



بررسی رفتار مخازن CNG نسل اول تا چهارم خودروها تحت اثر بار ضربه

محمد امامی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

علیرضا آلبویه

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

شهرام امیرعبدالهیان

دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

یکی از نکات مهم در طراحی خودروهای سبک گازسوز، طراحی، انتخاب و نصب صحیح مخزن می‌باشد. بازرسی منظم از مخازن CNG یک نیاز حیاتی برای سیستم‌های سوخت CNG بوده و تصادف یا ضربه به این نوع مخازن می‌تواند یکپارچگی و استحکام آنها را تهدید کند. یکی از پارامترهای مهم در طراحی مخازن CNG، مقاومت آن‌ها در برابر ضربه و تصادف است. در پژوهش حاضر ابتدا به طراحی مخازن نسل اول تا چهارم خودروها پرداخته و هرکدام از نظر وزنی بررسی و قیاس شده‌اند. سپس مخازن طراحی شده در فشار هیدرواستاتیک ۲۰۰ بار (فشار کاری) با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس تست شده تا از نظر صحت طراحی و استحکام تایید شوند. تست هیدرو استاتیک مخازن با استفاده از معیار گسیختگی سای-هیل مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در نهایت به بررسی میزان آسیب‌های وارده به مخازن فلزی و کامپوزیتی تحت ضربه با سرعت و زاویه برخورد متفاوت پرداخته شده و رفتار این مخازن به کمک معیارهای آسیب فلزات و کامپوزیت‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌است تا مناسب‌ترین نوع مخزن یا مخازن در برابر آسیب ناشی از ضربه شناسایی و معرفی شود. صدمات وارد بر بخش فلزی مخازن با بکارگیری معیار آسیب جانسون-کوک و صدمات وارده به بخش کامپوزیت مخازن با استفاده از معیار آسیب هاشین ارزیابی شده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد، مخزن نسل چهارم عملکرد به مراتب بهتری را در برخورد عمودی و افقی با سرعت ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت از خود نشان می‌دهد. همچنین نسبت به سایر نسل‌ها دارای وزن به مراتب کم-تری بوده و در مقایسه به نسل اول، حدود ۴۷٪ سبک‌تر می‌باشد.

واژگان کلیدی: مخازن CNG، مخازن تحت فشار، ضربه، معیار شکست هاشین، معیار شکست جانسون-کوک

مقدمه

مخزن گاز خوردو یکی از اجزای اصلی سیستم سوخت‌رسانی گازی است که سوخت گاز در آن ذخیره می‌گردد. به منظور افزایش قابلیت ذخیره‌سازی بیشتر، سوخت گاز به صورت فشرده نگهداری می‌شود. در مخازن CNG، این فشار تا بیش از ۲۰۰ بار (واحد فشار) نیز افزایش می‌یابد. استاندارد اصلی طراحی این مخازن توسط انجمن مهندسين مکانیک آمریکا تدوین شده و هر چهار سال یک بار مورد بازنگری واقع می‌شود (Ariatapeh, 2014). تعداد مخازن استفاده شده در خودروها، حجم و طراحی ابعاد آن‌ها به عواملی مانند نوع خودرو، توان موتور و فضای در نظر گرفته شده برای مخازن بستگی دارد؛ اما به طور کلی مخازن CNG مورد استفاده در خودرو را می‌توان به چهار دسته نسل اول (تمام فلزی)، نسل دوم (آستر فلزی با پوشش کمپریچ کامپوزیت)، نسل سوم (آستر فلزی با پوشش کامل کامپوزیت) و نسل چهارم (تمام کامپوزیتی) تقسیم‌بندی کرد. در ایران، مخازن فولادی پرکاربردترین نوع در میان این مخازن هستند. در پژوهش‌های اخیر، طراحی و تحلیل مخازن تحت فشار مورد مطالعه قرار گرفته‌است. چانگ لیانگ و همکاران (Changliang, 2006) در سال ۲۰۰۶، لایه لایه شدن مخزن کامپوزیتی با آستر فلزی تحت ضربه با سرعت پایین را بررسی کردند. آن‌ها از قانون اصلاح شده هرتزین برای بدست آوردن نیروی تماس بین دو جسم و روش نیومارک برای تحلیل پروسه طی ضربه استفاده کردند. وو و همکاران (Wu, 2015) در سال ۲۰۱۵، به تحلیل تنش و آسیب در مخازن تحت فشار کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها تحلیل تنش و آسیب را بر روی یک مخزن تحت فشار کامپوزیت با آستر آلومینیوم تحت فشار داخلی از طریق شبیه‌سازی عددی انجام دادند. یک مدل آسیب متری با در نظر گرفتن چهار حالت شکست برای کامپوزیت، یعنی الیاف کششی و فشاری، ماتریس کششی و فشاری در نظر گرفتند. شریفی و همکاران (Sharifi, 2018) در سال ۲۰۱۸، آسیب مخازن GFRP تحت فشار کامپوزیتی بافته شده چند لایه را تحت تأثیر ضربه با سرعت کم و فشار داخلی مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر شکل هندسی گنبدی (گنبدهای نیم‌کره، سهمی و بیضوی) بر تغییر شکل مکانیکی و طول ترک انواع پلیمرهای تقویت شده و بافته شده با ورق (GRP) تحت تأثیر سرعت کم (مورد اول) یا ترکیبی از مورد اول و فشار داخلی (مورد دوم) انجام شد. لیاو و جیا (Liao, 2018) نیز در آن سال، پاسخ دینامیکی مخازن تحت فشار کامپوزیتی تحت تأثیر ضربه با سرعت کم را با استفاده از یک مدل سه‌بعدی چند لایه مورد تحلیل المان محدود قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود بیان نمودند که پاسخ‌های ضربه‌ای مخازن تحت فشار کامپوزیتی را می‌توان بر اساس زیر لایه‌ها محاسبه کرد و با استفاده از این روش، آسیب الیاف و ماتریس را بر اساس هر قطعه پیش‌بینی کرد. در سال ۲۰۱۹، پرآمد و همکاران (Pramod, 2019) به طراحی و تحلیل المان محدود کامپوزیت فلزی تحت فشار پرداختند. آن‌ها در این تحقیق، روش جدیدی در طراحی آستر اتخاذ نمودند و آزمایش امکان‌سنجی تکنیک‌های تولیدی و پیوستگی را انجام دادند. انتخاب زاویه پیچش و توزیع ضخامت کامپوزیت در طول مخزن را با استفاده از یک روش تحلیلی مبتنی بر تئوری کلاسیک لمینت بدست آوردند. آریا تپه و همکاران (Ariatapeh, 2014) در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثر تصادم و آسیب ناشی از برخورد مخازن CNG فولادی تحت فشار پرداختند و قابلیت بکارگیری مجدد مخزن پس از برخورد، مطابق استاندارد سازمان توسعه استاندارد کانادا و ایالت متحده در مخازن CNG را مورد بررسی قرار دادند. آنان شبیه‌سازی صدمات وارد بر مخزن را در تصادف و سقوط خودرو با بکارگیری مدل آسیب جانسون-کوک^۱ انجام و محاسبات برخورد در جهت‌های مختلف را با در نظر گرفتن تأثیر فشار داخل مخزن، سرعت تصادم و ارتفاع سقوط مورد بررسی قرار دادند و انباشتگی آسیب ناشی از برخورد را برای حالت‌های مختلف بدست آوردند. نتایج آنان نشان داد که بیشترین آسیب در حالت برخورد عمودی ایجاد می‌گردد و با تغییر زاویه برخورد از امتداد عمودی به افقی، آسیب وارده به مخزن کم‌تر خواهد بود.

مخازن فولادی به دلیل هزینه تولید پایین‌تر و پروسه ساده ساخت آن‌ها نسبت به مخازن نیمه کامپوزیتی و تمام کامپوزیتی، پرکاربردترین نوع مخازن در ایران هستند. همچنین به سبب داشتن مزیت نفوذ ناپذیری عالی در مقابل عبور گازها و استحکام مکانیکی، از کارکرد خوبی برخوردار هستند. از طرفی، وزن بالای این مخازن و همچنین عمر خستگی پایین‌ترشان

¹ Johnson-Cook Damage

نسبت به سایر مخازن، از معایب و محدودیت‌های مهم آن‌ها به شمار می‌رود. مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه نیازها، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل کرد. به طور کلی مواد کامپوزیتی دارای مزایای زیر هستند: مقاومت مکانیکی نسبت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی بالا، خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات، خواص عایق حرارتی خوب و صلیبت بیشتر. استحکام کششی الیاف کربن می‌تواند تا بیش از ۵۰۰۰ مگاپاسکال (یعنی بیش از دو برابر فولادهای مستحکم و فوق مستحکم) باشد. استحکام کششی اپوکسی نیز در بهترین حالت ۱۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. از طرفی الیاف کربن بسیار ترد و شکننده است، در حالی که اپوکسی از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردار است. ترکیب خواص این دو ماده منجر به ایجاد یک خواص بینابین می‌شود که بسیار مطلوب است. کامپوزیت کربن-اپوکسی بسته به این که به چه نسبتی با هم مخلوط شوند، دارای استحکام نهایی کشش در حدود ۷۰۰ تا ۲۵۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که با فولادهای مستحکم و فوق مستحکم برابری می‌کند. ضمن این که چگالی آن تقریباً یک چهارم فولاد بوده و میزان کرنش شکست آن می‌تواند تا ۲ الی ۳ برابر کرنش شکست فولادهای مستحکم افزایش پیدا کند (Changliang, 2006).

