsion angle, thickness of the liner and composite

ردیف	زاویه پیچش	ضخامت لایه ها (mm)	مخزن	ضخامت (mm)		بیشینه تنش (MPa)		ضریب اطمینان	وزن (kg)
				لاینر	پوشش	لاینر	پوشش		
1	(0,+45,-45,0)	(1.5,1,1,1)	مخزن1	2	4.5	1009	185	1.2	8.86
	(0,+45,-45,0)	(1.5,1,1,1)	مخزن2	1.5	4.5	990	304		
2	(0,+45,-45,0)	(1,1,1,1.5)	مخزن1	2	4.5	1022	262	1.2	8.86
	(0,+45,-45,0)	(1,1,1,1.5)	مخزن2	1.5	4.5	995	316		
3	(90,+45,-45,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن1	2	4.5	623	470	1.81	8.86
	(90,+45,-45,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن2	1.5	4.5	660	455		
4	(90,+45,-45,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن1	2	4.5	630	474	1.84	8.86
	(90,+45,-45,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن2	1.5	4.5	650	445		
5	(90,0,0,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن1	2	4.5	620	480	1.93	8.86
	(90,0,0,90)	(1,1,1,1.5)	مخزن2	1.5	4.5	560	430		
6	(90)	(4.5)	مخزن1	2	4.5	460	352	2.37	8.86
	(90)	(4.5)	مخزن2	1.5	4.5	505	320		
7	(90,+50,-50,90)	(2.5,1,1,1)	مخزن1	2	4.5	538	410	2.1	8.86
	(90,+50,-50,90)	(2.5,1,1,1)	مخزن2	1.5	4.5	570	374		
8	(90,+50,-50,90)	(1.75,0.5,0.5,1.75)	مخزن1	2	4.5	535	410	2.09	8.86
	(90,+50,-50,90)	(1.75,0.5,0.5,1.75)	مخزن2	1.5	4.5	572	375		
9	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	532	410	2.25	8.86
	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	1.5	4.5	523	372		
10	(90)	(4.5)	مخزن1	2	4.5	470	352	2.55	9.9
	(90)	(4.5)	مخزن2	2	4.5	460	315		
11	(90,+50,-50,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	540	407	2.22	9.9
	(90,+50,-50,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	2	4.5	505	370		
12	(90,+50,-50,90)	(1.75,0.5,0.5,1.75)	مخزن1	2	4.5	537	410	2.23	9.9
	(90,+50,-50,90)	(1.75,0.5,0.5,1.75)	مخزن2	2	4.5	505	370		
13	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	535	409	2.24	9.9
	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	2	4.5	467	369		
14	(90)	(6)	مخزن1	2	6	382	260	2.75	9.89
	(90)	(6)	مخزن2	1.5	6	435	290		
15	(90)	(6)	مخزن1	2	6	390	292	3.04	10.93
	(90)	(6)	مخزن2	2	6	394	262		
16	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	535	411	2.24	9.9
	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	2	4.5	480	371		
17	(90,+75,-75,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	483	368	2.48	9.9
	(90,+75,-75,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	2	4.5	472	327		
18	(90)	(6)	مخزن1	0	6	---	426	5.39	4.15
	(90)	(6)	مخزن2	0	6	---	386		
19	(90,+50,-50,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن1	0	6	---	449	4.68	4.15
	(90,+50,-50,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن2	0	6	---	491		
20	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن1	0	6	---	505	4.55	4.15
	(90,+18,-18,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن2	0	6	---	448		
21	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن1	0	6	---	506	4.54	4.15
	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن2	0	6	---	453		
22	(90,+75,-75,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن1	0	6	---	438	5.25	4.15
	(90,+75,-75,90)	(2.5,0.5,0.5,2.5)	مخزن2	0	6	---	403		
23	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن1	2	4.5	533	410	2.22	8.86
	(90,+27,-27,90)	(2.5,0.5,0.5,1)	مخزن2	1.5	4.5	540	374		
24	(90,+75,-75,90)	(1.5,0.5,0.5,2)	مخزن1	2	4.5	481	363	2.26	8.86
	(90,+75,-75,90)	(1.5,0.5,0.5,2)	مخزن2	1.5	4.5	531	332		

