



## شبیه‌سازی و تحلیل مخازن گاز طبیعی فشرده نوع اول تا چهارم خودروها تحت اثر بارگذاری انفجاری

علیرضا آلبویه<sup>\*</sup>، شهرام امیرعبدالهیان<sup>۲</sup>، نیما فتاحی<sup>۱</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

### کلمات کلیدی:

مخزن گاز طبیعی فشرده

مخزن کامپوزیتی

انفجار

معیار شکست جانسون - کوک

معیار شکست هاشین

**خلاصه:** در پژوهش حاضر به بررسی رفتار مخازن گاز طبیعی فشرده نوع اول تا چهارم خودروها تحت اثر فشار داخلی و بار انفجاری خارجی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس پرداخته شد. ابتدا، به منظور اطمینان از عدم گسیختگی این مخازن تحت فشار داخلی، فشارهیدرواستاتیک ۲۰۰ بار به آن‌ها اعمال شد و میزان شاخص شکست این مخازن با استفاده از معیار سای - هیل مورد بررسی قرار گرفت. سپس، جهت ارزیابی رفتار مخازن تحت بار انفجاری خارجی، مدل کانوپ مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، از ماده تری‌نیتروتولون در دو نقطه انفجاری (نزدیک و دور) و سه مقدار خرج انفجار مختلف استفاده شد. در شبیه‌سازی انفجار، مقدار آسیب وارد به ناحیه فلزی و کامپوزیتی مخازن به ترتیب با استفاده از معیار جانسون - کوک و هاشین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد، مخزن نوع چهارم نسبت به مخازن دیگر بیشترین استحکام در برابر فشار هیدرواستاتیکی داخلی را دارد و می‌تواند تا فشار ۶۱۰ بار را تحمل کند. بعلاوه، مخزن نوع سوم بالاترین ایمنی را در مقابل موج انفجار خارجی دارد. مقایسه نتایج مربوط به مخازن کامپوزیتی نوع دوم تا چهارم نشان می‌دهد، وجود آستر فولادی در زیر لایه کامپوزیتی تأثیر بسزایی در استحکام مخزن در مقابل ضربه یا انفجار دارد. از نتایج مهم دیگر بدست آمده این است که مخزن نوع اول علیرغم وزن بالا مقاومت خوبی در مقابل فشار داخلی و همچنین موج انفجار دارد.

### ۱- مقدمه

مخازن تحت فشار یکی از تجهیزات بالقوه خطرآفرین هستند که ایمنی آن‌ها بسیار مهم و ضروری است. حوادثی که در سراسر جهان ناشی از انفجار مخازن تحت فشار صورت می‌گیرد منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی می‌گردد [۱]. با توجه به انفجارهای اتفاق افتاده در مخازن خودروهای گازسوز، مطالعات مربوط به شبیه‌سازی بار ضربه و انفجار در این تجهیزات و چگونگی مستحکم‌سازی آن‌ها در برابر این نوع بارگذاری خاص، اهمیت و گسترش بیشتری یافته است. گاز طبیعی فشرده با فشار حدود ۲۰۰ بار در مخازن ذخیره گاز طبیعی در خودروهای گازسوز که مهم‌ترین جزء سیستم سوخت‌رسانی هستند، ذخیره می‌شود و در صورتیکه نکات ایمنی در طراحی و ساخت این مخازن به دقت مورد توجه قرار نگیرد، در اثر یک ضربه قابلیت انفجار و اشتعال را دارا هستند [۲]. بنابراین طراحی مناسب، ساخت و کنترل دقیق، کیفیت حمل و نقل و چگونگی به‌کارگیری این مخازن معمولاً توسط استانداردها و مقررات سختگیرانه‌ای انجام می‌شود. از طرف دیگر، با توجه

به اینکه، مخازن تحت فشار در بخش‌های عمومی و صنعتی مختلف به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، طراحی و ساخت مخازن ذکر شده باید به گونه‌ای باشد که توانایی مقاومت در برابر بارگذاری‌های مختلف شامل فشار داخلی، فشار خارجی و یا خلاء داخلی را نیز دارا باشند [۲]. امروزه در ساخت مخازن گاز طبیعی فشرده (سی‌ان‌جی<sup>۱</sup>) نسل جدید، از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیاز، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل کرد. بعلاوه، کامپوزیت‌ها دارای مقاومت خوردگی بسیار بالا، وزن اندک و استحکام ویژه بالا در مقایسه با فلزات هستند و با توجه به جنس آستر، نوع رزین و الیاف مصرفی می‌توانند شرایط فشار و خلأ متفاوتی را تحمل کنند [۳].

یکی از روش‌های علمی و معتبر جهت پیش‌بینی چگونگی وقوع حوادث و پیامدهای آن‌ها، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در مدیریت شرایط اضطراری و مدیریت بحران است. بررسی آزمایشگاهی انفجار، روشی مناسب ولی در عین حال پرهزینه است، به همین خاطر شبیه‌سازی انفجار به روش

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.albooyeh@du.ac.ir

1 Compressed Natural Gas (CNG)

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



اجزای محدود، روشی بسیار پرکاربرد و مقرون به صرفه می‌باشد.

پژوهش‌های متعددی در حوزه انفجار مخازن جدار نازک و پوسته‌های کامپوزیتی و چندلایه انجام شده است. ردی [۴] تأثیر بارگذاری فشار ناگهانی بر روی پوسته‌ی کامپوزیتی از جنس شیشه - اپوکسی غوطه‌ور در آب را با استفاده از تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار داد. رفیعی و ترابی [۵]، به پیش‌بینی فشار انفجاری مخازن تحت فشار کامپوزیتی (با آستر و بدون آستر) در معرض فشار داخلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید پرداختند و نشان دادند، معیارهای شکست هاشین<sup>۱</sup> و تنش ماکزیمم<sup>۲</sup> انفجار را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کنند. کارنال [۶] با هدف برآورد فشارهای انفجاری و افزایش حجم دائمی مخازن نگه‌دارنده گاز مایع (ال‌پی‌جی)، از روش تجربی و تحلیل اجزای محدود استفاده نمود و نتایج حاصل از فشار انفجار و افزایش حجم مخزن را با نتایج تجربی مقایسه کرد. اردیک [۷] با در نظر گرفتن این موضوع که انفجار مین ضد تانک یا مواد منفجره باعث ایجاد موج شوک شده و آسیب شدید به وسیله نقلیه و پرسنل آن وارد می‌کند به مطالعه تجربی و عددی تأثیر بار انفجار بر روی پوسته V شکل یک وسیله نقلیه نظامی پرداخت و برای راستی‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی عددی، از آزمایش انفجار بهره برد. همچنین، لی و همکاران [۸] یک مدل عددی برای بررسی واکنش و آسیب ورق کامپوزیتی شیشه - اپوکسی که در معرض بار انفجار و ضربه بود را ارائه دادند. آن‌ها برای این تحلیل سه حالت مختلف بارگذاری شامل بارگذاری توسط ضربه قطعه آلومینیومی، بارگذاری انفجار و ترکیب بارگذاری انفجار و ضربه را در نظر گرفتند و با مقایسه انرژی جذب شده و ناحیه آسیب دیده در ورق نشان دادند که حالت آسیب ورق با نوع بارگذاری ارتباط دارد. گارگانو و همکاران [۹] با استفاده از روش اجزای محدود به تحلیل واکنش دینامیکی ورق‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تحت موج شوک ایجاد شده توسط بار انفجار در هوا پرداختند. آن‌ها از یک مدل اجزای محدود که می‌توانست شروع ترک خوردگی و پارگی لایه‌ها را پیش‌بینی کند، استفاده نمودند و نتایج حاصل را با مقایسه با داده‌های تجربی اعتبارسنجی کردند. هانگزو کائو و همکاران [۱۰] با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های عددی، اثر انفجار بر روی استحکام لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار دادند و میزان انحراف، تنش و کرنش لوله‌ی کامپوزیتی را تحت اثر بار انفجار بسیار بالا بررسی نمودند. در تحقیقاتی دیگر، حاتمی و همکاران [۱۱-۱۳] به بررسی آزمایشگاهی و المان محدود اثرات بارگذاری ضربه‌ای بر صفحات کامپوزیتی، ورق‌های آلومینیومی

- 1 Hashin damage criteria
- 2 Maximum Stress criteria

یک‌لایه و دولایه و ورق‌های فولادی انحنادار در شرایط گوناگون بار و لایه‌چینی مختلف پرداختند. همچنین در تحقیقی دیگر حاتمی و شریعتی [۱۴] به بررسی عددی و تجربی پوسته استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای تک محوری پرداختند.

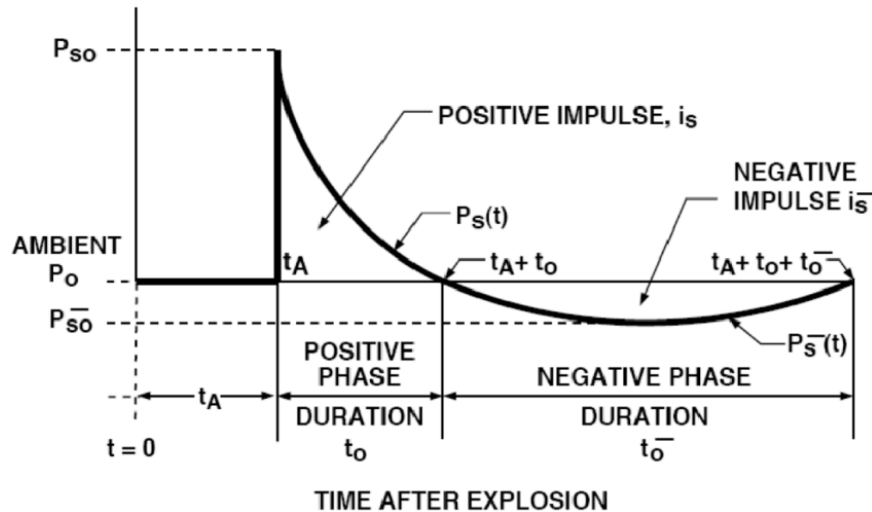
با مروری بر پژوهش‌های پیشین ملاحظه می‌شود که تاکنون مطالعه‌ای پیرامون بررسی عملکرد مخازن سی‌ان‌جی در معرض بارگذاری انفجار خارجی و همچنین مقایسه خواص هر چهار نوع مخزن سی‌ان‌جی تحت این بارگذاری صورت نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر به شبیه‌سازی اجزای محدود رفتار مخازن و بررسی آسیب ناشی از انفجار خارجی در چهار نوع مخزن سی‌ان‌جی مورد استفاده در خودروها پرداخته شد و استحکام و مقاومت این مخازن تحت بار دینامیکی گذرا مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی انفجار خارجی با استفاده از ماده منجره تری‌نیتروتولوئن (تی‌ان‌تی<sup>۳</sup>) در دو نقطه انفجاری (نزدیک و دور) و سه مقدار مختلف خرج انفجار انجام شد.

## ۲- مبانی تئوری

### انواع مخزن تحت فشار سی‌ان‌جی

بطور کلی مخازن سی‌ان‌جی به چهار نوع مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. الف) مخازن تمام فلزی، ب) مخازن کمرپیچ کامپوزیتی با آستر فلزی، ج) مخازن تمام پیچ کامپوزیتی با آستر فلزی و د) مخازن تمام کامپوزیتی. مخازن نوع اول بدون درز و از جنس فولاد یا آلومینیوم هستند. این مخازن مقاومت و استحکام بسیار خوبی در مقابل ضربه، انفجار و فشار داخلی دارند. با توجه به اینکه هزینه ساخت و تولید این مخازن پایین است، در خودروهای سواری معمولاً از مخازن فولادی استفاده می‌شود. مخازن نوع دوم دارای یک لایه آستری از جنس آلومینیوم یا فولاد بدون درز هستند و قسمت استوانه‌ای این آستر، توسط کامپوزیت الیاف کربن - اپوکسی به صورت محیطی پیچیده شده است. این مخازن در جهت شعاعی به‌جز در دو انتها تقویت شده‌اند. مخازن نوع سوم دارای یک لایه آستر از جنس فولاد یا آلومینیوم بدون درز بوده و تمام این لایه توسط کامپوزیت الیاف کربن - اپوکسی، در راستای محیطی و محوری پیچیده شده است. این ساختار کامپوزیتی این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان از ضخامت قسمت فلزی کاست و مخزنی با وزن کمتر نسبت به مخازن نوع اول و دوم به دست آورد. مخازن نوع چهارم تماماً از کامپوزیت تشکیل شده‌اند. تمام لایه‌های این نوع مخازن توسط کامپوزیت الیاف کربن - اپوکسی پیچیده شده است و این ساختار تمام کامپوزیت، از سبک‌ترین انواع مخازن سی‌ان‌جی است [۱۵].

