



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Investigation of the Behavior of CNG Tanks of the First to Fourth Generation of Vehicles Under the Effect of Impact Loading

Alireza Albooyeh <sup>a,\*</sup>, Shahram Amirabdollahian <sup>b</sup>, Mohammad Emami <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>c</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 2025-01-08

Revised: 2025-02-27

Accepted: 2025-03-03

### Keywords:

CNG pressure vessels;

Impact;

Hashin criteria;

Johnson-Cook criteria;

Simulation;

ABAQUS software.

## ABSTRACT

In this research, firstly, the first to fourth generation tanks of cars was modeled and each of them was compared in terms of weight. The designed tanks were then tested at 200 bar hydrostatic pressure using the criterion of Tsai-Hill failure in the ABAQUS software to confirm the design accuracy and strength. Finally, the amount of damage to tanks under impact loading with different velocities and angles was investigated. The behavior of tanks was analyzed with the help of metal and composite damage criteria to determine the most appropriate type of tank to identify equal damage caused by impact. Simulations of damage to the metal part of the tanks evaluated using the Johnson-Cook criteria and the damage of composite part of the tanks evaluated using the Hashin criteria. The results of this research showed 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.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36493.2786>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [ar.albooyeh@semnan.ac.ir](mailto:ar.albooyeh@semnan.ac.ir)

## How to cite this article:

A. Albooyeh, S. Amirabdollahian and M. Emami, "Investigation of the behavior of CNG tanks of the first to fourth generation of vehicles under the effect of impact loading.," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 275-289, doi: 10.22075/jme.2025.36493.2786

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

علیرضا آلبویه<sup>۱\*</sup>، شهرام امیرعبدالهیان<sup>۲</sup>، محمد امامی<sup>۳</sup>

| اطلاعات مقاله                                                                    | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹<br>بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹<br>پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ | در پژوهش حاضر، در ابتدا، مخازن CNG نسل اول تا چهارم خودروها مدلسازی و عملکرد آنها از نظر وزنی با یکدیگر مقایسه شدند. سپس، مخازن تحت فشار هیدرواستاتیکی ۲۰۰ بار با استفاده از معیار گسیختگی سای- هیل در نرم افزار آباکوس تست شدند تا از نظر صحت طراحی و استحکام تایید شوند. در نهایت به بررسی میزان آسیب های وارده به مخازن تحت ضربه با سرعت و زاویه برخورد متفاوت پرداخته شد. رفتار این مخازن به کمک معیارهای آسیب فلزات و کامپوزیت ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت تا مناسب ترین نوع مخزن در برابر آسیب ناشی از بارگذاری ضربه ای شناسایی شود. صدمات وارد بر بخش فلزی مخازن با به کارگیری معیار آسیب جانسون-کوک و صدمات وارده به بخش کامپوزیت مخازن با استفاده از معیار آسیب هاشین ارزیابی شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، مخزن نسل چهارم عملکرد بهتری را در برخورد عمودی و افقی با سرعت ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت از خود نشان می دهد. همچنین نسبت به سایر نسل ها دارای وزن به مراتب کمتری بوده، بطوریکه در مقایسه با نسل اول، حدود ۴۷٪ سبک تر می باشد. |

### واژگان کلیدی:

مخازن تحت فشار CNG،  
ضربه،  
معیار هاشین،  
معیار جانسون-کوک،  
شبیه سازی،  
نرم افزار آباکوس.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.36493.2786>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### ۱- مقدمه

طراحی و انتخاب صحیح مخزن CNG از نکات مهم در خودروهای سبک گازسوز می باشد. تصادف یا ضربه به این نوع مخازن می تواند یکپارچگی و استحکام آنها را تهدید کند. یکی از پارامترهای مهم در طراحی مخازن CNG، مقاومت آنها در برابر ضربه و تصادف است [۱]. جنبه های مختلف طراحی و تحلیل مخازن تحت فشار مورد مطالعه تعدادی از محققان قرار گرفته است. چانگ لیانگ و همکاران [۲]، 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 [۳]، 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 شبیه سازی عددی انجام دادند. شریفی و همکاران [۴]، 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 پژوهش با هدف بررسی تأثیر شکل هندسی گنبدی بر تغییر شکل مکانیکی و طول ترک انواع پلیمرهای تقویت شده و بافته شده با ورق GRP انجام شد. لیائو و جیا

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [ar.albooyeh@semnan.ac.ir](mailto:ar.albooyeh@semnan.ac.ir)

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۲. دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود،

ایران

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

علیرضا آلبویه، شهرام امیرعبدالهیان و محمد امامی، "بررسی رفتار مخازن CNG نسل اول تا چهارم خودروها تحت اثر بار ضربه ای"، مدل سازی در مهندسی، ۸۳ (۲۳): ۲۷۵-۲۸۹، ۱۴۰۴. doi: 10.22075/jme.2025.36493.2786

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، تحت این بارگذاری صورت گرفته است. لذا، در این پژوهش مخازن مدل‌سازی شده در فشار هیدرواستاتیک ۲۰۰ بار (فشار کاری) با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و به کمک معیار گسیختگی سای-هیل تست شده تا از نظر صحت طراحی تایید شوند. بررسی میزان آسیب‌های وارده به مخازن مختلف تحت بارگذاری ضربه ای با دو سرعت و زاویه برخورد متفاوت، جهت دستیابی به مناسب‌ترین نوع مخزن در برابر آسیب ناشی از ضربه از دیگر موارد مورد بررسی در این تحقیق است که برای اولین بار ارائه شده است.

## ۲- مبانی تئوری

### ۲-۱- معیار شکست سای-هیل و آسیب هاشین

بر اساس معیار سای-هیل<sup>۲</sup>، مقدار شاخص شکست ( $I_F$ ) از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۷]. در صورتیکه این شاخص عددی کمتر از ۱ باشد، گسیختگی اتفاق نمی‌افتد، در غیر این صورت لایه کامپوزیتی دچار گسیختگی می‌شود.

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

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

هاشین 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 [۸ و ۹]. بنابراین، این دو معیار شامل چهار حالت: شکست الیاف تحت کشش، شکست الیاف تحت فشار، شکست رزین تحت کشش و شکست رزین تحت فشار هستند. معادله هاشین در نرم افزار آباکوس به ترتیب برای چهار حالت ذکر شده، به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود [۱۰].

[۵]، پاسخ دینامیکی مخازن تحت فشار کامپوزیتی تحت تاثیر ضربه با سرعت کم را با استفاده از یک مدل سه بعدی 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. پرامد و همکاران [۶]، به طراحی و تحلیل المان محدود کامپوزیت فلزی تحت فشار پرداختند. آن‌ها در این پژوهش، روش جدیدی در طراحی آستر اتخاذ نمودند و آزمایش امکان‌سنجی تکنیک‌های تولیدی و پیوستگی را انجام دادند. آریا تپه و همکاران [۱]، به بررسی اثر تصادف و آسیب ناشی از برخورد مخازن CNG فولادی تحت فشار پرداختند. آن‌ها شبیه‌سازی صدمات وارد بر مخزن را در تصادف و سقوط خودرو با به کارگیری مدل آسیب جانسون-کوک انجام و محاسبات برخورد در جهت‌های مختلف را با در نظر گرفتن تاثیر فشار داخل مخزن، سرعت تصادف و ارتفاع سقوط مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد، بیشترین آسیب در حالت برخورد عمودی ایجاد می‌گردد و با تغییر زاویه برخورد از امتداد عمودی به افقی، آسیب وارده به مخزن کمتر خواهد شد.