همان طور که در جدول6 مشاهده می شود تنش بیشینه در قسمت مخزن 2 و در لاینر اتفاق می‌افتد با درنظر گرفتن استحکام تسلیم فولاد (1200 مگاپاسکال برای فولاد 4340) ضریب اطمینان مخزن برابر 2.29 به دست می‌آید. وزن مخزن در این حالت برابر 8.86 کیلوگرم می باشد که در مقایسه با وزن مخزن نمونه فلزی که 16.96 کیلوگرم می‌باشد 8.86 کیلوگرم کاهش وزن داشته که در حدود 48 درصد کاهش داشته است.

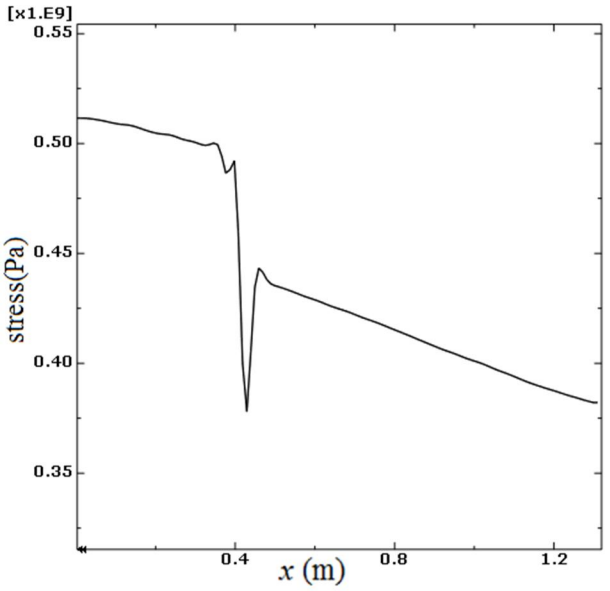

Fig. 19 Changes diagram of von Mises stress at the time of 7 milliseconds during the metal vessel

شکل 19 نمودار تغییرات تنش ون میسز مخزن تمام فلزی در زمان 7 میلی ثانیه در طول مخزن

در شکل‌های 20 تا 22 کانتور تنش و نمودار تغییرات تنش ون میسز در لاینر و پوشش کامپوزیتی برای مدل انتخابی (مدل 24) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 20 نشان داده شده است تنش در مخزن 1 دارای بیشینه تنش 481 مگاپاسکال و در مخزن 2 برابر 531 مگاپاسکال می باشد و بدلیل ضخامت کمتر لاینر در مخزن 2 تنش بیشتر متحمل لاینر در این مخزن خواهد شد تنشهای ایجاد شده در پوشش کامپوزیتی در شکل 21 نشان داده شده است لذا با توجه به این شکل ها می توان گفت که باربرداری کامپوزیت در هر دو مخزن تا حدودی شبیه به هم بوده و روند یکسانی را طی می کند و با توجه به مقاومت کششی کامپوزیت در جدول 4 که برابر 2300 مگاپاسکال و معیار بیشینه تنش در لایه های کامپوزیت ضریب اطمینان این لایه ها حدود 6.33 خواهد بود. شکل 22 نمودار تنش در لایه‌های مختلف مخزن را نشان می دهد مطابق این شکل تنش در لاینر از تمام لایه‌ها بیشتر می‌باشد همچنین مقدار تنش در لایه های اول و آخر کامپوزیت تقریبا دارای مقدار تنش یکسانی بوده و نسبت به لایه‌های دیگر دارای مقدار بیشتری می-باشند نحوه رفتار موج تنش در لاینر بدلیل فلزی بودن در نقطه تغییر مقطع دارای نوسانی متفاوت نسبت به لایه‌های کامپوزیت دارد و در این نقطه بدلیل پیچیدگی رفتار موج تنش و وجود موج های برگشتی تنش بصورت ناگهانی زیاد شده و سپس کاهش می یابد.