3 Trinitrotoluene (TNT)



شکل ۱. تغییرات نمودار فشار - زمان در هوا [۱۶]

Fig. 1. Pressure -time diagram changes in the air [16]

نظر اندکی کمتر از فشار محیط می‌شود و پس از گذشت زمان، فشار نقطه مورد نظر به فشار محیط می‌رسد. به این بخش از منحنی نیز فاز منفی اطلاق می‌شود. فشار ماکزیمم در یک نقطه خاص که فاصله‌اش از مرکز انفجار برابر  $R$  باشد، با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۶].

$$P_{max} = \begin{cases} \frac{6.7}{Z^3} + 1 & : P_{max} > 10 \text{ kg/cm}^2 \\ \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 & : 0.1 < P_{max} < 10 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (1)$$

که  $Z$  فاصله مقیاس شده می‌باشد و از رابطه (۲) تعیین می‌شود که در این رابطه  $W$  وزن معادل ماده منفجره می‌باشد.

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

#### معیار شکست جانسون - کوک<sup>۴</sup> و معادلات حاکم

زمانی که دما و سرعت تغییر شکل در قطعه قابل توجه باشد، تنش لازم برای اعمال یک مقدار مشخص کرنش وابسته به دمای قطعه و نرخ کرنش

#### مدل سازی انفجار با موج تصادفی<sup>۱</sup>

در این پژوهش از مدل کانوپ<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی اثر انفجار استفاده شده است. این مدل نمودار اعمال فشار بر حسب زمان را مطابق شکل ۱ برای نقاط مختلف ایجاد می‌کند و فشار را بر روی سطوح سازه‌های اطراف مرکز انفجار، اعمال می‌کند. در این مدل زمانی که یک انفجار در هوا به وقوع می‌پیوندد، یک توده بسیار بزرگ از هوای فشرده و داغ تشکیل می‌شود. این هوای فشرده، در هوای محیط بیرون، تولید یک موج شوک به سمت بیرون از نقطه انفجار می‌کند. این موج شوک به صورت کروی از مرکز انفجار انتشار می‌یابد و سبب اعمال نیروی زیادی بر اجسام اطراف خود می‌شود. این نیرو اصطلاحاً انفجار هوایی<sup>۳</sup> و امواج حاصله نیز امواج انفجار نامیده می‌شوند [۱۶].

در شکل ۱ زمان رسیدن موج انفجار به یک نقطه دلخواه به فاصله  $R$  با  $t_A$  نشان داده شده است. پس از این که موج به این نقطه رسید، فشار آن نقطه از مقدار فشار محیط به سرعت تا مقدار فشار ماکزیمم افزایش می‌یابد، سپس این فشار به صورت یک تابع نمایی با زمان کاهش می‌یابد تا به فشار محیط برسد. این قسمت از نمودار فشار - زمان، فاز مثبت نامیده می‌شود و طول بازه زمانی آن با  $T_o$  نشان داده شده است. پس از آن به دلیل افت فشار در مرکز انفجار، هوا به سمت مرکز انفجار کشیده می‌شود و فشار نقطه مورد

- 1 Incident Wave
- 2 CONWEP
- 3 Air blast

$$F_m^t = \left( \frac{\sigma_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (7)$$

$$F_m^c = \left( \frac{\sigma_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left( \frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (8)$$

در روابط فوق  $F_f^c$  و  $F_f^t$  شاخص شکست یلیاف در کشش و فشار هستند و  $F_m^c$  و  $F_m^t$  نشان‌دهنده شاخص شکست ماتریس (رزین) در کشش و فشار می‌باشند. همچنین  $Y^C$ ،  $Y^T$ ،  $X^C$ ،  $X^T$  به ترتیب استحکام کششی در راستای یلیاف، استحکام فشاری در راستای یلیاف، استحکام کششی در راستای عمود بر یلیاف و استحکام فشاری در راستای عمود بر یلیاف هستند. به علاوه  $S^T$  و  $S^L$  استحکام برشی لایه کامپوزیت در جهت طولی و جهت عرضی هستند. ضریب  $\alpha$  نیز بیان‌گر سهم تنش برشی در شروع تسلیم شدن لایه کامپوزیتی (در حالت کششی) است که در معیار هاشین مقدار آن ۱ در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از شکست در یک لایه کامپوزیتی، در هر چهار حالت بالا بایستی  $F < 1$  باشد.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- اعتبارسنجی شبیه‌سازی بار انفجار برای مواد چند لایه

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انفجار در نرم افزار اجزای محدود آباکوس و همچنین شبیه‌سازی مواد تک لایه و چندلایه، مدلی با سه جنس مختلف و ترکیب لایه‌های متفاوت مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شد. در انجام این شبیه‌سازی از حلگر دینامیکی صریح<sup>۱</sup> استفاده شد، برای اعمال بارگذاری انفجار در نرم افزار آباکوس از مدل کانوپ و ماده تی‌ان‌تی با وزن ۱ کیلوگرم استفاده شد. تمامی مدل‌ها در فاصله ۰/۵ متری از نقطه انفجاری مقید شدند. از آنجایی‌که شرایط مرزی نسبت به دستگاه مختصات متقارن است، برای کاهش حجم محاسبات تمامی صفحات بصورت یک چهارم مدل شدند. چیدمان لایه‌ها به شکلی انجام شده است که تمام صفحات از نظر وزنی یکسان باشند. نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی با نتایج مرجع [۲۱] اعتبارسنجی شده است.

خواهد بود. این رفتار فلز در پدیده‌هایی مانند انفجار و یا برخورد با سرعت بالا باید در نظر گرفته شود [۱۶]. یکی از مدل‌هایی که خصوصاً در نرخ کرنش‌های بالا به خوبی عمل می‌کند مدل جانسون - کوک است که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۷ و ۱۸].

$$\sigma^{Pl} = \left[ A + B(\sigma^{Pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^{Pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \hat{\theta}^m \right] \quad (3)$$

که در آن  $\theta$  دمای فلز،  $\sigma^{Pl}$  تنش پلاستیک،  $\epsilon^{Pl}$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}^{Pl}$  نرخ کرنش پلاستیک و  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش مرجع می‌باشد. علاوه بر این،  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $n$  پارامترهای جانسون - کوک برای ماده هستند [۱۷ و ۱۸].

### معیار آسیب کامپوزیت‌ها و معادلات حاکم

برای تخریب مواد کامپوزیتی که رفتار ارتوتروپیک دارند، معیارهای متعددی ارائه شده است که در این پژوهش از معیارهای سای - هیل<sup>۱</sup> و هاشین استفاده می‌شود. در نرم افزار آباکوس با استفاده از معیار سای - هیل، مقدار شاخص شکست<sup>۲</sup> از رابطه (۴) بدست می‌آید [۱۹]. در صورتیکه این شاخص کمتر از ۱ باشد، گسیختگی اتفاق نمی‌افتد در غیر این صورت لایه کامپوزیتی دچار تخریب می‌شود [۱۹].

$$I_F = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} \quad (4)$$

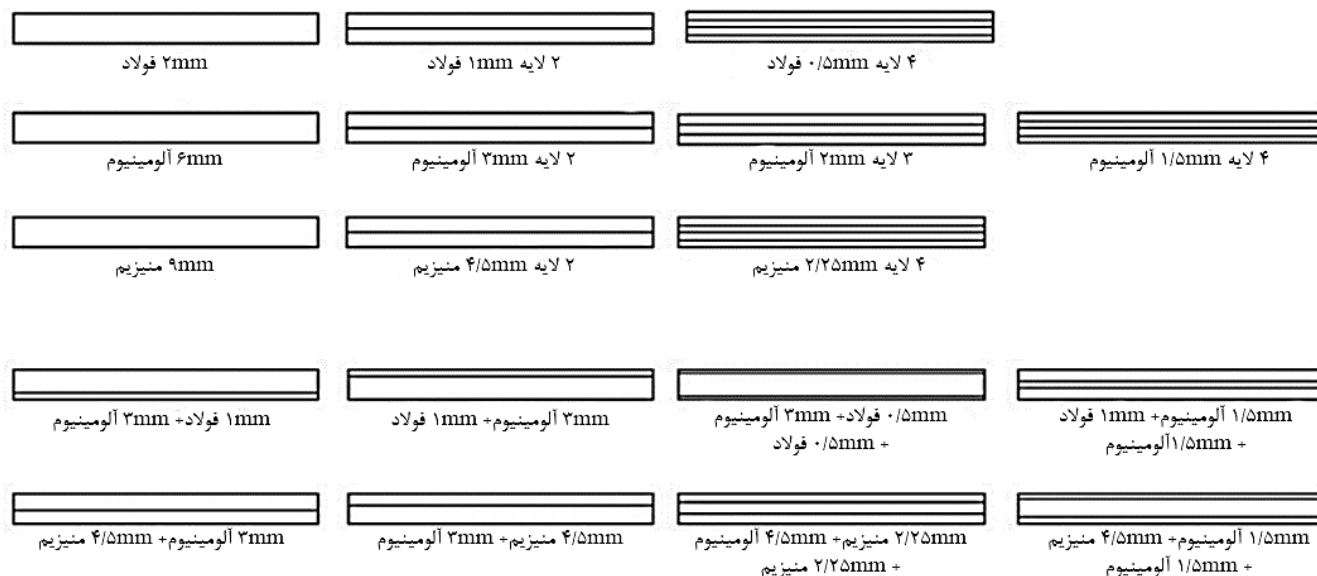
$$\begin{cases} \text{if } \sigma_{11} > 0 \text{ then } X = X_t, \text{ if } \sigma_{11} < 0 \text{ then } X = X_c \\ \text{if } \sigma_{22} > 0 \text{ then } Y = Y_t, \text{ if } \sigma_{22} < 0 \text{ then } Y = Y_c \end{cases}$$

همچنین معیار شکست هاشین در روابط (۵) تا (۸) ارائه شده‌اند.

$$F_f^t = \left( \frac{\sigma_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (5)$$

$$F_f^c = \left( \frac{\sigma_{11}}{X^C} \right)^2 \quad (6)$$

- 1 Tsai-Hill Criterion
- 2 Failure index



شکل ۲. چیدمان لایه‌ها [۲۱]

Fig. 2. The arrangement of layers [21]

مخازن تحت فشار گاز سی‌ان‌جی از نظر جنس، به چهار نوع تقسیم می‌شوند: الف) نوع اول: تمام فلزی (AISI ۴۳۴۰) ب) نوع دوم: آستر فلزی تقویت شده با کامپوزیت کربن-اپوکسی در قسمت استوانه‌ای بصورت حلقوی ج) نوع سوم: آستر فلزی تقویت شده با کامپوزیت کربن-اپوکسی بصورت کامل د) نوع چهارم: تمام کامپوزیت کربن-اپوکسی. ضخامت مخازن، ضخامت آستر فلزی، تعداد لایه و زوایه‌ی لایه استفاده شده در این پژوهش، در جدول ۲ ارائه شده است. برای محاسبه ضخامت آستر در مخازن نوع دوم و نوع سوم از رابطه تجربی (۹) استفاده شده است [۲۳].

$$t \geq \frac{D}{250} + 1 \quad (9)$$

که در این رابطه  $D$  قطر مخزن است. با توجه به اینکه قطر مخزن ۳۵۶ میلی‌متر است، حداقل ضخامت آستر ۲/۴ میلی‌متر بدست می‌آید. آن جاییکه نسبت قطر مخازن به ضخامت آن‌ها ۲۰ می‌باشد، دیواره مخزن به صورت پوسته<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده است. برای مقید نمودن مخزن از دو

۳-۲- شبیه‌سازی مخازن تحت فشار نوع اول تا چهارم تحت بار انفجار  
 ۳-۲-۱- مدل‌سازی  
 مخزن مورد مطالعه این پژوهش برای هر چهار نوع مخزن (شکل ۳)، مخزن ۷۵ لیتری با شعاع ۱۷۸ میلی‌متر و طول ۹۴۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده که تحت فشار داخلی ۲۰۰ بار قرار می‌گیرند [۲۲]. در اعتبارسنجی این شبیه‌سازی خواص الاستیک - پلاستیک مطابق با جدول ۱ برای مواد در نظر گرفته شد.



شکل ۳. مشخصات هندسی مخازن

Fig. 3. Geometry properties of tanks

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد [۲۱]

Table 1. Mechanical properties of materials [21]

خواص مواد	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ L	آلومینیوم ۶۰۶۱ O	منیزیم ۳۰ AZ
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۷۸۰۰	۲۷۰۰	۱۷۴۰
تنش تسلیم (MPa)	۱۷۰	۵۵/۲	۱۹۹
حد نهایی تنش (MPa)	۴۸۵	۱۲۴	۲۶۴
مدول الاستیک ( $\text{N/m}^2$ )	$2 \times 10^{11}$	$68 / 9 \times 10^9$	$45 \times 10^9$
ضریب پواسن	۰/۳	۰/۲۷	۰/۳۵
درصد کشیدگی	۴۰	۲۵	۱۵

جدول ۲. مشخصات لایه‌ها [۲۴-۲۶]

Table 2: Layers properties [24-26]

نوع مخزن	تعداد لایه	ضخامت هر لایه (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)	ضخامت آستر فلزی (mm)	ضخامت کل (mm)	ترتیب قرارگیری زاویای لایه‌ها (به ترتیب از چپ به راست)
نوع اول	۱	۸	-	۸	۸	[۰]
نوع دوم	۸	۰/۵	۴	۴	۸	$[90/90/90/90]_S$
نوع سوم	۸	۱/۵	۱۲	۲/۵	۱۴/۵	$[0/90/54/-67]_S$
نوع چهارم	۸	۲/۱	۱۶/۸	-	۱۶/۸	$[0/90/65/-70]_S$

کمبرند به صورت صلب<sup>۱</sup> استفاده شده است، بصورتی که مجموعه دوران‌ها و جابجایی‌ها صفر باشد.

