



## تحلیل تجربی و عددی مخزن فلز - کامپوزیت تحت بار دینامیکی

علی اصغر معصومی<sup>1</sup>، غلامحسین رحیمی شرابف مقدس<sup>2\*</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2</sup>

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

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

\*rahimi\_gh@modares.ac.ir, 14115-143 صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 بهمن 1394

پذیرش: 06 فروردین 1395

ارائه در سایت: 18 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

فشار متغیر

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 سوراخ‌هایی 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 بر حسب 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 loggers 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

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

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 مخصوصاً 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

حسب نرخ کرنش، چگالی، ضخامت پوسته و نمای انبساط آیزوتروپیک 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 داده اند و نتایج حاصله را با هم مقایسه کرده اند. معصومی و همکاران [13-14] تحلیل شکست مایع و پخش ابر هوا- سوخت در مخزن استوانه ای 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 مرحله ای و مطالعه تجربی اثر مخلوط ترمیتی در آغاز انفجار هوا- سوخت تک مرحله ای و همچنین موج شاک ناشی از دتونیشن مخلوط اکسیژن- استیلن را مورد بررسی قرار داده اند. ملکان و همکاران [18] مدل سازی رشد ترک در استوانه های جدار نازک آلومینیومی تحت بارگذاری دتونیشن گازی با استفاده از یک المان چسبنده را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق از روش المان محدود، تحلیلی و آزمایشگاهی استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده است. پریداگ و همکاران [19] مدل سازی شتاب استوانه های فلزی تحت بار انفجاری مورد بررسی قرار داده اند. 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 آن ها الگوریتمی ارائه کرده اند که بوسیله آن می توان با بهینه سازی زوایا و ضخامت صفحات کامپوزیتی، وزن صفحه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کاهش داد. ایکسمی و همکاران [21] مدل سازی و پاسخ دینامیکی استوانه های فلزی تحت بار انفجاری را مورد بررسی قرار داده اند. در این مقاله با استفاده از نرم افزار ال اس داینا<sup>2</sup> این مدل سازی انجام شده است. هوانگ و همکارانش [22] روی تست انفجار مخازن کامپوزیتی تحت فشار داخلی از جنس زینن اپوکسی<sup>3</sup> 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 می باشد که مقدار زاویه

پوسته ها تحت اثر بارهای انفجاری را می وان علاوه بر سرجنگی ها برای تحلیل مخزن ها و پوسته های استوانه ای در صنایع نظامی و صنعت به کار برد. به منظور طراحی سیستم های انفجاری لازم است که شناخت دقیق تری از نحوه آغاز و پیشروی موج انفجار درون ماده که می تواند به صورت جامد و یا گاز باشد ایجاد گردد. از طرف دیگر شناخت چنین پدیده ای می تواند در جهت جلوگیری از وقوع انفجارهای ناخواسته مورد استفاده قرار گیرد. محققان زیادی شکست 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 که در نتیجه مدل هایی نظری و آزمایشگاهی برای تشریح مکانیسم و شرایط شکست سازه ها تحت اثر بارگذاری انفجاری ارائه شده است لذا با گسترش تکنولوژی مواد مرکب به عنوان مواد مهندسی مناسب برای کاربردهای مختلف در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است. سبکی مواد مرکب و کارایی 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 متغیر 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 نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>1</sup> 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 شکل گیری، رشد و همگرا شدن آسیب های ریز (مثلا حفره های ریز یا ترک های 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

<sup>2</sup> LS-DYNA

<sup>1</sup> ABAQUS

لایبر پلیمری تقویت شده با کامپوزیت تحت فشار داخل جهت ذخیره گاز سی ان جی<sup>3</sup> را مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق چند لایبر 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 اصلی ترین قسمت در طراحی مطرح می باشد لذا این بخش تحت تأثیر بارهای دینامیکی و نیز در احتراق های متوالی از بارهای سیکنی قرار دارد که باعث بروز پدیده خستگی در سازه می گردد. 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 جوش کاری انجام شده است.

