



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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



Research Article

Numerical analysis of collapse of polyurethane foam filled composite tubes under pressure loading at different speeds

Ehsan Zamani^{1*}, Mohammad Izadpanah²

1. Assistant Professor, Department Of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2. Msc Graduate, Department Of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Corresponding Author: zamani.ehsan@sku.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:

Received: 26 December 2022

Revised: 11 April 2023

Accepted: 24 April 2023

Keywords:

Energy absorber foam,
Thin walled structure,
Plastic deformation,
Optimization algorithm.

ABSTRACT

Thin-walled energy-absorbing elements in compressive loading are widely used in the transportation industry, especially in automobile manufacturing, airplane manufacturing, and urban and intercity train construction. As a new idea, coaxial double-tube energy absorbers are used in this research. The execution method is based on simulation in ABAQUS explicit finite elements software. Based on the validated model, a parametric analysis has been carried out in order to extract the effect of structure thickness, loading angle and density of polyurethane foam on the amount of energy absorption. Examining the deformed geometry of the sample after loading, the dynamic loading coefficient and the effect of the load angle on the maximum value of the structure collapse to the initial length is one of the topics that has been taken into consideration. In the end, according to the design goals, which include the maximum amount of energy absorption, the lowest amount of initial maximum force and the lowest weight of the structure, the optimization process of the design variables, using the optimization algorithm and formulation of multiple goals and with the help of finite element software data, has been completed.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27610.2332>

How to cite this article:

Zamani, E., & Izadpanah, M. (2023). numerical analysis of collapse of polyurethane foam filled composite tubes under pressure loading at different speeds. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(74), 113-124. doi: 10.22075/jme.2023.27610.2332

تحلیل عددی فروریزش لوله‌های کامپوزیتی پر شده از فوم پلی‌یورتان تحت بارگذاری فشاری با سرعتهای متفاوت

احسان زمانی^{۱*}، محمد ایزدپناه^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴</p>	<p>المان‌های جدارنازک جذب‌کننده‌ی انرژی در بارگذاری فشاری، به طور گسترده در صنعت حمل و نقل به ویژه خودروسازی، هواپیماسازی و ساخت قطارهای شهری و بین‌شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق پیش‌رو از جاذب‌های انرژی دولوله‌ای هم‌محور استفاده شده است. روش اجرا بر شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS explicit استوار است. مبتنی بر مدل اعتبارسنجی شده، تحلیلی پارامتریک به منظور استخراج تاثیر ضخامت سازه، زاویه‌ی بارگذاری و چگالی فوم پلی‌یورتان بر میزان جذب انرژی انجام گرفته است. بررسی هندسه‌ی تغییر شکل یافته‌ی نمونه پس از بارگذاری، ضریب بارگذاری دینامیکی و اثر زاویه‌ی بار بر بیشترین مقدار لهیدگی سازه به طول اولیه از مباحثی است که مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل، نشانگر افزایش ضریب DAF در سازه‌ی ضربه‌گیر چندلوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان با زاویه‌ی ضربه‌ی ۱۲ درجه نسبت به ۱۰ درجه، به میزان ۴/۳٪ و نسبت به زاویه‌ی ۴ درجه، به میزان ۱۹٪ است. همچنین با مقایسه بین مقادیر ضریب DAF در هر دو سازه با لوله‌های دوتایی و سه‌تایی، مشخص می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌ها مقادیر متوسط DAF تا ۶/۱۴٪ افزایش خواهد یافت.</p>
<p>واژگان کلیدی: فوم جاذب انرژی، سازه‌ی جدار نازک، تغییر شکل پلاستیک، الگوریتم بهینه‌سازی.</p>	

۱- مقدمه

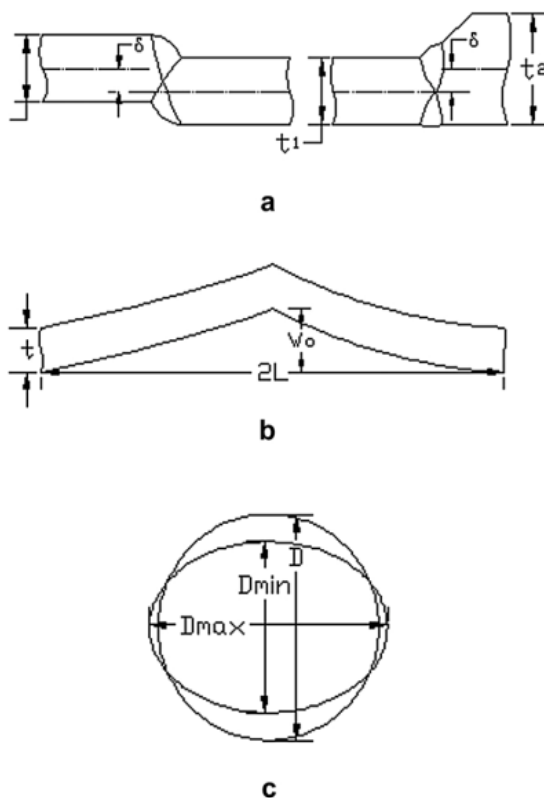
حساسیت و توجه به ایمنی سرنشینان وسایل نقلیه‌ی پرسرعت امروزی و نیز کاهش خسارتهای وارد به خودرو در تصادفات و سوانح جاده‌ای، هم در فرآیند طراحی و هم در قوانین راهنمایی و رانندگی افزایش محسوس یافته است. به طوری که درجه‌ی ایمنی خودروها به عنوان یکی از مشخصات مهم وسیله نقلیه در دفترچه‌ی همراه آن بیان می‌شود. سازه‌های جذب‌کننده‌ی انرژی به عنوان یکی از تجهیزات ایمنی خودروهای مدرن، انرژی جنبشی خودرو را به صورت تغییرشکل پلاستیک مستهلک می‌کنند [۱].