### ۳-۲-۲- خواص مواد

همانطور که ذکر شد جنس آستر مخازن نوع اول تا نوع سوم از فولاد AISI ۴۳۴۰ و جنس لایه‌های کامپوزیت از ماده کربن - اپوکسی است. خواص مکانیکی فولاد و ثوابت مدل جانسون-کوک را در جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد. همچنین پارامترهای هاشین و خواص مکانیکی کامپوزیت کربن - اپوکسی در جدول ۴ ارائه شده است.

### ۳-۲-۳- نوع تحلیل

در مخازن تحت فشار، جداره مخزن تحت فشار استاتیکی قرار دارد. لذا به منظور اطمینان از عدم گسیختگی این مخازن در فشار داخلی، مخازن، تحت فشار هیدرواستاتیک ۲۰۰ بار تحلیل شدند و میزان شاخص شکست مخازن مورد مقایسه قرار گرفت. سپس با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح اثر انفجار بر روی مخازن با فشار داخلی ۲۰۰ بار برای دو فاصله انفجاری ۳۰ و ۸۰ سانتی‌متر انجام شد. برای شبیه‌سازی بار انفجار، از مدل انفجار کانوپ با مقادیر ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی استفاده شد (شکل ۴). برای مدل‌سازی مخازن از المان S۴R با سایز ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. همچنین کمربندها بصورت صلب با المان R۳D<sup>۴</sup> مدل‌سازی شدند.

1 Rigid

جدول ۳. خواص مکانیکی فولاد و ثوابت جانسون-کوک [۲۴]

Table 3. Mechanical properties of steel and Johnson-Cook constants [24]

$E$ (GPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	$C_y$ (J/kg.K)	$T_m$ (K)	$T_c$ (K)
۲۰۰	۰/۲۹	۷۸۳۰	۴۷۷	۱۷۹۳	۲۹۳
$\alpha$ (K <sup>-۱</sup> )	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$\dot{\epsilon}_c$ (s <sup>-۱</sup> )	$C$	$m$
۰/۰۰۰۰۳۲	۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$n$
۰/۰۵	۳/۴۴	-۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۶۱	۰/۲۶

جدول ۴. پارامترهای هاشین و خواص مکانیکی کامپوزیت کربن-اپوکسی [۲۷]

Table 4: Hashin parameters and mechanical properties of carbon-epoxy composite [27]

۱۶۰۰	چگالی (kg / m <sup>۳</sup> )
$E_1^T = ۱۵۳ \text{ GPa}; E_2^T = E_3^T = ۱۰/۳ \text{ GPa}$ $\nu_{12} = \nu_{13} = ۰/۳; \nu_{23} = ۰/۴$	خواص ارتوتروپیک
$G_{12}^T = G_{13}^T = ۶ \text{ GPa}; G_{23}^T = ۳/۷ \text{ GPa}$	
$X^T = ۲۵۳۷; X^C = ۱۵۸۰; Y^T = ۸۲$ $Y^C = ۲۳۶; S_{12} = ۹۰; S_{23} = ۴۰$	استحکام (MPa)
$G_{1C}^T = ۹۱/۶; G_{1C}^C = ۷۹.۹; G_{2C}^T = ۰/۲۲$ $G_{2C}^C = ۱/۱; G_S = ۰/۷$	چقرمگی شکست در سطح (kJ/m <sup>۲</sup> )

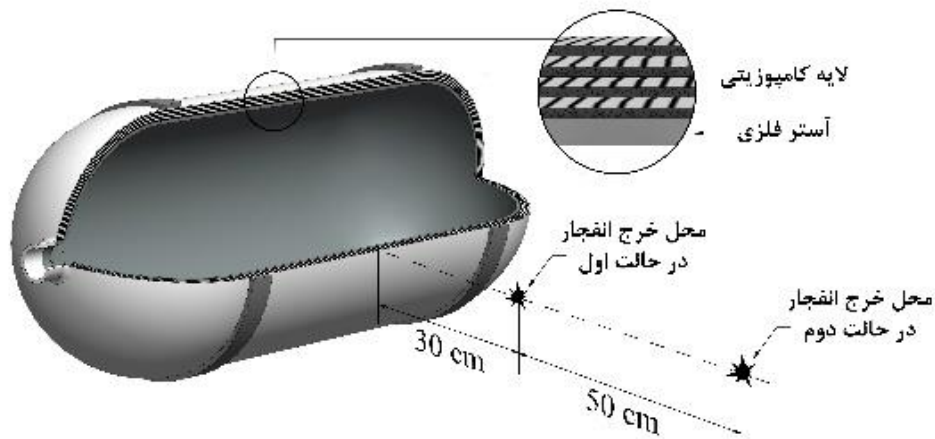
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی بار انفجار و مواد چند لایه

ابتدا به صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در مرجع [۲۱] پرداخته شده است. همانطور که نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد در تمام حالات درصد اختلاف نتایج بسیار کم است که این موضوع درستی و صحت نتایج را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه آستر مورد استفاده در مخازن سی‌ان‌جی فلزی است، در شکل ۵ نتایج بدست آمده از انحراف صفحه آلومینومی در حالت تک لایه و چند لایه در مقابل موج انفجار با مرجع [۲۱] مقایسه شده است.

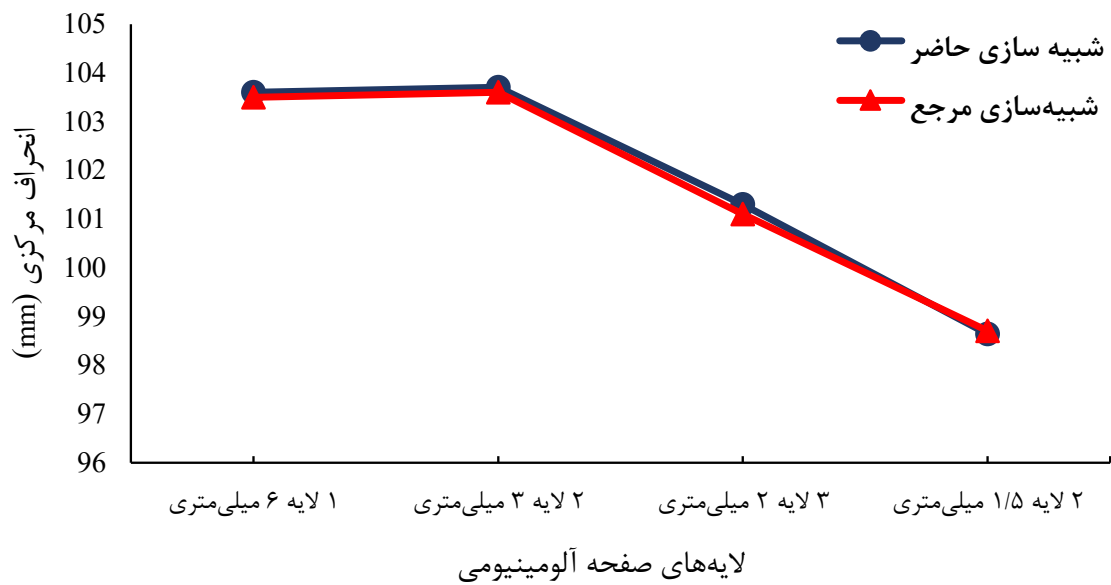
##### ۴-۲- نتایج بررسی گسیختگی مخازن تحت فشار استاتیکی

در این تحلیل جهت بررسی شاخص شکست مخازن از معیار سای - هیل استفاده شد. در جدول ۶ مقادیر شاخص شکست سای هیل به ترتیب برای مخازن نوع اول تا نوع چهارم ارائه شده‌اند. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بحرانی‌ترین شاخص شکست هیچکدام از مخازن از ۱ عبور نکرده است و مخازن تحت فشار داخلی ۲۰۰ بار آسیب ندیده‌اند و در محدوده ایمن قرار دارند. بحرانی‌ترین شاخص شکست برای مخازن نوع اول تا نوع چهارم به ترتیب ۰/۴۲۱، ۰/۵۰۹، ۰/۴۵۷ و ۰/۳۳۶ می‌باشد که به ترتیب، مخزن نوع چهارم، نوع اول، نوع سوم و نوع دوم بیشترین مقاومت را در



شکل ۴. شماتیک لایه چینی مخازن و محل قرارگیری خرج انفجار

Fig. 4. Schematic view of tanks layering and position of explosion charge



شکل ۵. نتایج اعتبار سنجی: مقایسه انحراف مرکزی آلومینیوم ۶۰۶۱ O در حالت تک لایه و چند لایه در پژوهش حاضر با مرجع [۲۱]

Fig. 5. Validation results: comparison of the central deflection of aluminum 6061O in single-layer and multi-layer state in the present study with the reference [21]



جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی

Table 5. Results of simulation validation

ردیف	نحوه چیدمان مواد	لایه	میزان انحراف (mm)			تنش فون میزس (MPa)			کرنش معادل	
			شبیه‌سازی	درصد	خطا	شبیه‌سازی	درصد	خطا	شبیه‌سازی	درصد
مقایسه نتایج صفحه تک‌لایه و چندلایه فولاد ۳۰۴L										
۱	فولاد (۱ لایه ۲ mm)	فولاد	۱۰۵/۵	۱۰۲/۸	۲/۵۶٪	۳۴۹/۴	۳۴۸	۰/۴٪	-	
۲	فولاد (۲ لایه ۱ mm)	فولاد	۹۸/۶۱	۹۶/۷۷	۱/۸۶٪	۳۰۱/۱	۲۹۲/۵	۲/۸٪	-	
مقایسه نتایج صفحه تک‌لایه و چندلایه آلومینیوم ۶۰۶۱O										
۱	آلومینیوم (۱ لایه ۶ mm)	آلومینیوم	۱۰۳/۶	۱۰۳/۵	-۰/۹٪	۹۴/۳۲	۹۲/۶۲	۱/۸٪	-۰/۳۷۲۷	
۲	آلومینیوم (۲ لایه ۳ mm)	آلومینیوم	۱۰۳/۷	۱۰۳/۶	-۰/۹٪	۱۱۶/۳	۱۱۵	۱/۱٪	-۰/۳۷۹۹	
۳	آلومینیوم (۳ لایه ۲ mm)	آلومینیوم	۱۰۱/۳	۱۰۱/۱	-۰/۲٪	۱۱۷/۷	۱۱۹/۴	۱/۴۵٪	-۰/۳۵۲۷	
۴	آلومینیوم (۴ لایه ۱/۵ mm)	آلومینیوم	۹۸/۶۴	۹۸/۷	-۰/۶٪	۱۰۳/۶	۱۰۷	۳/۱٪	-۰/۲۱۷۷	
مقایسه نتایج صفحه تک‌لایه و چندلایه منیزیم ۳۰ AZ										
۱	منیزیم (۱ لایه ۹ mm)	منیزیم	۴۵/۹۲	۴۵/۵۰	۰/۹٪	۱۷۴/۵	۱۷۸/۴	۲/۲٪	-۰/۱۴۶۲	
۲	منیزیم (۲ لایه ۴/۵ mm)	منیزیم	۴۶/۹۷	۴۶/۴۸	۱٪	۱۹۱/۹	۱۹۴/۶	۱/۳٪	-۰/۱۱۱۲	
۳	منیزیم (۳ لایه ۳ mm)	منیزیم	۴۶/۳۹	۴۶/۳۹	۰٪	۲۲۷	۲۲۶/۵	۰/۲٪	-۰/۱۰۶۲	
مقایسه نتایج صفحات لایه‌ای ترکیبی منیزیم ۳۰ AZ و آلومینیوم ۶۰۶۱O										
۱	منیزیم (۴/۵ mm) جلو + آلومینیوم (۳ mm)	منیزیم	۴۶/۴۸	۴۶/۴۷	۰٪	۱۶۵/۳	۱۶۵	۰/۲٪	-۰/۱۱۰۸	
		آلومینیوم	۱۰۲/۸	۱۰۲/۸	۰٪	۱۰۱/۵	۱۰۱/۵	۰/۳٪	-۰/۲۶۷۴	
۲	منیزیم (۴/۵ mm) عقب + آلومینیوم (۳ mm)	منیزیم	۶۲/۱۰	۶۲/۰۹	۰٪	۲۰۵/۵	۲۰۸/۱	۲/۱٪	-۰/۱۳۵۷	
		آلومینیوم	۶۰/۱۰	۶۰/۱۰	۰٪	۷۸/۱۶	۷۹/۱۷	۰/۷٪	-۰/۱۰۲۶	
۳	منیزیم (۲/۵ mm) + آلومینیوم (۳ mm)	منیزیم	۴۹/۰۴	۴۹/۶۲	۱/۲٪	۲۱۳/۹	۲۰۹/۹	۱/۹٪	-۰/۰۹۰۳	
		آلومینیوم	۷۰/۴۳	۷۰/۱۱	۰/۱٪	۹۱/۲۹	۹۱/۶۶	۰/۴٪	-۰/۱۳۶۹	
۴	منیزیم (۴/۵ mm) + آلومینیوم (۱/۵ mm)	منیزیم	۷۰/۳۹	۷۰/۹۹	۰/۸٪	۲۰۵/۶	۲۰۵/۸	۰/۱٪	-۰/۱۵۶۶	
		آلومینیوم	۴۹/۰۱	۴۸/۱۷	۱/۷٪	۷۴/۲۶	۷۴/۶۸	۰/۵٪	-۰/۱۲۵۲	
۴	منیزیم (۴/۵ mm) + آلومینیوم (۱/۵ mm)	منیزیم	۵۷/۰۲	۵۶/۹۶	۰/۱٪	۱۶۴/۷	۱۶۲/۷	۱/۲٪	-۰/۱۳۷۲	
		آلومینیوم	۱۰۳/۱	۱۰۳/۲	۰/۱٪	۹۹/۲۲	۹۷/۸۷	۱/۴٪	-۰/۲۶۳۷	
مقایسه نتایج صفحات لایه‌ای ترکیبی فولاد ۳۰۴L و آلومینیوم ۶۰۶۱O										
۱	فولاد (۱ mm) جلو + آلومینیوم (۳ mm)	فولاد	۹۶/۵۷	۹۹/۱۱	۲/۶٪	۳۱۱/۳	۳۰۳/۶	۲/۴٪	-۰/۲۳۳۸	
		آلومینیوم	۱۰۵/۱	۱۰۴/۸	۰/۳٪	۹۴/۶	۹۱/۶۵	۳/۱٪	-۰/۲۶۳۸	
۲	فولاد (۱ mm) عقب + آلومینیوم (۳ mm)	فولاد	۱۰۴	۱۰۳/۸	۰/۲٪	۳۴۴/۶	۳۴۲	۰/۵٪	-۰/۲۶۳۳	
		آلومینیوم	۱۰۴/۳	۱۰۳/۹	۰/۴٪	۱۱۵/۵	۱۱۹/۲	۳/۱٪	-۰/۲۶۰۳	
۳	فولاد (۰/۵ mm) + آلومینیوم (۳ mm)	فولاد	۱۰۲/۱	۱۰۰/۸	۱/۳٪	۳۳۷	۳۴۳/۳	۱/۸٪	-۰/۲۳۷۲	
		آلومینیوم	۱۰۴/۳	۱۰۲/۶	۱/۶٪	۱۱۲	۱۱۰/۲	۱/۶٪	-۰/۲۳۲۴	
۴	فولاد (۰/۵ mm) + آلومینیوم (۱/۵ mm)	فولاد	۱۰۳/۸	۱۰۲/۳	۱/۵٪	۳۱۲/۲	۳۰۳/۸	۲/۷٪	-۰/۲۳۲۹	
		آلومینیوم	۴۹/۰۱	۴۸/۱۷	۰/۱٪	۱۲۳	۱۱۹/۶	۲/۹٪	-۰/۲۷۹۸	
۴	فولاد (۱ mm) + آلومینیوم (۱/۵ mm)	فولاد	۵۷/۰۲	۵۶/۹۶	۰/۷٪	۳۲۳/۷	۳۲۸/۸	۱/۵٪	-۰/۲۸۵۷	
		آلومینیوم	۱۰۳/۱	۱۰۳/۲	۰/۱٪	۱۱۶/۲	۱۱۷/۷	۱/۵٪	-۰/۲۶۹۳	