مخازن فولادی به دلیل هزینه تولید پایین‌تر و فرآیند ساخت ساده تر 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 پایین‌تر آنها نسبت به سایر مخازن، از معایب و محدودیت‌های مهم آن‌ها به شمار می‌رود.

مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با به توجه نیازها، می‌توان خواص آن‌ها را کنترل کرد. به طور کلی مخازن کامپوزیتی دارای مزایایی نظیر: مقاومت مکانیکی نسبت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی بالا، خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات، خواص عایق حرارتی خوب و صلبیت بیشتر هستند [۲]. یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی مخازن CNG، مقاومت آن‌ها در برابر ضربه و سقوط است. مخازن فلزی و

<sup>2</sup> Tsai-Hill

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 ثوابت شبه استاتیکی می‌گویند. ثوابت  $C$  و  $m$  توسط تست‌های پیچش در نرخ کرنش‌ها و دماهای متفاوت و تست فشار میله هاپکینسون تعیین می‌شوند [۱۴ و ۱۵]. براکت اول در معادله جانسون-کوک نشان‌دهنده تاثیر کار سختی یا کرنش بر تنش سیلان است. براکت دوم و سوم نیز به ترتیب تاثیر نرخ کرنش و دما را بر تنش سیلان نشان می‌دهند. بر اساس معیار گسیختگی جانسون-کوک مقدار «کرنش شروع شکست» از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

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

در رابطه (۶)، براکت اول نشان‌دهنده تاثیر  $\eta$  بر  $\varepsilon_D^{Pl}$  است. براکت دوم هم نشان‌دهنده تاثیر نرخ کرنش بر  $\varepsilon_D^{Pl}$  است. براکت سوم نیز تاثیر دما بر  $\varepsilon_D^{Pl}$  را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن ضرایب  $D_1$  تا  $D_5$  از آزمایش‌های متعددی استفاده می‌شود. 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.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- شبیه‌سازی مخازن نسل CNG

مخازن CNG از لحاظ ساختار مدل‌سازی به چهار دسته نسل اول (تمام فلزی)، نسل دوم (آستر فلزی با پوشش کمپیچ کامپوزیت)، نسل سوم (آستر فلزی با پوشش کامل کامپوزیت) و نسل چهارم (تمام کامپوزیتی) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۶]. به جهت مقایسه و بررسی مخازن در شرایط برابر، ابعاد مخازن به صورت مشترک، به شعاع ۱۷۸ میلی‌متر، طول ۹۸۰ میلی‌متر و حجم واقعی ۷۵ لیتر مطابق با کاتالوگ محصول تولیدی شرکت پارس ام سی انتخاب شدند که بر روی خودروهایی هم‌چون سمند، پژو پارس و پژو ۴۰۵ قابل نصب می‌باشد. از آنجایی که نسبت ضخامت مخزن به قطر آن ناچیز می‌باشد، دیواره مخزن به صورت پوسته‌ای مدل‌سازی شد. سایر اطلاعات مخازن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

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

نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی شکست در کامپوزیت‌های لایه-الیافی با استفاده از معادله هاشین<sup>۳</sup>، از شاخص شکست  $F$  استفاده می‌کند. بنابراین،  $F_F^T$  و  $F_F^C$  به ترتیب شاخص شکست الیاف در کشش و فشار و  $F_M^T$  و  $F_M^C$  نشان‌دهنده شاخص شکست ماتریس در کشش و فشار می‌باشند. برای این که شکست در یک لایه کامپوزیتی اتفاق نیفتد، در هر چهار معادله هاشین باید  $F < 1$  باشد. در روابط فوق  $X^T$ ،  $X^C$  و  $Y^T$  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  $S^T$  و  $S^L$  استحکام برشی لایه کامپوزیت در جهت طولی و 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 [۱۱].

#### ۳-۲- معیار حالت پلاستیک 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 مدل با استفاده از روابط (۴) و (۵) بیان می‌شود [۱۲ و ۱۳].

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

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

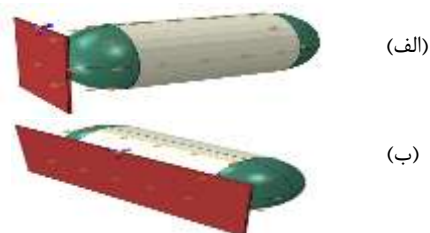
که  $\theta$  دمای فلز و  $\theta_{melt}$  دمای ذوب فلز و  $\theta_{Transition}$  دمایی است که دماهای کمتر از آن تاثیری بر تنش سیلان فلز نخواهند داشت.  $\dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنشی است که مقادیر  $A$ ،  $B$

<sup>4</sup> Shell

<sup>3</sup> Hashin

### ۳-۳- تحلیل استاتیکی و دینامیکی مدل

به منظور بررسی رفتار مخازن CNG، تحلیل در دو مرحله انجام شد. ابتدا مخازن نسل اول تا چهارم مدل سازی و به کمک حلگر استاتیکی، تحت فشار داخلی ۲۰۰ بار مورد صحت سنجی قرار گرفتند تا از استحکام کافی برخوردار باشند. سپس مدل ها به کمک حلگر دینامیکی صریح با مدت زمان ۰/۱ ثانیه در برابر آسیب ناشی از ضربه با برخورد به یک دیواره صلب قرار گرفتند و رفتار آن ها بررسی و تحلیل شد. 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. تماس از نوع عمومی با خاصیت تماس عمودی<sup>۵</sup> و بدون ضریب اصطکاک در نظر گرفته شد. دیواره صلب از نوع Discrete rigid بود که در تمام جهات مقید شد. مدل سازی مخازن به صورت پوسته و از المان با فرمول بندی S4R و اندازه ۷ میلی متر استفاده شد. نمای اولیه مخازن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای مدل آزمایش در برخورد (الف) عمودی، (ب) افقی

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- صحت سنجی نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی ضربه در نرم افزار آباکوس، مدل هایی از مراجع [۱۴] و [۱۵] از جنس آلومینیوم ۵۰۸۳ برای آستر فلزی و دیگری از جنس کامپوزیت چند لایه کربن-اپوکسی با زوایای الیاف مختلف و ضخامت متفاوت انتخاب شدند. در انجام این تحلیل، از حلگر دینامیک صریح<sup>۶</sup> استفاده شد و تماس بین پرتابه و هدف از نوع سطح به سطح<sup>۷</sup> بدون اصطکاک تعریف شد. مطابق مرجع [۱۴]، ورق آلومینیوم به ضخامت ۳ و ۵ میلی متر توسط ضربه زننده ای به جرم ۵ کیلوگرم تحت بار

جدول ۱- مشخصات هندسی مخازن مدل سازی شده [۱ و ۱۷]

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

جدول ۲- ترتیب قرارگیری لایه ها در مخازن [۴ و ۸ و ۱۷]

| نوع مخزن  | ترتیب قرارگیری لایه ها به ترتیب از چپ به راست                             |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|
| نسل دوم   | [90] <sub>10</sub>                                                        |
| نسل سوم   | [90,90,90,90,54.7, -54.7,54.7, -54.7,54.7, -54.7,54.7, -54.7,90,90,90,90] |
| نسل چهارم | [90,90,90,90,90,90, -90,90, -90,90, -90,90,90,90,90,90]                   |

### ۳-۲- خواص مکانیکی مواد

در جداول ۳ و ۴ خواص مکانیکی مواد ارائه شده اند.