لوله‌های جاذب انرژی، یکی از انواع این سازه‌ها هستند که معمولاً از فولاد، آلومینیوم، لاستیک و یا کامپوزیت ساخته شده و در هنگام رخداد تصادف، با جذب بخشی از ضربه‌ی ناشی از برخورد، تا حد امکان از رسیدن آسیب به خودرو و سرنشینان جلوگیری کرده و یا از شدت آن می‌کاهند. جاذب‌هایی که در سال‌های اخیر طراحی شده‌اند، این قابلیت را دارند که انرژی برخورد را در سرعت‌های حدوداً ۳۰ کیلومتر بر ساعت بصورت کامل جذب کرده و از بروز آسیب‌های جدی در شاسی و بدنه‌ی خودرو جلوگیری به عمل آورند. برای سرعت‌های بیش از ۳۰ کیلومتر بر ساعت،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: zamani.ehsan@sku.ac.ir

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک جامدات، دانشگاه شهرکرد

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک جامدات، دانشگاه شهرکرد



شکل ۱- انواع مودهای در نظر گرفته شده برای تغییر شکل صفحه‌ی کامپوزیتی منحنی شکل تحت بار ضربه‌ای، (a) آفست همراستا، (b) واپیچش زاویه‌ای، (c) بیضوی شدن [۱۰]

علوی‌نیا و خدابخش به بررسی عددی تأثیر فاصله لوله‌های جدارنازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها پرداختند. [۱۱]

تحقیقات رضوانی و همکاران نیز مؤید این نکته است که فوم نانوکامپوزیت پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات SiC می‌تواند بعنوان جاذب انرژی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرد [۱۲].

نگهبان و همکاران در بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله‌های پر شده از فوم، به مطالعه اثر فوم پلی‌یورتان، وجود آغازگر و تغییر در طول آن بر روی جذب انرژی ویژه و نیروی اوج اولیه پرداخته‌اند. نکته حایز اهمیت آن است که میزان جذب انرژی ویژه در لوله مجهز به آغازگر، افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بدون آغازگر یافته است [۱۳].

این المان‌ها با تخریب کامل موجب انتقال کمتر انرژی به خودرو و سرنشینان آن خواهند شد [۲].

در پژوهش پیش‌رو تلاش شده که با تکیه بر پیشینه‌ی تحقیق و تمرکز بر شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جاذب انرژی کامپوزیتی دولوله‌ای، نمونه‌ای جدید و قابل استفاده در صنعت خودرو معرفی شود.

آندرو^۱ مودهای تغییرشکل محفظه‌های جدار نازک توخالی با مقطع دایروی را برای نسبت‌های مختلف L/t و D/t معرفی و دسته‌بندی کرد که در اینجا D قطر مقطع دایروی، t ضخامت و L طول محفظه‌ی جدارنازک است. بر

این اساس، مودهای عمومی تغییر شکل عبارتند از:

۱. مود دایموند: مودی با لایه‌های غیرمتمقارن [۳]
۲. مود کانسترتینا: مودی با تغییرشکل لایه‌ای متمقارن استوانه‌ای [۴]
۳. مود ترکیبی: ترکیبی از دو مود دایموند و کانسترتینا [۵]
۴. مود تغییرشکل بشکه‌ای (یگانه و دوگانه) و دیگرام نیرو جابجایی [۶]

۵. مود تغییرشکل خمشی کلی (اویلری) [۷]

سازه‌های جدارنازک فولادی با مقطع مربعی و دایروی و پر شده از فوم آلومینیومی و تحت بارگذاری محوری فشاری، توسط سیتزبرگر^۲ در سال ۱۹۹۷ مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهدات وی حاکی از آن است که برهمکنش بین فوم فلزی و دیواره‌ی سازه‌ی جدار نازک، جذب انرژی را افزایش داده و موجب عوض شدن مودهای تغییر شکل می‌شود [۸].

تأثیر فوم آلومینیومی در رفتار فشاری محفظه‌های جدارنازک مربعی از جنس آلایژ آلومینیوم AA6060 T4 تحت بار دینامیکی و استاتیکی توسط لنگست^۳ در سال ۲۰۰۳ بررسی شد [۹]. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش چگالی فوم و ضخامت دیواره‌ی سازه جدارنازک، «انرژی جذب شده مخصوص»^۴ نیز افزایش می‌یابد.

برابین^۵ و همکارانش پنل‌های تحت بار ضربه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. انواع مودهای در نظر گرفته شده در این کار در شکل (۱) نمایش داده شده است. برای تحلیل تنش، هر سه مود تغییر شکل آفست همراستا، واپیچش زاویه‌ای و بیضوی شدن روابط تئوری پیشنهاد شده است.

¹ Androw

² Seitzberger

³ Langseth

⁴ Specified energy absorbrd (SEA)

⁵ Brabin

$$\Phi = \hat{\sigma} - \hat{\sigma}_y \leq 0 \quad (2)$$

در این رابطه، $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}_y$ به ترتیب تنش معادل و تنش تسلیم فوم پلیمری می‌باشند. خود تنش معادل نیز با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(1+(\alpha/3)^2)} [\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] \quad (3)$$

که در آن، σ_e تنش معادل فن‌مایسز، σ_m تنش متوسط و α پارامتری برای تعریف سطح تسلیم بوده و مطابق با رابطه زیر، تابعی از نسبت پواسون پلاستیک ν^p است:

$$\alpha^2 = \frac{9(1-2\nu^p)}{2(1+\nu^p)} \quad (4)$$

ν^p برای فوم پلیمری صفر است و بنابراین، α برابر $2/12$ خواهد بود [۱۶ و ۱۷]. $\hat{\sigma}_y$ یا تنش تسلیم فوم نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{\sigma}_y = \sigma_p + \gamma \frac{\varepsilon}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left(\frac{1}{1 - (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_D})^\beta} \right) \quad (5)$$

که در آن، σ_p تنش پلاستیک فوم پلیمری و ε_D کرنش چگالش بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_D = -\frac{9+\alpha^2}{3\alpha^2} \ln(\rho_f/\rho_{f0}) \quad (6)$$

σ_p تنش پلاستیک فوم پلیمری بوده و ضرایب α_2 ، β و γ مطابق رابطه‌ی زیر با چگالی فوم در ارتباطند [۱۶]:

$$\left(\sigma_p, \alpha_2, \gamma, \frac{1}{\beta} \right) = C_0 + C_1 \left(\frac{\rho_f}{\rho_{f0}} \right)^k \quad (7)$$

C_0 ، C_1 و k در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۱۷]:

جدول ۱- ثوابت دشیپند و فلک برای فوم پلیمری

	σ_p MPa	α_2	γ MPa	$\frac{1}{\beta}$
C_0	0	0	0	0.14307
C_1	494.08	125.44	298.20	97.40
k	2.963	0.663	2.056	4.063

۲-۳- شبیه‌سازی اجزای محدود جاذب انرژی

دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان

شبیه‌سازی اجزای محدود جاذب انرژی دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان و معرفی الگوریتم‌های تماسی، مطابق با شکل (۲) انجام شده است. فرض بر این است که صفحه‌ی

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی اجزای محدود جاذب انرژی دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان انجام شده است. از آنجا که در تحلیل پارامتریک نتایج و فرآیند بهینه‌سازی، از نتایج شبیه‌سازی المان محدود استفاده می‌شود، ساخت یک مدل عددی که با دقت ۰/۹۹ تغییر شکل سازه را پیش‌بینی کند، از اهمیت زیادی برخوردار است.