یافته و پوشش کامپوزیتی به دور هسته فولادی پیچیده شده است به همین خاطر وزن این مخازن نسبت به مخزن نوع اول کمتر است. در جدول فوق پارامتر حداکثر فشار قابل تحمل ویژه تعریف شده است که از تقسیم حداکثر فشار قابل تحمل به وزن مخازن به دست آمده است که استحکام مخزن در مقابل فشار داخلی نسبت به وزن آن را نشان می‌دهد که مخزن نوع چهارم با اختلاف زیادی بیشترین مقاومت در برابر فشار نسبت به وزنش دارد. همچنین کمترین مقدار این پارامتر مربوط به مخزن نوع اول است.

برابر فشار داخلی ۲۰۰ بار دارند. افزایش وزن مخازن سی‌ان‌جی اثرات زیادی بر روی مولفه‌های عملکرد دینامیکی خودروها به ویژه عدم فرمان‌پذیری مناسب و احتمال ناپایداری خودرو در ترمزگیری‌های شدید می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود مخزن تمام کامپوزیتی نوع چهارم کمترین وزن را دارد که این موضوع یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این مخازن است. در نقطه مقابل مخزن تمام فولادی دارای بیشترین وزن بین مخازن سی‌ان‌جی است. همچنین در ساخت مخازن نوع دوم و سوم ضخامت آستر فولادی کاهش

جدول ۶. شاخص شکست سای هیل، وزن و حداکثر فشار قابل تحمل در مخازن

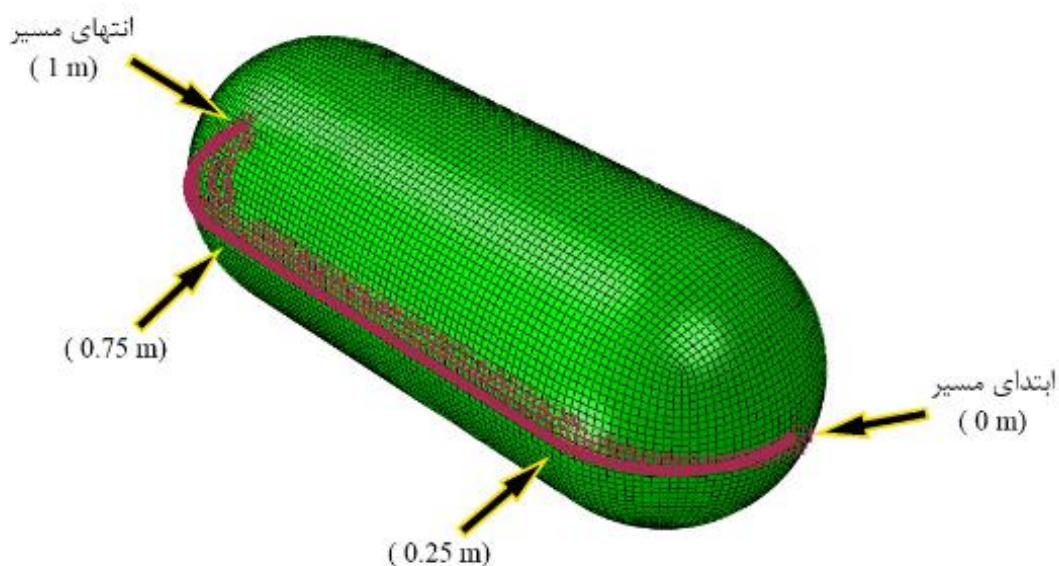
Table 6. Tsai-Hill failure index, weight and maximum pressure tolerable in tanks

شماره لایه	زاویه لایه	مقدار $I_F$	بحرانی ترین $I_F$	حداکثر فشار قابل تحمل (bar)	وزن (kg)	حداکثر فشار قابل تحمل ویژه (bar/kg)
مخزن نوع اول						
آستر فلزی	۱	۰	۰/۴۲۱	۵۱۰	۷۰/۵	۷/۲۳
مخزن نوع دوم						
کامپوزیت	۱	۰/۳۰۷	۰/۵۰۹	۴۰۰	۳۸/۳۶	۱۰/۴۲
	۲	۰/۳۰۵				
	۳	۰/۳۰۲				
	۴	۰/۳				
	۵	۰/۲۹۷				
	۶	۰/۲۹۴				
	۷	۰/۲۹۲				
	۸	۰/۲۹				
	آستر فلزی	۹				
مخزن نوع سوم						
کامپوزیت	۱	۰	۰/۴۵۷	۴۴۰	۳۵/۲۳	۱۲/۴۸
	۲	۹۰				
	۳	۵۴				
	۴	-۶۷				
	۵	-۶۷				
	۶	۵۴				
	۷	۹۰				
	۸	۰				
	آستر فلزی	۹				
مخزن نوع چهارم						
کامپوزیت	۱	۰	۰/۳۳۶	۶۱۰	۳۱/۷۱	۱۹/۲۳
	۲	۹۰				
	۳	۶۵				
	۴	-۷۰				
	۵	-۷۰				
	۶	۶۵				
	۷	۹۰				
	۸	۰				

جدول ۷. شرایط حالت‌های مختلف بار انفجار

Table 7. The conditions of different cases of blast load

ردیف	عنوان حالت مورد بررسی	فاصله محل انفجار (cm)	جرم تی‌ان‌تی (kg)
۱	حالت اول	۳۰	۱
۲	حالت دوم	۳۰	۲
۳	حالت سوم	۳۰	۳
۴	حالت چهارم	۸۰	۱
۵	حالت پنجم	۸۰	۲
۶	حالت ششم	۸۰	۳

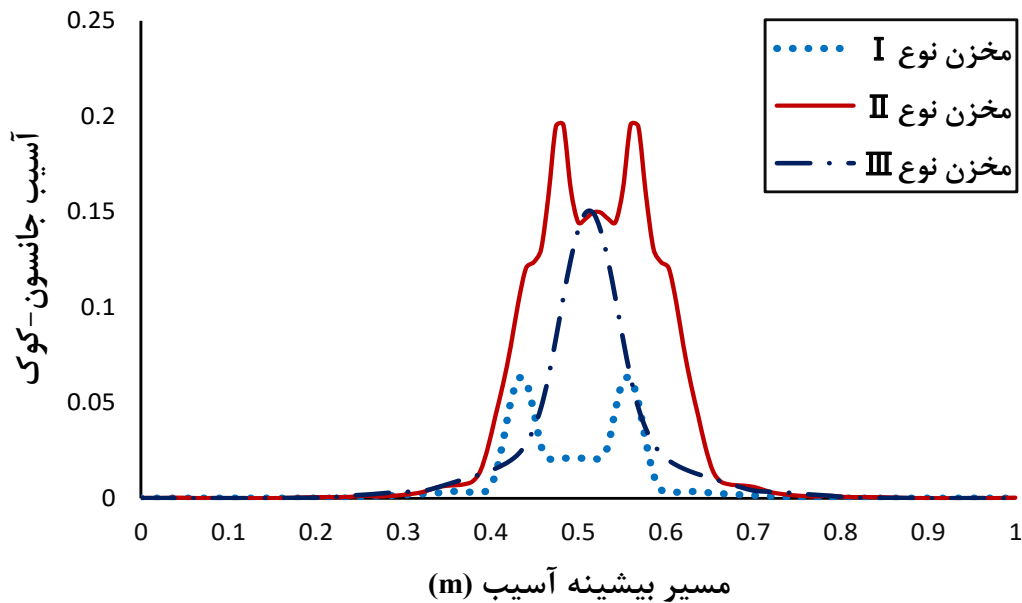


شکل ۶. مسیر ثبت نتایج

Fig. 6. Path of record results

نتایج مورد بحث، در راستای یک مسیر که مرکز دو عدسی مخزن را به هم متصل می‌کند استخراج شده است. مسیر فوق‌الذکر به طوری در نظر گرفته شده است که در مقابل نقاط انفجاری قرار گیرد. زیرا بیشینه موج انفجار به آن ناحیه وارد می‌شود و مسیر مناسبی برای ثبت نتایج در طول مخزن است (شکل ۶).

۳-۴ نتایج شبیه‌سازی مخازن تحت فشار نوع اول تا چهارم تحت بار انفجار در این بخش، اثر انفجار بر روی مخازن با فشار داخلی ۲۰۰ بار برای دو نقطه انفجاری مختلف به فواصل ۳۰ و ۸۰ سانتی‌متر از سطح مخزن با مقادیر ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۷).



