

بررسی جذب انرژی در ضربه‌گیرهای استوانه‌ای شیاردار با استفاده از روش سطح پاسخ

شیمیا شهری^۱، محمد جواد رضوانی^{۲*} و علی جهان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک و صنایع، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

*سمنان، rezvani57@gmail.com، rezvani@semnaniau.ac.ir

چکیده

هدف از این مطالعه، بهبود طراحی و بالا بردن میزان کارایی لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک شیاردار پر شده از فوم پلی اورتان به عنوان سیستم جذب انرژی می‌باشد. شیارها به صورت محیطی در داخل و خارج لوله با فاصله‌های مساوی از یکدیگر، ایجاد می‌شوند. جهت دستیابی به این هدف تاثیر قطر لوله، فاصله‌ی شیارها، عمق شیارها، ضخامت لوله در محل شیار و چگالی فوم بر روی جذب انرژی ویژه لوله شیاردار بررسی می‌شود. در این مطالعه، شاخص جذب انرژی ویژه، با استفاده از تحلیل المان محدود و روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد و با ترکیب مختلف از متغیرهای طراحی، تحلیل المان محدود به همراه فرآیند طرح آزمایشات اجرا می‌شود. استفاده از روش سطح پاسخ نشان می‌دهد که فاصله‌ی شیارها، قطر داخلی لوله، ضخامت لوله در محل شیار و عمق شیار به ترتیب و توسط مدل درجه دوم با میزان جذب انرژی ویژه ارتباط دارند. علاوه بر این، تاثیر متقابل بین فاصله‌ی شیارها - چگالی فوم و فاصله‌ی شیارها - قطر داخلی لوله بر روی جذب انرژی ویژه تاثیرگذار تشخیص داده شد.

کلید واژگان

لوله استوانه‌ای شیاردار، فوم پلی‌اورتان، طرح آزمایشات، روش سطح پاسخ، جذب انرژی ویژه.

Investigation of energy absorption in shock absorbers of grooved circular using response surface

Shima Shahravi¹, Mohammad Javad Rezvani^{2*} and Ali Jahan²

1- Master of Science student, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Department of Industrial and Mechanical engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

*Semnan, Iran, m.rezvani@semnaniau.ac.ir, rezvani57@gmail.com

Abstract

The main objective of this research is improving the design and performance of the polyurethane foam-filled thin-walled aluminum grooved circular tubes. The tubes are shaped with the inner and the outer circular grooves at different positions along the axis. In this study, the effects of the grooves distance, tube diameter, grooves depth, foam density, and tube thickness are investigated on the Specific Energy Absorption (SEA) of grooved circular tubes. finite-element analysis (FEA) and response surface methodology (RSM) is carried out for crush force efficiency. Finite-element analysis is performed with design of experiments technique (DOE) at the different combinations of the design parameters. The results of RSM indicate that SEA is related to the grooves distance, tube diameter, tube thickness of the groove and groove depth, by a quadratic model. Moreover, the effects of the interaction between the grooves distance - the foam density and the grooves distance - the tube diameter on the SEA was significant.

Keywords

grooved tubes, polyurethane foam, design of experiments (DOE), response surface methodology, Specific Energy Absorption (SEA).

این اهداف پیشنهاد داده‌اند. بر کردن لوله‌های جدارنازک با مواد سبک وزن مانند فوم یکی از گزینه‌ها برای بهبود مشخصات جذب انرژی و شکل لهیدگی است که بطور گسترده مطالعه شده است [۱-۳]. ایجاد شیارهای داخلی و خارجی روی لوله‌های جدار نازک یکی دیگر از روشهایی است که توسط محققین برای کنترل و تغییر شکل فروریزش تحت فشار محوری انجام شده است [۴-۹]. شیارها می‌توانند به آسانی روی سطوح داخلی و خارجی توسط ماشینکاری ایجاد شوند. دانشی و حسینی‌پور به طور تجربی اثر ایجاد شیارها روی لوله‌های فولادی جدارنازک استوانه‌ای تحت فشار محوری را مطالعه کردند [۱۰-۱۲]. آنها یافتند که شیارها تا حد زیادی می‌توانند جذب انرژی لوله‌ها را کنترل کنند و باعث بهبود در یکنواختی منحنی نیرو-جابجایی

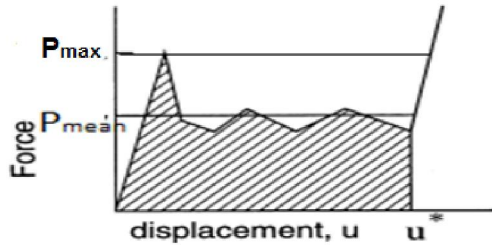
۱- مقدمه

لوله‌های جدار نازک با اشکال مختلف در سیستم‌های حمل و نقل به عنوان اجزاء جذب انرژی برای اتلاف انرژی جنبشی در طول حوادث و سوانح برخورد و تصادف استفاده می‌شوند. طراحی این سازه‌ها با وزن کم و عملکرد ضربه‌پذیری عالی به منظور امنیت عمومی، صرفه‌جویی در انرژی و حفاظت از محیط زیست انجام می‌شود. سیستم‌های جذب انرژی کارآمد باید مقدار جذب انرژی مخصوص بالا و نیروی ماکزیمم لهیدگی کم در طول فرآیند ضربه داشته باشند. محققان و مهندسان روشهای مختلفی را برای رسیدن به

بنابراین جذب انرژی ویژه بیان کننده‌ی نسبت انرژی جذب شده‌ی کل به جرم لوله است. در شرایطی که از فوم برای پرکردن جاذب استفاده می‌شود، وزن کلی بالا می‌رود ولی به دلیل بالا بودن نسبت استحکام به وزن در فوم، جذب انرژی ویژه نیز بالا می‌رود.

۲-۲- نیروی ماکزیمم لهیدگی یا نیروی آغاز لهیدگی^۸

مطابق شکل (۱)، نیروی ماکزیمم لهیدگی (P_{max}) در تشکیل اولین چین نقش دارد.



شکل ۱ نمایش نیروی ماکزیمم لهیدگی و نیروی متوسط لهیدگی

۳-۲- نیروی متوسط لهیدگی^۹

نیروی متوسط لهیدگی (P_m), یکی از مهمترین پارامترها برای تعیین رفتار لوله‌های تحت فشار محوری است و برابر است با نسبت انرژی جذب شده‌ی کل به طول لهیدگی کل^{۱۰}.

$$P_m = \frac{1}{\delta_t} \int P d\delta \quad (2)$$

۴-۲- راندمان نیروی لهیدگی

این پارامتر برای مقایسه‌ی کارایی جاذب‌های انرژی به کار می‌رود که برابر است با نسبت نیروی متوسط لهیدگی به نیروی ماکزیمم لهیدگی.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

در این تحقیق، از میان معیارهای ارزیابی لوله‌ها، شاخص جذب انرژی ویژه (KJ/Kg) به عنوان هدف طراحی تعیین شده است. انتخاب این شاخص به این دلیل است که میتواند قابلیت ضربه‌پذیری را به درستی بیان کند.