جدول ۳- خواص مکانیکی کربن/اپوکسی [۱۸]

| $E_1$ (GPa) | $E_2$ (GPa) | $\nu_{12}$  | $G_{12}$ (GPa) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------|-------------|----------------|-----------------------------|
| ۱۳۷         | ۸,۱۷        | ۰,۳۲        | ۴,۷            | ۱۵۵۰                        |
| $X_T$ (MPa) | $X_C$ (MPa) | $Y_T$ (MPa) | $Y_C$ (MPa)    | $S$ (MPa)                   |
| ۱۴۷۰        | ۹۸۰         | ۳۹,۲        | ۷۸,۴           | ۷۸,۴                        |

جدول ۴- خواص مکانیکی فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ [۱]

| $E$ (GPa) | $\nu$     | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $T_m$ (K) | $T_0$ (K) | $\alpha$ (K <sup>-1</sup> )           |
|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|
| ۲۰۰       | ۰,۳       | ۷۸۳۰                        | ۱۷۹۳      | ۲۹۳       | ۰,۰۰۰۰۳۲                              |
| $A$ (MPa) | $B$ (MPa) | $n$                         | $m$       | $C$       | $\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> ) |
| ۷۹۲       | ۵۱۰       | ۰,۲۶                        | ۱,۰۳      | ۰,۰۱۴     | ۱                                     |
| $D_1$     | $D_2$     | $D_3$                       | $D_4$     | $D_5$     | -                                     |
| ۰,۰۵      | ۳,۴۴      | -۲,۱۲                       | ۰,۰۰۲     | ۰,۶۱      | -                                     |

<sup>7</sup> Surface to Surface

<sup>5</sup> Normal behavior

<sup>6</sup> Dynamic Explicit

#### ۲-۴- وزن مخازن CNG

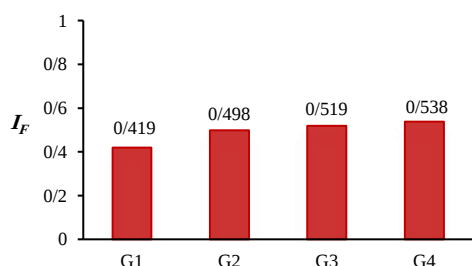
مخازن تمام فلزی دارای وزن بیشتر و قیمت پایین‌تری نسبت به مخازن نیمه کامپوزیتی و تمام کامپوزیتی هستند. در مقابل، مخازن کامپوزیتی وزن کمتر و عمر خستگی بهتری را نسبت به مخازن تمام فلزی ارائه می‌دهند. همانطور که از جدول ۷ مشخص است، مخزن نسل اول بیشترین مقدار وزن را دارا می‌باشد. سایر مخازن به ترتیب از نسل پیشین خود سبک‌تر هستند و در این بین، مخزن نسل چهارم با وزن ۳۳/۱۵ کیلوگرم، کمترین مقدار وزن را دارا می‌باشد.

جدول ۷- وزن انواع مخازن CNG

| نوع مخزن                 | نسل اول (G1) | نسل دوم (G2) | نسل سوم (G3) | نسل چهارم (G4) |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| وزن (Kg)                 | ۶۲/۸         | ۴۱/۸۳        | ۳۶/۸۳        | ۳۳/۱۵          |
| کاهش وزن نسبت به نسل اول | -            | ٪۳۳/۴        | ٪۴۱/۴        | ٪۴۷            |

#### ۳-۴- نتایج تحلیل استاتیکی

شکل (۲) مقادیر شاخص گسیختگی سای هیل ( $I_F$ ) برای مخازن مختلف در تست فشار هیدرواستاتیکی را نشان می‌دهد. مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد، هیچ یک از لایه‌های مخازن دچار شکست نشده‌اند و مقدار شاخص آسیب بحرانی برای تمامی مخازن در محدوده ایمن قرار دارند و مدل‌ها برای استفاده در تحلیل دوم کاملاً مورد اطمینان می‌باشند.



شکل ۲- مقدار بحرانی‌ترین شاخص شکست سای هیل ( $I_F$ )

#### ۴-۴- نتایج تحلیل دینامیکی

##### ۴-۴-۱- نتایج حالت برخورد افقی با سرعت 30 km/hr

مقادیر کرنش لگاریتمی وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد در شکل (۳) قابل مشاهده است. می‌توان

ضربه با سرعت ۹/۰۲ و ۱۲/۳۱ متر بر ثانیه قرار گرفت. مطابق مرجع [۱۵]، ورق ۶ لایه کامپوزیتی با مجموع ضخامت ۳/۸ میلی‌متر توسط ضربه زننده‌ای به جرم ۶۸۰ گرم و با سرعت ۴/۴۲ و ۵/۴۲ متر بر ثانیه مورد برخورد قرار گرفت. در جدول ۵ بیشینه خیز ورق آلومینیومی به همراه درصد اختلاف آن نسبت به نتایج مرجع [۱۴] ارائه شده است. همچنین، بیشینه خیز ورق کامپوزیتی به همراه درصد اختلاف نتایج نسبت به نتایج مرجع [۱۵] نیز در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، در تمام حالات مقدار اختلاف میان بیشینه خیز بسیار اندک می‌باشد که این موضوع، صحت روند شبیه‌سازی و نتایج را تأیید می‌کند.