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

۱-۲- معرفی سطوح تماسی

تحلیل یک مسأله‌ی اجزای محدود با تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از سنبه‌ی صلب شامل تماس بین سطوح است. معرفی سطوح تماسی در شبیه‌سازی عددی، به منظور ایجاد نوع برهمکنش بین بخش‌های مدل اجزای محدود صورت می‌گیرد. به دلیل تغییر شکل‌های بزرگ و غیرخطی در حین تحلیل شبه‌استاتیکی صریح، شبیه‌سازی تماس بین اجزای مختلف سازه پیچیدگی‌های خاصی دارد. به همین دلیل نمایه‌های خاصی برای شبیه‌سازی تماس پیش‌بینی می‌شود.

برای معرفی تماس از منوی *contact* در روش حل صریح، برخلاف روال حل ضمنی، المان خاصی برای تماس در نظر گرفته نشده و تماس بین کلیه‌ی سطوح با روشی که در ادامه آمده است، انجام می‌گیرد. برای معرفی این سطوح، سازه‌ی مکانیکی به اجزای مختلف تقسیم شده و مدل‌های تماسی بین این اجزا تعریف می‌شوند. در نهایت ضرایب اصطکاک مابین سطوح با رابطه‌ی زیر معرفی می‌شوند [۱۴]:

$$\mu_c = FD + (FS - FD)e^{-DC \cdot V_{Rel}} \quad (1)$$

در این رابطه FS و FD به ترتیب ضرایب اصطکاک دینامیکی و استاتیکی بوده و DC و V_{Rel} به ترتیب سرعت نسبی بین سطوح تماس و توان نمایی می‌باشند.

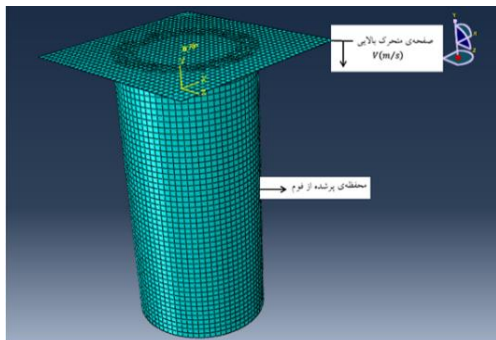
۲-۲- فوم پلی‌یورتان

فوم پلی‌یورتان که برای پر کردن محفظه‌ی جدار نازک به کار گرفته شده است، از طریق مدل فوم همسانگرد و همگن شماره‌ی ۱۵۴ در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شود. این مدل ساختاری توسط دشیپند و فلک^۱ معرفی شده که در آن، ضابطه‌ی تسلیم از رابطه‌ی زیر پیشنهاد می‌شود [۱۵]:

¹ Deshpande and Fleck

زیر برای این نوع کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود [۱۸]:

$$\varepsilon = Y \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_0} - 1 \right)^q \quad (۸)$$



شکل ۲- جزییات مدل اجزای محدود برای ضربه‌گیر دو لوله‌ای پر شده از فوم

که در آن، σ_d تنش تسلیم در بارگذاری دینامیکی، σ_0 تنش تسلیم اولیه، ε نرخ کرنش، Y و q ضرایب ثابت کوپر- سایموند و ε_p^{eff} کرنش پلاستیک موثر می‌باشند. این ضرایب برای کامپوزیت اپوکسی/گرافیت T300/977-2، $Y = 1288000 \text{ s}^{-1}$ و $q = 4$ انتخاب می‌شوند [۱۹].

خواص اورتوتروپیک لایه تک‌سو برای مواد، به صورت زیر ارائه شده است [۱۸ و ۱۹]:

$$E_y = E_z = 1.03 \times 10^{10} \text{ pa}, E_x = 1.81 \times 10^{11} \text{ pa} \quad (۹)$$

$$\nu_{yz} = \nu_{zx} = 0.016 \quad \nu_{xy} = 0.28$$

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = 7.17 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\rho = 7300 \text{ kg/m}^3$$

که E_x ، E_y و E_z مدول یانگ لایه‌ی کامپوزیتی در طول مختصات مواد، G_{xy} ، G_{yz} و G_{zx} مدول برشی و ν_{xy} ، ν_{yz} و ν_{zx} نسبت پواسون هستند.

۳- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی براساس روابط تئوری بسط داده شده در مقالات موجود انجام می‌شود. برای نیروی متوسط دینامیکی در سازه‌ی پر شده از فوم، معادله‌ی زیر مبتنی بر روش انرژی در دسترس است [۲۰]:

$$P_{m(\text{eff})}^d = \sigma_y 2\pi R_0 t(\varphi) + \sigma_p + \frac{A_f + C_{avg} \sqrt{\sigma_p \sigma_y} A_0}{\sigma_y} \quad (۱۰)$$

صلب پایینی ثابت بوده و صفحه‌ی صلب بالایی با سرعت $V(\text{m/s})$ به سمت پایین در حرکت است. در کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها، ضخامت محفظه ۱/۵ میلی‌متر و از جنس کامپوزیت لایه‌ی اپوکسی / گرافیت T300/977-2 در نظر گرفته شده است.

سازه‌ی در نظر گرفته شده در این تحقیق، سازه‌ی با مقاطع دایره‌ای شکل با قطر ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. المان‌های shell 163 و solid 164 به ترتیب برای مدل‌سازی پوسته‌ی جدار نازک و جسم وارد کننده‌ی ضربه انتخاب شده‌اند. المان solid 164 المانی مکعبی شکل و ۸ گره‌ای می‌باشد.

المان shell 163 با فرمول‌بندی‌های مختلف در نرم‌افزار آباکوس موجود است که از آن میان، رابطه بلیتچکو-سای^۱ برای مدل‌هایی که دارای گسستگی اولیه‌ی در هندسه نباشند، مناسب است. لذا چون ناپیوستگی و گسیختگی بین اجزای تحت بارگذاری در شروع شکل‌دهی وجود ندارد، این فرمول‌بندی برای شبیه‌سازی دیواره‌ی سازه مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۲) مدل اجزای محدود متشکل از ۳۲۰۰ المان با طول ۲/۵ میلی‌متر و هم‌چنین مدل‌های تماسی در نظر گرفته شده بین کلیه‌ی اجزای سازه‌ی جدار نازک تحت بارگذاری فشاری محوری را نشان می‌دهد. هر یک از اجزا در شبیه‌سازی اجزای محدود، به صورت بخش‌هایی جداگانه^۲ در نظر گرفته شده و سنبه‌های شکل‌دهی بالایی و پایینی به منظور کاهش زمان محاسبات به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی تماس سطوح داخلی بین هر جز مدل تماسی با الگوریتم Single Surface Contact در نظر گرفته شده است. هم‌چنین، مدل تماسی Node-to-Surface Contact برای تماس بین اجسام صلب بالایی و پایینی با پوسته‌ی جدار نازک در نظر گرفته شده است.