5-جمع بندی و نتیجه گیری

در طراحی محفظه‌های استوانه ای چند تکه مهمترین بخش این سیستم محفظه‌ای می‌باشد که به صورت مستقیم در ارتباط با احتراق و سوزش مواد ناریه بوده و تحت فشار و دمای بالای ناشی از احتراق به عنوان اصلی‌ترین قسمت در طراحی مطرح می‌باشد لذا این بخش تحت تأثیر بارهای دینامیکی و نیز در احتراق‌های متوالی از بارهای سیکلی قرار دارد که باعث بروز پدیده خستگی در سازه می‌گردد. وظیفه اصلی این محفظه تحمل فشار و دمای بالای ناشی از احتراق مواد ناریه می‌باشد. لذا در این تحقیق، تحلیل تجربی و عددی یک مخزن چند تکه مورد بررسی قرار گرفت.

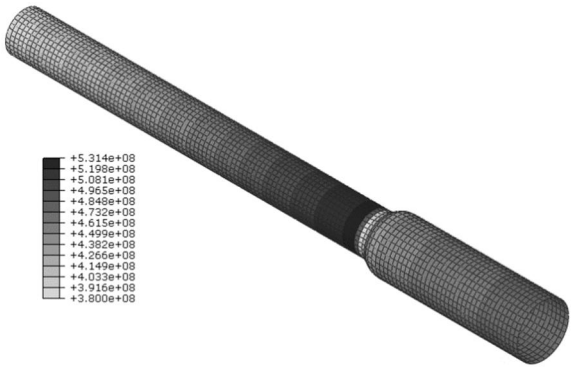

Fig. 20 Von Mises stress of liner vessel selected model caused by pressure load at the time of 7 milliseconds per unit Pascal

شکل 20 تنش ون میسز لاینر مخزن مدل انتخابی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال

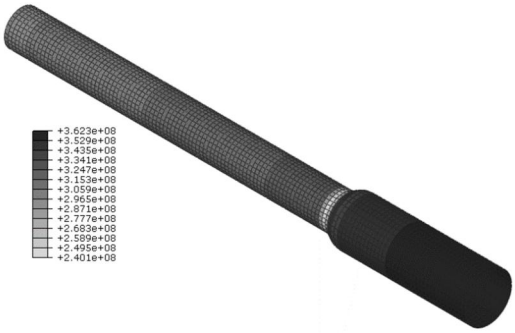

Fig. 21 Von Mises stress in composite vessel selected model caused by pressure load at the time of 7 milliseconds per pascal unit

شکل 21 تنش ون میسز در پوشش کامپوزیتی مخزن مدل انتخابی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال

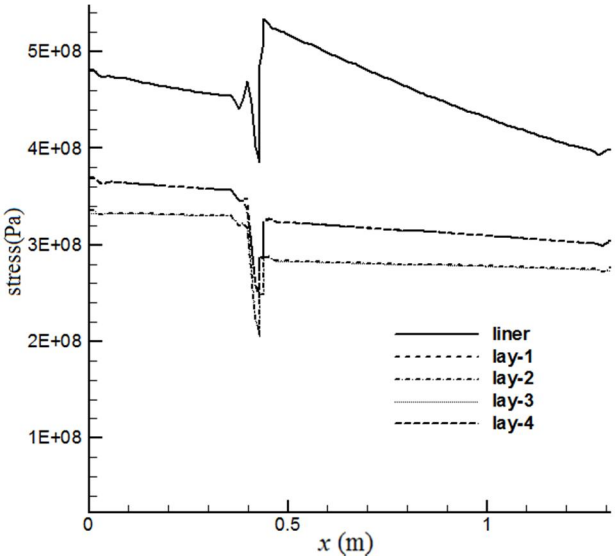

Fig. 22 Changes diagram of von Mises stress in composite vessel selected model caused by pressure load at the time of 7 milliseconds during the vessel

شکل 22 نمودار تغییرات تنش ون میسز در پوشش کامپوزیتی مخزن مدل انتخابی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه در طول مخزن

در ابتدا یک نمونه از مخزن مورد نظر با شرایطی که در متن توضیح داده شد جهت آزمایش تهیه شد. چهار آزمایش برای این منظور فراهم شد در آزمایش اول سنسورهای 1 و 2، آزمایش دوم سنسورهای1 ،2 ، 3 ، 4 ، 5 و 6 ، آزمایش

سوم سنسورهای 1، 4 ، 5، 6، 7 و 8 و در آزمایش چهارم مانند آزمایش سوم سنسورهای 1، 4، 5، 6، 7 و 8 جهت بررسی تکرار پذیری مورد تحلیل و بررسی تحلیل و بررسی قرار گرفتند. پس از بحث و بررسی نمودارها و مقایسه آن‌ها نتایج حاصله بصورت زیر می باشد.