۳- متدولوژی

در این تحقیق سعی شده است با توجه به تحقیقاتی که تاکنون در زمینه‌ی لوله‌های استوانه‌ای انجام شده است، میزان موثر بودن پارامترها مشخص شوند. بنابراین، به منظور بررسی این نوع از ضربه‌گیرها لازم است اهداف و متغیرهای طراحی به همراه محدوده‌ی آنها معلوم شوند. گام‌های در نظر گرفته شده جهت دستیابی به این هدف، با ترکیب تحلیل المان محدود^{۱۱} و روش سطح پاسخ، در شکل (۲) مشاهده می‌شود.

شوند. در مرجع [۱۳]، به طور تجربی اثر نوع شیار (مثلثی، دوزنقه‌ای، حلقوی و مربعی) روی لوله آلومینیومی جدار نازک استوانه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ی ۱۷ شیار دوزنقه‌ای دارای راندمان نیروی لهیدگی ۱ زیاد نسبت به بقیه هندسه‌ها دارد. از نظر میزان جذب انرژی و نیروی ماکزیمم لهیدگی، نمونه ۱۷ شیار مثلثی نسبت به بقیه شیارها بیشتر است. بنابراین باعث کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی شده است. با مقایسه پارامترهای ضربه‌پذیری، بین هندسه شیارها، مشاهده شد که ایجاد شیار حلقوی بدلیل ساخت راحت‌تر روی سطوح داخلی و خارجی لوله می‌تواند به عنوان جاذب انرژی کارآمد استفاده شود.

تحقیقاتی نیز در زمینه‌ی بهینه‌سازی لوله‌های جدار نازک انجام شده‌اند. در سال ۲۰۰۶ بهینه‌سازی لوله‌های استوانه‌ای با هدف بیشینه کردن انرژی جذب شده و جذب انرژی ویژه انجام شده است [۱۴]. در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۱ بهینه‌سازی چند هدفه^{۱۲} لوله‌های جدار نازک استوانه‌ای تحت ضربه محوری با نسبت‌های طول به قطر و قطر به ضخامت به عنوان متغیرهای طراحی ارائه شده‌اند [۱۵-۱۷]. در بهینه سازی لوله‌های رینگ‌دار در سال ۲۰۱۱، تعداد، عمق، عرض رینگ‌ها و ضخامت دیواره به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند و جذب انرژی ویژه و نیروی ماکزیمم لهیدگی اهداف طراحی هستند [۱۸].

با توجه به تعدد متغیرها در طراحی ضربه‌گیر استوانه‌ای و زیاد بودن سطوح متغیرها، یافتن شرایط بهینه از طریق تغییر یکی-یکی متغیرهای آزمایشات^{۱۳}، بسیار پرهزینه و طولانی خواهد بود. امکان بررسی همزمان چندین متغیر با کمترین دفعات انجام آزمایشات، تحلیل منطقی نتایج آزمایشات با استفاده از فرضیات آماری و آنالیز واریانس، و نهایتاً مدلسازی ریاضی اهداف بر مبنای متغیرهای طراحی، تنها به کمک تکنیکهای طراحی آزمایشات، روش سطح پاسخ^{۱۴} [۱۹، ۲۰]، امکان‌پذیر است. در صورت تعدد اهداف طراحی، استفاده از تکنیکهای تصمیم‌گیری چند معیاره [۲۱] در طراحی بهینه و ساخت ضربه‌گیر استوانه‌ای ضروری است.

با توجه به مطالعات ذکر شده، استفاده از فوم و ایجاد شیار در لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک می‌توانند نقش موثری در قابلیت ضربه‌پذیری ایفا کنند. بنابراین در این مقاله، بررسی روی لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی اورتان با شیارهای حلقوی با استفاده از تکنیک طراحی آزمایشات^{۱۵} می‌باشد. هدف از این مطالعه، دستیابی به تاثیر چگالی فوم، ابعاد لوله و شیار شامل قطر لوله، فاصله شیار، عمق شیار، ضخامت لوله در محل شیار است.

۲- ارزیابی کارایی سیستمهای جذب انرژی

معیارهای مطلوب که برای ارزیابی قابلیت ضربه‌پذیری و بهبود ایمنی سازه در نظر گرفته می‌شوند از منحنی نیرو - جابجایی بدست می‌آیند.

۲-۱- جذب انرژی ویژه^{۱۶}

انرژی جذب شده‌ی کل (E)^{۱۷}، نشان دهنده‌ی انرژی اتلاف شده در طول تغییر شکل ضربه‌گیر است که برابر با سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی است.

$$E_{absorbed} = \int P d\delta \quad (1)$$

1. Crush Force Efficiency (CFE)
2. Multi-Objective Optimization
3. One-factor-at-one-time experiment
4. Response surface methodology (RSM)
5. Design of Experiments (DOE)
6. Specific Energy Absorption(SEA)
7. Total Absorbed Energy

8. Maximum Crushing Load
9. Mean Crushing Load
9. Crushing distance
11. Finite element analysis (FEA)

[۲۲] انتخاب شده است که مقدار پارامتر ρ_s برای فوم‌های پلی اورتان ۱۲۰۰ می‌باشد.

محدوده‌ی تغییرات این متغیرهای طراحی در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

$$0.6 \leq t' \text{ (mm)} \leq 1.7 \quad (۴)$$

$$0.4 \leq d \text{ (mm)} \leq 1.3 \quad (۵)$$

$$60 \leq \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \leq 300 \quad (۶)$$

$$5 \leq \lambda \text{ (mm)} \leq 16 \quad (۷)$$

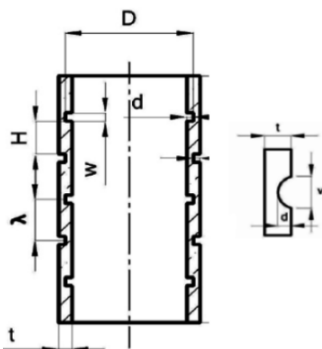
$$42 \leq D_i \text{ (mm)} \leq 92 \quad (۸)$$

و همانطوری که ذکر گردید مقدار ضخامت از ۱ تا ۳ میلیمتر متغیر است. همچنین با توجه به متغیر بودن قطر داخلی لوله و ضخامت آن، قطر خارجی نیز متغیر می‌شود.