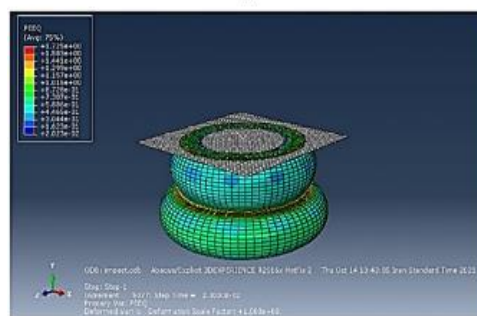
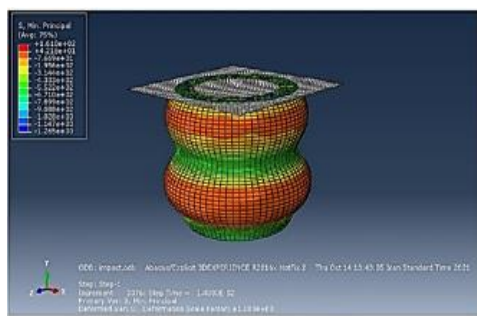
مدلهای گوناگونی برای معرفی رفتار ماده در تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک به روش حل صریح در آباکوس موجود است که از آن میان، مدلی مناسب برای حل مساله بر مبنای نتایج عددی و روش‌های آزمایشگاهی و هم‌چنین شرایط بارگذاری مسأله انتخاب می‌شود.

به دلیل حساسیت به نرخ کرنش، مدل مادی الاستوویسکو پلاستیک کوپر- سایموند با معادله‌ی ساختاری

² Part

¹ Belytschko-Tsay

با هندسه‌های مختلف، در جدول ۲ نیروی متوسط دینامیکی با توجه به ضخامت‌های مختلف سازه‌ی دینامیکی برای نتایج تئوری و شبیه‌سازی عددی مقایسه شده و درصد خطا برای هر هندسه بیان گردیده است. تطابق خوبی بین رفتار مکانیکی سازه با نتایج تئوری دیده می‌شود. رابطه (۱۰) همواره بار متوسط بیشتری را نسبت به شبیه‌سازی المان محدود پیش‌بینی می‌کند که دلیل آن، در نظر گرفتن ضریب برهم‌کنش ۲/۶۸ می‌باشد.



شکل ۳- جزئیات تغییر شکل ضربه‌گیر پر شده از فوم با سرعت برخورد، (الف) ۱۰ متر بر ثانیه، (ب) ۳۰ متر بر ثانیه.

در معادله‌ی بالا A_0, σ_y, σ_p و A_f و C به ترتیب معرف تنش پلاستیک فوم پلی‌یورتان، تنش تسلیم سازه، سطح مقطع اولیه‌ی فوم، سطح مقطع خارجی سازه‌ی جدار نازک و ضریب برهم‌کنش می‌باشند. در این مطالعه C_{avg} برابر ۲/۶۸ در نظر گرفته شده است [۲۰]. در رابطه‌ی مذکور، بخش اول P_m^d نیروی تخریب سازه‌ی جدار نازک کامپوزیتی، بخش دوم $A_f \sigma_p$ مربوط به نیروی متوسط پس از رسیدن فوم به تنش یکنواخت و بخش سوم $C_{avg} \sqrt{\sigma_p \sigma_y} A_0$ نیز نیروی بر هم‌کنش حاصل‌شده ناشی از برهم‌کنش بین فوم و سازه‌ی جدار نازک کامپوزیتی می‌باشد.

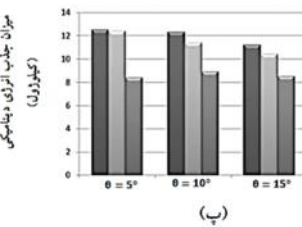
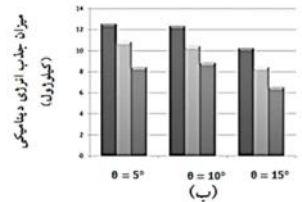
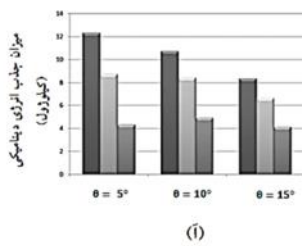
به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با نیروی حاصل از محاسبات تئوری برای چگالی ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تغییر شکل جاذب انرژی در شکل (۳) و نمودار نیروی متوسط دینامیکی- جابجایی در شکل (۴) نشان داده شده است. هر چند فرمول‌بندی پیشنهاد شده توانایی پیش‌بینی نیروی ماکزیمم را ندارد، اما براساس مطالعات تجربی، اگر بار ماکزیمم در شبیه‌سازی عددی برای سرعت‌های ۱۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه در ضریب ۰/۶ ضرب شود بار متوسط حاصل می‌گردد و پیش‌بینی نتایج بار ماکزیمم نیز قابل استناد خواهد بود. همان‌طوری که در نمودار شکل (۴) مشهود است، نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج تئوری دارد.

هم‌چنین به منظور اطمینان بیشتر برای اعتبارسنجی رفتار سازه‌ی جاذب انرژی دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان

جدول ۲- نتایج مقایسه‌ی بین نتایج عددی و تئوری [۲۰]