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی مخازن CNG، مقاومت آن‌ها در برابر ضربه و سقوط است. مخازن فلزی و کامپوزیتی به دلیل تفاوت در ساختار ماده و تعداد لایه‌ها و زاویه الیاف، هر کدام رفتاری متفاوت را در برابر ضربه و آسیب از خود نشان می‌دهند. مقدار آسیب وارده به مخازن، نقشی اساسی در مقاومت و عمر آن‌ها ایفا می‌کند. با مروری بر پژوهش‌های پیشین، مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعات بسیار کمی پیرامون بررسی عملکرد مخازن CNG در معرض بارگذاری ضربه، به ویژه مقایسه عملکرد هر چهار نوع مخزن CNG تحت این بارگذاری صورت گرفته‌است. لذا در این پژوهش ابتدا به طراحی مخازن نسل اول تا چهارم پرداخته و هر کدام از نظر وزنی بررسی و قیاس شدند. سپس مخازن طراحی شده در فشار هیدرواستاتیک ۲۰۰ بار (فشار کاری) با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تست شده تا از نظر صحت طراحی تایید شوند. شبیه‌سازی تست هیدرواستاتیک مخازن با استفاده از معیار گسیختگی سای-هیل^۱ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در نهایت به بررسی میزان آسیب‌های وارده به مخازن فلزی و کامپوزیتی تحت ضربه با دو سرعت و دو زاویه برخورد متفاوت پرداخته شده و رفتار این مخازن به کمک معیار آسیب فلزات و کامپوزیت‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است تا مناسب‌ترین نوع مخزن در برابر آسیب ناشی از ضربه شناسایی و معرفی شود. شبیه‌سازی صدمات وارد بر بخش فلزی مخازن با بکارگیری مدل آسیب جانسون-کوک و صدمات وارده به بخش کامپوزیتی مخازن با استفاده از مدل آسیب هاشین^۲ مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

مبانی تئوری

معیار شکست سای-هیل و آسیب هاشین

در نرم افزار آباکوس با استفاده از معیار سای-هیل^۱، مقدار شاخص شکست^۳ از روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود. چنانچه این شاخص عددی کمتر از ۱ باشد، گسیختگی اتفاق نمی‌افتد. در غیر این صورت، لایه کامپوزیتی دچار گسیختگی می‌شود (Mozafari, 2016).

$$I_F = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{if } \sigma_{11} \geq 0 \rightarrow X = X_t, \text{ if } \sigma_{11} < 0 \rightarrow X = X_c \\ \text{if } \sigma_{22} \geq 0 \rightarrow Y = Y_t, \text{ if } \sigma_{22} < 0 \rightarrow Y = Y_c \end{cases} \quad (2)$$

¹ Tsai-Hill Failure

² Hashin Failure

³ I_F (Index of Failure)



هاشین (Hashin, 1980) برای تسلیم کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با الیاف دو معیار را پیشنهاد نمود که در آن شکست الیاف و رزین زمینه از هم مستقل هستند. بنابراین، این دو معیار شامل چهار حالت می‌باشد: شکست الیاف تحت کشش، شکست الیاف تحت فشار، شکست رزین تحت کشش و شکست رزین تحت فشار. معادله هاشین در نرم افزار آباکوس به ترتیب برای چهار حالت ذکر شده، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} F_F^T &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \\ F_F^C &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T} \right)^2 \\ F_M^T &= \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \\ F_F^T &= \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی شکست در کامپوزیت‌های لایه-الیافی با استفاده از معادله هاشین، از یک شاخص به نام F (که نشان‌دهنده Failure است) استفاده می‌کند. این شاخص دقیقاً مانند شاخص شکست (I_F) است که در معیار سای-هیل معرفی شد. علت تفاوت این دو نام در نرم‌افزار آباکوس این است که I_F برای کلیه مواد ارتوتروپ از جمله کامپوزیت‌ها به کار می‌رود. اما شاخص F تنها برای بیان شروع شکست کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با الیاف بکار می‌رود. بنابراین F_F^C و F_F^T شاخص شکست الیاف در کشش و فشار هستند و F_M^T و F_M^C نشان‌دهنده شاخص شکست ماتریس (رزین) در کشش و فشار می‌باشند. برای اینکه شکست در یک لایه کامپوزیتی اتفاق نیافتد، در هر چهار معادله هاشین باید $F < 1$ باشد. در روابط فوق X^T ، Y^T و Y^C به ترتیب استحکام کششی در راستای الیاف، استحکام فشاری در راستای الیاف، استحکام کششی در راستای عمود بر الیاف و استحکام فشاری در راستای عمود بر الیاف هستند، به علاوه S^L و S^T استحکام برشی لایه کامپوزیت در جهت طولی و عرضی هستند. ضریب α 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.

معیار پلاستیسیته و آسیب جانسون-کوک

یکی از مدل‌هایی که خصوصاً در نرخ کرنش‌های بالاتر از $10s^{-1}$ به خوبی عمل می‌کند، مدل جانسون-کوک است. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود (Johnson, 1983):

$$\sigma^{Pl} = \left[A + B(\epsilon^{Pl})^n \right] \left[1 + C.Ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{Pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - \bar{\theta}^m] \quad (4)$$

$$\bar{\theta} = \begin{cases} 0 & : \theta < \theta_{Transition} \\ \frac{\theta - \theta_{Transition}}{\theta_{melt} - \theta_{Transition}} & : \theta_{Transition} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & : \theta > \theta_{Transition} \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه فوق θ دمای فلز و θ_{melt} دمای ذوب فلز و $\theta_{transition}$ دمایی است که دماهای کمتر از آن تأثیری بر تنش سیلان فلز نخواهند داشت. $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که مقادیر A ، B و n در آن نرخ اندازه‌گیری می‌شوند و معمولاً بین 0.001 تا $1s^{-1}$ است. این سه ثابت با تست کشش استاتیکی تعیین می‌شوند و به همین دلیل به آن‌ها ثابت شبه استاتیکی می‌گویند. ثابت C و m توسط تست‌های پیچش در نرخ کرنش‌ها و دماهای متفاوت و تست فشار میله هاپکینسون تعیین می‌شوند.

معیار گسیختگی جانسون-کوک یک حالت خاص از آسیب نرم می باشد. طبق این معیار مقدار « کرنش شروع شکست » از رابطه زیر محاسبه می شود (Johnson, 1983):

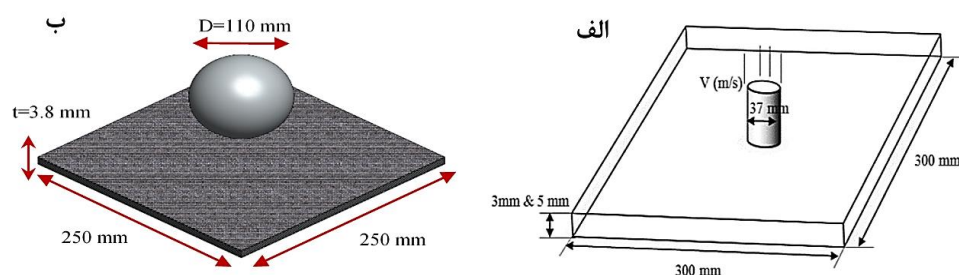
$$\varepsilon_D^{Pl} = \left[D_1 + D_2 \cdot e^{(D_3 \cdot \eta)} \right] \left[1 + D_4 \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_D^{Pl}}{\dot{\varepsilon}} \right) \right] \left[1 + D_5 \cdot \bar{\theta} \right] \quad (6)$$

در رابطه فوق، برکت اول نشان دهنده تاثیر η بر ε_D^{Pl} است. برکت دوم نشان دهنده تاثیر نرخ کرنش بر ε_D^{Pl} است. برکت سوم نیز تاثیر دما بر ε_D^{Pl} را نشان می دهد. برای بدست آوردن ضرایب D_1 تا D_5 از آزمایش های متعددی استفاده می شود. همانند معیار سای-هیل و هاشین، چنانچه مقدار آسیب در فلز به مقدار عددی ۱ برسد، تخریب رخ خواهد داد و آسیب در ناحیه مورد نظر کامل شده است.

روش تحقیق

اعتبارسنجی شبیه سازی

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی ضربه در نرم افزار اجزای محدود آباکوس و همچنین شبیه سازی آستر فلزی و ورق چند لایه کامپوزیتی تحت بار ضربه، مدل هایی از موهوتی و همکاران (Mohotti, 2013) و رضانی و همکاران (Ramezani, 2022)، یکی از جنس آلومینیوم ۵۰۸۳ و دیگری از جنس کامپوزیت چند لایه کربن-اپوکسی با زوایای الیاف مختلف و ضخامت متفاوت انتخاب و مطابق شکل ۱ به همراه جزئیات ذکر شده در جداول ۱ و ۲ مورد شبیه سازی قرار گرفت. در انجام این تحلیل، از حلگر دینامیک صریح^۱ استفاده شده و تماس بین پرتابه و هدف از نوع سطح به سطح^۲ و بدون اصطکاک تعریف شده است. به دلیل وجود تقارن در صفحات و کاهش حجم محاسباتی، تنها یک چهارم صفحات مدل سازی شدند. مطابق پژوهش (Mohotti, 2013)، ورق آلومینیوم به ضخامت ۳ و ۵ میلی متر توسط ضربه زننده ای به جرم ۵ کیلوگرم تحت بار ضربه با سرعت ۹/۰۲ و ۱۲/۳۱ متر بر ثانیه قرار می گیرد. به مشابه آن و مطابق پژوهش (Ramezani, 2022)، ورق ۶ لایه کامپوزیتی با مجموع ضخامت ۳/۸ میلی متر توسط ضربه زننده ای به جرم ۶۸۰ گرم و با سرعت ۴/۴۲ و ۵/۴۲ متر بر ثانیه مورد برخورد قرار می گیرد و در نهایت، نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها با نتایج پژوهش های ذکر شده اعتبارسنجی شده است.



شکل ۱: شماتیک آزمایش ضربه: الف) مرجع (Mohotti, 2013)، ب) مرجع (Ramezani, 2022)

جدول ۱: خواص مکانیکی آلومینیوم H۱۱۶-H۶۰۶۱ مرجع (Mohotti, 2013)

n	B (MPa)	A (MPa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۴۰۴	۲۸۰	۲۱۵	۲۶۶۰	۰/۳۳	۷۰
$\sigma \dot{\varepsilon}$	D_5	D_4	D_3	D_2	D_1
۰/۰۰۱	۱۶/۸	۰/۱۴۷	-۲/۲۵	۰/۳۸۹	۰/۱۷۸

¹ Dynamic Explicit

² Surface to Surface Contact



جدول ۲: خواص مکانیکی کامپوزیت کربن-ایپوکسی مرجع (Ramezani, 2022)

$E_1=E_2$ (GPa)	E_3 (GPa)	$\nu_{12}=\nu_{13}=\nu_{23}=\nu$	$G_{12}=G_{13}=G_{23}$	چگالی (kg/m^3)
۵۶	۸,۱۷	۰,۲۵	۲,۶	۱۶۰۰
ضخامت کل (میلی متر)		تعداد لایه ها		ترتیب قرارگیری لایه ها
۳,۸		۶		[۰/۹۰/۰] _s

شبیہ سازی مخازن نسل اول تا چهارم CNG

مخازن CNG از لحاظ ساختار مدل سازی به چهار دسته زیر تقسیم بندی می شوند:

(۱) نسل اول: تمام فلزی

(۲) نسل دوم: آستر فلزی با پوشش کم ریچ کامیوزیت

(۳) نسل سوم: آستر فلزی با پوشش کامل کامیوزیت

(۴) نسل چہارم: تمام کامیوزیتی

به جهت مقایسه و بررسی مخازن در شرایط برابر، ابعاد مخازن نسل اول تا چهارم بصورت مشترک، به شعاع ۱۷۸ میلی‌متر، طول ۹۸۰ میلی‌متر و حجم واقعی ۷۵ لیتر مطابق با کاتالوگ محصول تولیدی شرکت پارس‌ام-سی انتخاب شده‌است که بر روی خودروهایی همچون سمند، پژو پارس و پژو ۴۰۵ قابل نصب می‌باشد. از آن جایی که نسبت ضخامت مخزن به قطر آن ناچیز می‌باشد، دیواره مخزن به صورت پوسته مدل‌سازی شده‌است. سایر اطلاعات مخازن در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده‌است.