*سنسورهای شماره 1 تا 6 بدلیل قرارگیری در محفظه احتراق با اندک تفاوتی نسبت به هم دارای رفتار یکسان، نمودارهای فشار می باشد.

*سنسورهای شماره 6 تا 8 بدلیل قرارگیری در ناحیه خارج از محفظه احتراق تا زمان باز نشدن درپوش افزایش فشار در محفظه مخزن ، فشار در این سنسورها صفر بوده و پس از گذشت 6.5 میلی ثانیه و رسیدن موج شاک به اولین سنسور (شماره 6) در این ناحیه در اثر شاک ناگهانی ناشی از تغییر فشار به بیشینه مقدار خود رسیده و در همان زمان یا فاصله بسیار کم زمانی پس از عبور موج شاک دوباره به مقدار پایدار بر می گردد.

* تفاوت اندک در زمان رسیدن موج شاک و همچنین تغییرات بیشینه فشار در سنسورهای 6 تا 8 را می توان ناشی از عدم همزمان باز شدن درپوش های موقت افزایش فشار در جلو و عقب محفظه احتراق و یا خطا در نحوه سوزش سوخت و رفتار آن در آزمایش های مختلف دانست.

*از مقایسه نمودارها به ویژه آزمایش 3 و 4 تکرارپذیری نتایج آزمایش حاصل شد.

* بیشینه فشار در فشار 285 بار و در سنسور شماره 6 بخاطر موج شاک و مجاورت با محفظه احتراق و کمینه فشار در فشار 173 بار و در سنسور شماره 8 بخاطر دور بودن از محفظه احتراق و مجاورت با فشار محیط اتفاق افتاده است. در بخش تحلیل عددی طراحی ضخامت و زاویه پیچش الیاف مخزن فلز- کامپوزیت تحت بارهای دینامیکی ناشی از احتراق به منظور کاهش وزن و افزایش استحکام مخزن انجام شد.

فشارهای اعمالی به مدل حاصل از آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق بوده که بصورت یک بار دینامیکی جهت تحلیل عددی با نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. برای به‌دست آوردن بهترین ضخامت پوشش کامپوزیتی و زاویه پیچش الیاف به روش سعی و خطا در مجموع 24 مدل با ابعاد و زاویه‌های مختلف ایجاد و تحلیل شد، از بین این مدل‌ها، یک مدل به‌عنوان مدل طراحی که در آن بهینه‌ترین حالت برای وزن، استحکام و سایر ملاحظات مخازن فلز کامپوزیت معرفی گردید در طراحی صورت گرفته ضخامت لاینر در قسمت مخزن1 و مخزن 2 به ترتیب برابر 2 میلی‌متر و 1.5 میلی‌متر و ضخامت پوشش کامپوزیتی در طول هر دو مخزن برابر 4.5 میلی‌متر به دست آمد با مقایسه زوایای پیچش کامپوزیت در حالت-های مختلف بهترین حالت پیچش برای این مخزن بصورت زوایای پیچش (90,+75,-75,90) با ضخامت لایه (1.5,0.5,0.5,2) میلی‌متر به دست آمد، در این طراحی سعی شد که ضریب اطمینان مخزن نزدیک به مدل مخزن فلزی اولیه در نظر گرفته شود و وزن مخزن با توجه به پارامتر های طراحی کاهش یابد در نهایت مدلی طراحی شد که در آن وزن مخزن با کاهش حدود 48 درصدی، از وزن 16.96 کیلوگرم به 8.86 کیلوگرم تغییر کرد.

6-مراجع

[1] G. Taylor, The Fragmentation of tubular bombs, *Advisory Council on Scientific Research and Technical Development*, Vol. 5, No. 1, pp. 202-320, 1963.

[2] A. G. Ivanov,Explosive deformation and destruction of tubes, *Strength of Mateials* , Vol. 8, No. 11, pp. 1303-1311, 1976.