##### 2- سنسور فشار

برای اندازه گیری فشار از سنسورهای پیزوالکتریک 1000 بار مدل کیستلر<sup>4</sup> 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 مورد نظر در شکل 1 را در نقاط خاصی مته سوراخ می شود این نقاط با توجه به این که از نظر بررسی فشار تا چه



Fig. 1 Vessel model

شکل 1 مدل مخزن

55 درجه بهینه ترین 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 کنگی شناخته شده مانند ژئودزیک و بیضوی را مورد بررسی قرار داده اند در این تحقیق نتیجه گیری شده است که زاویه پیچش 9 درجه بهترین عملکرد را دارد. همچنین کنگی بیضوی عموماً عملکرد ضعیف تری نسبت به انواع کنگی ژئودزیک دارد. محمد صبور و همکاران [25] بر روی طراحی مخازن نیمه کامپوزیت با استفاده از روش فازی (روش غیر منظم ایف) و المان محدود مورد بررسی قرار داده اند. آن ها با این روش از سه نوع ایف کربن، کولار و شیشه استفاده کرده اند و با استفاده از این روش توانسته اند ثابت کنند که ایف کربن از ایف های دیگر دارای مقاومت بالاتر و همچنین وزن مخزن بهینه تر خواهد داشت. عزیز اوند و همکاران [26] زاویه مطلوب ایف در مخازن کامپوزیتی تحت فشار را مورد بررسی قرار داده اند. آن ها در پنج زاویه ایف [45/-45]، [55/-55]، [60/-60]، [75/-75] و [88/-88] مخزن را مورد تحلیل تئوری، تجربی و عددی قرار داده اند. ایف مورد بررسی آن ها ایف شیشه بوده و بار اعمالی آن ها یک بار فشار داخلی همراه با افزایش دما بوده که بهینه ترین زاویه پیچش ایف در زاویه پیچشی [55/-55] 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 امز شعاعی، محوری و محیطی ارائه شده است. بامار و همکاران [28] شبیه سازی مخزن کامپوزیتی تحت لایه های مختلف را مورد آنالیز عددی قرار داده اند. آن ها از معیار های سای-هیل، سای-وو و هاشین جهت ارزیابی کار خود استفاده کرده اند. 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 ایف کربن و لایبر 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 لایه های ایف طراحی شده است. سولایمن و همکاران [31] آنالیز شکست مخازن آلومینیم تقویت شده با کامپوزیت مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق ایف گرافیت و شیشه تحت زوایای 30، 45، 55، 65، 75 و 90 درجه بوسیله اپوکسی جهت تقویت مخزن استفاده شده که در نهایت بهینه ترین حالت در زاویه 55 درجه با ایف شیشه بدست آمده است. دنگ و همکاران [32] با روش المان محدود، مخازن کامپوزیت استوانه ای 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 ایف کربن و اپوکسی را بر روش تجربی مورد تحلیل خستگی قرار داده اند. 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<sup>1</sup> تقویت شده با کامپوزیت را بر روش عددی و تحلیلی، مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق با نرم افزار آباکوس<sup>2</sup> مخزن مورد نظر مورد تحلیل قرار گرفته و با حل تحلیلی مقایسه شده است. حسینی و همکاران [35] مخازن استوانه ای با

<sup>3</sup> CNG  
<sup>4</sup> Kistler

<sup>1</sup> FGM  
<sup>2</sup> ABAQUS

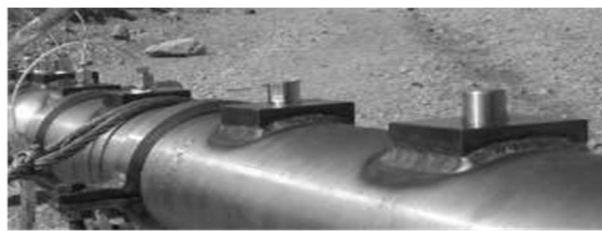


Fig. 5 The installation position of caps upon the vessel

شکل 5 موقعیت نصب درپوش‌ها بر روی مخزن



Fig. 2 Pressure sensors position

شکل 2 موقعیت سنسورهای فشار

جدول 1 موقعیت‌های نصب سنسورهای فشاری

Table 1 The installation positions of pressure sensors

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

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 کابل‌های 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. شکل 10 یک نمونه از این درپوش را نشان می‌دهد. برای ثبت نتایج از سنسورهای پیزوالکتریک 1000 بار مدل کیستلر<sup>1</sup> محصول کشور سوئیس استفاده گردیده است. کابل‌های ده متری نوین پایین اطلاعات را از سنسورها به شارژر آمپلی-فایر مدل 5015A100 (از شرکت مذکور) متصل می‌کند. شارژر آمپلی‌فایرها نیز توسط کابل‌های کوکاسیال به سیستم دیتالاگرا متصل می‌گردد تا اندازه-گیری‌های مربوط به فشار- زمان توسط کامپیوتر ذخیره گردد.