همچنین ثوابت طراحی شامل شکل شیار، طول (L) و عرض شیار (W) است که مقادیر آن‌ها در جدول (۱) بیان شده است. مقدار عرض شیار با توجه به رابطه‌ی $w = \pi d$ در [۱۲] و محدوده‌های انتخاب شده برای عمق شیار، انتخاب شده است و شکل شیار، با توجه به [۱۳] انتخاب شده است که در آن انواع شکل شیار بررسی شده و شیارهای حلقوی نسبت به دیگر شکل شیارها از راندمان نیروی لهیدگی مطلوبی برخوردار بوده است و با توجه به این که ساخت شیارهای حلقوی به مراتب آسانتر از انواع دیگر است. در شکل (۳) پارامترهای هندسی لوله‌های استوانه‌ای نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر ثوابت طراحی

ثوابت طراحی	واحد	مقادیر
طول لوله (L)	mm	۲۰۰
عرض شیار (W)	mm	۴
شکل شیار	-	حلقوی



شکل ۳ پارامترهای هندسی لوله‌های استوانه‌ای

همانطور که بیان شد، در این تحقیق جذب انرژی ویژه به عنوان هدف طراحی تعیین شده است.

۲-۳- مدل طراحی آزمایشات

مقادیر متغیرهای طراحی در فرآیند طراحی آزمایشات ۴۳ حالت آزمایش است که از طریق نرم‌افزار Design-Expert [۲۳] بر مبنای روش سطح پاسخ



شکل ۲ گام‌های در نظر گرفته شده جهت بررسی لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک شیاردار

۳-۱- معرفی متغیرها و اهداف طراحی

تحقیقات زیادی بر روی تغییرات پارامترها و تاثیر آنها در ساختار جاذب‌های انرژی انجام شده‌اند و نشان داده‌اند که تغییر این پارامترها تاثیراتی بر معیارهای مربوط به جذب انرژی دارند. در این پژوهش نیز پارامترهایی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته و محدوده‌ی تغییرات آنها تعیین شده است که این پارامترها و دلایل انتخاب آن‌ها عبارتند از:

عمق شیار (d) و ضخامت لوله در محل شیار (t'): این دو پارامتر که با رابطه‌ی $t' = t - d$ به هم مربوط می‌شوند، که در آن t ضخامت لوله و d عمق شیار است. در این پژوهش متغیر در نظر گرفتن d و t' موجب متغیر بودن ضخامت میشود. محدوده‌ی تغییرات d و t' بر اساس محدوده ضخامت لوله تعیین شده است که محدوده‌ی ضخامت ساختار با توجه به جدار نازک بودن ساختار بین ۱ تا ۳ میلیمتر می‌تواند متغیر در نظر گرفته شود. قطر داخلی لوله (D_i): این پارامتر قطر داخلی لوله‌های استوانه‌ای را معرفی می‌کند.

فاصله‌ی شیارها (λ): همانطوری که ذکر گردید حسینی‌پور و دانشی [۱۲] در ۲۰۰۴ نشان داده‌اند که ایجاد شیار سبب کاهش نوسانات نیرو در طول تغییر شکل، بهبود یکنواختی منحنی نیرو - جابجایی و معیارهای جذب انرژی میشود. محدوده‌ی این متغیر، از میان مقادیر فاصله‌های شیار در پژوهش ذکر شده با بررسی مودهای تغییر شکل و فاصله‌های شیار انتخاب شده است.

چگالی فوم (ρ): استفاده از فوم جذب انرژی را بالا می‌برد و تحقیقات زیادی نیز بر روی تغییر چگالی فوم انجام شده است و تاثیرات آن را بر روی معیارهای جذب انرژی نشان داده‌اند. محدوده‌ی تغییرات این پارامتر بر اساس تغییرات نسبت ρ/ρ_s در پژوهش انجام شده توسط اشبی و مدالیست

۶۷	۱۰/۵	۱۸۰	۱/۳	۱/۱۵	Axial	۲۶
۶۷	۱۰/۵	۶۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۲۷
۶۷	۱۰/۵	۳۰۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۲۸
۶۷	۵	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۲۹
۶۷	۱۶	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۴۰
۴۲	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۴۱
۹۲	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Axial	۴۲
۶۷	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۱۵	Center	۴۳

بدست آمده است. این طرح‌های آزمایش شامل ۳۲ نقاط فاکتوریال، یک نقطه مرکز و ۱۰ نقطه محوری است که بر اساس محدوده‌های تعریف شده، تعیین شده است. جدول (۲)، طرح آزمایشات محاسباتی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ طرح آزمایشات محاسباتی

Factor 5	Factor 4	Factor 3	Factor 2	Factor 1	Type	Std
E: قطر داخلی لوله	D: فاصله‌ی شیارها	C: چگالی فوم	B: عمق شیار	A: ضخامت لوله در محل شیار		
mm	mm	Kg/m^3	mm	mm		
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۱
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۲
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۳
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۴
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۵
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۶
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۷
۵۶/۴۹	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۸
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۹
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۱۰
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۱۱
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۱۲
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۱۳
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۱۴
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۱۵
۵۶/۴۹	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۱۶
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۱۷
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۱۸
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۱۹
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۲۰
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۲۱
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۲۲
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۲۳
۷۷/۵۱	۸/۱۹	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۲۴
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۲۵
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۲۶
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۲۷
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۱۲۹/۵۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۲۸
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۹۲	Fact	۲۹
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۰/۶۶	۱/۳۸	Fact	۳۰
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۰/۹۲	Fact	۳۱
۷۷/۵۱	۱۲/۸۱	۲۳۰/۴۵	۱/۰۴	۱/۳۸	Fact	۳۲
۶۷	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۸۵	۰/۶	Axial	۳۳
۶۷	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۸۵	۱/۷	Axial	۳۴
۶۷	۱۰/۵	۱۸۰	۰/۴	۱/۱۵	Axial	۳۵

۳-۳- خواص مواد

در این بخش، خواص مواد لوله و فوم مورد استفاده در این تحقیق بیان می‌شود.

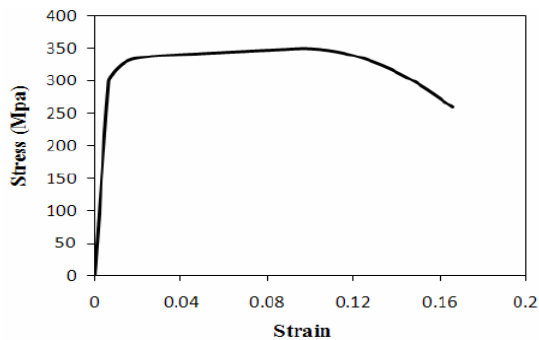
۳-۳-۱- لوله

پذیرش مواد سبک وزن با حفظ جذب انرژی برای کاهش وزن خودرو انگیزه‌ی قابل توجهی است. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، فولادهای استحکام بالا و کامپوزیت‌ها همه جایگزینی برای فولاد نرم در سازه خودرو پیشنهاد شده‌اند. بنابراین نمونه‌های این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 است. خواص این ماده در جدول (۳) مشاهده می‌شود [۱۳].