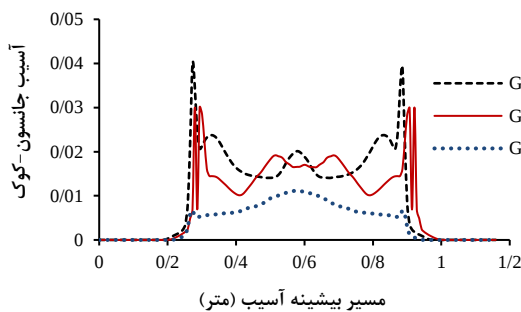
جدول ۵- مقایسه نتایج بیشینه خیز ورق آلومینیومی با مرجع [۱۴]

| درصد خطای شبیه‌سازی | بیشینه خیز ورق (mm) | آزمایش         | سرعت برخورد (m/s) | ضخامت (mm) |
|---------------------|---------------------|----------------|-------------------|------------|
| -                   | ۱۸/۳                | تجربی [۱۴]     | ۹/۰۲              | ۳          |
| ۱/۶۴                | ۱۸                  | شبیه‌سازی [۱۴] |                   |            |
| ۳/۶۶                | ۱۷/۶۳               | شبیه‌سازی حاضر |                   |            |
| -                   | ۱۷/۶                | تجربی [۱۴]     | ۱۲/۳۱             | ۵          |
| ۵/۱۱                | ۱۸/۵                | شبیه‌سازی [۱۴] |                   |            |
| ۱/۹۳                | ۱۷/۹۴               | شبیه‌سازی حاضر |                   |            |

جدول ۶- مقایسه نتایج بیشینه خیز ورق کامپوزیتی با مرجع [۱۵]

| درصد خطای شبیه‌سازی | بیشینه خیز ورق (mm) | آزمایش         | سرعت برخورد (m/s) | ضخامت (mm) |
|---------------------|---------------------|----------------|-------------------|------------|
| -                   | ۴/۸۴                | تجربی [۱۵]     | ۴/۴۲              | ۳/۸        |
| ۲/۶۹                | ۴/۹۷                | شبیه‌سازی [۱۵] |                   |            |
| ۵/۳۷                | ۵/۱                 | شبیه‌سازی حاضر |                   |            |
| -                   | ۵/۹۸                | تجربی [۱۵]     | ۵/۴۲              | ۳/۸        |
| ۰/۵                 | ۶/۰۱                | شبیه‌سازی [۱۵] |                   |            |
| ۰/۵                 | ۶/۰۱                | شبیه‌سازی حاضر |                   |            |

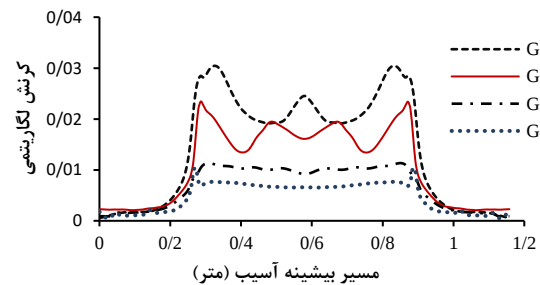
شده است. می‌توان نتیجه گرفت که وجود لایه‌های کامپوزیتی بر روی آستر فلزی در مخازن نسل دوم و سوم، موجب مقاومت بیشتر آستر مخازن در برابر بار ضربه، به ویژه مخزن نسل سوم می‌گردد. زیرا تمام یا تعدادی از لایه‌های کامپوزیتی همواره تخریب نشده و در ناحیه الاستیک خود، انرژی ضربه را به خوبی جذب می‌کنند. نتایج کرنش پلاستیک نیز این موضوع را تایید می‌کند.



شکل ۵- آسیب وارده به مخازن براساس معیار جانسون-کوک

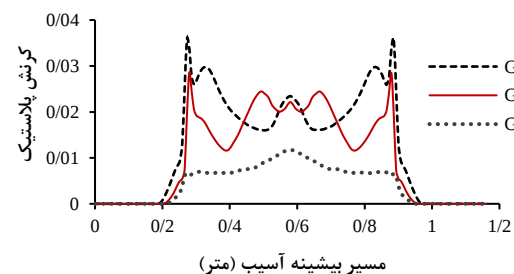
برای مقایسه گسیختگی کامپوزیت‌ها در مخازن نسل دوم، سوم و چهارم، در تمامی حالات برخورد، آسیب تمامی لایه‌های کامپوزیتی بر اساس معیار هاشین مورد بررسی قرار گرفت و لایه‌ای که بیشترین آسیب را در هر کدام از نسل‌ها داشت، شناسایی و نمودار آن ترسیم گردید. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مقدار آسیب فشاری بیشینه در مخزن نسل دوم به مراتب بیشتر از سایر نسل‌ها می‌باشد. 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 لایه‌های کامپوزیتی بر روی بخش استوانه‌ای مخزن است که به صورت محیطی به دور مخزن پیچیده شده و همین اختلاف سطح، باعث تجمع آسیب در این ناحیه شده است. مقدار آسیب بیشینه فشاری در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶، 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 ۸ هم کاملاً مشخص است که مقدار آسیب فشاری الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۱۵۶ شده است. 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 روی عدسی‌های آن می‌باشد.

نتیجه گرفت که مقدار کرنش ماکزیمم در مخزن نسل اول در مقدار عددی ۰/۰۳ رخ داده است. 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.



شکل ۳- کرنش در مسیر بیشینه آسیب

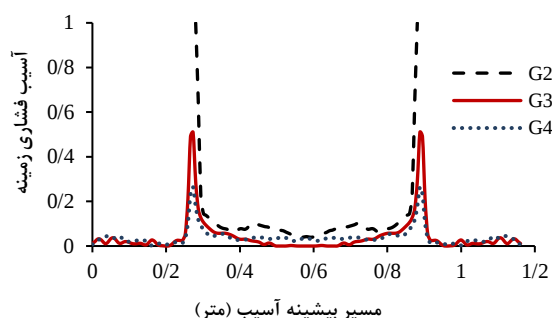
مقادیر کرنش پلاستیک معادل وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد در شکل (۴) قابل مشاهده است. مخزن نسل چهارم به دلیل عدم وجود آستر فلزی، فاقد کرنش پلاستیک می‌باشد. مشخص است که ماکزیمم کرنش پلاستیک در مخزن نسل اول با مقدار عددی ۰/۰۳۶ و این مقدار برای مخزن نسل دوم ۰/۰۲۹ است که در رتبه دوم قرار دارد.



شکل ۴- کرنش پلاستیک معادل در مسیر بیشینه آسیب

لازم به ذکر است، 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 می‌باشد. مخزن نسل دوم و سوم شامل هر دو معیار آسیب در ساختار خود هستند. شکل ۵ مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار آسیب وارده به آستر فلزی مخزن نسل اول بیشترین مقدار را داراست و عدد ۰/۰۴ را کسب کرده است. مخزن نسل سوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۱۱ کمترین آسیب را متحمل

در مود آسیب فشاری زمینه با مشاهده شکل (۸) نتیجه می‌شود 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 کرده است. از جدول ۱۰ هم می‌توان دریافت که آسیب فشاری زمینه در مخزن نسل چهارم از دیگر مخازن کمتر و میانگین آسیب لایه‌های 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 می‌باشد.