اندازه دارای اهمیت می‌باشد انتخاب خواهد شد. پس از این مرحله قطعات تقویتی اتصال رابط (شکل 3) به نقاط سوراخ شده با جوش آرگون جوش کاری می‌شود. پس از این مرحله سنسور و کابل‌های مربوطه به قطعات تقویتی بر روی مخزن با اتصال پیچ و رزوه به هم متصل می‌شود (شکل 4). 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 (شکل 5). وضعیت قرار گیری و چیدمان سنسورها در شکل 6 و جدول 1 نشان داده شده است.



Fig. 3 Pieces of reinforcement

شکل 3 قطعات تقویتی



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

شکل 4 نحوه نصب آداپتور، سنسور و کابل‌های رابط

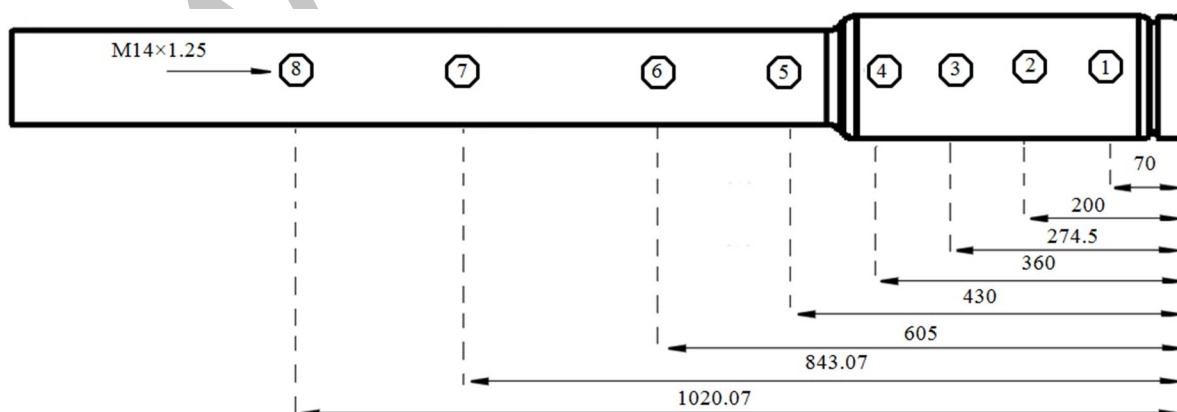


Fig. 6 Vessel schematic and the arrangement position of pressure sensors (dimensions in mm) (numbered points show the arrangement of sensors)

شکل 6 شماتیک مخزن و نحوه قرار گیری سنسورهای فشاری ابعاد به میلیمتر می باشد. (نقاط شماره گذاری شده ترتیب قرار گیری سنسورها می باشد)

<sup>1</sup> Kistler

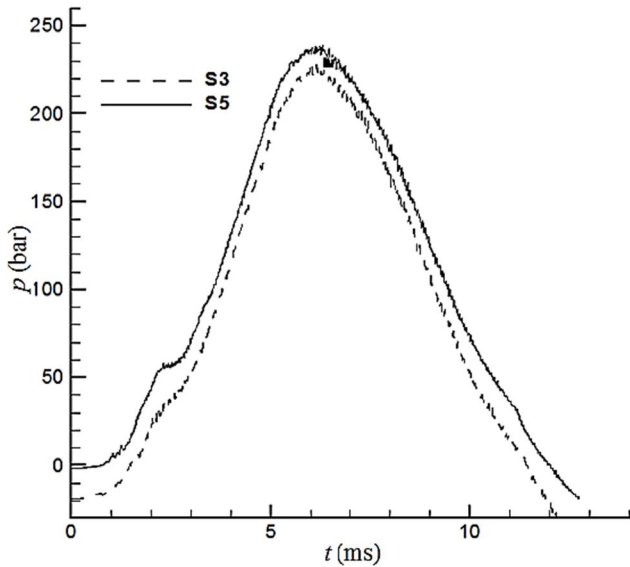


Fig. 11 Pressure – time diagram of experiment # 1  
شکل 11 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 1

(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.