جدول ۳ خواص الاستیک برای ماده مورد استفاده [۱۳]

آلومینیوم 6061-T6		
۰/۳۵	-	ضریب پواسون
۲۷۰۰	Kg/m^3	چگالی
۷۰	GPa	مدول یانگ
۳۱۱	GPa	تنش تسلیم
۳۴۹	GPa	استحکام نهایی

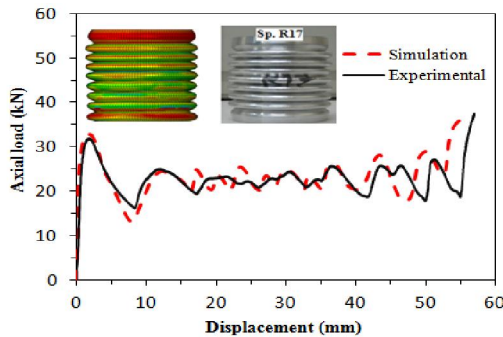
برای بدست آوردن اطلاعات دقیق مواد، از منحنی تنش - کرنش مهندسی شبه‌استاتیکی مواد استفاده می‌شود که در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۴ نمودار تنش - کرنش برای آلومینیوم 6061-T6 [۱۳]

۳-۳-۲- فوم

۱۱۷/۶	mm	طول
۲	mm	ضخامت
۴۷/۵	mm	قطر خارجی
۴۳/۵	mm	قطر داخلی
۳	mm	عرض شیار
۱	mm	عمق شیار
۶/۷	mm	فاصله‌ی شیارها
۱۷	-	تعداد شیار
حلقوی	-	شکل شیار



شکل ۶ مقایسه تست تجربی [۱۳] و شبیه‌سازی عددی نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۷ شیار

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و تحلیل آماری ارائه می‌شود.

۴-۱- شبیه‌سازی عددی

نمودارهای نیرو-جابجایی که مشخص‌کننده‌ی مراحل مربوط به تغییرات نمونه‌ها است، برای تمام نمونه‌ها بدست آمده است. هنگامی که نمونه تحت فشار محوری قرار می‌گیرد در ابتدا به صورت الاستیک رفتار می‌کند و نیرو با یک نرخ ثابت تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. سپس ماده تسلیم می‌شود و یک چین پلاستیک محیطی ایجاد می‌کند. بعد از آن نیرو کاهش می‌یابد و تغییر شکل ناپایدار می‌شود تا یک لایه ایجاد شود. نمودار نیرو - جابجایی چند نمونه جهت مقایسه در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. در هر چهار نمونه موجود در هر نمودار، بیشترین نیروی ماکزیمم لهیدگی مربوط به نمونه‌های دارای عمق شیار کمتر و ضخامت بیشتر است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۷) و (۸)، مشاهده می‌شود که در شکل (۸) نوسانات نیرو و نیروی ماکزیمم لهیدگی بیشتر از شکل (۷) است و نمونه‌های موجود در شکل (۷) دارای یکنواختی مطلوبی هستند. زیرا این نمونه‌ها دارای فاصله شیار کمتر (تعداد شیار بیشتر) هستند. این نتایج در تمام نمونه‌ها صدق می‌کند و یکنواخت‌ترین نمودار نیرو - جابجایی مربوط به نمونه‌ی (۳۹) است که دارای بیشترین تعداد شیار می‌باشد.

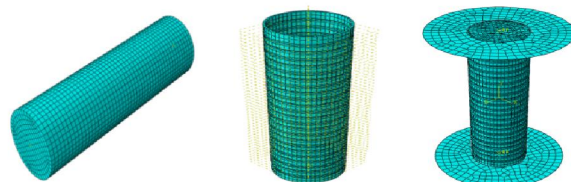
فوم‌های مورد استفاده در این تحقیق، فوم‌های پلی اورتان است که مشخصات مکانیکی برای هر چگالی فوم موجود در مدل طراحی آزمایشات و خواص الاستیک و پلاستیک آن‌ها (جدول ۴) در شبیه‌سازی استفاده شده است.

جدول ۴ خواص فوم‌های مورد استفاده در مدل طراحی آزمایشات

چگالی (Kg/m^3)	خواص الاستیک		خواص پلاستیک	
	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)	U_p	K
۶۰	۰	۱/۶	۰	۱
۱۲۹/۵۵	۰	۱۶	۰	۱
۱۸۰	۰	۲۵	۰	۱
۲۳۰/۴۵	۰	۴۸	۰	۱
۳۰۰	۰	۷۰	۰	۱

۴-۳- مدل‌سازی المان محدود لوله‌های استوانه‌ای شیاردار

در این تحقیق، برای مدل‌سازی نمونه‌های مورد نیاز در روش سطح پاسخ، از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است. المان استفاده شده برای تحلیل از نوع 8-node linear brick است. شکل (۵) مدل سه بعدی لوله استوانه‌ای شیاردار که با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است را نشان می‌دهد. برای تعریف تماس بین صفحات صلب با لوله و فوم از تماس "سطح به سطح" استفاده می‌شود و از آنجا که در زمان فروریزش نمونه‌ها، المان‌های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند از خود تماسی^۲ استفاده شده است تا از نفوذ المان‌ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. پس از همگرایی حل، اندازه مش مطلوب برای لوله که نتایج قابل قبولی را ایجاد کند بدست آمد. با استفاده از فرآیند همگرایی مش مشخص شد، اندازه مش ۳/۵ mm برای لوله و مش ۴ mm برای فوم، می‌تواند نتایج دقیقی را ایجاد کند.



شکل ۵ مش‌بندی قطعات مدل مورد نظر

از آنجایی که لوله‌های پر شده از فوم شامل دو نوع مواد با سختی‌های مختلف هستند (لوله آلومینیوم و فوم پلی‌اورتان) و لوله بین دو صفحه صلب قرار دارد، وضعیت تماس به طور کامل شبیه‌سازی شده است.

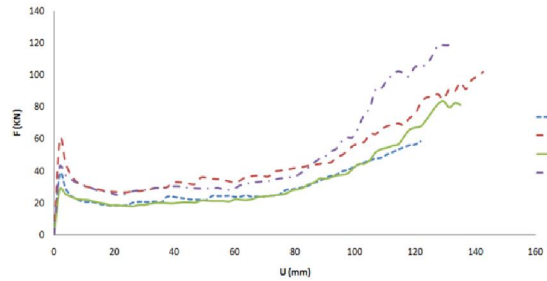
پیش از مدل‌سازی نمونه‌ها، به منظور صحت شبیه‌سازی عددی نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۷ شیار بر اساس ابعاد هندسی داده شده در جدول (۵) ساخته شد [۱۳]. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین تست تجربی و شبیه‌سازی عددی ایجاد شده است. لذا شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیر در لوله‌های استوانه‌ای شیاردار را به خوبی برآورد کند.