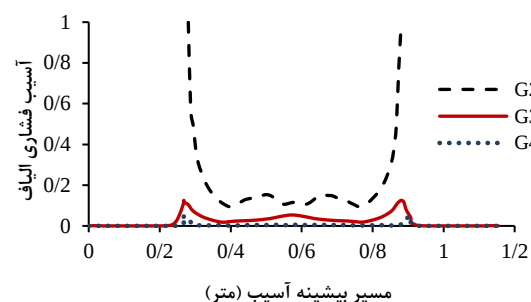


شکل ۸- آسیب فشاری وارده به زمینه براساس معیار هاشین

جدول ۱۰- مقادیر بیشینه آسیب فشاری زمینه

| نسل    | نسل    | نسل   | نوع مخزن             |
|--------|--------|-------|----------------------|
| چهارم  | سوم    | دوم   |                      |
| ۰/۵۲۷  | ۱/۳۶۳  | ۳/۵۶۷ | میانگین آسیب لایه‌ها |
| ٪۱۸/۷۵ | ٪۵۶/۲۵ | ٪۱۰۰  | درصد تخریب لایه‌ها   |

در شکل (۹) مشاهده می‌شود 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 ۴/۳ و در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۳/۱ ایجاد شده است. درصد تخریب ۱۰۰ در تمامی مخازن، به معنی تخریب تمام لایه‌ها در این مود آسیب می‌باشد. مخزن نسل دوم در این مود شکست، آسیب کمتری را در لایه‌ای که بیشینه آسیب را کسب کرده، متحمل شده است. در مقابل، مخزن نسل چهارم آسیب بیشتری در لایه مورد نظر

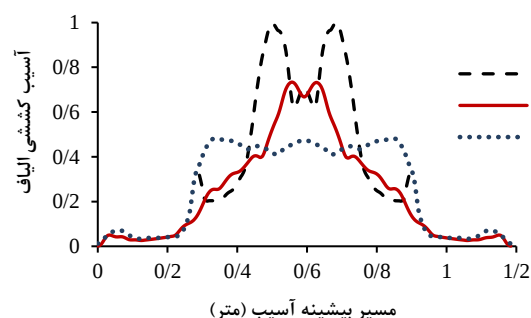


شکل ۶- آسیب فشاری وارده به الیاف براساس معیار هاشین

جدول ۸- مقادیر بیشینه آسیب فشاری الیاف

| نسل   | نسل   | نسل | نوع مخزن             |
|-------|-------|-----|----------------------|
| چهارم | سوم   | دوم |                      |
| ۰/۱۵۶ | ۰/۴۳۹ | ۳/۳ | میانگین آسیب لایه‌ها |
| ٪۰    | ٪۱۲/۵ | ٪۷۰ | درصد تخریب لایه‌ها   |

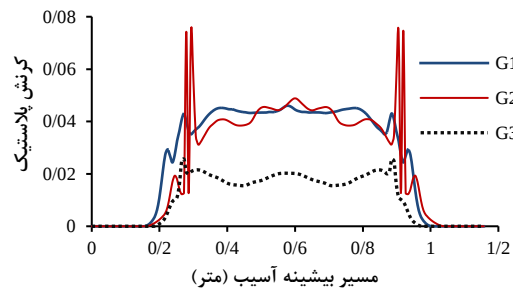
در مود آسیب کششی الیاف، با مشاهده شکل (۷) نتیجه می‌شود که مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل دوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۹۷ مشاهده شده است. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل سوم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۰/۷۱ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۴۷ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را متحمل شده است. در جدول ۹ مشخص است که مقدار آسیب کششی الیاف در مخزن نسل چهارم از سایر مخازن به مراتب کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۲۵ شده است. درصد تخریب تمامی مخازن در این مود برابر صفر می‌باشد اما مخزن نسل دوم میانگین آسیب و مقدار عددی آسیب بیشتری را دارد.



شکل ۷- آسیب کششی وارده به الیاف براساس معیار هاشین

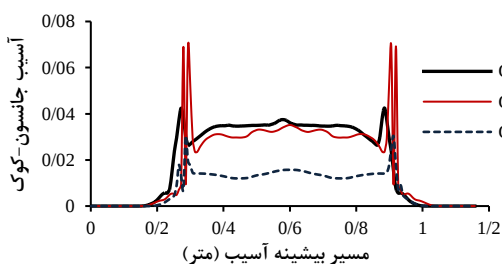
جدول ۹- مقادیر بیشینه آسیب کششی الیاف

| نسل   | نسل   | نسل   | نوع مخزن             |
|-------|-------|-------|----------------------|
| چهارم | سوم   | دوم   |                      |
| ۰/۲۵  | ۰/۴۱۵ | ۰/۶۷۶ | میانگین آسیب لایه‌ها |



شکل ۱۱- کرنش پلاستیک معادل در مسیر بیشینه آسیب

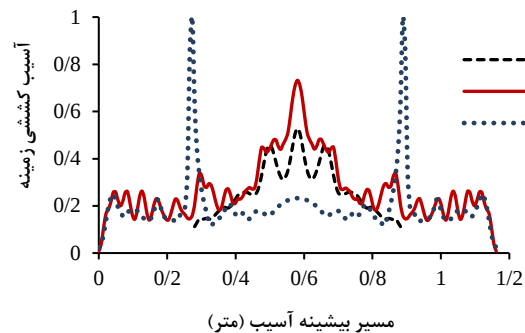
شکل (۱۲)، مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- آسیب وارده به مخازن براساس معیار جانسون-کوک شکل (۱۲) نشان می‌دهد 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. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دو برابری سرعت برخورد، تخریب لایه‌های 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 کامپوزیت‌ها، لایه‌ای که بیشترین آسیب را در هر کدام از نسل‌ها داراست، شناسایی و نمودار آن رسم گردید. از شکل (۱۳) کاملاً واضح است که مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل دوم به مراتب بیشتر از سایر نسل‌ها می‌باشد. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۳/۴ اتفاق افتاده است. مقدار آسیب بیشینه 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

دیدده است، اما میانگین آسیب لایه‌های آن کمترین مقدار را نسبت به سایر نسل‌ها دارد. در جدول ۱۱ مقادیر آسیب میانگین نشان داده شده است. در حالت کلی و مشاهده برآیند نتایج، مخزن نسل چهارم باز هم عملکرد بهتری را از خود نشان داده است.



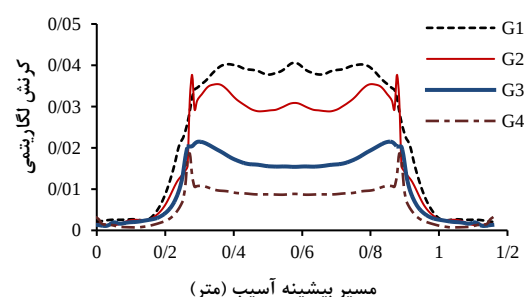
شکل ۹- آسیب کششی وارده به زمینه براساس معیار هاشین

جدول ۱۱- مقادیر بیشینه آسیب کششی زمینه

| نوع مخزن             | نسل دوم | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۲/۶۴۱   | ۳/۰۲    | ۲/۱۷۹     |

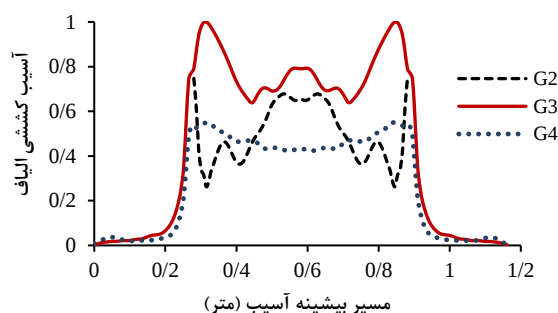
#### ۴-۴-۲- نتایج حالت برخورد افقی با سرعت 60 km/hr

شکل (۱۰) مقدار کرنش وارده به مخازن در طول مسیر محل برخورد را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که مقدار کرنش ماکزیمم در مخزن نسل اول در مقدار ۰/۰۴، نسل دوم با مقدار عددی ۰/۰۳۷ و در مخزن نسل چهارم کمتر از سایر مخازن با مقدار عددی ۰/۰۱۷ می‌باشد.