شکل ۷. میزان آسیب جانسون - کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت اول

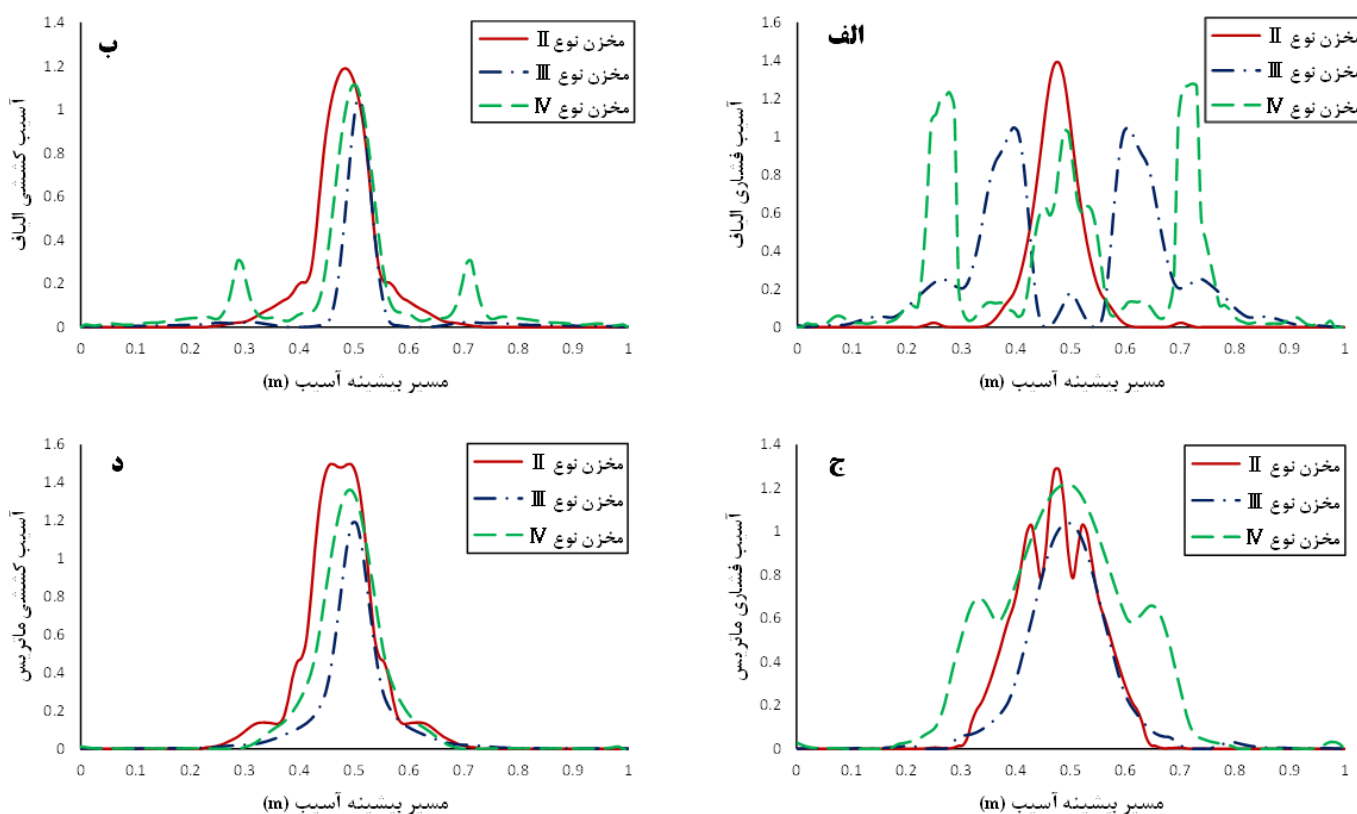
Fig. 7. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the first case

می‌تواند داشته باشد. هر چه شاخص آسیب یک المان به ۱ نزدیک‌تر باشد، میزان خرابی آن المان نیز بیشتر خواهد بود و اگر از ۱ عبور کرده باشد به معنای آن است که المان‌ها در اثر بار انفجار کاملاً از بین رفته‌اند. شکل ۱۰ میزان آسیب الیاف و ماتریس لایه کامپوزیتی مخازن نوع دوم تا چهارم را طبق معیار هاشین نشان می‌دهد، مخزن نوع اول به علت نداشتن لایه کامپوزیتی، در این نمودار مورد بررسی قرار نگرفته است. لازم به ذکر است که در مخزن نوع دوم الیاف کامپوزیتی به صورت شعاعی به دور قسمت استوانه‌ای آستر فلزی پیچیده شده است و عدسی‌های این مخزن کامپوزیت پیچی نشده است، به همین دلیل مقدار آسیب کامپوزیت برای ۰/۲۵ متر ابتدایی و انتهایی مسیر (شکل ۶) تعریف نشده است. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، مقدار آسیب الیاف و ماتریس در هر سه مخزن از ۱ عبور کرده است و لایه کامپوزیتی این مخازن دچار گسیختگی شده‌اند. به علت نازک بودن ضخامت لایه کامپوزیتی مخزن نوع دوم نسبت به دو مخزن دیگر، بیشینه آسیب در مخزن این اتفاق افتاده است. مخزن نوع سوم به دلیل داشتن آستر فلزی در زیر لایه کامپوزیتی به مراتب آسیب کمتری متحمل شده است.

۴-۳-۱ نتایج حالت اول:  $m = 1\text{ kg}$  و  $L = 3\text{ cm}$

برای بررسی آسیب در آستر فلزی در مخازن نوع اول تا نوع سوم از معیار آسیب جانسون - کوک استفاده شده است. اگر مقدار آسیب المان‌ها در این معیار از ۱ عبور کند به این معنی است که آن المان‌ها از ناحیه پلاستیک خارج شده و وارد ناحیه آسیب شده‌اند و کاملاً زوال پیدا کرده‌اند. میزان آسیب وارد شده به آستر فلزی براساس معیار جانسون - کوک در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ بیشترین مقدار آسیب حدود ۰/۲ است که مربوط به مخزن نوع دوم است. در برخی از نقاط آسیب تقریباً یکسانی برای مخازن نوع دوم و نوع سوم مشاهده می‌شود. مخزن نوع اول با اختلاف زیادی نسبت به دو مخزن دیگر کمترین آسیب را دیده است که مقدار آسیب آن حدوداً ۰/۰۷ است. از آنجایی که آسیب در آستر فلزی رابطه مستقیمی با ضخامت آستر دارد، مخزن نوع اول به دلیل اینکه ضخامت بیشتری نسبت به آستر مخزن نوع دوم و سوم دارد آسیب کمتری به آن وارد شده است.

آسیب فشاری و کششی، شاخصی از میزان خرابی الیاف و ماتریس کامپوزیت در برابر بار انفجار است که بر مبنای کرنش پلاستیک و پارامترهای تخریب تعریف شده و حداقل مقدار صفر و حداکثر مقدار ۱ را



شکل ۸. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت اول: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

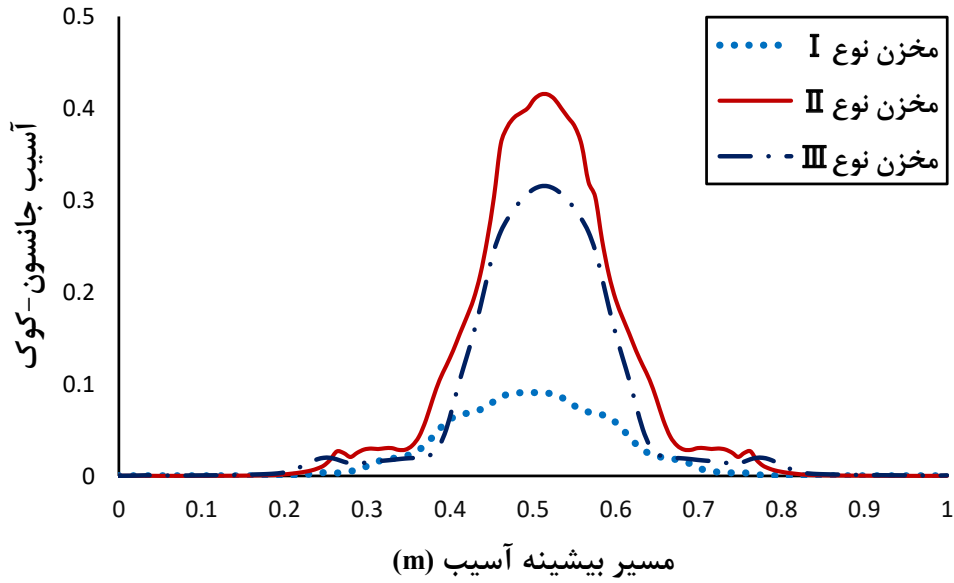
Fig. 8. The amounts of damage to the composite in the first case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix

آسیب الیاف در مخازن نوع دوم و نوع چهارم از ۱ عبور کرده است، گسیختگی الیاف در این مخازن پیش‌بینی می‌شود. به دلیل کم بودن ضخامت لایه کامپوزیتی در مخزن نوع دوم، مقدار آسیب در این مخزن نسبت به دو مخزن دیگر افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. همچنین، بیشتر بودن ضخامت کامپوزیت در مخزن نوع چهارم باعث کاهش بیشینه آسیب در این مخزن شده است. در اثر این انفجار مخزن نوع سوم کمترین آسیب را متحمل شده است، که این موضوع نتیجه ضخامت زیاد کامپوزیت در این مخزن و همچنین وجود آستر فلزی در زیر لایه کامپوزیتی است، که بعنوان لایه پشتیبان مانع از تغییر شکل زیاد کامپوزیت می‌شود. مطابق شکل ۱۰ ج و د، در اثر افزایش ماده انفجاری، شدت آسیب ماتریس در تمام مخازن افزایش یافته است و گسیختگی صورت گرفته است، در این حالت نیز بیشترین گسیختگی مربوط به مخزن نوع دوم و کمترین آسیب مربوط به مخزن نوع سوم است.

۴-۳-۲- نتایج حالت دوم:  $m = 2 \text{ kg}$  و  $L = 30 \text{ cm}$

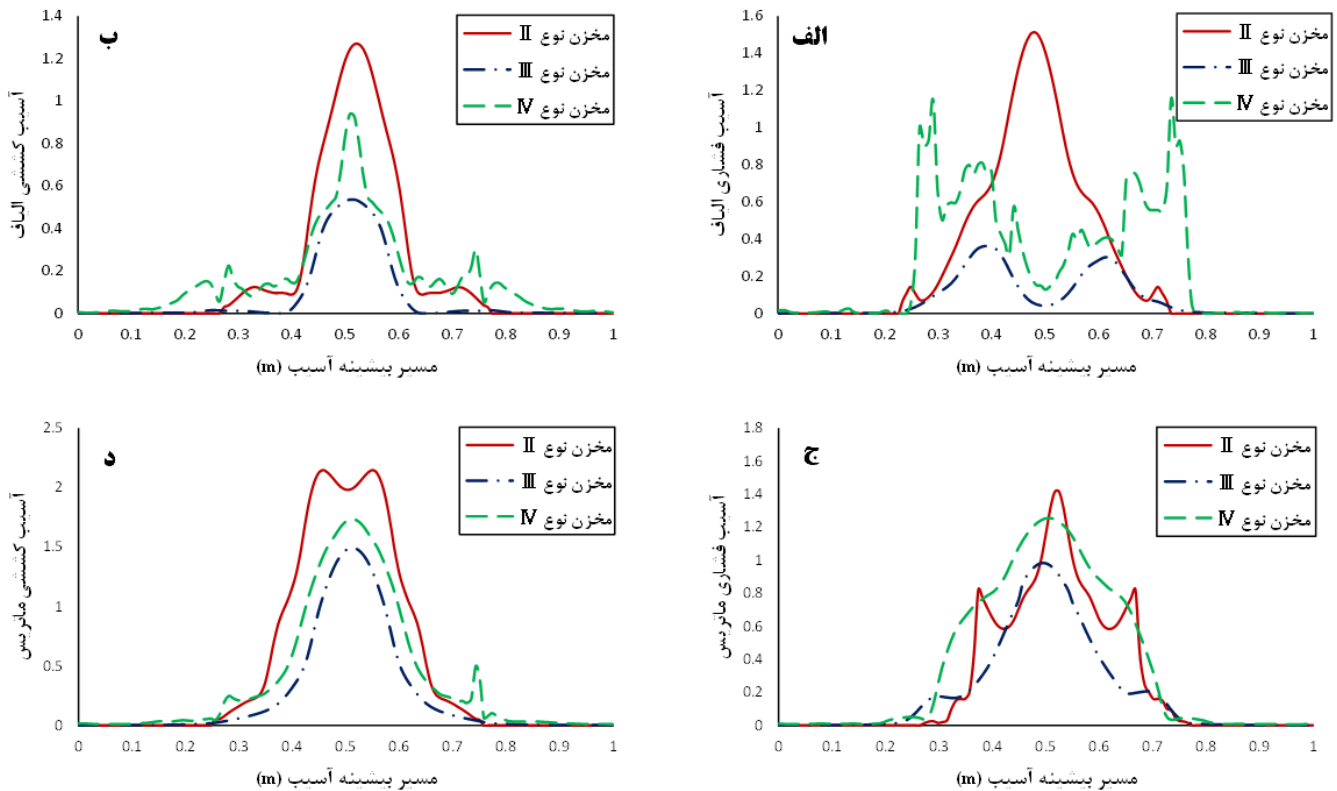
میزان آسیب وارد شده به آستر فلزی براساس معیار جانسون-کوک در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش ۱ کیلوگرمی ماده انفجار موجب افزایش آسیب در مخازن شده است. همانند حالت قبل بیشترین آسیب به آستر مخزن نوع دوم وارد شده است، چرا که در این مخزن لایه کامپوزیتی ۴ میلی‌متری فقط بصورت شعاعی به دور قسمت استوانه‌ای مخزن پیچیده شده است و عدسی این مخازن فاقد پوشش کامپوزیتی است به همین دلیل شدت افزایش آسیب در این مخزن نسبت به دو مخزن دیگر بیشتر است. در حالیکه در مخزن نوع سوم پوشش ۱۲ میلی‌متری تمام کامپوزیتی به دور هسته فلزی سهم زیادی از انرژی انفجار را جذب کرده و مانع از افزایش بیش از حد آسیب در آستر فلزی می‌گردد. آستر فلزی مخزن نوع اول به دلیل ضخامت بیشتر، آسیب کمتری متحمل شده است.