جدول ۵ ابعاد هندسی نمونه آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی [۱۳]

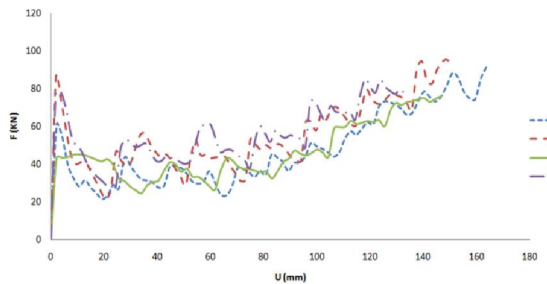
ابعاد لوله	واحد	مقادیر
------------	------	--------

1. ABAQUS
2. Self-contact

۱۰/۷۷۹	۶۰/۳۰۷	۳/۷۹۷	۴۷/۱۴۶	۷۸/۱۷۷	۰/۳۵۲	۱۶
۶/۰۵۲	۵۵/۶۳۳	۱/۸۷۸	۲۳/۲۸۷	۴۱/۸۵۷	۰/۳۱۰	۱۷
۷/۵۵۳	۵۱/۹۹۸	۲/۸۲۱	۳۵/۰۱۳	۶۷/۳۳۵	۰/۳۷۴	۱۸
۴/۸۷۱	۷۲/۷۷۲	۱/۶۸۲	۲۰/۸۷۲	۲۸/۶۸۲	۰/۳۴۵	۱۹
۶/۲۱۹	۶۶/۱۷۶	۲/۵۴۴	۳۱/۵۳۳	۴۷/۵۵۱	۰/۴۰۹	۲۰
۶/۳۵۰	۷۴/۱۱۲	۲/۵۷۵	۳۱/۹۴۴	۴۳/۱۰۲	۰/۴۰۶	۲۱
۷/۷۱۰	۶۵/۴۵۲	۳/۶۱۵	۴۴/۸۶۰	۶۸/۵۴۰	۰/۴۶۹	۲۲
۵/۴۷۴	۱۰۱/۳۲۰	۲/۴۱۱	۲۹/۹۰۷	۲۹/۵۱۸	۰/۴۴۱	۲۳
۶/۵۵۸	۸۵/۵۳۷	۳/۳۰۸	۴۱/۰۰۵	۴۷/۹۳۸	۰/۵۰۴	۲۴
۷/۶۷۱	۴۳/۶۸۲	۲/۵۵۳	۳۱/۶۵۵	۷۲/۴۶۸	۰/۳۳۳	۲۵
۸/۵۸۸	۴۱/۳۴۴	۳/۴۲۴	۴۲/۴۳۵	۱۰۲/۶۴۱	۰/۳۹۹	۲۶
۷/۵۳۷	۵۳/۳۶۹	۲/۸۳۵	۳۵/۱۵۸	۶۶/۰۰۰	۰/۳۷۶	۲۷
۸/۴۰۳	۴۹/۰۹۲	۳/۷۱۹	۴۶/۰۶۵	۹۳/۸۳۳	۰/۴۴۳	۲۸
۷/۳۳۵	۶۰/۷۷۱	۳/۱۶۳	۳۹/۲۱۸	۶۴/۵۳۴	۰/۴۳۱	۲۹
۸/۳۴۰	۴۹/۹۹۹	۴/۱۵۴	۵۱/۵۳۱	۱۰۳/۰۶۴	۰/۴۹۸	۳۰
۷/۴۴۷	۶۴/۹۲۲	۳/۵۴۰	۴۳/۸۹۲	۶۷/۶۰۸	۰/۴۷۵	۳۱
۸/۳۵۱	۵۹/۱۳۸	۴/۵۲۶	۵۶/۱۶۸	۹۴/۹۷۹	۰/۵۴۲	۳۲
۶/۸۷۱	۶۰/۹۹۶	۱/۸۰۷	۲۲/۳۷۵	۳۶/۶۸۳	۰/۲۶۳	۳۳
۹/۸۴۳	۵۱/۳۲۰	۳/۸۴۲	۴۷/۶۸۶	۹۲/۹۷۳	۰/۳۹۰	۳۴
۹/۱۰۰	۶۹/۴۹۸	۲/۶۰۶	۳۲/۲۵۲	۴۶/۴۰۷	۰/۳۸۶	۳۵
۸/۱۲۲	۷۱/۸۳۸	۲/۹۶۴	۳۶/۷۹۲	۵۱/۲۱۶	۰/۳۶۵	۳۶
۷/۸۹۰	۴۱/۴۹۹	۱/۹۲۶	۲۳/۸۳۱	۵۷/۴۲۶	۰/۲۴۴	۳۷
۸/۸۵۰	۷۱/۰۵۶	۳/۶۰۸	۴۴/۷۵۷	۶۲/۹۸۸	۰/۴۰۸	۳۸
۶/۸۸۴	۱۰۹/۷۸۶	۲/۱۸۹	۲۶/۶۴۹	۲۴/۲۷۴	۰/۳۱۸	۳۹
۱۱/۵۷۸	۵۸/۸۲۱	۳/۹۲۲	۴۸/۵۷۶	۸۲/۵۸۳	۰/۳۳۹	۴۰
۱۳/۰۰۹	۵۶/۳۲۴	۲/۳۰۸	۲۸/۵۶۵	۵۰/۸۰۵	۰/۱۷۷	۴۱
۶/۳۶۲	۶۲/۵۸۵	۳/۲۳۰	۴۰/۰۱۵	۶۳/۹۳۷	۰/۵۰۸	۴۲
۸/۲۱۵	۵۴/۳۸۵	۲/۶۸۰	۳۳/۲۷۳	۶۱/۳۹۲	۰/۳۲۶	۴۳



شکل ۷ نمودارهای نیرو - جابجایی برای نمونه‌های ۵-۸



شکل ۸ نمودارهای نیرو - جابجایی برای نمونه‌های ۱۳-۱۶

بر اساس روابطی که برای معیارهای ارزیابی بیان شد و مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی، معیار جذب انرژی ویژه و سایر معیارها از جمله راندمان نیروی لهیدگی، نیروی متوسط و ماکزیمم لهیدگی محاسبه شده است و نتایج در جدول (۶) مشاهده میشود.