[3] C. Hoggat, R. Recht, Fracture behavior of tubular bombs, *Journal of Applied Physics*, Vol. 39, pp. 1856-62, 1968.

[4] Al-Hassani, W. Johnson, The Dynamics of the fragmentation process for shells containning explosive, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 11, pp. 811, 1969.

[5] G. Chongyang, S. Huiji, Y. Zhenhan, W. Xiaohua, B.Chunhua, Numerical simulation dynamic fracture criteria of thin cylindrical shells under inner explosive loading, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 5 :No. I, pp. 13-17, 2000.

[6] T. W. Chao, J. Shepherd, Comparison of fracture response of preflawed tubes under internal static and detonation loading, *Jonrnal of Pressur Vessel Technology*,Vol. 126, No.3, pp. 345-353, 2004.

[7] M. Singh, H. R. Suneja, M. S. Bola, S. Prakash, Dynamic tensile defomation and fracture of metal cylinders at high strain rates, *Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, pp. 939-954, 2002.

[8] L. T. Wilson, D. R. Reedal, L. D. Kuhns, D .E. Grady, M. E. Kipp, Using a numerical fragmentation model to understand the fracture and fragmentation Of naturally fragmenting munitions of differing materials and geometries, *19th International Symposium Of Ballistics*, Interlaken, Switzerland, May 7-11, 2001.

[9] Q. Zhang, C. Miao, D. Lin, C. Hua Bai, Relation of fracture with air shock wave intensity for explosion in a shell, *Internatinal Journal of Impact Engineering*, Vol.28, pp.1129-1141, 2003.

[10] N. Dshteyan Gerami, H. Khodarahmi, A. A. Masoumi, Analysis of fracture grooven cylindrical with theory method under inner explosive loading, *Proceedings of The 4th International Conference Mechanical Engineering*, Esfehan, Iran, 2005. (in Persian فارسی)

[11] N. Dshteyan Gerami, H. Khodarahmi, A. M. Mirjalili, Numerical simulation and investigation transiant theorical model under inner explosive loading, *Proceedings of The 5th International Conference Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2004. (in Persian فارسی)

[12] N. Dshteyan Gerami, A. A. Masoumi, M. Gorbani, S. J. Enderami, Experimental analysis of double effect FAE system, *Proceedings of The 1th International Conference High Energy Material*, Tehran, Iran, 2011. (in Persian فارسی)

[13] A. A. Masoumi, N. Dshteyan Gerami, M. M. Dostar, Analysis liquid fracture in denes zone of FAE system with numerical and experimental method, *Proceedings of The 1th International Conference High Energy Material*, Tehran, Iran, 2011. (in Persian فارسی)

[14] A. A. Masoumi, N. Dshteyan Gerami, M. M. Dostar, A. Mollaei, Analysis cloud dispersal of single effect FAE system with numerical and experimental method, *Proceedings of The 1th International Conference High Energy Material*, Tehran, Iran, 2011. (in Persian فارسی)

[15] A. A. Masoumi, N. Dshteyan Gerami, M. M. Dostar, Analysis cloud dispersal of FAE system by numerical and experimental method, *Proceedings of The 1th International Conference High Energy Material*, Tehran , Iran, 2011. (in Persian فارسی)

[16] A. Mollaei, N. Dshyeyan Gerami, A. A. Masoumi, A.R Khodaverdi P. farzanfar, Experimental study effect of termital mixtures in initiation of single effect FAE explosion, *Proceedings of The 1th International Conference High Energy Material*, Tehran , Iran, 2011. (in Persian فارسی)

[17] A. Mollaei, S. M. Moosavi, I. Ahmadzadeh , R. Khodaverdi, Comparison between the shock Wave and chemical initiation in detonation of acetylene–oxygen mixtures, Combustion, *Explosion and Shock Waves*, Vol. 46, No. 6, pp. 666–671, 2010.

[18] M. Malekan, M. Mirzai, Modeling of crack growth in aluminum thin cylinders under gas detonation loading with adhesive element, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 95-102, 2012. (in Persian فارسی)

[19] E. Predrag, J. Slobodan, M. dejan, Modeling of the metal cylinder acceleration under explosive loading, *Scientific Technical Review*,Vol. 63,No. 2,pp. 39-4,2013.