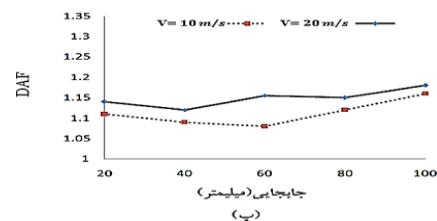
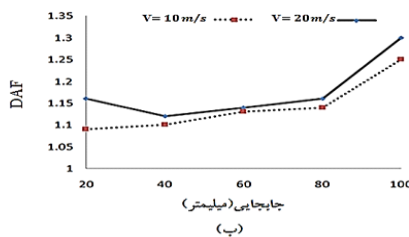
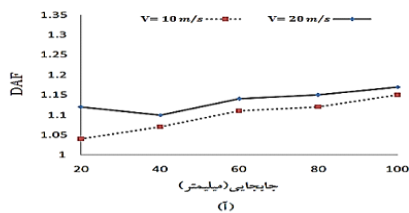
Tubes number	ضخامت t(mm)	$P_{m}^d (KN)$			$P_{max} (KN)$			SEA (kJ/kg)		
		Theo.	FE	Diff. (%)	Theo.	FE	Diff. (%)	Theo.	FE	Diff. (%)
1	1	31.3	34.9	8.7	31.3	40.4	22.0	14.8	17.5	9.5
2	1.5	33.5	36.4	6.6	33.5	37.3	8.7	21.3	22.1	7.4
3	2	62.1	67.8	7.9	62.1	73.9	16.3	16.5	18.3	9.2
4	2.5	68.8	61.3	3.1	68.8	71.2	3.0	28.4	30.2	5.7
5	3	84.2	89.3	5.3	84.2	99.2	15.9	19.6	22.1	11.0
6	3.5	91.7	99.6	7.7	91.7	95.9	4.1	27.8	29.4	5.1

فوم پلی یورتان بررسی می شود.

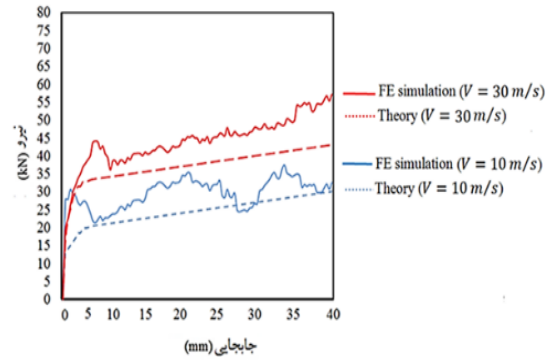


■ $\rho_f = 720 (kg/m^3)$, ▨ $\rho_f = 520 (kg/m^3)$, ▩ $\rho_f = 320 (kg/m^3)$

شکل ۵ - تاثیر چگالی فوم، ضخامت سازه و زاویه ی بار بر جذب انرژی: (الف) $t=1.5 \text{ mm}$ ، (ب) $t=2 \text{ mm}$ ، (پ) $t=2.5 \text{ mm}$



شکل ۶ - تاثیر سرعت بر DAF: (الف) زاویه ی بار 4° ، (ب) زاویه ی بار 10° ، (پ) زاویه ی بار 12°



شکل ۴ - نمودار نیروی متوسط دینامیکی جاذب انرژی دولوله ای پر شده از فوم پلی یورتان با سرعت های برخورد مختلف

۴- تحلیل پارامتریک

۴-۱- تاثیر ضخامت سازه، زاویه ی بارگذاری و چگالی

فوم بر میزان جذب انرژی

تاثیر چگالی فوم پلی یورتان در پاسخ دینامیکی سیستم جاذب انرژی که تحت ضربه ای با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و جرم جسم ضارب ۶۰۰ کیلوگرم قرار گرفته است با چگالی های مختلف بررسی می شود. برای این که مقایسه ای معنا دار بین متغیرها صورت بگیرد، در هر شبیه سازی به ازای ضخامت یکسان t ، نمودار میزان جذب انرژی دینامیکی، برای چگالی ها و زوایای مختلف بارگذاری مطابق شکل (۵) ترسیم شده است.

همانطور که در نمودارها دیده می شود، میزان جذب انرژی در سازه به شدت تحت تاثیر چگالی انتخاب شده و ضخامت سازه می باشد و با افزایش این دو متغیر، میزان جذب انرژی افزایش خواهد داشت. این در حالی است که تاثیر زاویه ی بارگذاری بر میزان جذب انرژی نسبت به دو متغیر قبلی از شدت کمتری برخوردار می باشد.

۴-۲- ضریب افزایش بارگذاری دینامیکی

به منظور برقراری ارتباطی بین پاسخ دینامیکی و استاتیکی سازه ی جاذب انرژی دولوله ای پر شده از فوم پلی یورتان، ضریب افزایش بارگذاری دینامیکی به صورت زیر تعریف شده است [۲۱]:

$$DAF = \frac{\text{مقدار انرژی جذب شده تحت بارگذاری دینامیکی}}{\text{مقدار انرژی جذب شده تحت بارگذاری شبه استاتیکی}} \quad (11)$$

مقدار جذب انرژی در بارگذاری دینامیکی به مقدار جرم و سرعت جسم ضارب بستگی دارد. در اینجا تاثیر پارامترهای مذکور و همچنین پارامترهای دیگری مثل زاویه ی بار و تعداد لوله ها بر DAF در یک سازه ی دولوله ای پر شده از

- با مقایسه‌ای بین مقادیر ضریب DAF در هر دو سازه با لوله‌های دوتایی و سه‌تایی و سه‌تایی مشخص می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌ها مقادیر متوسط DAF با افزایش ۶/۱۴ درصدی مواجه خواهد بود.

۳-۴- تاثیر تعداد لوله‌ها و زاویه‌ی بار بر بازدهی کورس

نسبت بیشترین مقدار لهیدگی سازه تحت بارگذاری به طول اولیه آن، بازدهی کورس نامیده شده و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

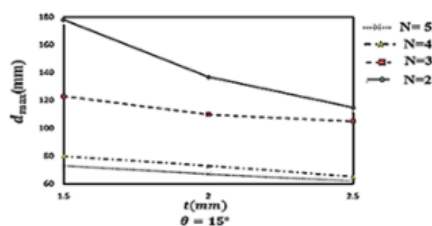
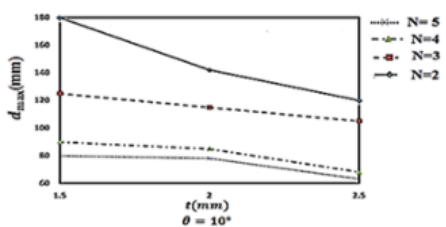
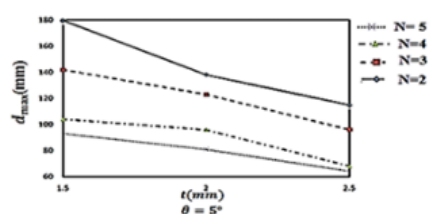
$$SE = d_{max}/L \quad (۱۲)$$

به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای طراحی بر این متغیر، سازه‌های جدارنازک با زوایای بار ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه، تحت ضربه‌ی جسمی ۶۰۰ کیلوگرمی و با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که پیداست:

- در همه‌ی نمودارها، به ازای افزایش زاویه‌ی ضربه، قابلیت تخریب درصدی کاهش داشته است.