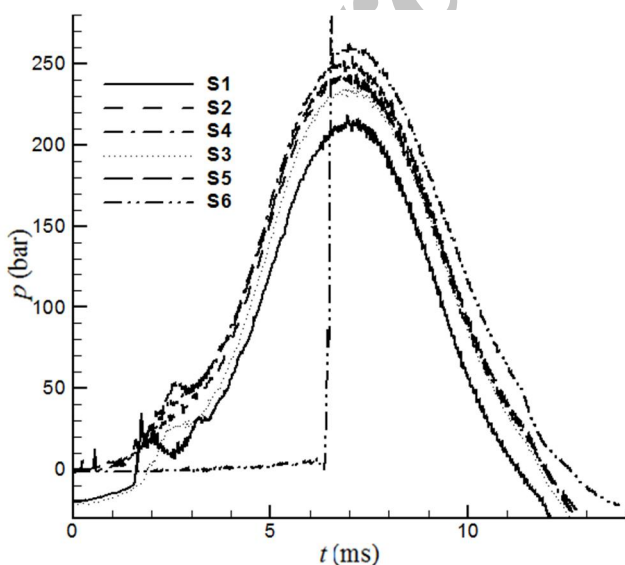


Fig. 12 Pressure – time diagram of experiment # 2  
شکل 12 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 2

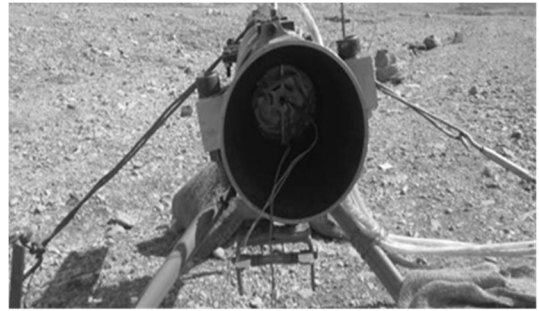


Fig. 7 Vessel harnessing method in the test

شکل 7 نحوه مهار مخزن در هنگام آزمایش



Fig. 8 Fuel package with end cap

شکل 8 پکیج سوخت به همراه درپوش انتهایی



Fig. 9 Installation and placement of fuel

شکل 9 نحوه نصب و جاگذاری سوخت

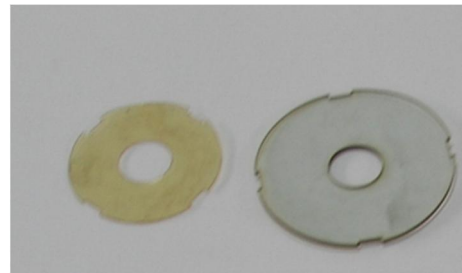


Fig. 10 A sample of fuel lid

شکل 10 یک 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 می‌دهند. شکل 11 نمودار فشار زمان این دو سنسور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود فشار از نقطه صفر که فشار کالیبره شده اتمسفر می‌باشد شروع شده و با شیب نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد. بعد از 2 میلی ثانیه، فشار محفظه احتراق به مقدار 50 بار می‌رسد. با تمام شدن سوزش ماده منفجره در زمان 6 میلی ثانیه مقدار فشار در قسمت وسط محفظه

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. همان طور که در این شکل مشاهده می شود تمامی سنسورها با اندکی تفاوت دارای رفتار مشابه آزمایش 3 می باشد. از مقایسه نمودار سنسورهای شماره 6، 7 و 8 این آزمایش با آزمایش 3 می توان گفت که فقط تفاوت در زمان رسیدن موج شاک می باشد که در آزمایش 3 در زمان های 7.5، 9.5 و 10.5 میلی ثانیه موج شاک به این سنسورها رسیده ولی در این آزمایش در زمان های 8.5، 10.5 و 11.5 میلی ثانیه می باشد تفاوت دیگری که در مقایسه این نمودارها مشاهده می شود مقدار بیشینه فشار می باشد که فقط در سنسور شماره 6 مقدار آن در دو آزمایش متفاوت می باشد که این اختلاف ها 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.