تأثیر افزایش خرج انفجار در فاصله ۳۰ سانتی‌متری بر آسیب کامپوزیت مخازن نوع دوم تا چهارم در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه



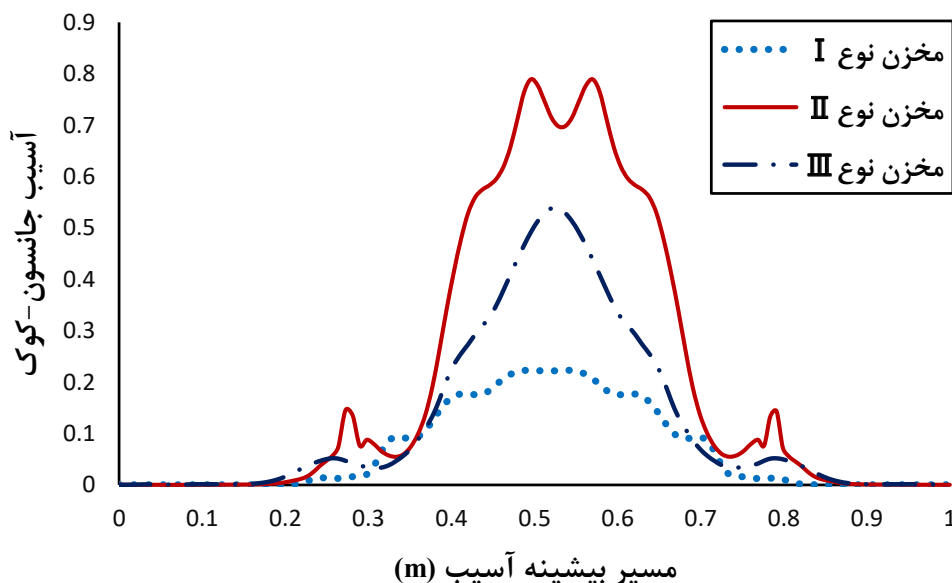
شکل ۹. میزان آسیب جانسون - کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت دوم

Fig. 9. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the second case



شکل ۱۰. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت دوم: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

Fig. 10. The amounts of damage to the composite in the second case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix



شکل ۱۱. میزان آسیب جانسون - کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت سوم

Fig. 11. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the third case

عملکرد مخزن نوع دوم را در مقابل این انفجار ناموفق دانست و واماندگی پیش‌بینی می‌شود. تأثیر قابل ملاحظه افزایش خرج انفجار در شکل ۱۲ مشهود است. با توجه به اینکه میزان معیار هاشین در شکل‌های الف تا د از ۱ عبور کرده است، الیاف و ماتریس مربوط به قسمت کامپوزیت مخازن تا حد زیادی گسیخته شده‌اند.

شکل ۱۳ تصویری از آسیب شدید مخازن طی انفجار ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۳۰ سانتی‌متری در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

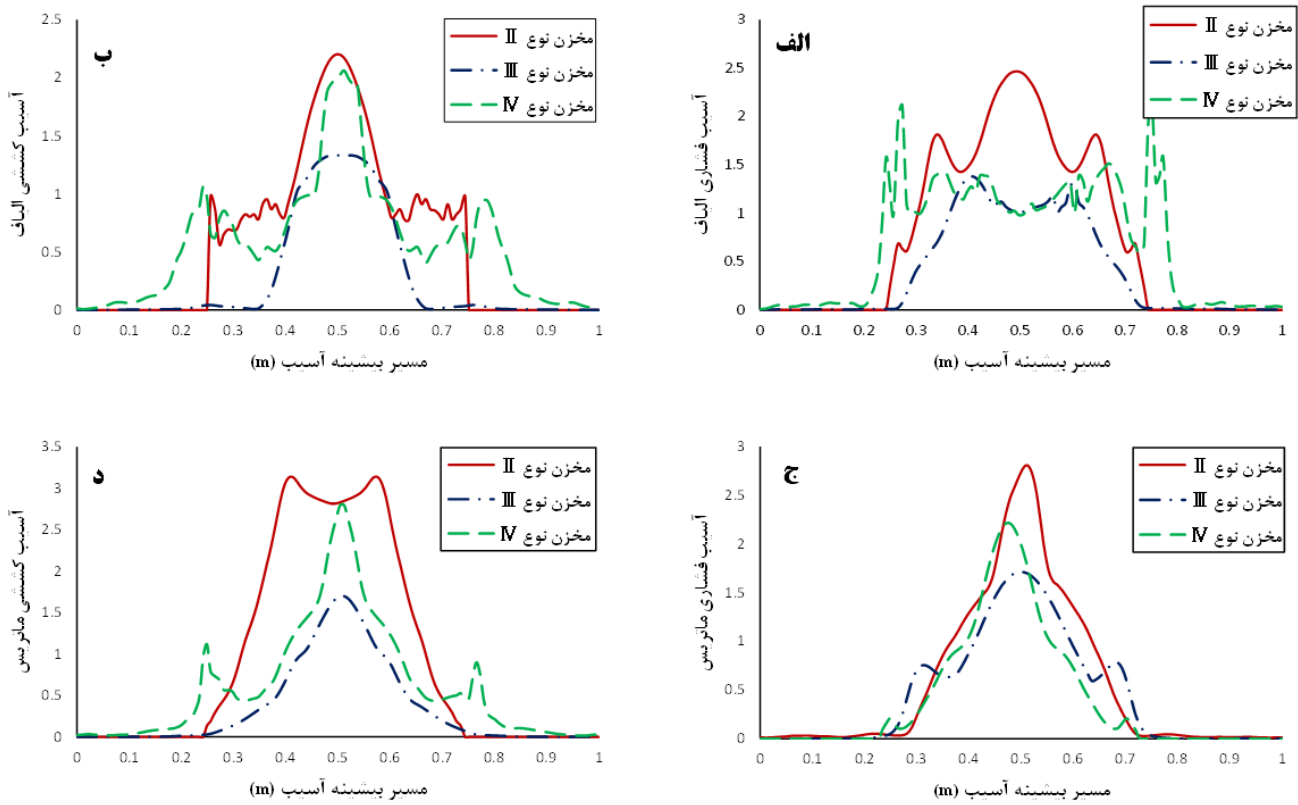
#### ۴-۳-۴ نتایج حالت چهارم: $m = 1\text{ kg}$ و $L = 80\text{ cm}$

در شکل ۱۴ میزان آسیب وارد شده به آستر فلزی براساس معیار جانسون-کوک، نشان داده شده است. تأثیر افزایش فاصله نقطه انفجاری در کاهش بیشینه آسیب به وجود آمده در مخازن مشهود است. در نمودار شکل فوق کاهش آسیب وارد شده به آستر فلزی مخازن در اثر افزایش فاصله نقطه انفجاری مشاهده می‌شود، هر سه مخزن در مقابل انفجار ۱ کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۸۰ سانتی‌متری مقاومت خوبی از خود نشان داده‌اند. با توجه به اینکه آسیب ایجاد شده برای هر سه مخزن از ۱ کمتر است گسیختگی در آستر این مخازن صورت نگرفته است.

#### ۴-۳-۳ نتایج حالت سوم: $m = 3\text{ kg}$ و $L = 30\text{ cm}$

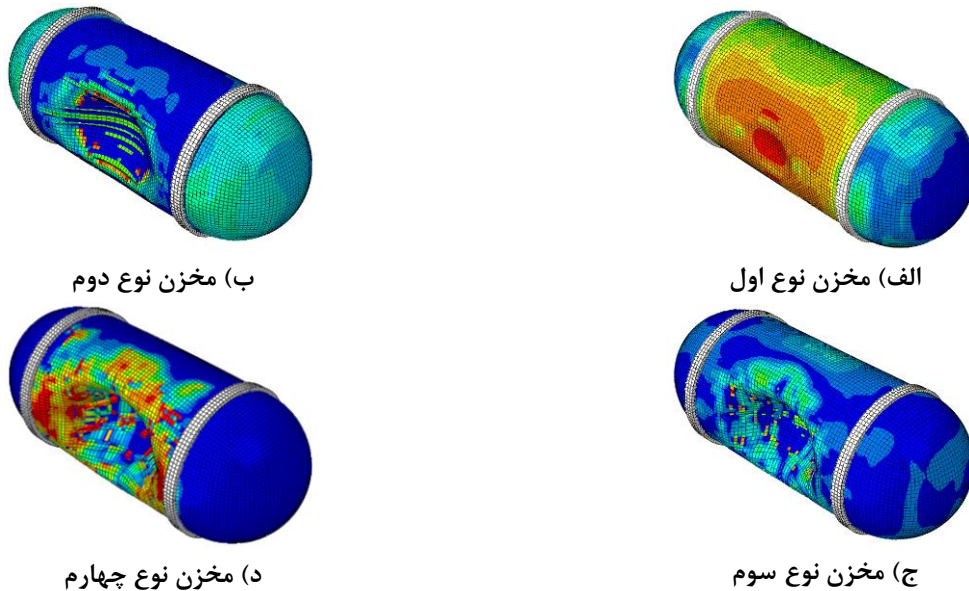
در شکل ۱۱ مقدار آسیب آستر فلزی مخازن نوع اول تا نوع سوم طبق معیار جانسون-کوک مورد بررسی قرار گرفته است. در اثر افزایش خرج انفجاری، تأثیر قابل توجهی در میزان آسیب وارد شده به مخازن مشاهده می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد مخزن نوع چهارم فاقد آستر فلزی می‌باشد و تماماً از کامپوزیت تشکیل شده است، به همین دلیل در این مقایسه مورد بررسی قرار نگرفته است. مطابق حالت‌های گذشته، کمترین آسیب در مخزن نوع اول و بیشترین آسیب در مخزن نوع دوم رخ داده است.

یکی از مزیت‌های مخزن تمام فلزی (نوع اول)، مقاومت آن در مقابل انفجار و ضربه می‌باشد، در اثر انفجار ۳ کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۳۰ سانتی‌متری مقدار آسیب ایجاد شده در این مخزن در محدوده قابل قبولی قرار دارد. پس از آن، آستر مخزن نوع سوم استحکام خوبی در مقابل انفجار از خود نشان داده است. در نقطه مقابل، آستر مخزن نوع دوم به شدت تحت تأثیر موج انفجار قرار گرفته است که مقدار آسیب این مخزن به مقدار  $0.97$  رسیده است که به علت نازک بودن پوشش کامپوزیتی اطراف این مخزن می‌باشد. همچنین عدم وجود پوشش کامپوزیتی در عدسی‌های مخازن نوع دوم می‌تواند مزید بر علت باشد. البته با در نظر گرفتن درصدی خطا می‌توان



شکل ۱۲. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت سوم: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

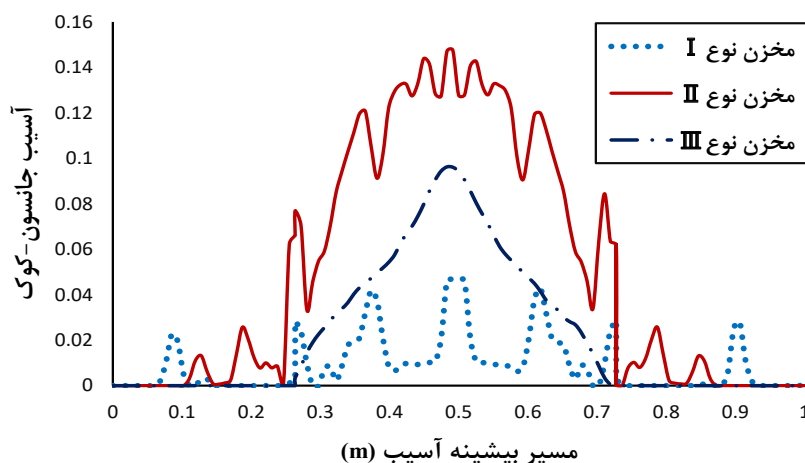
Fig. 12. The amounts of damage to the composite in the third case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix



شکل ۱۳. میزان آسیب وارد شده به مخازن

Fig. 13. The amounts of damage to the tanks





شکل ۱۴. میزان آسیب جانسون - کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت چهارم

Fig. 14. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the fourth case

می‌کند. در نقطه مقابل مخزن ایلف نوع سوم عملکرد مناسبی از خود نشان داده است و مقدار آسیب ایلف آن حدوداً به  $0/7$  رسیده است. البته ماتریس این مخزن توانایی تحمل موج انفجار را نداشته است.