- افزایش تعداد لوله‌ها، کاهش مقادیر بازدهی کورس را در پی داشته است.

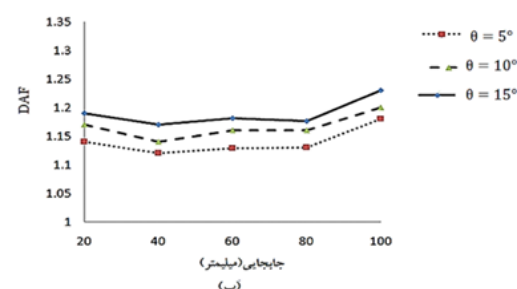
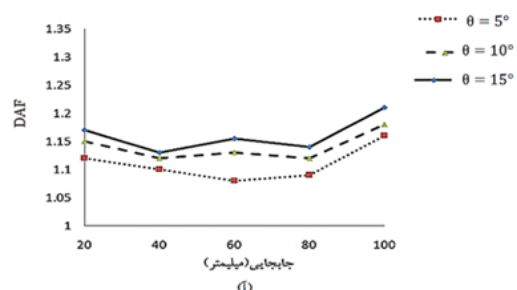
- افزایش ضخامت، موجب کاهش مقادیر بازدهی کورس شده است.



شکل ۸- تاثیر زاویه‌ی بار و تعداد لوله‌ها بر بازدهی کورس

۴-۲-۱- تاثیر سرعت جسم ضارب و زاویه بار بر DAF

شکل (۶)، تاثیر سرعت برخورد بر DAF برای سرعت‌های مختلف در سازه دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، افزایش سرعت ضربه‌ی برخورد موجب افزایش ضریب DAF شده است. روند افزایش ضریب DAF نیز در هر سه زاویه‌ی بارگذاری ۴، ۸ و ۱۲ درجه کاملاً مشهود است. همچنین مطابق شکل (۷) افزایش ضریب DAF در سازه‌ی دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان با زاویه‌ی ۱۲ درجه نسبت به ۱۰ درجه، افزایشی ۴/۳ درصدی و نسبت به زاویه‌ی ۴ درجه افزایش ۱۹ درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین روند تغییر زاویه بر ضریب DAF مؤثر خواهد بود.



شکل ۷- تاثیر زاویه‌ی بار بر DAF: (الف) لوله‌های دوتایی، (ب) لوله‌های سه‌تایی

۴-۲-۲- تاثیر تعداد لوله‌های مقطع بر DAF

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای طراحی سازه‌ی پر شده از فوم پلی‌یورتان بر ضریب DAF، دو نمونه با تعداد لوله‌های دوتایی و سه‌تایی با سرعت ضربه‌ی ۱۰ متر بر ثانیه، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودارها نتایج زیر قابل ملاحظه است:

- روند افزایش DAF با افزایش زاویه‌ی بار روندی مستقیم دارد؛ یعنی با افزایش زاویه‌ی بار، ضریب DAF نیز افزایش داشته است. این افزایش برای هر دو سازه با لوله‌های دوتایی و سه‌تایی مشهود بوده و مقدار این افزایش برای هر دو نمونه افزایش حدود ۴/۸ درصدی را نشان می‌دهد.

نمودارهای نیرو - جابجایی ضربه‌گیر به روش سطح پاسخ، ابتدا چندین تحلیل به روش اجزای محدود (نرم افزار آباکوس) انجام شده و سپس به روش محاسباتی حداقل مربعات، تابع چندجمله‌ای به دست آمده است. آنگاه فرآیند بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک برای مدل انجام شده است. پس از آن، مقادیر جذب انرژی بر واحد جرم و نیروهای بهینه با استفاده از نرم‌افزار متلب به دست آمده‌اند. در این پژوهش مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم تحت عنوان جذب انرژی مخصوص (SEA): سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی بر جرم سازه) به عنوان اولین تابع هدف معرفی شده است. از آنجا که در بیشتر حوادث ضربه‌ای، نیروی بیشینه به عنوان پارامتری مهم در آسیب به سرنشینان وسایل نقلیه می‌باشد، نیروی بیشینه اولیه برخورد (F_{max}) نیز به عنوان هدف دوم طراحی انتخاب شده است.

مسأله‌ی بهینه‌سازی با اهداف چندگانه به ترتیب زیر قابل نمایش است:

$$\begin{cases} \text{Maximize} [SEA(\theta, t) - F_{max}(\theta, t)] \\ \text{St} & x^L \leq x \leq x^U \end{cases} \quad (13)$$

۲-۵ ترسیم مدل ریاضی انرژی جذب شده و بار بیشینه

شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، ترسیم مدل ۳ بعدی حاصل شده برای توابع هدف برحسب متغیرهای طراحی را نمایش داده است. با توجه به این اشکال نتایج زیر حاصل گردید:

- تغییر تعداد لوله‌های مقطع ضربه‌گیر از ۳ به ۴ و ۵، افزایش مقدار جذب انرژی مخصوص در سازه را در پی داشته است. این در حالی است که مقدار بار بیشینه‌ی تخریب در مقطع ۵ لوله‌ای نسبت به دو نوع دیگر بیشتر است.

- افزایش مقادیر ضخامت، افزایش مقادیر SEA را در پی داشته است.

- افزایش زاویه‌ی بار تاثیر چندانی بر SEA نداشته است، ولی تا حدی نیروی بیشینه‌ی تخریب سازه را افزایش داده است.

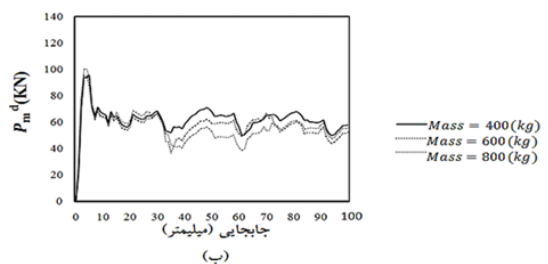
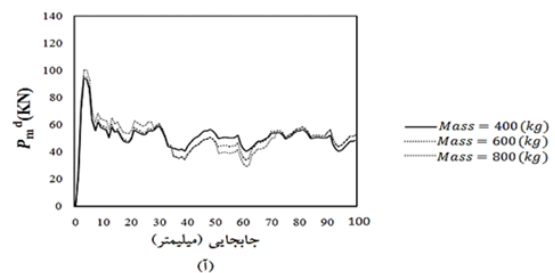
- افزایش ضخامت سازه‌ی پر شده از فوم پلی‌یورتان با مقطع چندلوله‌ای به ۳ میلیمتر، موجب افزایش نیروی بیشینه‌ی تخریب ضربه‌گیر می‌شود.