جدول ۳: مشخصات هندسی مخازن مدل سازی شده (Zu, 2012), (Ariatapeh, 2014)

نوع مخزن	ضخامت آستر فلزی (mm)	تعداد لایه کامپوزیتی	ضخامت کامپوزیت (mm)	مجموع ضخامت (mm)
نسل اول	۷٫۵	–	–	۷٫۵
نسل دوم	۴٫۵	۱۰	۴	۸٫۵
نسل سوم	۲٫۵	۱۶	۹٫۶	۱۲٫۱
نسل چهارم	–	۱۶	۲۰	۲۰

جدول ۴: ترتیب قرارگیری لایه‌ها در مخازن نسل دوم تا چهارم (Zu, 2012), (Sharifi, 2018)

[illegible]

خواص مکانیکی مواد

نوع فولاد و کامپوزیت به کار رفته به ترتیب AISI 4340 و Carbon-Epoxy بوده که در جداول ۵ و ۶ می‌توان خواص مکانیکی آن‌ها را مشاهده کرد.

جدول ۵: خواص مکانیکی کربن-اپوکسی (Heydari-Rarani, 2018)

چگالی (kg/m^3)	G_{12} (GPa)	$I_2=I_{13}$	E_2 (GPa)	E_1 (GPa)
۱۵۵۰	۴۷	۰.۳۲	۸۱۷	۱۳۷
S (MPa)	Y_C (MPa)	Y_T (MPa)	X_C (MPa)	X_T (MPa)
۷۸۴	۷۸۴	۳۹۲	۹۸۰	۱۴۷۰

جدول ۶: خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۳۴۰ (Ariatapeh, 2014)

α (K^{-1})	T_0 (K)	T_m (K)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	E (GPa)
۰.۰۰۰۰۳۲	۲۹۳	۱۷۹۳	۷۸۳۰	۰.۳	۲۰۰
$\dot{\epsilon}_0$	C	m	n	B (MPa)	A (MPa)
۱	۰.۰۱۴	۱.۰۳	۰.۲۶	۵۱۰	۷۹۲
-	D_5	D_4	D_3	D_2	D_1
-	۰.۶۱	۰.۰۰۲	-۲.۱۲	۳.۴۴	۰.۰۵

تحلیل استاتیکی و دینامیکی مدل

به منظور بررسی رفتار مخازن CNG، تحلیل در دو مرحله انجام شده است. ابتدا مخازن نسل اول تا چهارم مدل سازی و به کمک حلگر استاتیکی، تحت فشار داخلی ۲۰۰ بار مورد صحت سنجی مدل سازی قرار می گیرند تا از استحکام کافی برخوردار باشند. سپس مدل ها به کمک حلگر دینامیکی در برابر آسیب ناشی از ضربه قرار گرفته و رفتار آن ها مورد بررسی قرار می گیرند. پس از بررسی استحکام مخازن در فشار کاری، مدل ها همراه با فشار داخلی تحت ضربه به دیواره صلب قرار گرفتند. برخورد مخازن در حالت افقی (در امتداد محور طولی مخزن) با سرعت های ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت و حالت عمودی (عمود بر محور طولی مخزن) با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت انجام شد و مقدار آسیب و رفتار مخازن در برابر ضربات به موانع، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در تمامی مراحل آزمون برخورد، مخازن در فشار کاری ۲۰۰ بار قرار دارند. در تحلیل اول، جداره مخازن تحت فشار استاتیکی قرار دارند. لذا تحلیل مسئله ی اول استاتیکی بوده و از حلگر استاتیک جنرال^۱ استفاده شده است. در تحلیل مسئله ی دوم، مخازن در فشار داخلی تحت برخورد به دیواره، با سرعت های مدنظر قرار می گیرند. لذا تحلیل مسئله ی دوم از نوع دینامیکی بوده و از حلگر دینامیک صریح با مدت زمان ۰/۱ ثانیه استفاده شده است. تماس از نوع عمومی با رفتار عمودی^۲ و بدون ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده است. دیواره به صورت صلب گسسته^۳ مدل سازی و به کمک نقطه مرجع، در تمام جهات مقید شده است. در نهایت مخازن تحت فشار داخلی ۲۰ مگاپاسکال و سرعت اولیه ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت بارگذاری می شوند. مدل سازی مخازن به صورت پوسته^۴ و از المان با فرمول بندی S4R^۵ و سائز ۷ میلی متر استفاده شده است. نمای اولیه آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.

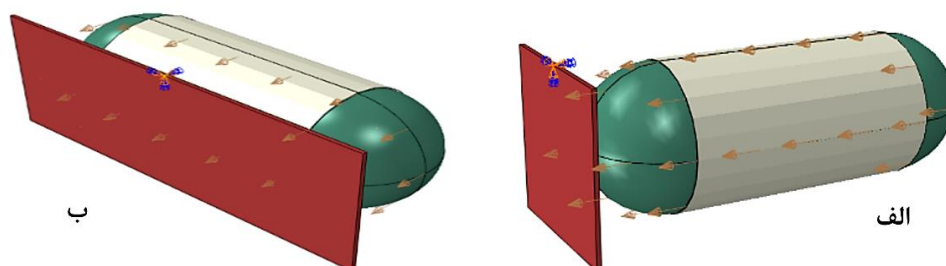
¹ Static General Solver

² Normal Behavior

³ Discrete Rigid

⁴ Shell

⁵ Shell Element, Reduced Integration Formulation

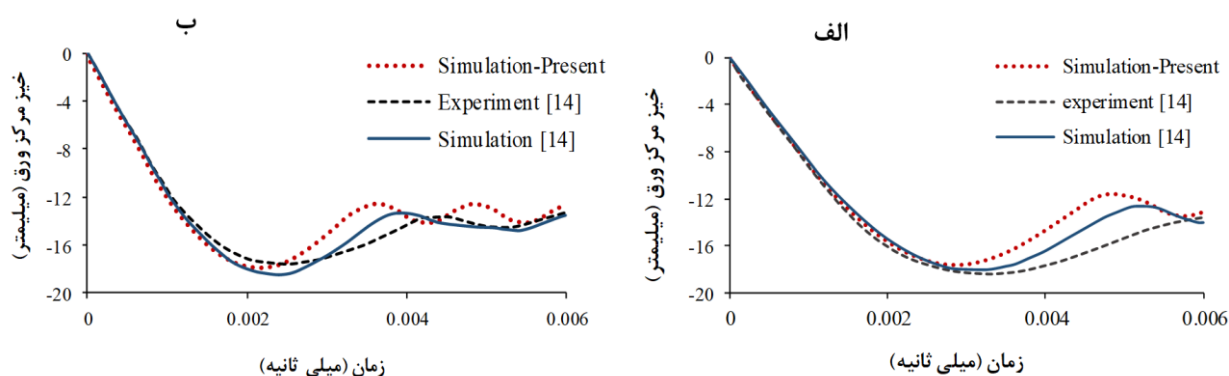


شکل ۲: نمای مدل آزمایش برخورد: (الف) برخورد عمودی، (ب) برخورد افقی

نتایج و بحث

نتایج صحت‌سنجی

ابتدا به صحت‌سنجی و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج ارائه شده در پژوهش موهوتی و همکاران (Mohotti, 2013) و رضانی و همکاران (Ramezani, 2022) پرداخته شده است. همانطور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهد، در تمام حالات مقدار اختلاف نتایج میان بیشینه خیز و تغییرات جابجایی بر حسب زمان ورق‌ها بسیار کم می‌باشد که این موضوع، صحت روند شبیه‌سازی و نتایج را تأیید می‌کند. با توجه به این‌که آستر مورد استفاده در مخازن CNG فلزی است، در شکل ۳ نتایج بدست آمده از خیز صفحه آلومینیومی تحت بار ضربه با مرجع (Mohotti, 2013) مقایسه شده‌است. در جدول ۷ نیز بیشینه خیز ورق آلومینیومی به همراه درصد اختلاف آن نسبت به نتایج مرجع (Mohotti, 2013) نمایش داده شده‌است.

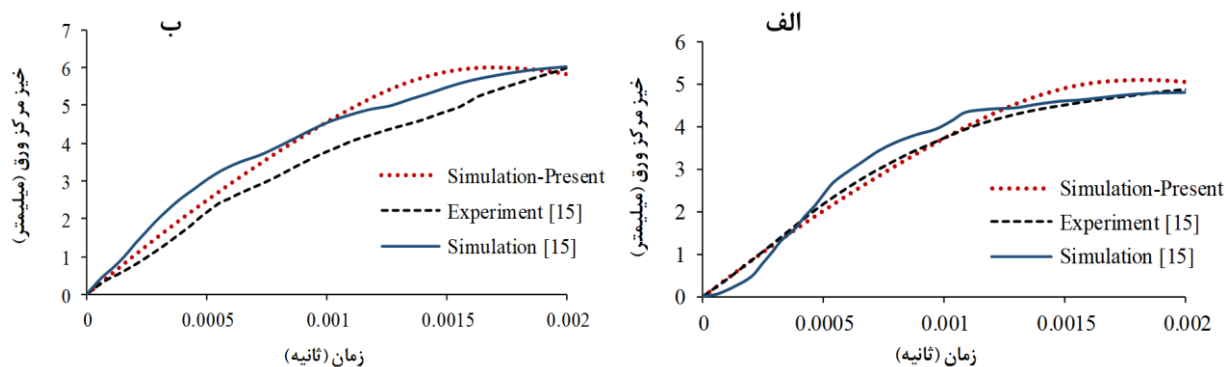


شکل ۳: منحنی خیز-زمان مرکز ورق آلومینیوم و مقایسه با مرجع (Mohotti, 2013): (الف) ضخامت ۳ میلی‌متر، (ب) ضخامت ۵ میلی‌متر

جدول ۷: مقایسه نتایج بیشینه خیز ورق آلومینیوم با مرجع (Mohotti, 2013)