جدول ۶ معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای نمونه‌ها

SP	جرم سازه	نیروی ماکزیمم لهیدگی	نیروی متوسط لهیدگی	انرژی جذب شده کل	راندمان نیروی لهیدگی	جذب انرژی ویژه
۱	۰/۲۰۳	۳۷/۳۸۶	۱۷/۹۶۳	۱/۴۴۹	۴۸/۰۴۶	۷/۱۴۷
۲	۰/۲۵۰	۵۷/۸۲۹	۲۶/۳۳۱	۲/۱۲۳	۴۵/۵۳۱	۸/۵۰۷
۳	۰/۲۲۹	۲۸/۱۱۶	۱۶/۴۲۶	۱/۳۲۲	۵۸/۴۲۳	۵/۷۸۳
۴	۰/۲۷۶	۴۲/۲۷۱	۲۴/۶۲۶	۱/۹۸۵	۵۸/۲۵۸	۷/۱۹۲
۵	۰/۲۵۳	۳۸/۰۲۷	۲۲/۸۲۲	۱/۸۳۷	۶۰/۰۱۵	۷/۲۵۵
۶	۰/۳۰۰	۵۹/۲۲۷	۳۳/۳۸۳	۲/۶۸۱	۵۶/۱۹۶	۸/۹۳۶
۷	۰/۲۷۹	۲۸/۶۲۷	۲۱/۴۰۷	۱/۷۲۷	۷۴/۷۸۱	۶/۱۸۶
۸	۰/۳۲۷	۴۲/۷۳۵	۳۰/۳۳۸	۲/۴۴۲	۷۰/۹۹۲	۷/۴۷۸
۹	۰/۲۱۸	۶۱/۵۴۷	۳۱/۷۵۹	۲/۵۶۸	۵۱/۶۰۲	۱۱/۷۶۹
۱۰	۰/۲۶۷	۹۱/۰۴۲	۴۴/۰۳۸	۳/۵۴۹	۴۸/۳۷۲	۱۳/۲۸۹
۱۱	۰/۲۵۰	۵۴/۱۱۳	۳۲/۷۱۴	۲/۶۳۶	۶۰/۴۵۵	۱۰/۵۳۴
۱۲	۰/۳۰۰	۸۲/۲۹۰	۴۲/۱۹۶	۳/۴۰۲	۵۱/۲۷۷	۱۱/۳۵۲
۱۳	۰/۲۷۰	۶۰/۹۲۲	۳۲/۹۳۰	۲/۶۵۸	۵۴/۰۵۴	۹/۸۴۰
۱۴	۰/۳۱۹	۸۶/۴۲۳	۴۳/۲۰۳	۳/۴۸۵	۴۹/۹۹۰	۱۰/۹۲۳
۱۵	۰/۳۰۲	۴۳/۴۸۷	۳۶/۳۰۵	۲/۹۳۶	۸۳/۴۸۳	۹/۷۲۳

با توجه به مقادیر جدول (۶) مشاهده می‌شود که کاهش فاصله‌ی شیارها موجب افزایش راندمان نیروی لهیدگی و کاهش جذب انرژی ویژه می‌شوند و نمونه‌ها با چگالی فوم بیشتر، دارای راندمان نیروی لهیدگی بالاتری هستند.

۴-۲- نتایج تحلیل آماری

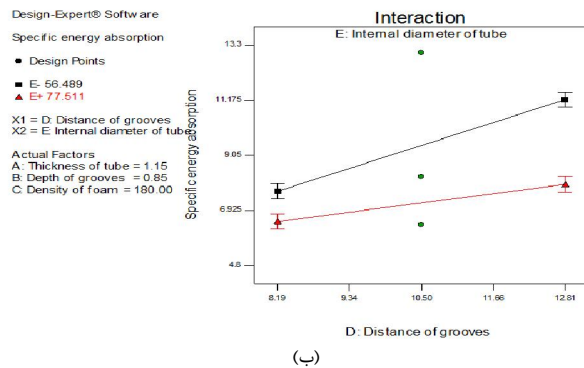
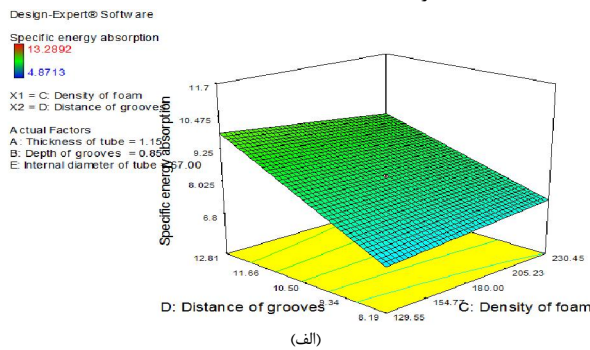
تاثیر متغیرهای طراحی روی پاسخ با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert تخمین زده شده است. برای مطالعه‌ی اهمیت عامل‌ها و اثر متقابل آن‌ها، تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده گردید. در تحلیل مدل، مجموع مربعات

$$SEA = -2.82952 + 6.57974 \times t' - 11.60821 \times d + 2.24386 \times \lambda + 0.033610 \times D_i - 2.41879E-003 \times \rho \times \lambda - 0.021648 \times \lambda \times D_i \quad (9)$$

$$SEA = 8.32 + 0.61 \times t' - 0.36 \times d + 1.24 \times \lambda - 1.11 \times D_i - 0.28 \times \rho \times \lambda - 0.53 \times \lambda \times D_i \quad (10)$$

رابطه‌ی (۱۰) نرمال شده‌ی رابطه‌ی (۹) است، که با توجه به ضرایب هر پارامتر در این رابطه می‌توان میزان و ترتیب اهمیت هر متغیر طراحی را تعیین کرد. با توجه به این رابطه درمی‌یابیم که افزایش ضخامت لوله در محل شیار موجب افزایش جذب انرژی ویژه می‌شود و افزایش عمق شیار، تعداد شیار و قطر داخلی لوله منجر به کاهش جذب انرژی ویژه می‌شود. با مقایسه ضرایب هر پارامتر مشاهده می‌شود که میزان تاثیر فاصله‌ی شیارها و قطر داخلی لوله در جذب انرژی ویژه از سایر پارامترها بیشتر است.

تاثیرات متقابل فاصله‌ی شیارها و چگالی فوم و همچنین فاصله‌ی شیارها و قطر داخلی لوله در شکل (۹) نشان داده شده است در شکل (۹) نمودار (الف) مشاهده می‌شود که در لوله‌های با فاصله‌ی شیار کمتر (تعداد شیار بیشتر) با افزایش چگالی فوم، جذب انرژی ویژه افزایش می‌یابد. وقتی فاصله‌ی شیار بیشتر است (تعداد شیار کمتر)، افزایش چگالی فوم، موجب کاهش جذب انرژی ویژه می‌شود. نمودار (ب) نیز نشان می‌دهد که میزان افزایش جذب انرژی ویژه توسط کاهش تعداد شیار در لوله‌های با قطر کمتر ($D_i = 56.489$) بیشتر است.