- با اجرای شبیه‌سازی‌های لازم سطح پاسخ توابع هدف،

۴-۴ حساسیت سیستم جاذب انرژی به جرم جسم واردکننده ضربه

در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در بخش‌های پیشین، جرم جسم ضارب برابر ۶۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده بود. در این قسمت، سنجش میزان حساسیت سازه‌ی جدار نازک دولوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان و بررسی رفتار دینامیکی این سازه تحت بارگذاری ضربه‌ای با اجرام و سرعت‌های مختلف، در دستور کار قرار گرفته است.

در همین راستا مطابق شکل (۹)، سازه‌ی جدار نازک تحت ضربه‌هایی با اجرام ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه قرار گرفته و تاثیر تغییر جرم بر نمودار نیروی متوسط - جابجایی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در ضربه‌گیر با تعداد لوله‌های دوتایی و سه‌تایی، جرم جسم ضارب تاثیر چندانی بر تغییر نمودار نیروی متوسط جابجایی نخواهد داشت و این مورد اطمینان کافی را فراهم می‌سازد که در نظر گرفتن جرم ۶۰۰ کیلوگرم برای شبیه‌سازی‌های انجام شده، قابل قبول است.



شکل ۶- تاثیر جرم جسم ضارب بر نمودار نیروی متوسط دینامیکی - جابجایی، (الف) لوله‌های دوتایی، (ب) لوله‌های سه‌تایی

۵- بهینه‌سازی هندسی

۵-۱- روش‌شناسی

الگوریتم بهینه‌سازی ابعاد هندسی ضربه‌گیر، همچون ضخامت و زاویه‌ی بارگذاری در تعداد لوله‌های مختلف با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و روش رویه‌ی پاسخ برای افزایش خواص جذب انرژی و کاهش نیروی بیشینه‌ی تخریب اولیه مورد استفاده قرار گرفته است. برای یافتن

۵-۳ نتایج بهینه‌سازی جذب انرژی و بار بیشینه در

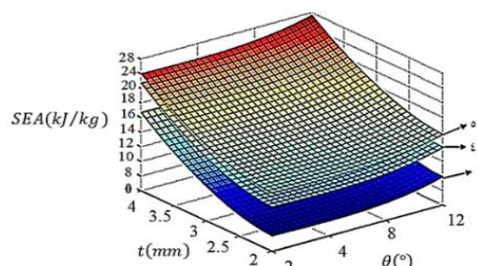
ضربه‌گیر

در این بخش مدلی ریاضی به روش RSM، از دو متغیر هدف SEA و F_{max} برحسب متغیرهای طراحی ابعاد هندسی ضربه‌گیر ساخته شده و در نهایت با روش میانگین هندسی جواب‌های مطلوب بدست آمده است. جدول ۳، نتایج بهینه را برای سرعت‌های مختلف بار ضربه‌ای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. نتایج حاصل برای مقادیر بهینه را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

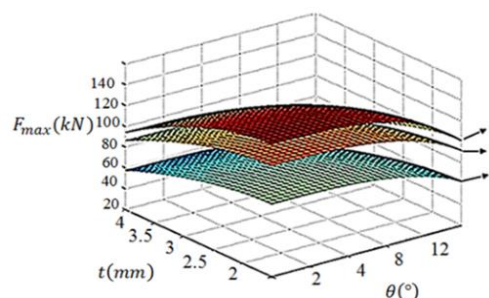
- با افزایش مقدار سرعت ضربه، ضخامت حاصل شده برای سازه‌ی پر شده از فوم پلی‌یورتان با مقطع چندلوله‌ای در موده‌های یکسان، کاهش نشان می‌دهد.

- پاسخ‌های بهینه برای مقطع ۳ لوله‌ای با وجود اینکه مقدار جذب انرژی کمتری دارد، بار تخریب کمتری نیز خواهد داشت. انتخاب هر یک از شرایط بارگذاری و ابعاد هندسی ضربه‌گیر در نمونه‌های مورد بررسی بستگی به اولویت طراح و ملاحظات در نظر گرفته شده برای ضربه‌گیر دارد. مثلاً در صورتی که جذب انرژی بیشینه‌ی ضربه برای سازه‌ی ضربه‌گیر خودرو در بیشترین مقدار سرعت ضربه اهمیت داشته باشد، مقطع ۵ لوله‌ای با سرعت بار ۳۰ متر بر ثانیه که دارای بار بیشینه‌ی ۸۸/۷۱ کیلو نیوتن و جذب انرژی ۲۸/۱۲ کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد، بهینه‌ترین حالت خواهد بود.

سطحی پیوسته از توابع هدف حاصل شده است. این سطح پیوسته، حصول جواب‌های منطقی برای مباحث بهینه‌سازی که در الگوریتم ژنتیک اجرا خواهد شد را تضمین می‌کند. -ارتباط بین توابع هدف و متغیرهای چندجمله‌ای از طریق تابعی بیان می‌شود که با بزرگی ضرایب هر متغیر می‌توان به حساسیت تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی پی برد.



شکل ۱۰- ترسیم مدل ۳ بعدی حاصل از روش RSM برای تابع هدف SEA بر حسب متغیرهای طراحی



شکل ۱۱- ترسیم مدل ۳ بعدی حاصل شده از روش RSM برای تابع هدف F_{max} بر حسب متغیرهای طراحی

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی ابعاد هندسی ضربه‌گیر برای تعداد لوله‌ها و سرعت ضربه متفاوت با روش میانگین هندسی

SEA (kJ/kg)	F_{max} (kN)	d_{SEA}	$d_{F_{max}}$	F_g	هندسه بهینه شده ($\theta(^{\circ}) \cdot t(mm)$)	تعداد لوله	سرعت ضربه (m/s)
14.26	75.51	0.8342	0.5481	0.7358	(4.3 , 2.1)	3	10
19.11	84.33	0.8245	0.5223	0.7321	(4.9 , 2.3)	4	10
17.32	87.12	0.8136	0.5222	0.7125	(5.6 , 2.6)	5	10
16.11	73.68	0.6469	0.7342	0.6843	(4.5 , 2.1)	3	20
21.34	81.39	0.6229	0.7313	0.6752	(5.1 , 2.4)	4	20
19.12	85.92	0.6345	0.7455	0.6843	(5.9 , 2.6)	5	20
27.34	72.42	0.6352	0.7457	0.7754	(4.9 , 2.2)	3	30
20.29	81.98	0.6278	0.6423	0.7133	(5.5 , 2.3)	4	30
28.12	88.71	0.6249	0.6179	0.7361	(6.0 , 2.6)	5	30