ضخامت (mm)	سرعت برخورد (m/s)	آزمایش	بیشینه خیز ورق (mm)	درصد خطای شبیه‌سازی
۳	۹٫۰۲	تجربی (مرجع)	۱۸٫۳	-
		شبیه‌سازی (مرجع)	۱۸	۱٫۶۴
		شبیه‌سازی حاضر	۱۷٫۶۳	۳٫۶۶
۵	۱۲٫۳۱	تجربی (مرجع)	۱۷٫۶	-
		شبیه‌سازی (مرجع)	۱۸٫۵	۵٫۱۱
		شبیه‌سازی حاضر	۱۷٫۹۴	۱٫۹۳

در ادامه نتایج، از آن جایی که پوشش اصلی مورد استفاده در مخازن CNG کامپوزیتی می باشد، در شکل ۴ نتایج بدست آمده از خیز صفحه کامپوزیتی تحت بار ضربه با مرجع (Ramezani, 2022) مورد مقایسه قرار گرفته است. بیشینه خیز ورق کامپوزیتی به همراه درصد اختلاف نتایج نسبت به مرجع (Ramezani, 2022) نیز در جدول ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴: مقایسه منحنی خیز-زمان مرکز ورق کامپوزیت با مرجع (Ramezani, 2022): (الف) سرعت ۴/۴۲ متر بر ثانیه، (ب) سرعت ۵/۴۲ متر بر ثانیه

جدول ۸: مقایسه نتایج بیشینه خیز ورق کامپوزیتی با مرجع (Ramezani, 2022)

درصد خطای شبیه سازی	بیشینه خیز ورق (mm)	آزمایش	سرعت برخورد (m/s)	ضخامت (mm)
-	۴٫۸۴	تجربی (مرجع)	۴٫۴۲	۳٫۸
۲٫۶۹	۴٫۹۷	شبیه سازی (مرجع)		
۵٫۳۷	۵٫۱	شبیه سازی حاضر		
-	۵٫۹۸	تجربی (مرجع)	۵٫۴۲	
۰٫۵	۶٫۰۱	شبیه سازی (مرجع)		
۰٫۵۲	۶٫۱۱	شبیه سازی حاضر		

نتایج وزن مخازن CNG

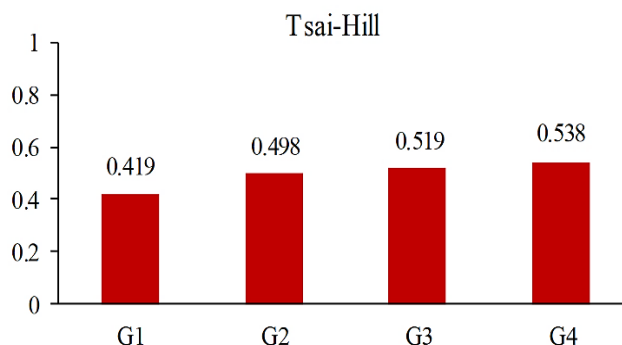
مخازن تمام فلزی دارای وزن بیشتر و قیمت پایین تری نسبت به مخازن نیمه کامپوزیتی و تمام کامپوزیتی هستند. در مقابل، مخازن کامپوزیتی وزن کم و عمر خستگی بهتری را نسبت به مخازن تمام فلزی ارائه می دهند. جدول ۹ مقادیر وزن مخازن را پس از مدل سازی نشان می دهد و مشخص است که مخزن نسل اول بیشترین مقدار وزن را دارا می باشد. سایر مخازن به ترتیب از نسل پیشین خود سبکتر هستند و در این بین، مخزن نسل چهارم با وزن ۳۳/۱۵ کیلوگرم، کمترین مقدار وزن را دارا است. مخزن نسل دوم، سوم و چهارم نسبت به نسل اول به ترتیب ۳۳/۴٪، ۴۱/۴٪ و ۴۷٪ سبک تر می باشد که برتری مخازن کامپوزیتی را به وضوح نشان می دهد.

جدول ۹: وزن مخازن CNG طراحی شده

نوع مخزن	نسل اول	نسل دوم	نسل سوم	نسل چهارم
وزن (کیلوگرم)	۶۲/۸	۴۱/۸۳	۳۶/۸۳	۳۳/۱۵
درصد کاهش وزن نسبت به نسل اول	-	۳۳/۴	۴۱/۴	۴۷

نتایج تحلیل استاتیکی

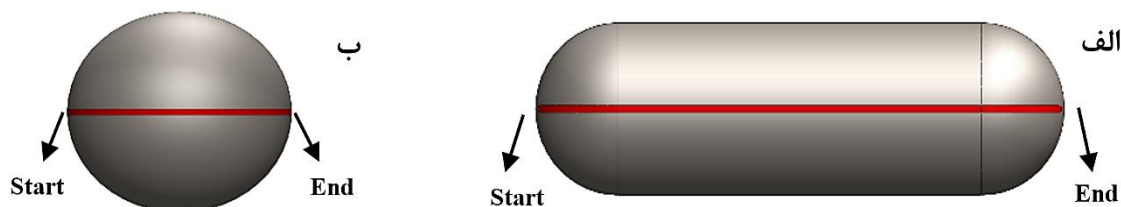
شکل ۵ مقدار بحرانی‌ترین شاخص گسیختگی مخازن را در تست فشار هیدرواستاتیکی نشان می‌دهد. واضح است که پس از بررسی تحلیل مخازن در تست استاتیکی، هیچ یک از لایه‌های مخازن دچار شکست نشده‌اند و مقدار شاخص آسیب بحرانی برای تمامی مخازن در محدوده ایمن قرار دارد. بنابراین مدل‌ها برای استفاده در تحلیل دوم کاملاً مورد اطمینان می‌باشند.



شکل ۵: مقدار بحرانی‌ترین شاخص شکست سای-هیل (I_F) مخازن CNG

نتایج تحلیل دینامیکی برخورد افقی با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت

جهت مشاهده خروجی‌های مورد بحث، مطابق شکل ۶ مسیری بر روی مخازن به عنوان محل استخراج داده‌ها در محل برخورد به مانع صلب در نظر گرفته شد. مقادیر کرنش لگاریتمی وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد در شکل ۷ الف قابل مشاهده است.

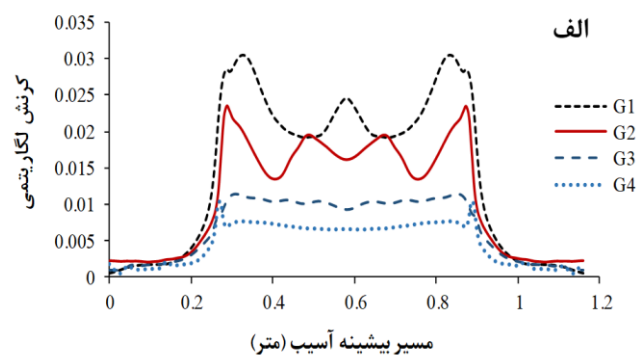
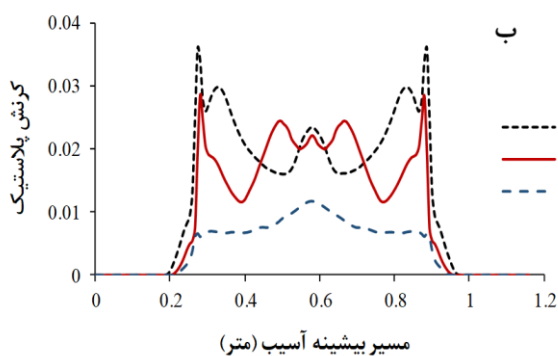


شکل ۶: مسیر ثبت نتایج: الف) در حالت برخورد افقی، ب) در حالت برخورد عمودی

از شکل ۷-الف می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کرنش ماکزیمم در مخزن نسل اول در مقدار عددی ۰/۰۳ رخ داده‌است. مقدار ماکزیمم کرنش رخ داده در مخزن نسل دوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۲۳ در رتبه دوم قرار دارد. همچنین مقدار کرنش رخ داده در مخزن نسل چهارم کمتر از سایر مخازن با مقدار عددی ۰/۰۱ می‌باشد.

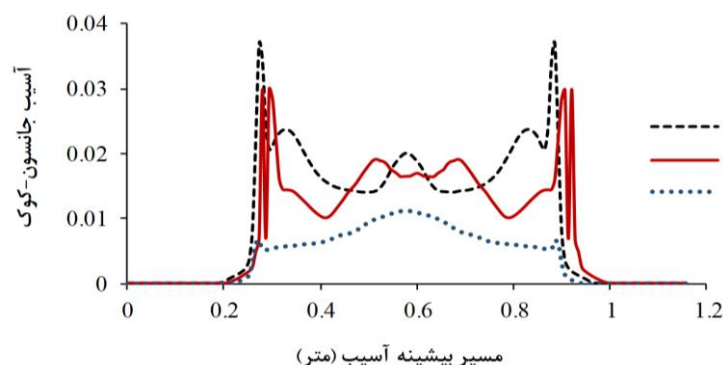
مقادیر کرنش پلاستیک معادل^۱ وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد در شکل ۷-ب قابل مشاهده است. مخزن نسل چهارم به دلیل عدم وجود آستر فلزی، فاقد کرنش پلاستیک می‌باشد. شکل ۷ ب نشان می‌دهد که ماکزیمم کرنش پلاستیک در مخزن نسل اول با مقدار عددی ۰/۰۳۶ رخ داده‌است. مقدار ماکزیمم کرنش پلاستیک مخزن نسل دوم نیز با مقدار ۰/۰۲۹ در رتبه دوم قرار دارد.

¹ Equivalent Plastic Strain (PEEQ)



شکل ۷: الف) کرنش لگاریتمی، ب) کرنش پلاستیک در مسیر بیشینه آسیب

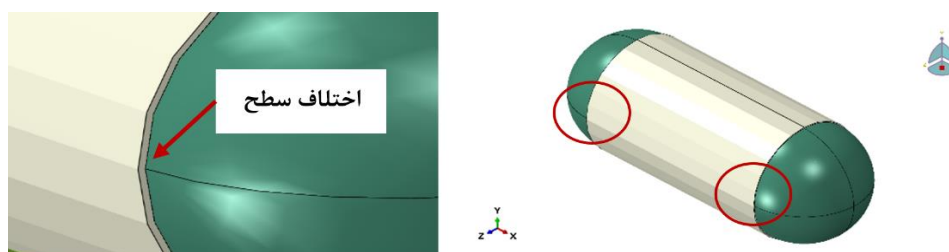
مخزن نسل اول به دلیل تمام فلزی بودن، فاقد آسیب هاشین و مخزن نسل چهارم هم به دلیل تمام کامپوزیتی بودن، فاقد آسیب جانسون-کوک می باشد. مخزن نسل دوم و سوم شامل هر دو معیار آسیب در ساختار خود هستند. شکل ۸ مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت نشان می دهد. از شکل زیر می توان نتیجه گرفت که مقدار آسیب وارده به آستر فلزی مخزن نسل اول بیشترین مقدار را دارا است و عدد ۰/۰۴ را کسب کرده است. مخزن نسل سوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۱۱ کمترین آسیب را متحمل شده است. می توان نتیجه گرفت که در ضربه با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت، وجود لایه های کامپوزیتی بر روی آستر فلزی در مخازن نسل دوم و سوم، موجب مقاومت بیشتر آستر مخازن در برابر بار ضربه، به ویژه مخزن نسل سوم می گردد. زیرا تمام یا تعدادی از لایه های کامپوزیتی همواره تخریب نشده و در ناحیه الاستیک خود، انرژی ضربه را به خوبی جذب می کنند. نتایج کرنش پلاستیک نیز این موضوع را تایید می کند.