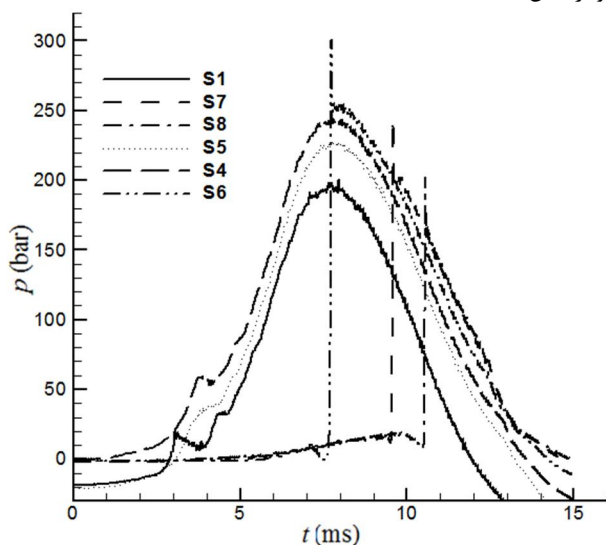


Fig. 13 Pressure – time diagram of experiment # 3

شکل 13 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 3

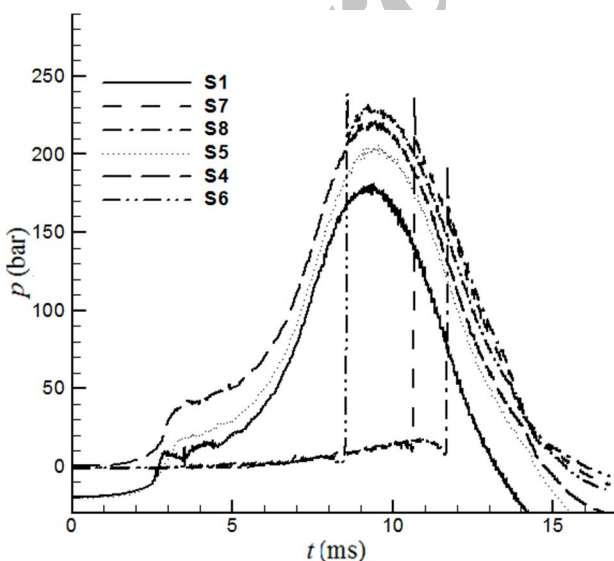


Fig. 14 Pressure – time diagram of experiment # 4

شکل 14 نمودار فشار-زمان آزمایش شماره 4

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 می باشد. در 4 سنسور بعدی همانند آزمایش 1 مراحل افزایش و کاهش نمودار فشار - زمان تکرار می شود. با حرکت گازهای محفظه احتراق به سمت جلو مخزن در زمان 6.5 میلی ثانیه 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 می گردد. 280 بار بیشینه فشار ثبت شده می باشد که دلیل نوسان آنرا می توان 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 می یابد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود سنسورهای 1، 4، 5 و 6 مانند آزمایش 1 دارای رفتار مشابه می باشد و نشان می دهد رفتار فشار مخزن تکرار پذیر می باشد. اما نکته ای 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 به دلیل 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 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 آزمایش های 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 می دهد. 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 می توان گرفت اول این که 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 7.5 میلی 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

#### 4- تحلیل عددی

##### 4-1- مدل هندسی مخزن

برای المان بندی لاینر فلزی و همچنین پوشش کامپوزیتی از المان 4 گرهی شل<sup>2</sup> به تعداد 6563 المان استفاده شده است. نرم افزار آباکوس کاربر را برای انتخاب نوع المان، با یک مجموعه بزرگ از المان ها با قابلیت های مختلف روبرو نمی کند، بلکه تعداد محدودی و در برخی کاربردها تنها یک المان متناسب با زمینه انجام تحلیل در اختیار می گذارد و به طور خودکار، قابلیت های المان را با ویژگی هایی که کاربر در بخش های مختلف مدل سازی مانند تعریف خواص ماده، نوع بارگذاری و ... تعیین نموده است، منطبق می کند. نمایی از مدل مش بندی شده مخزن توسط المان های مذکور در شکل 16 دیده می شود.

##### 4-2-3- 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 می کند به همین دلیل در این پژوهش یکی از پارامتر های طراحی زاویه پیچش کامپوزیت در نظر گرفته شده است زاویه پیچش کامپوزیت زاویه ای است که الیاف کامپوزیت با محور مخزن می سازد و در لایه های مختلف می تواند مقادیر مختلفی در نظر گرفته شود. در شکل 17 زاویه پیچش لایه های 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

مقدار	کمیت
210	مدول یانگ E (GPa)
0.3	ضریب پواسون $\nu$
7800	جرم حجمی $\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
460	گرمای ویژه $cp$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
40	هدایت گرمایی $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
0.000015	ضریب انبساط گرمایی $\alpha T$ (1/K)
0.000117	ضریب انتشار گرمایی $\alpha$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )

##### 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%

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

فرم هندسی مخزن مورد مطالعه مطابق شکل 15 به صورت دو استوانه تو خالی به هم متصل شده می باشد. 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 می باشد. مدل اولیه مخزن با مشخصات ارائه شده در این بخش می باشد. با توجه به این که بهینه کردن استحکام به وزن مخزن در این تحقیق مورد نظر می باشد لذا مخزن به دو بخش لاینر فلزی و لایه کامپوزیت تقسیم بندی می شود که در ادامه به معرفی و طراحی این بخش ها پرداخته می شود.