۶- نتیجه گیری

روش‌شناسی الگوریتم ژنتیک به منظور جستجوی فضای طراحی سازه تحت ضربه، بررسی و کلیه ملاحظات الگوریتم ژنتیک و روش سطح پاسخ تشریح شد. مبتنی بر این ملاحظات و با هدف تعیین چیدمان و ابعاد ضربه‌گیر چندلوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان در تعداد لوله‌ها، ضخامت‌ها و زوایای مختلف ضربه، کدی برای بهینه‌سازی توابع هدفی همچون مقدار جذب انرژی بر واحد جرم و مقدار نیروی تخریب، در نرم‌افزار MATLAB نوشته شد. برخی از نتایج حاصل شده از این بررسی‌ها در ادامه، بصورت بندهایی مجزا و به ایجاز بیان می‌شود:

- میزان جذب انرژی در سازه به شدت تحت تاثیر چگالی فوم انتخاب شده و ضخامت سازه است و با افزایش این دو متغیر، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. این در حالی است که تاثیر زاویه‌ی ضربه بر میزان جذب انرژی نسبت به دو متغیر قبلی از شدت کمتری برخوردار است.
- با افزایش تعداد لوله‌های ضربه‌گیر مود تغییر شکل از مود متقارن به مودهای ترکیبی و نامتقارن تغییر شکل خواهد داشت.

- افزایش ضریب DAF در سازه‌ی ضربه‌گیر چندلوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان با زاویه‌ی ضربه‌ی ۱۲ درجه نسبت به ۱۰ درجه، افزایشی ۴/۳ درصدی و نسبت به زاویه‌ی ۴ درجه افزایش ۱۹ درصدی را نشان می‌دهد.

- با مقایسه بین مقادیر ضریب DAF در هر دو سازه با لوله‌های دوتایی و سه‌تایی، مشخص می‌شود که با افزایش تعداد لوله‌ها مقادیر متوسط DAF با افزایش ۶/۱۴ درصدی مواجه خواهد شد.

- با تخریب سازه تا ۱۰۰ میلیمتر در تمام هندسه‌های مورد نظر، مقدار DAF به حداکثر میزان خود می‌رسد.

- با افزایش زاویه‌ی ضربه، قابلیت تخریب درصدی کاهش می‌یابد.

- با تغییر سرعت جسم ضارب، تغییر چندانی در نمودار نیروی متوسط - جابجایی و نیروی بیشینه اولیه‌ی برخورد مشاهده نمی‌شود.

- تغییر تعداد لوله‌های ضربه‌گیر مقطع چندلوله‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان از ۳ به ۴ و ۵، افزایش مقدار جذب انرژی مخصوص در سازه را در پی داشته است. همچنین، افزایش ضخامت، افزایش مقادیر SEA را در پی خواهد داشت.

مراجع

- [1] Askeland, Science and Engineering of Materials, second edition, Chapman & Hall, 2020.
- [2] V. Trefilov, Ceramic and Carbon Matrix composite, 1st ed., Chapman & Hall, 2015.
- [3] J. Marsolek, and H. G. Reimerdes, 2004, Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non axisymmetric folding patterns, International Journal of Impact Engineering, Vol. 30, 2004, pp. 1209-1223.
- [4] X. Huang, Axisymmetric progressive crushing of circular tubes, International Journal of Crashworthiness, Vol. 8, 2003, pp. 87-95.
- [5] A.K. Toksoy, Quasi-static axial compression behavior of empty and polystyrene foam filled aluminum tubes, MSc thesis, Izmir Institute of Technology, 2009.
- [6] H. Kavi, Investigation of compression mechanical behaviour of aluminum foam filled metal tubes, Master of Science, Izmir Institute of Technology, 2004.
- [7] M. Seitzberger, F. Rammerstorfer, H. Degischer and R. Gradinger, Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam, Acta Mechanica, Vol. 125, 1997, pp. 93-105.
- [8] M. Seitzberger, F.G. Rammerstorfer, R. Gardinger, H.P. Degischer, M. Blaimschein, C. Walch Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminum foam, International Journal of Solids and structures, Vol. 37, 2000, pp. 4125- 4147.
- [9] M. Langseth, O. S. Hopperstad and A. G. Hanssen, Crash behaviour of thin walled aluminium members, Thin-Walled Structures, Vol. 32, 1998, pp. 127-150.
- [10] T. Brabin, T. Christopher and B. Rao, Finite elements analysis of cylindrical pressure vessels having a misalignment in a circumferential joint, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 87, 2010, pp. 197- 201.

[۱۱] علی علوی‌نیا و حامد خدابخش، "بررسی عددی تاثیر فاصله لوله‌های جدارنازک متداخل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی آنها"، مجله مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، تیر ۱۳۹۵، صفحه ۳۳-۴۷.

[۱۲] محمد جواد رضوانی؛ احسان برهانی؛ احسان الله شاهی، "ساخت فوم نانو کامپوزیت پلی‌یورتان سخت با استفاده از نانو ذرات SiC و بررسی خواص مکانیکی و جذب انرژی آن تحت بار دینامیکی"، مجله مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تیر ۱۳۹۷، صفحه ۷-۱۰.

[۱۳] نگین نگهبان واشقانی، محمد جواد رضوانی و محمد دامغانی نوری، "بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی جذب انرژی در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌یورتان با استفاده از آغازگر"، مجله مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، فروردین ۱۳۹۵، صفحه ۶۹-۷۸.

[14] E. Ventsel, T. Krauthammer, Thin Plates and Shells: Theory, Analysis and Applications, CRC Press, 2001.

[15] A. Ghamarian, M. Abadi, Axial crushing analysis of end-capped circular tubes, Thin Walled Structures, Vol. 49, 2011, pp.743-752.

[16] M.D. McKay, R.J. Bechman and W. J. Conover, A Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, Vol. 21, 1979, pp. 239-245.

[17] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang, L. Wei, Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design, International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, 2008, pp. 1355-1367.

[18] V. Novozhilov, Shell theory, Groningen, 1964.

[19] P. Santosa, S.T. Wierzbicki, A. G. Hanssen and M. Langseth, Experimental and numerical studies of foam-filled sections, International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, 2003, pp. 509-534.

[20] M. Langseth, O.S. Hopperstad and A. G. Hanssen, Crash behaviour of thin walled aluminium members, Thin-Walled Structures, Vol. 32, 2001, pp. 127-150.

[21] Z. Ahmad and D.P. Thambiratnam, Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading, Computers & Structures, Vol. 87, 2009, pp. 186-197.