شکل ۱۰- کرنش در مسیر بیشینه آسیب

در شکل (۱۱) مقدار کرنش پلاستیک معادل نشان داده شده است. از شکل (۱۱) می‌توان 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.

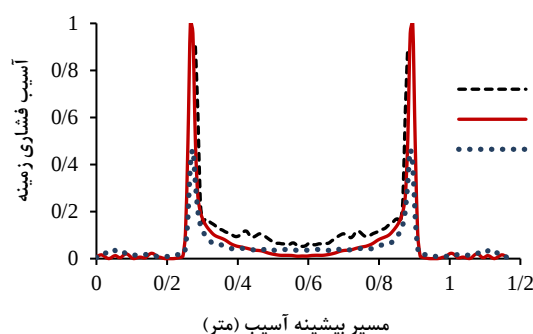


شکل ۱۴- آسیب کششی وارده به الیاف براساس معیار هاشین

جدول ۱۳- مقادیر بیشینه آسیب کششی الیاف

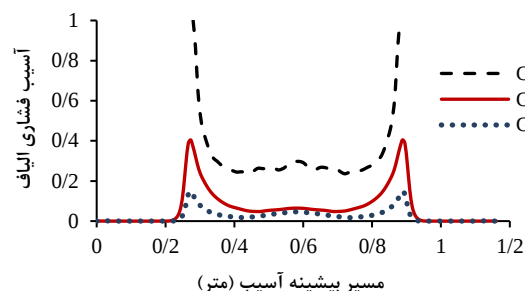
| نسل چهارم | نسل سوم | نسل دوم | نوع مخزن             |
|-----------|---------|---------|----------------------|
| ۰/۴۰۷     | ۰/۶۹۷   | ۱/۰۳    | میانگین آسیب لایه‌ها |
| %۰        | %۱۸/۷۵  | %۶۰     | درصد تخریب لایه‌ها   |

در مود آسیب فشاری زمینه، شکل (۱۵) 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 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 ۱۴ 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 فشاری وارده به زمینه براساس معیار هاشین

مخزن نسل چهارم آسیب کمتری در این مود شکست متحمل شده است. در جدول ۱۲ مشخص 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، در جایگاه دوم قرار دارد.



شکل ۱۳- آسیب فشاری وارده به الیاف براساس معیار هاشین

جدول ۱۲- مقادیر بیشینه آسیب فشاری الیاف

| نسل چهارم | نسل سوم | نسل دوم | نوع مخزن             |
|-----------|---------|---------|----------------------|
| ۰/۶۶      | ۲/۰۳    | ۵/۲۳    | میانگین آسیب لایه‌ها |
| %۲۵       | %۵۶/۲۵  | %۸۰     | درصد تخریب لایه‌ها   |

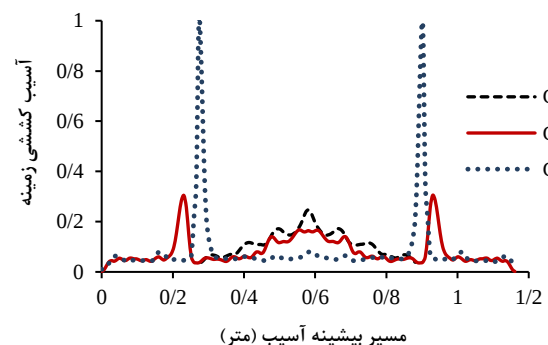
در مود آسیب کششی الیاف (شکل ۱۴)، می‌توان دریافت که مقدار بیشینه آسیب در مخزن نسل سوم رخ داده است. این آسیب در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۶۷ مشاهده شده است. مقدار آسیب بیشینه در مخزن نسل دوم در لایه ۱ با مقدار عددی ۱/۲۵ و برای مخزن نسل چهارم در لایه ۱ با مقدار عددی ۰/۹۲ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری را متحمل شده است. در جدول ۱۳، مشخص 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 آسیب قرار دارد.

جدول ۱۴- مقادیر بیشینه آسیب فشاری زمینه

| نوع مخزن             | نسل دوم | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۴/۹۳۷   | ۳/۸۳۶   | ۱/۵۳۴     |
| درصد تخریب لایه‌ها   | ٪۱۰۰    | ٪۷۵     | ٪۵۶/۲۵    |

در شکل (۱۶) 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. مقدار آسیب بیشینه 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 ۱۵ می‌توان گرفت 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 داده‌اند [۱۶].

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 نشده‌اند.



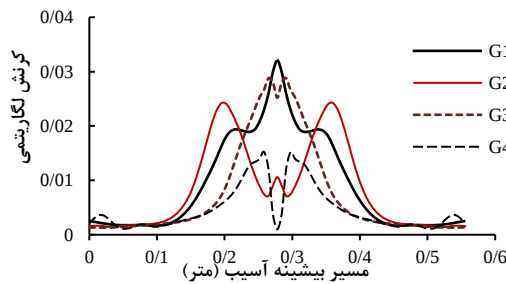
شکل ۱۶- آسیب کششی وارده به زمینه براساس معیار هاشین

جدول ۱۵- مقادیر بیشینه آسیب کششی زمینه

| نوع مخزن             | نسل دوم | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۴/۶۸    | ۴/۶۶    | ۴/۳۶      |

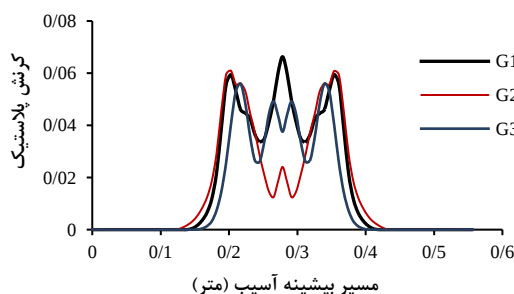
#### ۴-۳-۴-۴- نتایج حالت برخورد عمودی با سرعت 60 km/hr

شکل (۱۷) مقدار کرنش 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 ۰/۰۳۲ رخ داده است. مقدار ماکزیمم کرنش رخ داده در مخزن نسل سوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۲۹ در رتبه دوم قرار دارد. همچنین مقدار کرنش رخ داده در مخزن نسل چهارم کمتر از سایر مخازن با مقدار عددی ۰/۰۱۵ می‌باشد.