شکل ۹ تاثیرات متقابل بر جذب انرژی ویژه (الف) فاصله‌ی شیارها و چگالی فوم، (ب) فاصله‌ی شیارها و قطر داخلی لوله

استفاده از روش سطح پاسخ نشان داد که فاصله‌ی شیارها، قطر داخلی لوله، ضخامت لوله در محل شیار و عمق شیار به ترتیب و توسط مدل درجه دوم بر اساس رابطه‌ی (۱۰) با میزان جذب انرژی ویژه ارتباط دارند. افزایش ضخامت در محل شیار موجب افزایش جذب انرژی ویژه می‌شوند و افزایش عمق شیار،

SS و متوسط مجموع مربعات MS با ارزیابی پاسخها محاسبه شده است. همچنین در این تحلیل دو پارامتر F-Value و P-Value وجود دارد که F-Value نشان دهنده‌ی نسبت MS و MSError است و P-Value اهمیت یک عامل یا تاثیر متقابل عامل‌ها را بیان می‌کند. $P-Value = 1$ مشخص می‌کند که یک فاکتور کم اهمیت‌ترین است و $P-Value = 0$ پر اهمیت‌ترین فاکتور را نشان می‌دهد. به طور معمول، در مدل RSM جملات دارای $P-Value < 0.05$ ، می‌توانند پاسخ را پیش بینی نمایند و در مدل ریاضی باقی می‌مانند.

جدول (۷)، نتایج ANOVA را برای شاخص جذب انرژی ویژه نشان می‌دهد. P-Value مدل کمتر از ۰/۰۵ است و این مطلب بیانگر این است که مدل از نظر آماری معتبر است. بنابراین عامل‌های تاثیرگذار اصلی به ترتیب فاصله‌ی شیارها، قطر داخلی لوله، ضخامت لوله در محل شیار و عمق شیار هستند. همچنین تاثیر متقابل دو عامل چگالی فوم - فاصله‌ی شیارها و تاثیر متقابل فاصله‌ی شیارها - قطر داخلی لوله قابل توجه هستند. تاثیر متقابل دو عامل، به این معنی است که تاثیر یک عامل بر روی تغییرات پاسخ به سطح عامل دیگر وابسته است. مقادیر P-Value بالاتر از ۰/۰۵ نیز نشان می‌دهد که این عامل‌ها قابل توجه نیستند.

جدول ۷ نتایج ANOVA برای جذب انرژی ویژه در لوله‌های استوانه‌ای شیاردار

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	P-Value Prob > F
Model	۱۵۶/۵۰	۱۵	۱۰/۴۳	۲۴/۳۵	<۰/۰۰۰۱
A-Thickness of tube (t')	۱۵/۹۴	۱	۱۵/۹۴	۳۷/۱۹	<۰/۰۰۰۱*
B-Depth of grooves (d)	۵/۶۹	۱	۵/۶۹	۱۳/۲۸	۰/۰۰۱۱*
C-Density of foam (ρ)	۰/۰۵۲	۱	۰/۰۵۲	۰/۱۲	۰/۷۳۰۶
D-Distance of grooves (λ)	۶۶/۷۷	۱	۶۶/۷۷	۱۵۵/۸۳	<۰/۰۰۰۱*
E-Internal diameter of tube (D _i)	۵۳/۲۹	۱	۵۳/۲۹	۱۲۴/۳۷	<۰/۰۰۰۱*
AB	۰/۰۸۵	۱	۰/۰۸۵	۰/۲۰	۰/۶۵۹۷
AC	۲/۳۳۲۰-۰۰۳	۱	۲/۳۳۲۰-۰۰۳	۵/۴۴۲۰-۰۰۳	۰/۹۴۱۷
AD	۰/۲۶	۱	۰/۲۶	۰/۶۰	۰/۴۴۵۳
AE	۰/۰۴۸	۱	۰/۰۴۸	۰/۱۱	۰/۷۴۱۲
BC	۰/۵۰	۱	۰/۵۰	۱/۱۶	۰/۳۹۰۹
BD	۱/۱۷	۱	۱/۱۷	۲/۷۳	۰/۱۰۹۹
BE	۰/۴۸	۱	۰/۴۸	۱/۱۱	۰/۳۰۱۶
CD	۲/۵۵	۱	۲/۵۵	۵/۹۵	۰/۰۲۱۶*
CE	۰/۸۲	۱	۰/۸۲	۱/۹۱	۰/۱۷۷۸
DE	۸/۸۶	۱	۸/۸۶	۲۰/۶۸	۰/۰۰۰۱*
Residual	۱۱/۵۷	۲۷	۰/۴۳		
Cor Total	۱۶۸/۰۷	۴۲			

* Denotes significant factors

با توجه به تاثیرات متقابل پارامترها در جدول (۷)، تغییرات در جذب انرژی ویژه توسط مدل مرتبه ۲ مطابق رابطه‌ی (۹) بیان می‌شود. با توجه به این که R-Squared مدل برابر ۸۴٪ است، این بدین معناست که ۸۴٪ از تغییرات جذب انرژی ویژه توسط t' ، d ، λ و D_i قابل پیش‌بینی است.

مراجع

[1] Guillow, S.R., G. Lu, and R.H. Grzebieta, *Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes*. International Journal of Mechanical Sciences. **43**(9): p. 2103-2123, 2001.

[2] Niknejad, A., M.M. Abedi, G.H. Liaghat, and M. Zamani Nejad, *Prediction of the mean folding force during the axial compression in foam-filled grooved tubes by theoretical analysis*. Materials & Design. **37**: p. 144-151, 2012.

[3] Yan, L., N. Chouh, and K. Jayaraman, *Effect of triggering and polyurethane foam-filler on axial crushing of natural flax/epoxy composite tubes*. Materials & Design. **56**: p. 528-541, 2014.

[4] Mamalis, A.G., G.L. Viegelaahn, D.E. Manolakas, and W. Johnson, *Experimental investigation into the axial plastic collapse of steel thin-walled grooved tubes*. International journal of impact engineering. **4**(2): p. 117-126, 1986.

[5] Mamalis, A.G., D.E. Manolakas, G.L. Viegelaahn, and W. Johnson, *Energy absorption and deformation modes of thin PVC tubes internally grooved when subjected to axial plastic collapse*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. **203**(1): p. 1-8, 1989.

[6] Mamalis, A.G., D.E. Manolakas, M.B. Ioannidis, P.K. Kostazos, and S.N. Kastanias, *Numerical modelling of the axial plastic collapse of externally grooved steel thin-walled tubes*. International Journal of Crashworthiness. **8**(6): p. 583-590, 2003.

[7] Mokhtarnezhad, F., S. Salehghaffari, and M. Tajdari, *Improving the crashworthiness characteristics of cylindrical tubes subjected to axial compression by cutting wide grooves from their outer surface*. International Journal of Crashworthiness. **14**(6): p. 601-611, 2009.

[8] Salehghaffari, S., M. Panahipoor, and M. Tajdari, *Controlling the axial crushing of circular metal tubes using an expanding rigid ring press fitted on top of the structure*. International Journal of Crashworthiness. **15**(3): p. 251-264, 2010.

[9] Salehghaffari, S., M. Tajdari, M. Panahi, and F. Mokhtarnezhad, *Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading*. Thin-Walled Structures. **48**(6): p. 379-390, 2010.