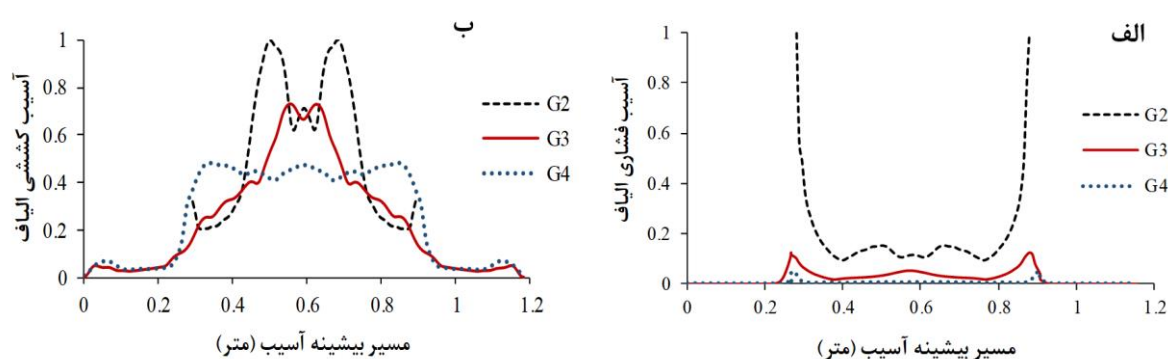
شکل ۸: آسیب وارده به مخازن بر اساس معیار جانسون-کوک

برای مقایسه گسیختگی کامپوزیت ها در مخازن نسل دوم، سوم و چهارم، در تمامی حالات برخورد، آسیب تمامی لایه های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و لایه ای که بیشترین آسیب را در هر کدام از نسل ها به خود دیده است، شناسایی و نمودار نرمال شده آن رسم گردید. در شکل ۱۰ و ۱۱، مقادیر مود آسیب فشاری الیاف، مود آسیب کششی الیاف، مود آسیب فشاری زمینه و مود آسیب کششی زمینه در بخش کامپوزیتی مخازن نسل دوم، سوم و چهارم نمایش داده شده است. در شکل ۱۰-الف مشخص است که مقدار بیشینه آسیب فشاری وارده به الیاف در مخزن نسل دوم به مراتب بیشتر از سایر نسل ها می باشد. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۸/۶۴ اتفاق افتاده است. دلیل آن هم اختلاف سطح بخش استوانه و عدسی مخزن به دلیل وجود لایه های کامپوزیتی بر روی بخش استوانه ای مخزن است که به صورت محیطی به دور مخزن پیچیده شده و همین اختلاف سطح، باعث تجمع آسیب در این ناحیه شده است. در شکل ۹ این موضوع با جزئیات نشان داده شده است. مقدار بیشینه آسیب الیاف در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار ۱/۱۱ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱۱ با مقدار عددی ۰/۴ رخ داده است. در نتیجه مخزن نسل چهارم آسیب کمتری را در این مود شکست متحمل شده است. از جدول ۱۰ هم کاملاً مشخص

است که مقدار آسیب فشاری الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۱۵۶ شده‌است. همچنین در هیچکدام از لایه‌های آن تخریبی رخ نداده و درصد تخریب لایه‌ها برابر صفر است. لازم بذکر است که علت عدم پیوستگی منحنی آسیب در مخزن نسل دوم، عدم حضور پوشش کامپوزیتی بر روی عدسی‌های آن می‌باشد. تمام نمودارهای آسیب بخش کامپوزیتی مخازن، به صورت نرمال شده استخراج و رسم شده‌اند.



شکل ۹: اختلاف سطح بین آستر و پوشش کامپوزیتی در مخزن نسل دوم



شکل ۱۰: آسیب وارده به الیاف بر اساس معیار هاشین: (الف) آسیب فشاری، (ب) آسیب کششی

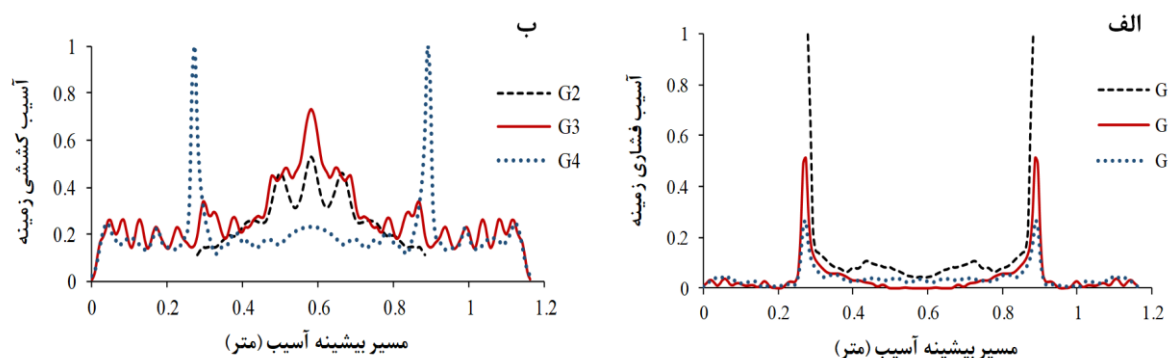
در مود آسیب کششی الیاف، با مشاهده شکل ۱۰-ب نتیجه می‌شود که مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل دوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۹۷ مشاهده شده‌است. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۰/۷۱ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۴۷ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را متحمل شده‌است. در جدول ۱۰ مشخص است که مقدار آسیب کششی الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن به مراتب کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۲۵ شده‌است. درصد تخریب تمامی مخازن در این مود برابر صفر می‌باشد اما مخزن نسل دوم میانگین آسیب و مقدار عددی آسیب بیشتری را دارد.

جدول ۱۰: مقادیر آسیب فشاری و کششی الیاف

نوع مخزن		نسل دوم	نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۳/۳	۰/۴۳۹	۰/۱۵۶
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۷۰	۱۲٪	٪۰
آسیب کششی الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۰/۶۷۶	۰/۴۱۵	۰/۲۵
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۰	٪۰	٪۰



در مود آسیب فشاری زمینه با مشاهده شکل ۱۱-الف نتیجه می شود که باز هم مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل دوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۵/۹۷ ایجاد شد. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۳/۰۴ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۱/۵۷ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را کسب کرد. از جدول ۱۱ هم می توان دریافت که آسیب فشاری زمینه در مخزن نسل چهارم از دیگر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه های آن برابر ۰/۵۲۷ شده است. درصد تخریب این مخزن هم به مراتب کمتر از مخازن دیگر شده و تنها ۳ لایه دچار تخریب شده است. مخزن نسل دوم با میانگین آسیب ۳/۵۶۷ و درصد تخریب ۱۰۰، بیشترین آسیب را دارا می باشد.



شکل ۱۱: آسیب وارده به زمینه بر اساس معیار هاشین: (الف) آسیب فشاری، (ب) آسیب کششی

در شکل ۱۱-ب هم می توان دید که مقدار بیشینه آسیب کششی زمینه در مخزن نسل چهارم اتفاق افتاده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۵/۸۸ رخ داده است. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل دوم در لایه ۱ با مقدار عددی ۳/۱ و در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۴/۳ ایجاد شده است. درصد تخریب ۱۰۰ در تمامی مخازن، به معنی تخریب تمام لایه ها در این مود آسیب می باشد. مخزن نسل دوم در این مود شکست، آسیب کمتری را در لایه ای که بیشینه آسیب را کسب کرده، متحمل شده است. در مقابل، مخزن نسل چهارم آسیب بیشتری در لایه مورد نظر دیده است، اما میانگین آسیب لایه های آن کمترین مقدار را نسبت به سایر نسل ها دارد. در حالت کلی و مشاهده برآیند نتایج، مخزن نسل چهارم باز هم عملکرد بهتری را از خود نشان داده است.

جدول ۱۱: مقادیر آسیب فشاری و کششی زمینه

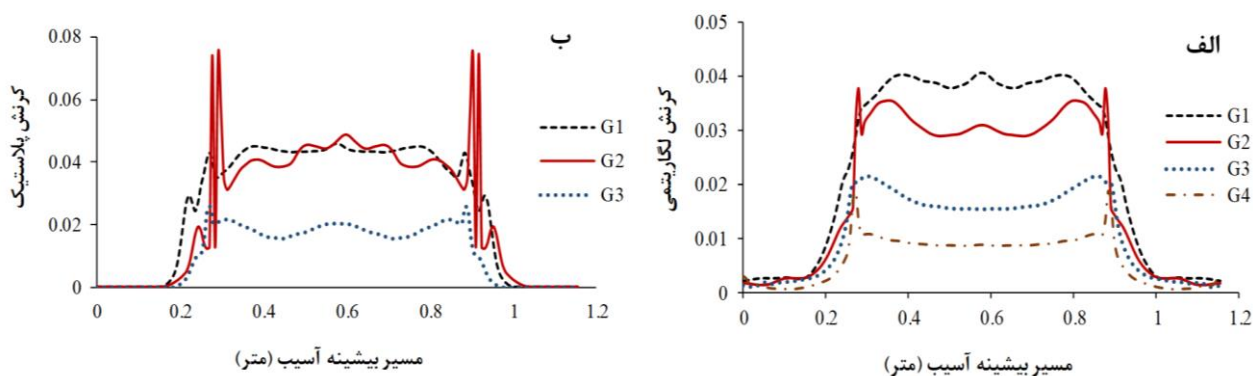
نوع مخزن		نسل دوم	نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری زمینه	میانگین آسیب لایه ها	۳/۵۶۷	۱/۳۶۳	۰/۵۲۷
	درصد تخریب لایه ها	٪۱۰۰	۵۶/٪۲۵	۱۸/٪۷۵
آسیب کششی زمینه	میانگین آسیب لایه ها	۲/۶۴۱	۳/۰۲	۲/۱۷۹
	درصد تخریب لایه ها	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰

نتایج تحلیل دینامیکی برخورد افقی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

شکل ۱۲-الف مقدار کرنش لگاریتمی وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد را نشان می دهد و می توان دید که مقدار کرنش ماکزیمم در مخزن نسل اول در مقدار عددی ۰/۰۴ رخ داده است. همچنین مقدار ماکزیمم کرنش رخ داده در مخزن نسل دوم با مقدار عددی ۰/۰۳۷ در رتبه دوم قرار دارد. میزان کرنش رخ داده در مخزن نسل چهارم کمتر از سایر مخازن با

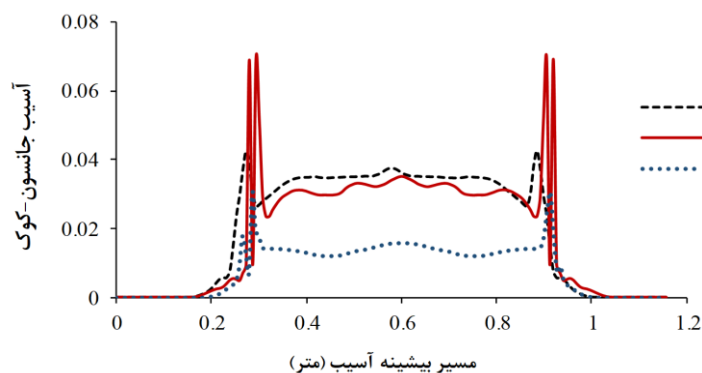


مقدار عددی ۰/۰۱۷ می باشد. در شکل ۱۲-ب مقدار کرنش پلاستیک معادل در مخازن نشان داده شده است. مخزن نسل چهارم به دلیل عدم وجود آستر فلزی و تمام کامپوزیتی بودن، فاقد کرنش پلاستیک می باشد. از شکل ۱۲-ب می توان نتیجه گرفت که برخلاف سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت، ماکزیمم کرنش پلاستیک این بار در مخزن نسل دوم با مقدار عددی ۰/۰۷۵ رخ داده است. مقدار ماکزیمم کرنش پلاستیک مخزن نسل اول با مقادیر عددی ۰/۰۴۶ در رتبه دوم قرار دارد.



شکل ۱۲: الف) کرنش لگاریتمی، ب) کرنش پلاستیک معادل در مسیر بیشینه آسیب

همانطور که قبلاً هم در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت ذکر شد، مخزن نسل اول به دلیل تمام فلزی بودن، فاقد آسیب هاشین و مخزن نسل چهارم هم به دلیل تمام کامپوزیتی بودن، فاقد آسیب جانسون-کوک می باشد. مخزن نسل دوم و سوم شامل هر دو معیار آسیب در ساختار خود می باشند. شکل ۱۳، مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت نشان می دهد.



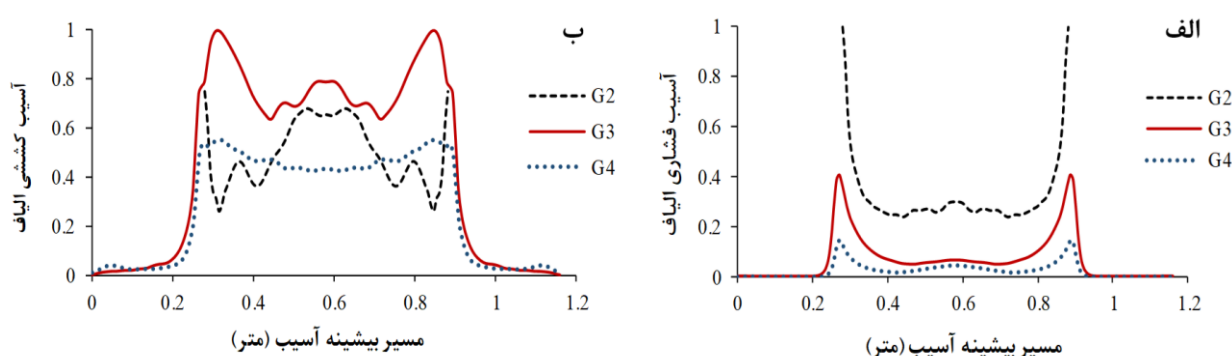
شکل ۱۳: آسیب وارده به مخازن بر اساس معیار جانسون-کوک

شکل ۱۳ نشان می دهد برخلاف سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت، مقدار آسیب وارده به آستر فلزی مخزن نسل دوم بیشترین مقدار را دارد و مقدار عددی ۰/۰۷ را کسب کرده است. می توان نتیجه گرفت که با افزایش دو برابری سرعت برخورد، تخریب لایه های کامپوزیتی مخزن نسل دوم افزایش یافته و نیروی ضربه بیشتری به آستر فلزی منتقل شده و موجب تجمع آسیب بیشتر در محل اتصال استوانه و عدسی مخزن (به دلیل اختلاف سطح موجود میان بخش عدسی و استوانه ای مخزن) گردیده است. مخزن نسل اول با مقدار عددی ۰/۴۲ رتبه دوم آسیب را داراست. مخزن نسل سوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۳ کمترین آسیب را متحمل شده است.

جهت مقایسه گسیختگی کامپوزیت ها، لایه ای که بیشترین آسیب را در هر کدام از نسل ها داراست، شناسایی و نمودار آن رسم گردید. در شکل ۱۴ و ۱۵، مقادیر مود آسیب فشاری الیاف، مود آسیب کششی الیاف، مود آسیب فشاری زمینه و مود



آسیب کششی زمینه در بخش کامپوزیتی مخازن نسل دوم، سوم و چهارم در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت نمایش داده شده است. از شکل ۱۴-الف کاملاً واضح است که مقدار بیشینه آسیب فشاری وارده به الیاف در مخزن نسل دوم به مراتب بیشتر از سایر نسل‌ها می‌باشد. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۳/۴ اتفاق افتاده است. دلیل آن هم اختلاف سطح بخش استوانه و عدسی مخزن به دلیل وجود لایه‌های کامپوزیتی بر روی بخش استوانه‌ای مخزن است که موجب تجمع آسیب در این مکان شده است. مقدار آسیب بیشینه فشاری الیاف در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۵/۴۲ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۱/۹۹ رخ داده است. در نتیجه مخزن نسل چهارم آسیب کمتری در این مود شکست متحمل شده است. در جدول ۱۲ هم کاملاً مشهود است که مقدار آسیب فشاری الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۶۶ شده است. همچنین درصد تخریب آن برابر ۲۵ و از سایر مخازن به مراتب کمتر بوده و تنها ۴ لایه آن دچار تخریب شده است. پس از آن، مخزن نسل سوم با میانگین آسیب ۲/۰۳ و درصد تخریب ۵۶/۲۵، مقام دوم را دارد. تمامی نمودارهای مربوط به آسیب بخش کامپوزیتی مخازن بصورت نرمال شده رسم شده‌اند.



شکل ۱۴: آسیب وارده به الیاف بر اساس معیار هاشین: (الف) آسیب فشاری، (ب) آسیب کششی

در مود آسیب کششی الیاف، با بررسی شکل ۱۴-ب می‌توان دریافت که مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل سوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۶۷ مشاهده شده است. مقدار آسیب بیشینه کششی الیاف در مخزن نسل دوم در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۲۵ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۹۲ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را متحمل شده است. در جدول ۱۲ هم محسوس است که مقدار آسیب کششی الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن به مراتب کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۴۰۷ شده است. همچنین در هیچکدام از لایه‌های آن تخریبی رخ نداده است، اما مخزن نسل دوم میانگین آسیب و مقدار عددی آسیب بیشتری را متحمل شده و ۶۰ درصد از لایه‌های آن دچار تخریب شده است. مخزن نسل سوم با میانگین آسیب ۰/۶۹۷ و درصد تخریب ۱۸/۷۵ در رتبه دوم قرار دارد.

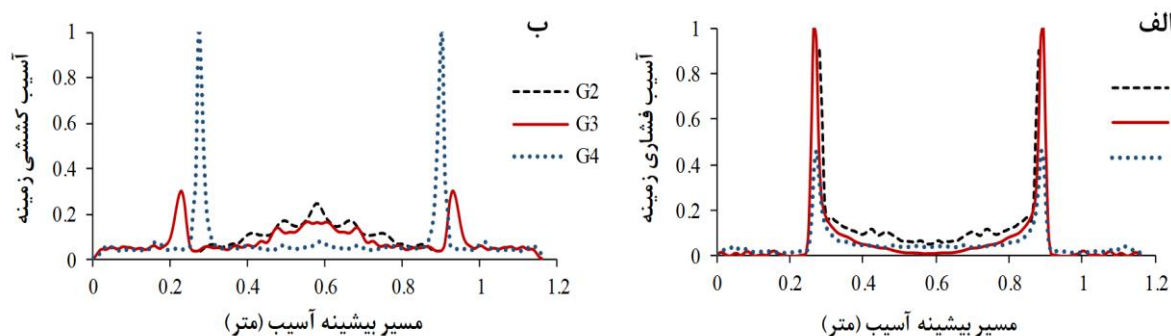
جدول ۱۲: مقادیر آسیب فشاری و کششی الیاف

نوع مخزن		نسل دوم	نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۵/۲۳	۲/۰۳	۰/۶۶
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۸۰	۵۶/۲۵	٪۲۵
آسیب کششی الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۱/۰۳	۰/۶۹۷	۰/۴۰۷
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۶۰	۱۸/۷۵	٪۰

در مود آسیب فشاری زمینه، شکل ۱۵-الف نشان می‌دهد که مقدار بیشینه در نسل سوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۹/۰۶ رخ داده است. مقدار آسیب بیشینه فشاری زمینه در مخزن نسل دوم در لایه ۱ با مقدار عددی



۸/۳۲ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۴/۱۸ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را دارد. از جدول ۱۳ هم می‌توان دریافت که مقدار آسیب فشاری زمینه در مخزن نسل چهارم از دیگر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه‌های آن برابر ۱/۵۳۴ شده است. درصد تخریب این مخزن هم به مراتب کمتر از دیگر نسل‌ها شده و تنها ۹ لایه آن دچار تخریب شده است. مخزن نسل دوم با میانگین آسیب ۴/۹۳۷ و درصد تخریب ۱۰۰، بیشترین آسیب را متحمل شده است.