۳-۳-۶- نتایج حالت ششم:  $m = ۲ \text{ kg}$  و  $L = ۸۰ \text{ cm}$

شکل ۱۸ مقدار آسیب جانسون کوک در آستر فلزی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود آستر فلزی هیچکدام از مخازن دچار واماندگی نشده است. در اثر افزایش مقدار ماده انفجاری به ۳ کیلوگرم، بیشترین مقدار آسیب در آستر مخزن نوع دوم و کمترین مقدار آسیب در مخزن نوع اول و سوم رخ داده است. و کلیه مخازن در محدوده ایمن قرار دارند.

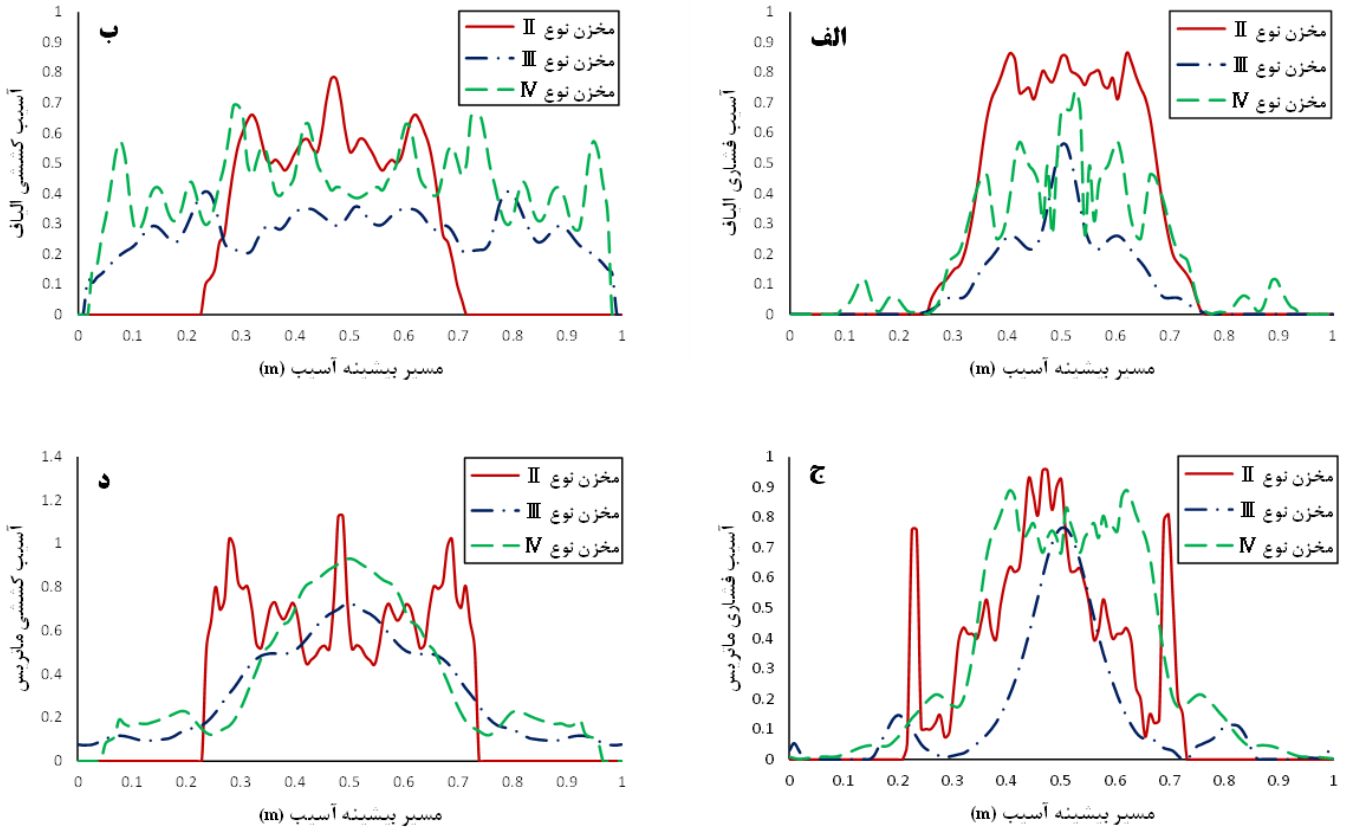
در شکل ۱۹ مقدار خرابی هاشین در مخازن نوع دوم، سوم و چهارم نشان داده شده است. مقدار آسیب کامپوزیت در محل تشکیل پله در مخزن نوع دوم مقدار تنش جهش ناگهانی داشته است که به دلیل اثرات تمرکز تنش و تنش خمشی در اتصال قسمت استوانه‌ای کامپوزیت به عدسی‌ها است. با توجه به افزایش خرج انفجاری به ۳ کیلوگرم، تخریب لایه‌های کامپوزیتی انتظار می‌رود. شدت تخریب لایه‌های در مخزن نوع دوم بیشتر بوده است که کم بودن ضخامت لایه کامپوزیتی این مخزن می‌تواند دلیل این اتفاق باشد.

در شکل ۱۵ میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت بر اساس معیار هاشین و همچنین میزان آسیب کششی و فشاری ایلف و ماتریس نشان داده شده‌اند. با افزایش فاصله نقطه انفجار، گسیختگی ایلف در هیچکدام از مخازن اتفاق نیفتاده است. اما آسیب ایلف در مخزن نوع دوم نسبت به دو مخزن دیگر بیشتر است و تا مقدار  $0/۹۷$  افزایش یافته است. همانند حالات گذشته لایه کامپوزیتی مخزن نوع سوم کمترین آسیب را متحمل شده است که به خوبی می‌توان عملکرد مثبت آستر فلزی در زیر لایه کامپوزیتی را ملاحظه نمود. همچنین میزان آسیب کششی ماتریس در مخزن نوع دوم از ۱ عبور کرده و به مرحله گسیختگی رسیده است.

۳-۳-۵- نتایج حالت پنجم:  $m = ۲ \text{ kg}$  و  $L = ۸۰ \text{ cm}$

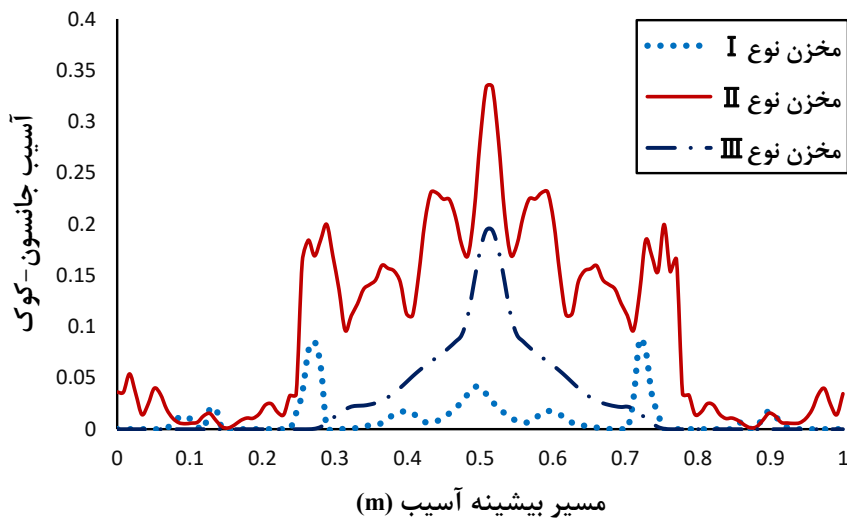
در این حالت، مقدار خرج انفجار در فاصله ۸۰ سانتی‌متری به ۲ کیلوگرم افزایش یافته است. در شکل ۱۶ میزان آسیب به آستر فلزی بر اساس معیار جانسون - کوک نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این حالت نیز مقدار آسیب در آستر فلزی مخزن نوع دوم نسبت به دو مخزن دیگر بیشتر است اما به مرحله گسیختگی نرسیده است.

تأثیر افزایش مقدار ماده منفجره بر روی گسیختگی لایه کامپوزیتی در مخازن نوع دوم و نوع چهارم در شکل ۱۷ مشهود است. میزان آسیب هاشین از ۱ عبور کرده است و گسیختگی کامپوزیت در این مخازن را پیش‌بینی



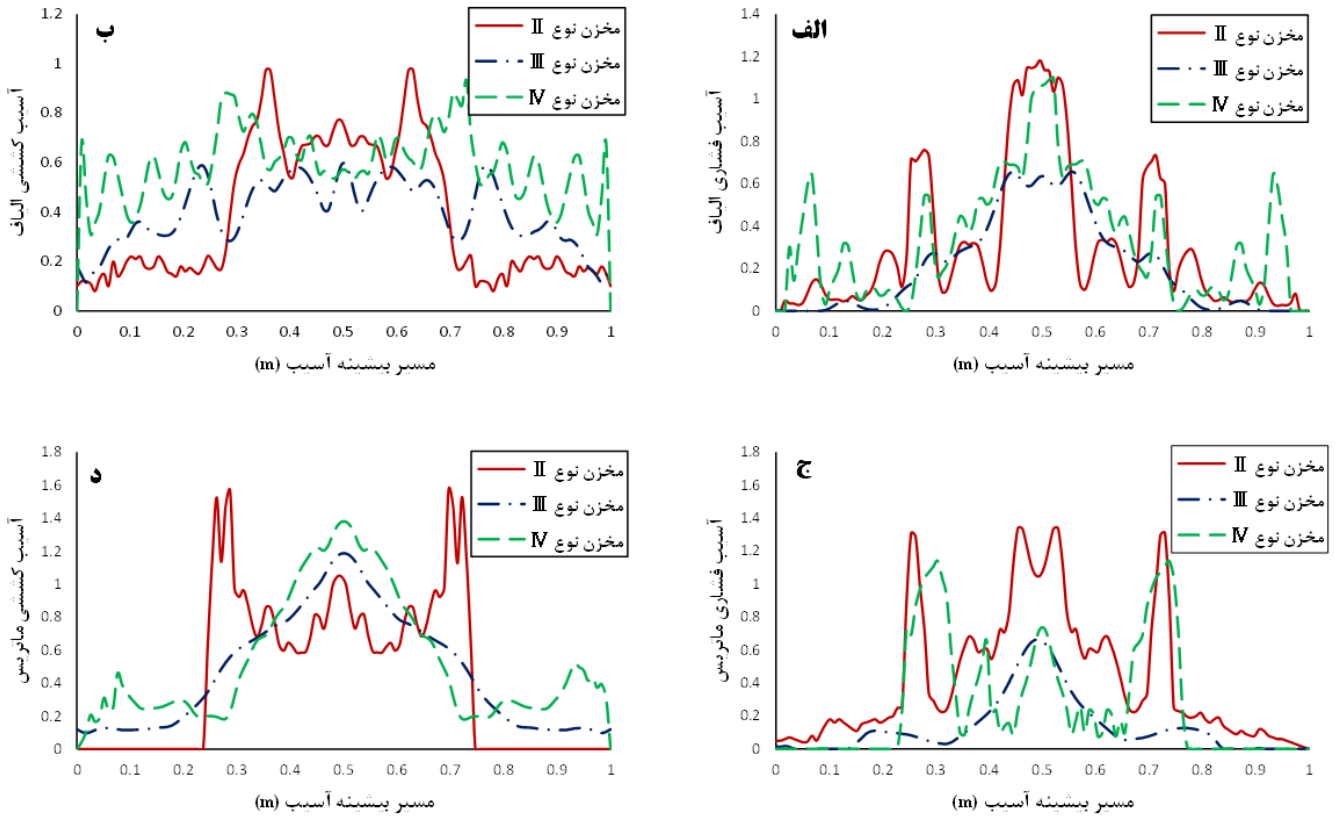
شکل ۱۵. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت چهارم: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

Fig. 15. The amounts of damage to the composite in the fourth case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix



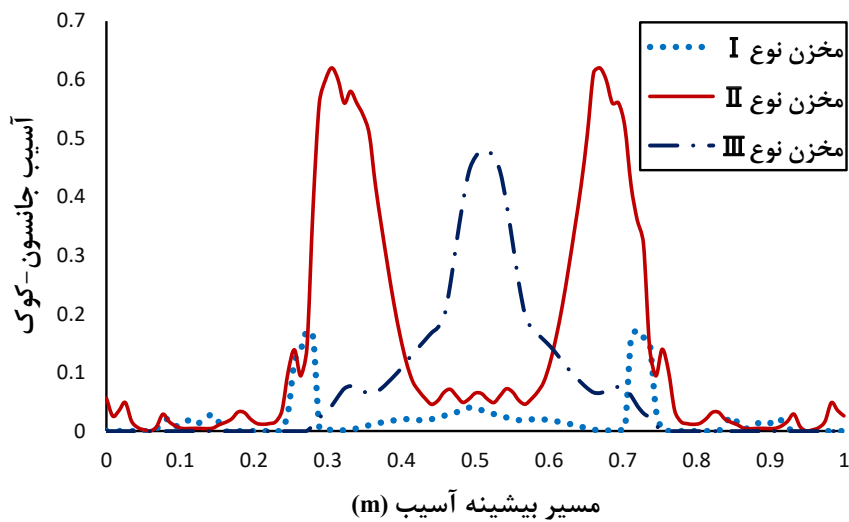
شکل ۱۶. میزان آسیب جانسون - کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت پنجم