[10] Daneshi, G.H. and S.J. Hosseiniour, *Grooves effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes under axial compression*. Materials & design. **23**(7): p. 611-617, 2002.

[11] Hosseiniour, S.J. and G.H. Daneshi, *Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression*. Thin-Walled Structures. **41**(1): p. 31-46, 2003.

[12] Hosseiniour, S.J. and G.H. Daneshi, *Experimental studies on thin-walled grooved tubes under axial compression*. Experimental mechanics. **44**(1): p. 101-108, 2004.

[13] Rezvani, M.J., M.D. Nouri, and H. Rahmani, *Experimental and numerical investigation of grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression*. International Journal of Materials and Structural Integrity. **6**(2): p. 151-168, 2012.

[14] Zarei, H.R. and M. Kroger, *Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes*. Thin-walled structures. **44**(3): p. 301-308, 2006.

[15] Shakeri, M., R. Mirzaeifar, and S. Salehghaffari, *New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. **221**(8): p. 869-885, 2007.

[16] Mirzaei, M., M. Shakeri, M. Sadighi, and S.E. Seyedi, *MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CRASHWORTHINESS OF CYLINDRICAL TUBES AS ENERGY ABSORBERS*. IRANIAN JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING (ENGLISH), 2007.

[17] Marzbanrad, J. and M.R. Ebrahimi, *Multi-Objective Optimization of aluminum hollow tubes for vehicle crash energy absorption using a genetic algorithm and neural networks*. Thin-Walled Structures. **49**(12): p. 1605-1615, 2011.

[18] Salehghaffari, S., M. Rais-Rohani, and A. Najafi, *Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes*. Thin-walled structures. **49**(3): p. 397-408, 2011.

[19] Jahan, A., M.Y. Ismail, and R. Noorossana, *Multi response optimization in design of experiments considering capability index in bounded objectives method*. Journal of Scientific & Industrial Research. **69**: p. 11-16, 2010.

[20] Bahraminasab, M., B.B. Sahari, K.L. Edwards, F. Farahmand, T.S. Hong, M. Arumugam, and A. Jahan, *Multi-objective design optimization of functionally graded material for the femoral component of a total knee replacement*. Materials & Design. **53**: p. 159-173, 2014.

[21] Jahan, A. and K.L. Edwards, *Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design*. 2013: Butterworth-Heinemann.

[22] Ashby, M.F. and R.F.M. Medalist, *The mechanical properties of cellular solids*. Metallurgical Transactions A. **14**(9): p. 1755-1769, 1983.

[23] Vaughn, N.A., *Design-Expert® software*. Stat-Ease, Inc, Minneapolis, MN, 2007.

قطر داخلی لوله و تعداد شیار سبب کاهش جذب انرژی ویژه می‌شوند. علاوه بر این، تاثیر متقابل بین فاصله‌ی شیارها و چگالی فوم و همچنین فاصله‌ی شیارها و قطر داخلی لوله بر روی جذب انرژی ویژه تاثیرگذار تشخیص داده شد. قابل ذکر است که کاهش جذب انرژی ویژه در اثر افزایش تعداد شیار، در [۱۳] نیز نشان داده شده است. در بررسی تاثیرات متقابل فاصله‌ی شیارها و چگالی فوم و همچنین فاصله‌ی شیارها و قطر داخلی لوله بر روی شاخص جذب انرژی ویژه، مشاهده گردید که در لوله‌های با فاصله‌ی شیار کمتر با افزایش چگالی فوم، جذب انرژی ویژه افزایش می‌یابد. وقتی فاصله‌ی شیار بیشتر است، افزایش چگالی فوم، موجب کاهش جذب انرژی ویژه می‌شود. همچنین میزان افزایش جذب انرژی ویژه توسط کاهش تعداد شیار در لوله‌های با قطر کمتر بیشتر است.

نتایج شبیه‌سازی نمونه‌ها نیز نشان داد که تعداد شیار و چگالی فوم بالاتر نوسانات نیرو و نیروی ماکزیمم لهیدگی با افزایش تعداد شیار، کاهش می‌یابد. این بهبود شاخص‌های ضربه‌پذیری توسط ایجاد شیار و تعداد آن، در تعدادی از تحقیقات شامل [۲، ۱۰-۱۳] بیان شده است و همچنین بهبود شاخص‌های ضربه‌پذیری با استفاده از فوم در مراجع [۱، ۳، ۲۴] بیان شده است که نتایج از این طریق تایید می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک پر شده از فوم پلی اورتان، با بررسی تغییرات چگالی فوم، ضخامت و قطر لوله، تعداد و عمق شیارها، پرداخته شد. بدین منظور از تحلیل المان محدود و فرآیند طرح آزمایشات استفاده شده است. تکنیک سطح پاسخ، میتواند به طور موثر برای مرتب‌سازی تاثیرات متقابل بین متغیرهای طراحی و برای شناسایی موثرترین متغیرها استفاده شود. این تکنیک نشان داد:

راندمان نیروی لهیدگی بصورت خطی به ترتیب با چگالی فوم، فاصله‌ی شیارها، عمق شیار، و ضخامت لوله در محل شیار ارتباط دارد. افزایش عمق شیار و چگالی فوم موجب افزایش راندمان نیروی لهیدگی و افزایش ضخامت در محل شیار و فاصله‌ی شیارها موجب کاهش راندمان نیروی لهیدگی می‌شوند. میزان تاثیر چگالی فوم و فاصله‌ی شیارها در راندمان نیروی لهیدگی از سایر پارامترها بیشتر است. اجرای چنین تحلیلی برای ساختارهای مخروطی و سایر مقاطع مانند مربع و مستطیل، می‌تواند سودمند باشد.

۶- فهرست علائم

L	طول لوله	P_m	نیروی متوسط لهیدگی
D_i	قطر داخلی لوله	$E_{absorbed}$	انرژی جذب شده کل
D_o	قطر خارجی لوله	SEA	جذب انرژی ویژه
t	ضخامت لوله	CFE	راندمان نیروی لهیدگی
$t' = t - d$	ضخامت لوله در محل شیار	E	مدول یانگ
d	عمق شیار	σ	تنش مهندسی
w	عرض شیار	ϵ	کرنش مهندسی
λ	فاصله‌ی شیارها	σ_{yield}	تنش تسلیم
ρ	چگالی فوم	ϵ_D	قفل کرنشی
ρ_s	چگالی مواد تشکیل دهنده فوم	DOE	طراحی آزمایشات
δ	طول لهیدگی	RSM	روش سطح پاسخ
P_{max}	نیروی ماکزیمم لهیدگی		

- [24] Damghani Nouri, M. and M.J. Rezvani, *Experimental Investigation of Polymeric Foam and Grooves Effects on Crashworthiness Characteristics of Thin-Walled Conical Tubes*. *Experimental Techniques*. **38**(5): p. 54-63, 2012.