شکل ۱۵: آسیب وارده به زمینه بر اساس معیار هاشین: (الف) آسیب فشاری، (ب) آسیب کششی

در شکل ۱۵-ب مشخص است که مقدار بیشینه آسیب کششی زمینه در مخزن نسل چهارم، آن هم در لایه ۱ با مقدار عددی ۲۲/۵ رخ داده است. بیشینه آسیب کششی زمینه در مخزن نسل دوم نیز در لایه ۱ با مقدار عددی ۵/۵۵ و در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۶/۸۶ ایجاد شده است. مخزن نسل دوم در این مود شکست، آسیب کمتری را در لایه مورد نظر متحمل شده است. در مقابل آن، مخزن نسل چهارم آسیب بیشتری در لایه مورد نظر دیده است. از جدول ۱۳ نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که مقدار میانگین آسیب مخزن نسل دوم به نسبت سایر نسل‌ها بیشتر است. همچنین در تمامی مخازن درصد تخریب برابر ۱۰۰ بوده و معنی آن، تخریب تمام لایه‌ها در این مود آسیب می‌باشد. مقدار میانگین آسیب لایه‌ها در مخزن نسل دوم و سوم تقریباً برابر شده است اما مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ دچار آسیب بیشتری شده است. در حالت کلی، زمینه با احاطه کردن الیاف (تقویت‌کننده) آن را در محل مناسب خود نگه می‌دارد. با توجه به مقدار میانگین آسیب لایه‌ها، می‌توان گفت که هر سه نسل عملکرد تقریباً مشابهی را از خود نشان داده اند. الیاف‌های تقویت‌کننده، تحمل‌کننده اصلی بارها می‌باشند و زمینه، فراهم‌سازی بستر مناسب جهت انتقال بار از الیافی به الیاف دیگر را بر عهده دارد. با اینکه فاز زمینه در مود کششی دچار تخریب شده، اما فاز تقویت‌کننده همواره متحمل بارهای وارده بوده و از طرفی سایر نواحی مخزن دچار آسیب یا تخریب نشده است.

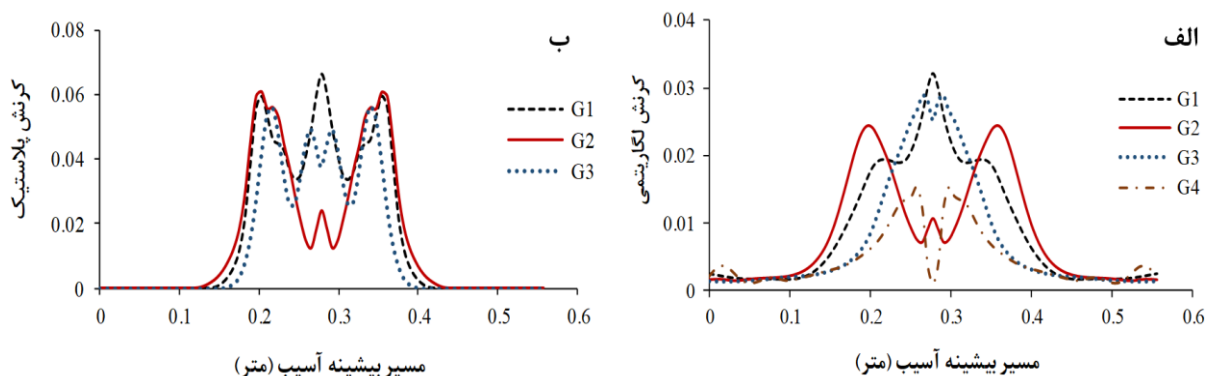
جدول ۱۳: مقادیر آسیب فشاری و کششی زمینه

نوع مخزن		نسل دوم	نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری زمینه	میانگین آسیب لایه‌ها	۴/۹۳۷	۳/۸۳۶	۱/۵۳۴
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۱۰۰	٪۷۵	۵۶/۲۵
آسیب کششی زمینه	میانگین آسیب لایه‌ها	۴/۶۸	۴/۶۶	۴/۳۶
	درصد تخریب لایه‌ها	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰

نتایج تحلیل دینامیکی برخورد عمودی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت

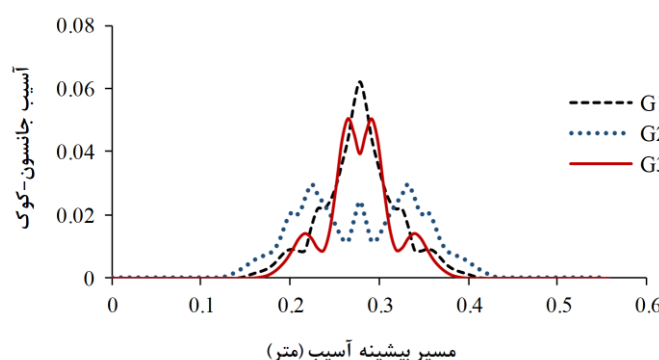


شکل ۱۶-الف مقدار کرنش لگاریتمی وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار کرنش ماکزیمم در مخزن نسل اول در مقدار عددی 0.032 رخ داده است. مقدار ماکزیمم کرنش رخ داده در مخزن نسل سوم نیز با مقدار عددی 0.029 در رتبه دوم قرار دارد. همچنین مقدار کرنش رخ داده در مخزن نسل چهارم کمتر از سایر مخازن با مقدار عددی 0.015 می‌باشد. شکل ۱۶-ب مقدار کرنش پلاستیک را در مخازن نشان می‌دهد و نشان‌دهنده این است که ماکزیمم کرنش پلاستیک در مخزن نسل اول با مقدار عددی 0.066 رخ داده است. ماکزیمم کرنش پلاستیک مخزن نسل دوم نیز با مقدار عددی 0.062 در رتبه دوم قرار دارد و مخزن نسل سوم در این بین با مقدار عددی 0.056 کرنش پلاستیک کمتری را متحمل شده است.



شکل ۱۶: الف) کرنش لگاریتمی، ب) کرنش پلاستیک معادل در مسیر بیشینه آسیب

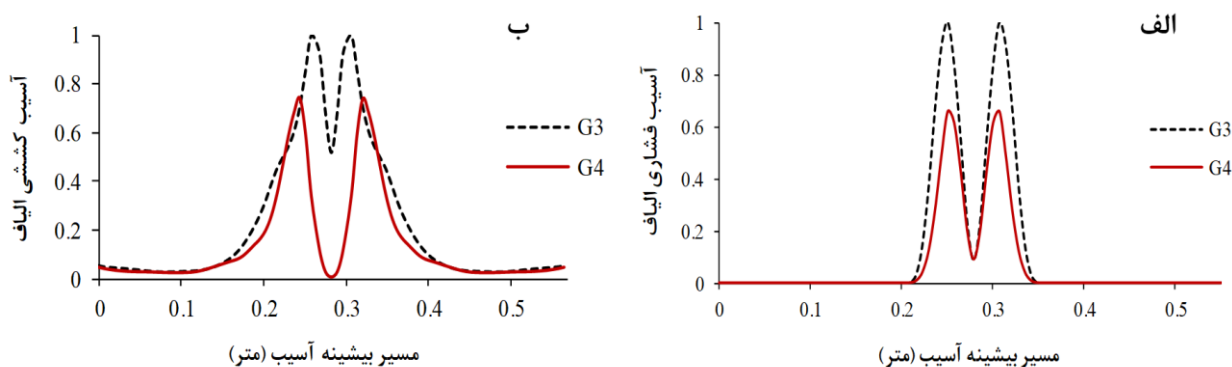
شکل ۱۷ مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت 60 کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد. در شکل ۱۷ مشخص است که مقدار آسیب وارده به آستر فلزی مخزن نسل اول بیشترین مقدار را دارد و مقدار عددی 0.062 را کسب کرده است. مخزن نسل سوم با مقدار عددی 0.05 رتبه دوم آسیب را داراست. در نتیجه مخزن نسل دوم با مقدار عددی 0.03 کمترین آسیب را متحمل شده است. مانند سرعت پیشین، مخزن نسل دوم فاقد پوشش لایه کامپوزیتی در محل برخورد، یعنی همان بخش عدسی‌های مخزن است. به همین دلیل، مخزن نسل دوم در برخورد عمودی فاقد آسیب کامپوزیت می‌باشد.



شکل ۱۷: آسیب وارده به مخازن بر اساس معیار جانسون-کوک

شکل‌های ۱۸ و ۱۹، مود آسیب فشاری الیاف، مود آسیب کششی الیاف، مود آسیب فشاری زمینه و مود آسیب کششی زمینه در بخش کامپوزیتی مخازن نسل سوم و چهارم را در سرعت 60 کیلومتر بر ساعت به صورت نرمال شده نمایش می‌دهند. شکل ۱۸-الف به وضوح نشان می‌دهد که بیشینه آسیب فشاری وارده به الیاف در مخزن نسل دوم به مراتب بیشتر از نسل

چهارم می‌باشد. این آسیب در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۱۴/۷۷ اتفاق افتاده است. مقدار بیشینه آسیب فشاری وارده به الیاف در مخزن نسل سوم هم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۹/۷۴ رخ داده است. در نتیجه مخزن نسل چهارم آسیب کمتری را در این مود شکست متحمل شده است. جدول ۱۴ هم نشان می‌دهد که مقدار آسیب فشاری الیاف در نسل چهارم کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۳/۵۴۵ شده است. مخزن نسل سوم هم با میانگین آسیب ۴/۸۴۱ دچار تخریب بیشتری شده است. هردو مخزن با درصد تخریب برابر ۶۸/۷۵، دارای ۱۱ لایه تخریب شده هستند. مانند بخش‌های قبلی، تمامی نمودارهای مربوط به آسیب بخش کامپوزیتی مخازن نرمال شده هستند.



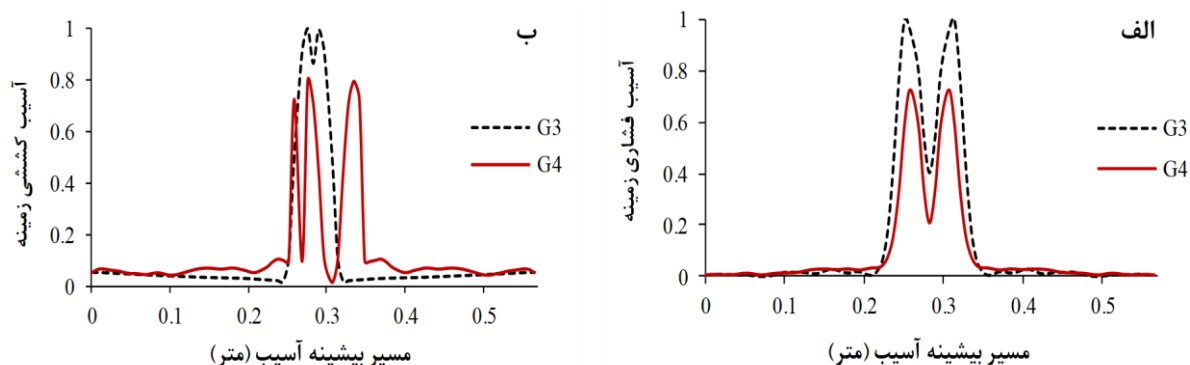
شکل ۱۸: آسیب وارده به الیاف بر اساس معیار هاشین: الف) آسیب فشاری، ب) آسیب کششی

در مود آسیب کششی الیاف، با مشاهده شکل ۱۸-ب می‌توان فهمید که مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل سوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۹۴ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۴۵ ایجاد شده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را به خود دیده است. جدول ۱۴ هم نشان می‌دهد که مقدار آسیب کششی الیاف در مخزن نسل چهارم به نسبت نسل سوم کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۴ شده است. مخزن نسل سوم هم با میانگین آسیب ۰/۴۹۳ دچار تخریب بیشتری شده است. همچنین هردو مخزن با درصد تخریب برابر ۱۲/۵، تنها ۲ لایه تخریب شده دارند.