Fig. 16. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the fifth case



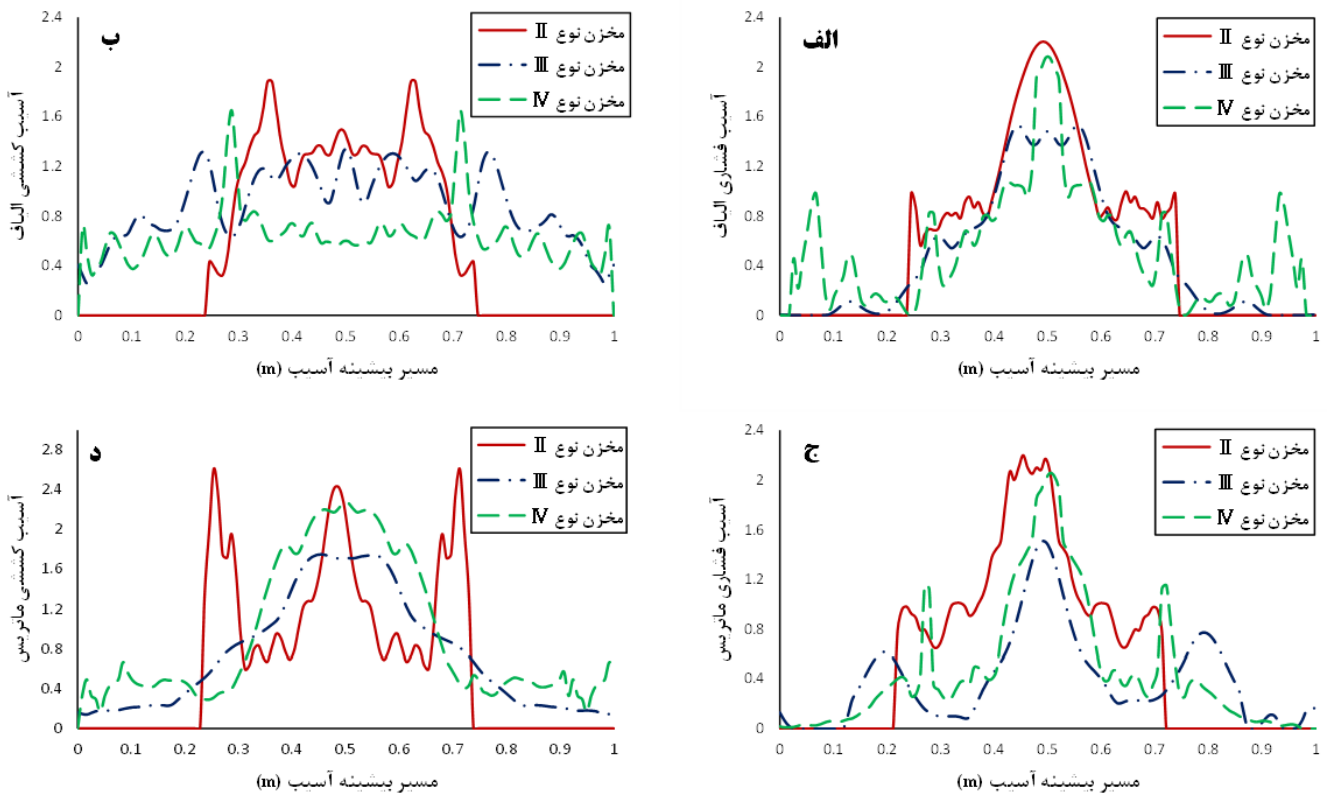
شکل ۱۷. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت پنجم: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

Fig. 17. The amounts of damage to the composite in the fifth case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix



شکل ۱۸. میزان آسیب جانسون-کوک وارد شده به آستر فلزی در حالت ششم

Fig. 18. The amounts of Johnson-Cook damage to the metal liner in the sixth case



شکل ۱۹. میزان آسیب وارد شده به کامپوزیت در حالت ششم: الف) آسیب فشاری الیاف، ب) آسیب کششی الیاف، ج) آسیب فشاری ماتریس، د) آسیب کششی ماتریس

Fig. 19. The amounts of damage to the composite in the sixth case: a) compressive damage of fibers, b) tensile damage of fibers, c) compressive damage of matrix, d) tensile damage of matrix

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا تحلیل هیدرواستاتیکی مخازن نوع اول تا چهارم تحت فشار داخلی ۲۰ بار جهت اطمینان از عدم گسیختگی مخازن در فشار کاری مورد بررسی قرار گرفت، سپس تحلیل دینامیکی این مخازن تحت فشار داخلی و بارگذاری انفجار خارجی با ۳ مقدار چاشنی مختلف و ۲ فاصله انفجار متفاوت انجام شد. تحلیل اجزای محدود این مخازن در نرم افزار آباکوس انجام شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. مهم‌ترین نتایج حاصله از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- از لحاظ فشار هیدرواستاتیکی، مخزن نوع چهارم نسبت به مخازن دیگر بیشترین استحکام در برابر فشار داخلی را دارد و تا فشار ۶۱۰ بار را می‌تواند تحمل کند، که به ترتیب حدود ۱۹/۶٪، ۵۲/۵٪ و ۳۸/۶٪ بیشتر از مخازن نوع اول، دوم و سوم می‌باشد. می‌توان از وزن بسیار سبک، احتمال

کم بودن ترکیدگی در اثر فشار داخلی و سیکل عمر طولانی به عنوان مزیت‌های مخزن نوع چهارم نام برد. از طرفی، به دلیل رفتار ترد کامپوزیت‌ها و همچنین عدم استفاده از آستر فلزی در این مخازن، در مقابل ضربه و انفجار بسیار حساس‌اند و کامپوزیت این مخازن به شدت آسیب می‌بیند.

۲- پارامتر حداکثر فشار قابل تحمل ویژه، نسبت تحمل فشار داخلی به وزن مخزن را نشان می‌دهد که مخزن نوع چهارم به علت سبک بودن و همچنین تحمل بالای فشار هیدرواستاتیکی، بیشترین استحکام در مقابل فشار داخلی را نسبت به وزنش دارد و پس از آن مخزن نوع سوم، دوم و اول بهترین عملکرد را دارند. مخزن نوع اول با وجود اینکه مقاومت بسیار خوبی در مقابل فشار داخلی و همچنین موج انفجار دارد، اما وزن بسیار بالای این مخازن باعث شده میزان تحمل فشار نسبت به وزن در این مخازن بسیار کم باشد که این موضوع منجر به اعمال بار اضافی به شاسی و تغییر رفتار

- pressure in composite pressure vessels, *Composite Structures*, 185 (2018) 573-583.
- [6] F. Kartal, Evaluation of explosion pressure of portable small liquefied petroleum gas cylinder, *Process Safety Progress*, 39(2) (2020) e12081.
- [7] A. Erdik, Experimental and numerical study on dynamic response of V-shaped hull subjected to mine blast, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, (2020) 1-19.
- [8] J. Li, C. Huang, T. Ma, X. Huang, W. Li, M. Liu, Numerical investigation of composite laminate subjected to combined loadings with blast and fragments, *Composite Structures*, 214 (2019) 335-347.
- [9] A. Gargano, R. Das, A. Mouritz, Finite element modelling of the explosive blast response of carbon fibre-polymer laminates, *Composites Part B: Engineering*, 177 (2019) 107412.
- [10] H. Cao, L. Wang, C. Wang, M. Huang, X. Liu, Q. Zeng, Q. Zhang, J. Zhong, Explosion impact strength calculation and failure analysis of glass fiber-reinforced composite pipe, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (2020) 1-10.
- [11] S.A. Mousavizadeh, M. Hosseini, H. Hatami, Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendentive on the Deformation of Samples, *Journal of Modeling in Engineering*, 18(63) (2021) 27-40 (In Persian).
- [12] H. Hatami, A. Fatholahi, The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and two-cell reticular under impact loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50 (2017) 51-60 (In Persian).
- [13] H. Hatami, A. Dalvand, A.S. Chegeni, Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(6) (2020) 1-23.
- [14] H. Hatami, M. Shariati, Numerical and experimental
- دینامیکی خودرو می‌شود. با این حال این مخزن هنوز از مخازن پر استفاده می‌باشد چرا که هزینه ساخت و تولید این مخازن نسبت به مخازن کامپوزیتی بسیار کمتر است.
- ۳- نتایج حاصل از بررسی معیار هاشین نشان داد، بیشترین آسیب در کامپوزیت مخزن نوع دوم اتفاق می‌افتد و مخزن نوع سوم بالاترین ایمنی را در مقابل موج انفجار خارجی دارد. همچنین یکی دیگر از مزایای این مخزن سبک‌تر بودن آن نسبت به مخازن نوع اول و دوم است.
- ۴- در مخزن نوع دوم که کامپوزیت به صورت کمربند به دور هسته استوانه‌ای پیچیده شده است، در محل اتصال کامپوزیت به مخزن یک پله به وجود می‌آید که نتایج حاصله نشان می‌دهد در اثر برخورد موج انفجار به این مخزن میزان آسیب لایه‌های کامپوزیت این محل به شکل ناگهانی افزایش می‌یابد. به طور کلی کرنش و آسیب ایجاد شده ناشی از موج انفجار در آستر فلزی مخزن نوع دوم نسبت به مخازن نوع اول و سوم بیشتر است.
- ۵- بررسی نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد مخزن نوع سوم نسبت به مخازن دیگر بهترین عملکرد را در مقابل موج انفجار دارد. به علت وجود لایه نازک آستر فلزی در مخزن نوع سوم، وزن این مخزن نسبت به مخازن نوع چهارم بیشتر است، اما وجود این آستر فلزی و اماندگی مخزن در مقابل انفجار را به شکل قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

## منابع

- [1] R. Tschirschwitz, D. Krentel, M. Kluge, E. Askar, K. Habib, H. Kohlhoff, S. Krüger, P.P. Neumann, M. Rudolph, A. Schoppa, Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire, *Journal of hazardous materials*, 367 (2019) 1-7.
- [2] M.R. Noban, R. Adibi Asl, Design of pressure vessels based on ASME, *simayedanesh*, 2016 (In Persian).
- [3] D.K. Rajak, D.D. Pagar, R. Kumar, C.I. Pruncu, Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6) (2019) 6354-6374.
- [4] A.C. Reddy, Influence of Stiffeners on Strength of E-Glass/Epoxy Composite Submersible Hull Subjected to Shock Pressure Load using Finite Element Method, *Materials Today: Proceedings*, 4(8) (2017) 7507-7518.
- [5] R. Rafiee, M.A. Torabi, Stochastic prediction of burst

- [21] D. Sahoo, A. Guha, A. Tewari, R. Singh, Performance of monolithic plate and layered plates under blast load, *Procedia engineering*, 173 (2017) 1909-1917.
- [22] A. Ahmadnejad Nategh, *CNG Vehicle Manual*, Kahkeshane Danesh, 2016 (In Persian).
- [23] L. Zu, S. Koussios, A. Beukers, Shape optimization of filament wound articulated pressure vessels based on non-geodesic trajectories, *Composite structures*, 92(2) (2010) 339-346.
- [24] M. Mashayekhi, Prediction of All-Steel CNG Cylinders Fracture in Impact by Using Damage Mechanics Approach, *Scientia Iranica*, 21(3) (2014) 609-619.
- [25] E.B. Neto, M. Chludzinski, P. Roese, J. Fonseca, S. Amico, C. Ferreira, Experimental and numerical analysis of a LLDPE/HDPE liner for a composite pressure vessel, *Polymer Testing*, 30(6) (2011) 693-700.
- [26] L. Zu, Design and optimization of filament wound composite pressure vessels, doctoral thesis, TU Delft, Netherland, 2012.
- [27] Y. Shi, T. Swait, C. Soutis, Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, 94(9) (2012) 2902-2913.
- investigation of SS304L cylindrical shell with cutout under uniaxial cyclic loading, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43(2) (2019) 139-153.
- [15] Gas cylinders - High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles., International Organization for Standardization, ISO 11439:2013/Amd 1:2021.
- [16] S.m. Ebrahimi, Finite element analysis of engineering problems using ABAQUS, andishehsara, 2015 (In Persian).
- [17] G.R. Johnson, A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, *Proc. 7th Inf. Sympto. Ballistics*, (1983) 541-547.
- [18] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering fracture mechanics*, 21(1) (1985) 31-48.
- [19] Abaqus Analysis User's Manual, Section 19.2.3: Plane stress orthotropic failure measures, V 6.10, in, 2010.
- [20] Z. Hashin, Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *Journal of Applied Mechanics*. 334-329 (1980) (2)47.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Albooyeh, S. Amirabdollahian, N. Fatahi, Simulation and Analysis of the First to Fourth Types of Compressed Natural Gas Tanks of Vehicles under the Explosive Loading, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(8) (2022) 1895-1916.

DOI: 10.22060/mej.2022.20911.7335