[20] A. Galehdari, A. Vafaisefat, D. Arozomandi, M. Shahabi, Use of genetic algoritm for optimation of composit plan lamina under subwatering explosive Loading with abaqus and matlab, *Proceedings of The 17th International Conference Mechanical Engineering*, Asfehan, Iran, 2009. (in Persian فارسی)

[21] Z. Ximei, W. Yonghui, Modelling and dynamic response of steel

reticulated shell under blast loading, *Shock and Vibration*,Vol. 20, pp. 19–28,2013.

[22] Y. K. Huang, *Exploding Pressure Vessels Test on Zylon/epoxy Composite*, Composite Part B: Enginering, 3th Eddition, pp. 117-123, 2002.

[23] A. Hokin, D. Chapelle, M.L. Boubakar, A. Benamar, A. Bezazi, Experimental and analytical investigation of the cylindrical part of a metallic vessel reinforced by filament winding while submitted to internal pressure, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*,Vol. 86, pp. 649-655, 2009.

[24] S. Rahmati, A. Khani, Optimum multi-stage design of vessel under mix pressure, *Mechanical Engineering of Majlesi Islamici Azad Univercity*, Vol. 1, No. 1, 2007. (in Persian فارسی)

[25] M. H. Sabour, M. F. Foghani, Design of Semi-composite pressure vessel using fuzzy and FEM , *Journal of Composite Materials*, Vol. 17,No. 2, pp. 175–182, 2010.

[26] A. Onder , O. Sayman , T. Dogan , N. Tarakcioglu , Burst failure load of composite pressure vessels, *Journal of Composite Structures*, Vol. 89, No. 1, pp. 159-166, 2009.

[27] F. H. Abdalla, S. M. Sapuan, M. M. HAamdan, B. B.Sahari, Stress-strain distributions through the thickness of thick walled filament wound polymer composite tube under internal pressure loading, *Journal of Polymer Materials*, Vol. 28, No. 3,475-504, 2011.

[28] U. Farooq, K. Gregory, Simulation of progressive failure prediction of filament wound composite tubes subjected to multiple loading With memberane-flexion coupling effects, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 4, April 2010.

[29] H. Y. Chou, A. Bunsell, G. Mair, A. Thionnet, Effect of the loading rate on failure of composite pressure vessel , *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Paris, France, July 14–18, 2013.

[30] G. W. William , S. Shoukry , J. Prucz and T. Evans, Finite element analysis of composite over-wrapped pressure vessels for hydrogen storage, *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 1499-1504, 2013.

[31] S. Sulaiman, S. Borazjani, A. Roshanand, S. Heydaryan, Failure analysis of aluminum reinforced composite vessel, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 392, No. 1, pp. 178-182, 2013.

[32] G. Deng, Q. Li, L. Sun, J. Wang, X. Ling, Fatigue performance analysis of hoop-wrapped composite cylinders with pit defects on liner based on element birth and death method, *ASME Pressure Vessels and Piping Conference* , Anaheim, California, USA, July 20–24 , 2014.

[33] C. Zheng , L. Wang , R. Li and Z. Wei, Fatigue test of carbon epoxy composite high pressure hydrogen storage vessel under hydrogen environment, *Journal of Zhejiang University- Science A: Applied Physics & Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 393-400, 2013.

[34] A. R Ghasemi, A. Kazemian, M. Moradi, Analytical and numerical investigation of FGM pressure vessel reinforced by laminated composite materials, *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 43-53, 2014.

[35] A. Hokine, A. Ghouaoula, F. Kara Achira, and S. M. Medjdoub, Analysis of failure pressures of composite cylinders with a polymer liner of type IV CNG vessels, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, Vol. 7, No. pp. 148-152, 2013.

[36] *AISI 4340 Alloy Steel (UNSG 43400)*, Accessed on 20 March 2015; http://www.azom.com/article.aspx.

[37] *All the Materials you need for Scientific and Industrial Research and Manufacturing*, Accessed on 20 March 2015, http://www.goodfellow.com/E/Carbon-EpoxyComposite-Tube.html.

[38] J. M. Lifshitz, H. Dayan, Filament-wound pressure vessel with thick metal liner, *Composite Structures Elsevier Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 313-323, 1995.