##### 4-2- مدل فیزیکی و مکانیکی

##### 4-1-2- مدل فیزیکی و مکانیکی لاینر

در لوله مخازن تحت بار دینامیکی استفاده از آلیاژهای فولادی مورد توجه بسیاری از سازندگان می باشد. هر چند در انتخاب جنس لاینر می توان از تیتانیوم نیز بهره جست، اما فولاد به خاطر مقاومت بالایی که در برابر خوردگی و سایش دارد همچنان به عنوان جنس مناسب برای لاینرها مورد استفاده قرار می گیرد. 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<sup>1</sup> با رزین اپوکسی می باشد که مشخصات مکانیکی آن در جدول 4 بیان شده است.

##### 4-3- مدل سازی المان محدود

##### 4-1-3- المان بندی

##### جدول 2 ابعاد و اندازه مخزن مورد آزمایش

Table 2 Vessel dimensions of test

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



Fig. 15 Vessel of modeling in software

شکل 15 مخزن مدل سازی شده در نرم افزار

<sup>2</sup>Shell (S4R)

<sup>1</sup>T700

3-3-4- بارگذاری و شرایط مرزی

1-3-3-4- 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 شکل‌ها که حاصل یک بار فشاری ضربه‌ای و داخلی می‌باشد بصورت یک بار دینامیکی به مدل در نرم افزار المان محدود آباکوس اعمال شده است.

2-3-3-4- شرایط مرزی

در تحلیل فشار به دلیل تقارن مدل تنها شرط مرزی در نقطه اتصال مخزن به بدنه می‌باشد به صورتی که از جا به جایی 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.

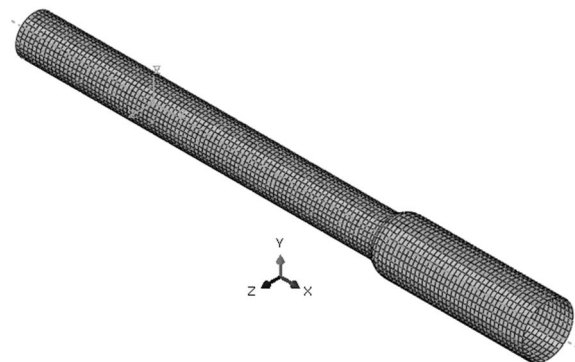


Fig. 16 Vessel meshed model

شکل 16 مدل مش بندی شده مخزن

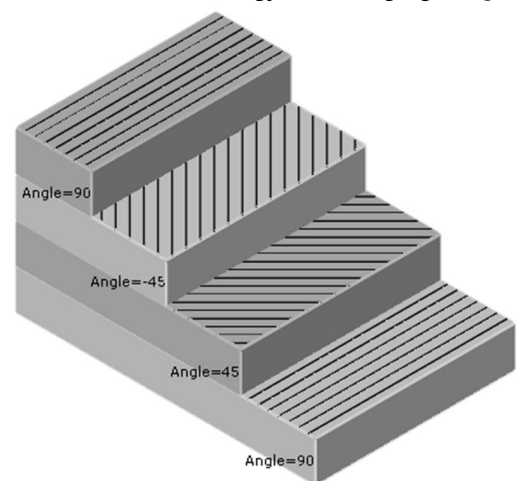


Fig. 17 Composite torsion angle in mode (90,+45,-45,90)

شکل 17 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)
فولاد	5.5	512 433	2.34	16.96

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 می‌دهد. 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 تنش‌های 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 می‌شود در مدل شماره 18 بهترین ضریب اطمینان و کمترین وزن را در بین مدل‌ها دارا می‌باشد لازم بذکر است که ضرایب اطمینان مدل‌ها 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 می‌باشد 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 لایه‌ها در زیر بار، مناسب نمی‌باشد [38] لذا مدل 24 با توضیحاتی که داده شد به عنوان بهترین حالت طراحی انتخاب می‌شود.