شکل ۱۷- کرنش در مسیر بیشینه آسیب

شکل (۱۸) مقدار کرنش پلاستیک را در مخازن نشان می‌دهد. ماکزیمم کرنش پلاستیک در مخزن نسل اول با مقدار عددی ۰/۰۶۶ رخ داده است. ماکزیمم کرنش پلاستیک مخزن نسل دوم نیز با مقدار عددی ۰/۰۶۲ در رتبه دوم قرار دارد و مخزن نسل سوم در این بین با مقدار عددی ۰/۰۵۶ کرنش پلاستیک کمتری را متحمل شده است.



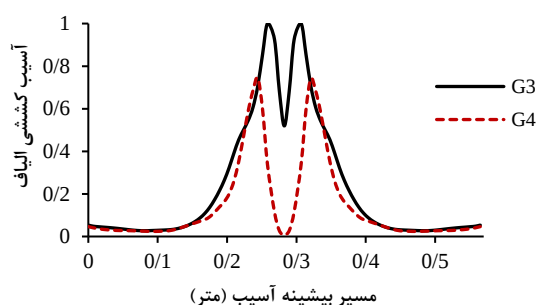
شکل ۱۸- کرنش پلاستیک معادل در مسیر بیشینه آسیب

شکل (۱۹) مقدار آسیب جانسون-کوک در بخش فلزی مخزن نسل اول، دوم و سوم را در سرعت ۶۰ کیلومتر

جدول ۱۶- مقادیر بیشینه آسیب فشاری الیاف

| نوع مخزن             | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۴/۸۴۱   | ۳/۵۴۵     |

در مود آسیب کششی الیاف، با مشاهده شکل (۲۱) می‌توان نتیجه گرفت 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 دیده است.



شکل ۲۱- آسیب کششی وارده به الیاف براساس معیار هاشین

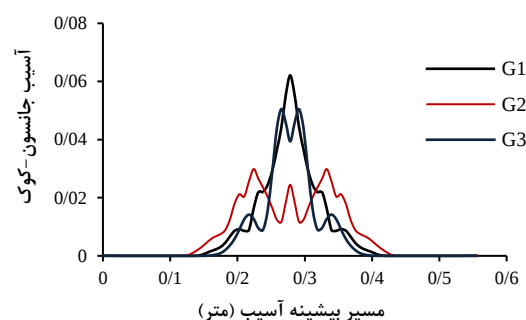
جدول ۱۷ نشان می‌دهد که مقدار آسیب کششی الیاف در مخزن نسل چهارم به نسبت نسل سوم کمتر و میانگین آسیب لایه‌ها برابر ۰/۴ شده است. مخزن نسل سوم هم با میانگین آسیب ۰/۴۹۳ دچار تخریب بیشتری شده است. همچنین هر دو مخزن با درصد تخریب برابر ۱۲/۵، تنها ۲ لایه تخریب شده دارند.

جدول ۱۷- مقادیر بیشینه آسیب کششی الیاف

| نوع مخزن             | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۰/۴۹۳   | ۰/۴       |

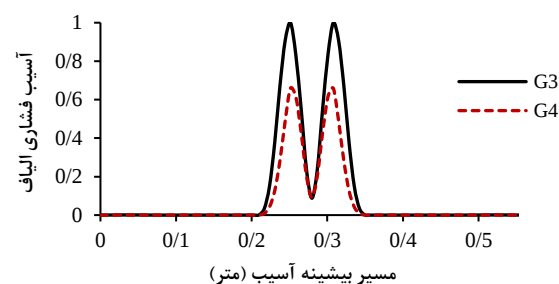
همان‌طور که از شکل (۲۲) مشخص است، مقدار بیشینه آسیب مخزن نسل سوم به مراتب از نسل چهارم بیشتر شده است. این آسیب در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۱۲/۶۹ ایجاد شده است. بیشینه آسیب مخزن نسل چهارم هم در لایه ۱۶ با مقدار عددی ۹/۱۹ رخ داده است. مخزن نسل چهارم در این مود شکست هم آسیب کمتری دیده است. نتایج جدول ۱۸ نشان 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 دارد. در مقابل، مخزن نسل سوم

برساعت نشان می‌دهد. در شکل (۱۹) مشخص است که مقدار آسیب وارده به آستر فلزی مخزن نسل اول بیشترین مقدار را دارد و مقدار عددی ۰/۰۶۲ را کسب کرده است. مخزن نسل سوم با مقدار عددی ۰/۰۵ رتبه دوم آسیب را داراست. در نتیجه مخزن نسل دوم با مقدار عددی ۰/۰۳ کمترین آسیب را متحمل شده است. مانند سرعت پیشین، مخزن نسل دوم فاقد پوشش لایه کامپوزیتی در محل برخورد، یعنی بخش عدسی‌های مخزن است. به همین دلیل، مخزن نسل دوم در برخورد عمودی فاقد آسیب کامپوزیت می‌باشد.



شکل ۱۹- آسیب وارده به مخازن براساس معیار جانسون-کوک

شکل (۲۰) نشان می‌دهد که مقدار آسیب بیشینه فشاری 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 آسیب بیشینه 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 ۱۶ 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. هر دو مخزن با درصد تخریب برابر ۶۸/۷۵، دارای ۱۱ لایه تخریب شده هستند.



شکل ۲۰- آسیب فشاری وارده به الیاف براساس معیار هاشین

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر آسیب ناشی از ضربه تحت برخورد افقی و عمودی در دو سرعت متفاوت بررسی و مقادیر کرنش و کرنش پلاستیک در مخازن محاسبه شدند. 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 نسل‌ها به مراتب کمتر شد. همچنین بخش کامپوزیتی این نسل پس از نسل چهارم، کمترین آسیب را بر مبنای تئوری هاشین متحمل شد. بنابراین مخازن نسل چهارم و سوم عملکرد بهتری در برخورد افقی از خود نشان داده اند. در برخورد عمودی، مخزن نسل چهارم کمترین مقدار کرنش را در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت کسب کرد. همچنین در بخش کامپوزیتی، به طور کلی مخزن نسل چهارم عملکرد بهتری از خود نشان داد. همچنین مقدار آسیب بخش فلزی نسل دوم کمترین آسیب را متحمل شد. در این سرعت، مقدار کرنش پلاستیک نسل سوم از نسل دوم بیشتر شد. به طور کلی، نتیجه می‌شود که مخزن نسل چهارم عملکرد بهتری از خود بر جای می‌گذارد و از نظر وزنی نیز دارای برتری جهت استفاده در خودروها است.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان بدین وسیله از تمامی اساتید، همکاران و افرادی که در مراحل مختلف انجام این پژوهش یاری‌رسان بودند، صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین از حمایت‌های علمی و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان سپاسگزاریم.

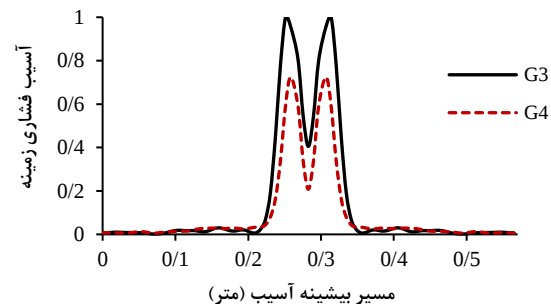
## تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافع مالی، مشاوره‌ای، نهادی یا سایر روابطی که ممکن است منجر به جانبداری در نتایج شود، وجود ندارند.

## تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله پیش‌تر در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده و هم‌اکنون نیز تنها برای انتشار در این مجله ارسال شده است.

با میانگین آسیب ۶/۴۶۹ و درصد تخریب ۱۰۰، آسیب بیشتری را متحمل و تمام لایه‌های آن از بین رفته است.

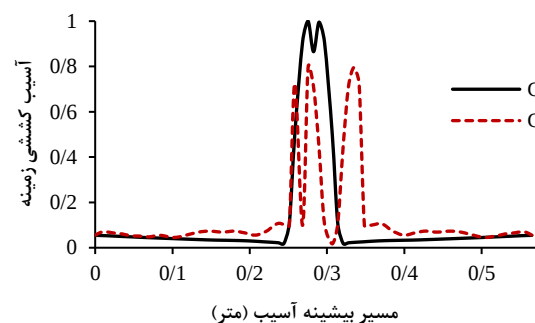


شکل ۲۲- آسیب فشاری وارده به زمینه براساس معیار هاشین

جدول ۱۸- مقادیر بیشینه آسیب فشاری زمینه

| نوع مخزن             | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۶/۴۶۹   | ۳/۵       |
| درصد تخریب لایه‌ها   | ٪۱۰۰    | ٪۹۳/۷۵    |

در شکل (۲۳) مشخص است که مقدار بیشینه آسیب کششی زمینه در مخزن نسل سوم در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۶/۲۹ رخ داده است. آسیب بیشینه در مخزن نسل چهارم نیز در لایه ۱ با مقدار عددی ۱۲/۸۱ ایجاد شده است. از جدول ۱۹ می‌توان 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 می‌باشد. به عبارتی، در مخزن نسل سوم ۱۱ لایه و مخزن نسل چهارم ۹ لایه تخریب شده دارد و مخزن نسل چهارم آسیب کمتری را متحمل شده است.



شکل ۲۳- آسیب کششی وارده به زمینه براساس معیار هاشین

جدول ۱۹- مقادیر بیشینه آسیب کششی زمینه

| نوع مخزن             | نسل سوم | نسل چهارم |
|----------------------|---------|-----------|
| میانگین آسیب لایه‌ها | ۴/۴۹    | ۲/۶۲      |
| درصد تخریب لایه‌ها   | ٪۶۸/۷۵  | ٪۵۶/۲۵    |

## مشارکت‌های نویسندگان

علیرضا آلبویه: بازبینی نهایی و ویرایش علمی متن  
 شهرام امیرعبدالهیان: طراحی مطالعه و نگارش  
 بخش‌های اصلی مقاله  
 محمد امامی: جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل نتایج

## منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت کمک مالی مستقیم یا غیرمستقیم از مؤسسات، سازمان‌ها یا اشخاص حقیقی و حقوقی انجام شده است.

## مراجع

- [1] Yazdani Ariatapeh, Mohammad, Mohsen Azadi, Mohammad Mashayekhi, and Saeed Ziaei Rad. "Simulation of All-steel CNG Cylinders Fracture in an Impact by Damage Mechanic Approach." *Journal of Petroleum Research* 24 (2014): 4-17. (in Persian)
- [2] Zheng, Changliang, Mingfa Ren, Wei Zhao, and Haoran Chen. "Delamination prediction of composite filament wound vessel with metal liner under low velocity impact." *Composite Structure* 75 (2006): 387-392.
- [3] Wu, Q.G., X.D. Chen, Z.C. Fan, and D.F. Nie. "Stress and Damage Analyses of Composite Overwrapped Pressure Vessel, *Procedia Engineering*." *Procedia Engineering* 130 (2015): 32-40.
- [4] Sharifi, Shokrollah, Scott Gohari, Masoumeh Sharifiteshnizi, Reza Alebrahim, Colin Burvill, Yazid Yahya, and Zora Vrcelj. "Fracture of laminated woven GFRP composite pressure vessels under combined low-velocity impact and internal pressure." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18 (2018): 1715-1728.
- [5] Liao, B.B., and L.Y. Jia. "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* 129 (2018): 488-501.
- [6] Pramod, R., C.K. Krishnadasan, and N. Siva Shanmugam. "Design and finite element analysis of metal-elastomer lined composite over wrapped spherical pressure vessel." *Composite Structures* 224 (2019): 111028.
- [7] Seyed, S.M., A. Naddaf Oskouei, and M. Sayah Badkhor. "Experimental, numerical and Optimization study of Composite Tanks with Non-Metallic Primer (CNG Fourth Type)." *Modares Mechanical Engineering* 20, no. 3 (2020): 1789-1800.
- [8] Nouri, M., F. Ashenai-Ghasemi, G. Rahimi-Sherbaf, and K. Reza Kashyzadeh. "Experimental and Numerical Study of the Static Performance of a Hoop-Wrapped CNG Composite Cylinder Considering Its Variable Wall Thickness and Polymer Liner." *Mechanics of Composite Materials* 56 (2020): 339-352.
- [9] Albooyeh, Alireza, Shahram Amirabdollahian, and Nima Fatahi. "Simulation and Analysis of the First to Fourth Types of Compressed Natural Gas Tanks of Vehicles under the Explosive Loading." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 54, no. 8 (2022): 379-382. (in Persian)
- [10] Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10. Section 19.2.3: Plane Stress Orthotropic Failure Measures. 2010.
- [11] Hashin, Z. "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites." *Journal of Applied Mechanics* 47 (1980): 329-334.
- [12] Johnson, G.R., and W.H. Cook. "A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature." In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, Netherlands, 541-547, 1983.
- [13] Johnson, G.R., and W.H. Cook. "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures." *Engineering Fracture Mechanics* 21 (1985): 31-48.
- [14] Mohotti, D., M. Ali, T. Ngo, J. Lu, P. Mendis, and D. Ruan. "Out-of-Plane Impact Resistance of Aluminium Plates Subjected to Low Velocity Impacts." *Materials & Design* 50 (2013): 413-426.
- [15] Ramezani, M., and M. Mohammadi. "Numerical and Experimental Investigation of Deflection of Laminated Composites due to Drop Weight of Different Projectiles." *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics* 33 (2022): 41-54.
- [16] Zu, L. Design and Optimization of Filament Wound Composite Pressure Vessels. Doctoral thesis, Delft University of Technology (TU Delft), Netherlands, 2012.

[17] Heidari-Rarani, Mohammad, and Mohsen Ahmadi-Jebeli. "Finite Element Modeling of Failure in IV Type Composite Pressure Vessel Using WCM Plug-in in ABAQUS Software." *Modares Mechanical Engineering* 18 (2018): 191–200.

[18] Noban, M., and R. Adibi Asl. *Design of Pressure Vessels Based on ASME*. Tehran: Simay Danesh, December 2016. (in Persian)