جدول ۱۴: مقادیر آسیب فشاری و کششی الیاف

نوع مخزن		نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۴/۸۴۱	۳/۵۴۵
	درصد تخریب لایه‌ها	۶۸/۷۵	۶۸/۷۵
آسیب کششی الیاف	میانگین آسیب لایه‌ها	۰/۴۹۳	۰/۴
	درصد تخریب لایه‌ها	۱۲/۵	۱۲/۵

همانطور که از شکل ۱۹-الف مشخص است، مقدار بیشینه آسیب فشاری وارده به زمینه در مخزن نسل سوم به مراتب از نسل چهارم بیشتر شده است. این آسیب در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۱۲/۶۹ ایجاد شده است. بیشینه آسیب فشاری زمینه مخزن نسل چهارم هم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۹/۱۹ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری دیده است. جدول ۱۵ هم نشان می‌دهد که مقدار آسیب فشاری زمینه در مخزن نسل چهارم به مراتب کمتر و میانگین آسیب لایه‌های آن برابر ۳/۵ شده است. همچنین با درصد تخریب ۹۳/۷۵ دارای ۱۵ لایه تخریب شده است. در مقابل، مخزن نسل سوم با میانگین آسیب ۶/۴۶۹ و درصد تخریب ۱۰۰، آسیب بیشتری را متحمل و تمام لایه‌های آن از بین رفته است.



شکل ۱۹: آسیب وارده به زمینه بر اساس معیار هاشین: (الف) آسیب فشاری، (ب) آسیب کششی

در شکل ۱۹-ب مشخص است که مقدار بیشینه آسیب کششی زمینه باز هم در مخزن نسل سوم اتفاق افتاده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۶/۲۹ رخ داده است. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل چهارم نیز در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۲/۸۱ ایجاد شده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست، آسیب کمتری را متحمل شده است. از جدول ۱۵ می توان دریافت که مقدار میانگین آسیب در مخزن نسل سوم با مقدار عددی ۴/۴۹ بیشتر از مخزن نسل چهارم با مقدار عددی ۲/۶۲ شده است. همچنین درصد تخریب نسل سوم از نسل چهارم بیشتر و مقدار آن ۶۸/۷۵ می باشد. به عبارتی، مخزن نسل سوم ۱۱ لایه و مخزن نسل چهارم ۹ لایه تخریب شده دارد. در نتیجه، مخزن نسل چهارم آسیب کمتری را متحمل شده است.

جدول ۱۵: مقادیر آسیب فشاری و کششی زمینه

نوع مخزن		نسل سوم	نسل چهارم
آسیب فشاری زمینه	میانگین آسیب لایه ها	۶/۴۶۹	۳/۵
	درصد تخریب لایه ها	٪۱۰۰	۹۳/۷۵
آسیب کششی زمینه	میانگین آسیب لایه ها	۴/۴۹	۲/۶۲
	درصد تخریب لایه ها	۶۸/۷۵	۵۶/۲۵

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش، آسیب ناشی از ضربه به مخازن CNG در برخورد افقی و عمودی در دو سرعت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای مختلفی بررسی گردید. صدمات وارده بر بخش فلزی مخازن با بکارگیری آسیب جانسون-کوک و صدمات وارده به بخش کامپوزیت مخازن با بکارگیری آسیب هاشین ارزیابی شدند و نتایج زیر بر مبنای تحلیل المان محدود به دست آمد:

۱- از لحاظ وزنی، مخزن نسل چهارم کمترین مقدار وزن را داشته و نسبت به نسل اول ۴۷٪ سبک تر می باشد که برتری این نسل را به وضوح نشان می دهد. مخزن نسل سوم با ۴۱/۴٪ کاهش وزن، در رتبه دوم این معیار قرار گرفت.

۲- در برخورد افقی با سرعت ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت، مخزن نسل چهارم کمترین آسیب را بر مبنای تئوری هاشین متحمل شد. همچنین کمترین مقدار کرنش را نیز کسب کرد. مخزن نسل سوم مقدار کرنش کمتری را پس از نسل چهارم متحمل شد و مقدار کرنش پلاستیک این نسل کمترین مقدار را کسب کرد. در بخش آسیب جانسون-کوک، مقدار آسیب نسل سوم از سایر نسل ها به مراتب کم تر شد. همچنین بخش کامپوزیتی این نسل پس از نسل چهارم، کمترین



آسیب را بر مبنای تئوری هاشین متحمل شد. پس نتیجه شد که به ترتیب، نسل چهارم و سوم عملکرد بهتری در برخورد افقی از خود نشان داده‌اند.

۳- در برخورد عمودی، مخزن نسل چهارم کم‌ترین مقدار کرنش را در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت کسب کرد. همچنین در بخش کامپوزیتی مخازن نسل سوم و چهارم، به طور کلی مخزن نسل چهارم (با توجه به درصد تخریب و میانگین آسیب لایه‌ها) عملکرد بهتری از خود نشان داد. همچنین مقدار آسیب بخش فلزی نسل سوم از نسل دوم پیشی گرفت و مخزن نسل دوم کم‌ترین آسیب را متحمل شد. در این سرعت، مقدار کرنش پلاستیک نسل سوم از نسل دوم بیش‌تر شده و نسل دوم کم‌ترین مقدار را کسب کرد. به طور کلی، نتیجه می‌شود که مخزن نسل چهارم عملکرد بهتری از خود بر جای می‌گذارد و از نظر وزنی نیز دارای برتری اولویت جهت استفاده در خودروها می‌باشد.

منابع و مراجع

- M. Ariatapeh, M. Mashayekhi, Prediction of All-Steel CNG Cylinders Fracture in Impact by Using Damage Mechanics Approach, Scientia Iranica, 21(3) (2014) 609-619.
- Z. Changliang, R. Mingfa, Z. Wei, and Haoran, "Delamination prediction of composite filament wound vessel with metal liner under low velocity impact", Composite Structure, 75, pp.387-392, 2006.
- Q.G. Wu, X.D. Chen, Z.C. Fan, D.F. Nie, Stress and Damage Analyses of Composite Overwrapped Pressure Vessel, Procedia Engineering, Procedia Engineering, Volume 130, 2015, Pages 32-40.
- Sharifi. Sh, Gohari. S, Sharifiteshnizi. M, Alebrahim. R, Burvill. C., Yahya. Y, Vrcelj. Z, Fracture of laminated woven GFRP composite pressure vessels under combined low-velocity impact and internal pressure, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 18, Issue 4, Sep 2018, Pages 1715-1728.
- Liao. B.B., Jia. L.Y., Finite element analysis of dynamic responses of composite pressure vessels under low velocity impact by using a three-dimensional laminated media model, Thin-Walled Structures, Thin-Walled Structures, Volume 129, August 2018, Pages 488-501.
- Pramod. R., Krishnadasan. C.K., Siva Shanmugam. N., Design and finite element analysis of metal-elastomer lined composite over wrapped spherical pressure vessel, Volume 224, 15 Sep 2019, 111028.
- H. Mozafari, Finite element analysis for the design of composite tanks (using Abaqus software), Miyad Andisheh, Mar 2016 (In Persian).
- Z. Hashin, Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, 1980, pp. 329-334 1171.
- G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, tempratures and pressures, Engineering fracture mechanics, Volume 21, No. 1, 1985, pp. 31-48.
- Mohotti, D., Ali, M., Ngo, T., Lu, J., Mendis, P. and Ruan, D., "Out-of-plane impact resistance of aluminium plates subjected to low velocity impacts", Materials & Design, Vol. 50, No., (2013), 413-426.
- Ramezani, Mohammad Javad and Mohammadi, Meisam, Numerical And Experimental Investigation of deflection of Laminated composites due to drop weight of different projectiles, Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 2022.
- L. Zu, Design and optimization of filament wound composite pressure vessels, doctoral thesis, TU Delft, Netherland, 2012.
- M. Heidari-Rarani, M. Ahmadi-Jebeli, Finite element modeling of failure in IV type composite pressure vessel using WCM plug-in in ABAQUS software, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 04, pp. 191-200, 2018 (in Persian).



Investigation of the behavior of CNG tanks of the first to fourth generation of vehicles under the effect of impact load

Mohammad Emami¹

Alireza Albooyeh

Shahram Amirabdollahian

Abstract

One of the important points in designing light gas vehicles is the correct design, selection and installation of the tank. Regular inspection of CNG tanks is a vital requirement for CNG fuel systems, and an accident or impact on such tanks can threaten their integrity and strength. One of the important parameters in the design of CNG tanks is their resistance to impact and fall. In this research, firstly, the first to fourth generation tanks of cars have been designed and each of them has been studied and compared in terms of weight. The designed tanks are then tested at 200 bar hydrostatic pressure (working pressure) using ABAQUS finite element software to confirm the design accuracy and strength. The hydrostatic test simulation of the reservoirs has been studied using the criterion of Tsai-Hill failure. Finally, the amount of damage to metal and composite tanks under Impact with different velocity and Angle of impact has been investigated and the behavior of these tanks has been analyzed with the help of metal and composite damage criteria to determine the most appropriate type of tank or tanks in identify and introduce equal damage caused by impact. Simulations of damage to the metal part of the tanks have been evaluated using the Johnson-Cook criteria and the damage to the composite part of the tanks has been evaluated using the Hashin criteria. The results of this research show that the fourth generation tank shows much better performance in vertical and horizontal collisions at speeds of 30 and 60 km/hr. Also, compared to other generations, it has much less weight and is about 47% lighter compared to the first generation.

Keywords: CNG Tanks, Pressure Vessels, Impact, Hashin criteria, Johnson-Cook criteria, ABAQUS