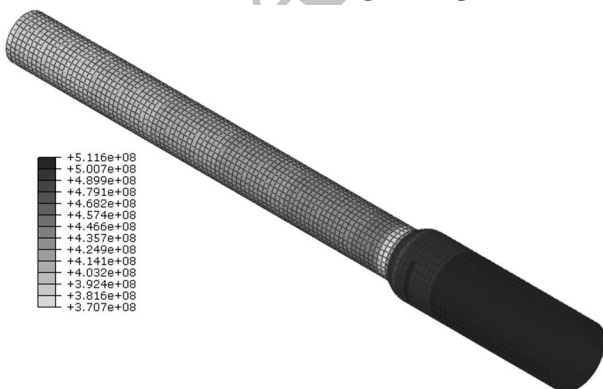


Fig. 18 Von Mises stress of metal vessel caused by pressure load at the time of 7 milliseconds per unit Pascal

شکل 18 تنش ون میسز مخزن تمام فلزی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال



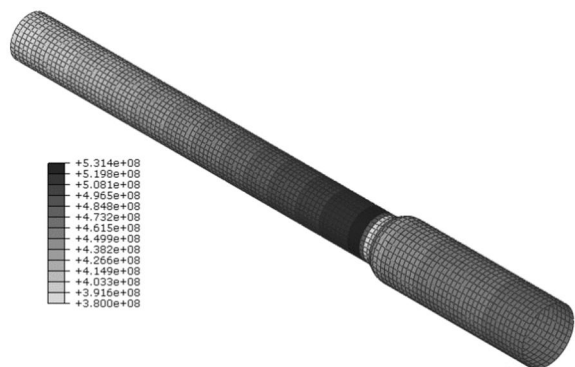
جدول 6 نتایج تحلیل تنش برای حالت‌های مختلف از زاویه پیچش کامپوزیت، ضخامت لاینر و ضخامت کامپوزیت

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

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

همان طور که در جدول 6 مشاهده می شود تنش بیشینه در قسمت مخزن 2 و در لاینر اتفاق می افتد با در نظر گرفتن استحکام تسلیم فولاد (1200 مگاپاسکال برای فولاد 4340) ضریب اطمینان مخزن برابر 2.29 به دست می آید. وزن مخزن در این حالت برابر 8.86 کیلوگرم می باشد که در مقایسه با وزن مخزن نمونه فلزی که 16.96 کیلوگرم می باشد 8.86 کیلوگرم کاهش وزن داشته که در حدود 48 درصد کاهش داشته است.

همان طور که در جدول 6 مشاهده می شود تنش بیشینه در قسمت مخزن 2 و در لاینر اتفاق می افتد با در نظر گرفتن استحکام تسلیم فولاد (1200 مگاپاسکال برای فولاد 4340) ضریب اطمینان مخزن برابر 2.29 به دست می آید. وزن مخزن در این حالت برابر 8.86 کیلوگرم می باشد که در مقایسه با وزن مخزن نمونه فلزی که 16.96 کیلوگرم می باشد 8.86 کیلوگرم کاهش وزن داشته که در حدود 48 درصد کاهش داشته است.

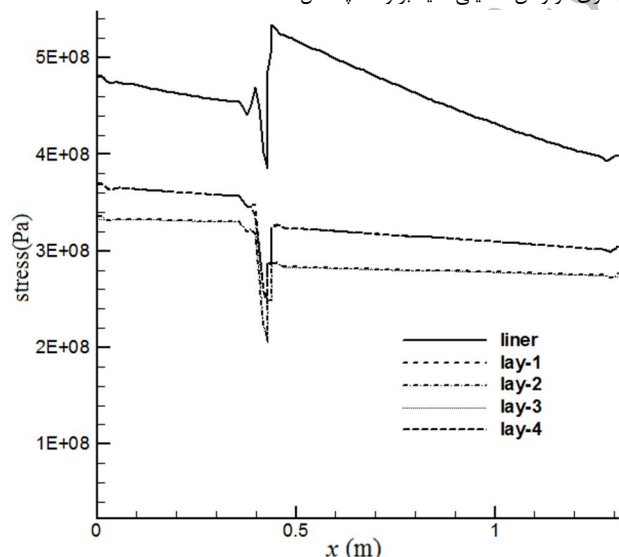


**Fig. 20** Von Mises stress of liner vessel selected model caused by pressure load at the time of 7 milliseconds per unit Pascal  
 شکل 20 تنش ون میسز لاینر مخزن مدل انتخابی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال



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

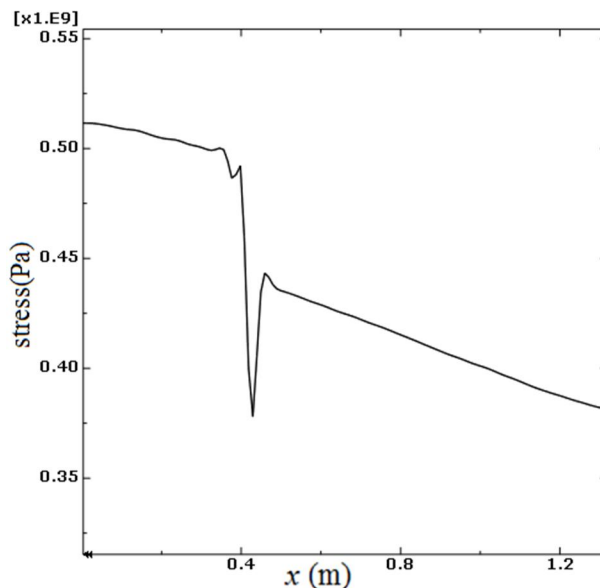
شکل 21 تنش ون میسز در پوشش کامپوزیتی مخزن مدل انتخابی حاصل از بار فشاری در زمان 7 میلی ثانیه بر واحد پاسکال



**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 سنسورهای 1، 2، 3، 4، 5 و 6، آزمایش



**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 شکل های 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. همان طور 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 لایه های مختلف مخزن را نشان می دهد مطابق این شکل تنش در لاینر از تمام لایه ها بیشتر می باشد همچنین مقدار تنش در لایه های اول و آخر کامپوزیت تقریباً دارای مقدار تنش یکسانی بوده و نسبت به لایه های دیگر دارای مقدار بیشتری می باشد نحوه رفتار موج تنش در لاینر بدلیل فلزی بودن در نقطه تغییر مقطع دارای نوسانی متفاوت نسبت به لایه های 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 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 اصلی ترین قسمت در طراحی مطرح می باشد 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 می گردد. وظیفه اصلی این محفظه تحمل فشار و دمای بالای ناشی از احتراق مواد ناریه می باشد. لذا در این تحقیق، تحلیل تجربی و عددی یک مخزن چند تکه مورد بررسی قرار گرفت.

- process for shells containing 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, *Journal 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 deformation 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. Reeddal, 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*, Esfahan, Iran, 2005. (in Persian فارسی)
- [11] N. Dshteyan Gerami, H. Khodarahmi, A. M. Mirjalili, Numerical simulation and investigation transient theoretical 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. Vafaisfat, D. Arozomandi, M. Shahabi, Use of genetic algoritrm for optimization of composit plan lamina under subwatering explosive Loading with abaqus and matlab, *Proceedings of The 17th International Conference Mechanical Engineering*, Asfahan, Iran, 2009. (in Persian فارسی)
- [21] Z. Ximei, W. Yonghui, Modelling and dynamic response of steel

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 پیش 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 آزمایش های تجربی انجام شده در این تحقیق بوده که بصورت یک بار دینامیکی جهت تحلیل عددی با نرم افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. برای به دست آوردن بهترین ضخامت پوشش کامپوزیتی و زاویه پیش الیاف به روش سعی و خطا در مجموع 24 مدل با ابعاد و زاویه های مختلف ایجاد و تحلیل شد، از بین این مدل ها، یک مدل به عنوان مدل طراحی که در آن بهینه ترین حالت برای وزن، استحکام و سایر ملاحظات مخازن فلز کامپوزیت معرفی گردید در طراحی صورت گرفته ضخامت لاینر در قسمت مخزن 1 و مخزن 2 به ترتیب برابر 2 میلی متر و 1.5 میلی متر و ضخامت پوشش کامپوزیتی در طول هر دو مخزن برابر 4.5 میلی متر به دست آمد با مقایسه زوایای پیش کامپوزیت در حالت های مختلف بهترین حالت پیش برای این مخزن بصورت زوایای پیش (90,+75,-75,90) با ضخامت لایه (1.5,0.5,0.5,2) میلی متر 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

- 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.
- 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: Engineering, 3th Edition, 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 University*, 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. HAamdani, 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

Archive of SID