

# کاربرد روش سطح پاسخ در تحلیل جذب انرژی لوله های مخروطی جدار نازک شیار دار پر

## شده از فوم پلی اورتان

بتول سرکبیری<sup>۱</sup>، علی جهان<sup>۲\*</sup>، محمد جواد رضوانی<sup>۳</sup>

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

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

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* سمنان، ۹۳۶۸۸-۳۵۱۳۶-a.jahan@semnaniau.ac.ir

### چکیده

جاذب های انرژی در صنایع مختلف به ویژه در صنایع خودرو سازی به عنوان راه حلی برای کاهش اثر ضربه وارده به سرنشینان و بالا بردن ایمنی خودرو بکار می روند. لوله های جدار نازک به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم های جذب انرژی امروزه کاربرد روزافزونی پیدا کرده اند. در این تحقیق، جذب انرژی با بررسی تاثیرات متغیر های طراحی مربوط به لوله های جدار نازک مخروط شیار دار با استفاده از آنالیز المان محدود انجام می شود. اما از آنجائیکه که خروجی اینگونه مطالعات بیشتر به نحوه طراحی آزمایشات محاسباتی وابسته است در این مطالعه از تکنیک طراحی آزمایشات همراه با آنالیز المان محدود استفاده شده است. بدین منظور لوله آلومینیومی مخروطی شکل پر شده از فوم پلی اورتان که شیارها در سطوح داخل و خارج آن و با فواصل مساوی ایجاد شده اند، تحت بار شبه استاتیکی شبیه سازی میگردد. هدف طراحی شامل جذب انرژی ویژه (SEA) و متغیرهای طراحی شامل زاویه مخروط، فاصله شیارها، چگالی فوم، عمق شیار و ضخامت لوله است. روش سطح پاسخ (RSM) نشان می دهد که ضخامت لوله، چگالی فوم، عمق شیار و فاصله بین شیارها به ترتیب ذکر شده و بصورت خطی با میزان جذب انرژی ارتباط دارند. این نتایج میتواند در طراحی لوله های جدار نازک مخروطی با هندسه متفاوت مفید باشد.

کلمات کلیدی: ضربه پذیری، جذب انرژی، روش سطح پاسخ، المان محدود، طراحی آزمایشات

## RSM in Analysis of Energy Absorption of thin-walled conical groove tubes filled with polyurethane foam

Batul Sarkabiri<sup>1</sup>, Ali Jahan<sup>2\*</sup>, Mohammad Javad Rezvani<sup>3</sup>

1- Name of the Department, University Name, Semnan, Iran.

2- Department of Industrial Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\* P.O.B. 35136-93688 Semnan, Iran, a.jahan@semnaniau.ac.ir

### Abstract

Energy absorbers are used in various – especially in the automotive – industries as a solution to reduce the damages stroke on the passengers, and to enhance automobile safety. Nowadays, thin-walled tubes as one of the most efficient energy absorption systems have found increasing applications. In this study, energy absorption parameters is performed to investigate the impacts of designing variables related to thin-walled conical groove tubes using finite element analysis. However, since the output of these studies depends to methods of designing computational experiments, the design of experiments technique (DOE) is used in this study along with the finite element analysis. For this purpose a conical aluminium tube filled with polyurethane foam is simulated that the grooves are designed with a given distance on the inside and outside surfaces under quasi-static load. Objectives of the design include the specific energy absorption  $e$  (SEA), and designing variables including conical angle, grooves distance, foam density, groove depth, and tube thickness. response surface methodology (RSM) showed that the tube thickness foam density, groove depth and grooves distance, respectively and linearly relate to the amount of specific energy absorption. These results can be helpful in the design of thin-walled tubes with different conical geometries.

**Keywords:** crashworthiness, energy absorption, response surface methodology, finite element analysis, Design of experiments (DOE).

الگوهای مختلف بر روی لوله کنترل شود و سبب بالا بردن میزان کارایی این

نوع از جاذبها گردد.

رفتار لهیدگی لوله های جدار نازک در تحقیقات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. بعنوان مثال تفاوت ظرفیت جذب انرژی، نیروی ماکزیمم و متوسط لهیدگی لوله های آلومینیومی استوانه ای، شش ضلعی، هرمی، مخروطی و مستطیلی شکل در سال ۲۰۱۰ به روش شبیه سازی و عددی بررسی شد. نتایج نشان داد لوله های استوانه ای، مخروطی، شش ضلعی، مستطیلی و مثلی به ترتیب بیشترین جذب انرژی را دارند و کاهش بیشتر نیروی ماکزیمم لهیدگی در لوله های مخروطی و هرمی اتفاق افتاد همچنین تفاوت بین نیروی ماکزیمم و متوسط لهیدگی در لوله های مخروطی کمتر بود [۱]. در سال ۲۰۰۸ اثر ایجاد نقص از جمله ایجاد شیار، دندانه و برش روی لوله های آلومینیومی با مقطع دایره و مربع بر مد فروپاشی و نیروی ماکزیمم لهیدگی به روش تجربی

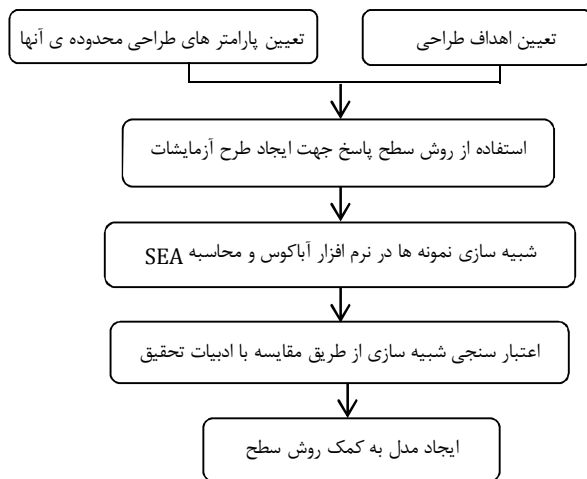
### ۱- مقدمه

لوله های جدار نازک به دلیل مقدار لهیدگی زیاد، سبکی، اشغال فضای کم، پایداری بهتر به هنگام لهیدگی، ارزانی و دسترسی آسان به عنوان سیستم جذب انرژی مورد توجه بوده و برای بسیاری از کاربردهای مهندسی مناسب هستند. از این قطعات بعنوان جاذب انرژی در شاسی، پشت سپر و ستون فرمان خودرو ضربه گیر<sup>۱</sup> قطارها و کشتی ها، کف آسانسورها، حفاظت از تجهیزات و مواد بسته بندی شده در هلیکوپترها و فضاپیماها و همچنین در مخازن سوخت هسته ای به منظور نشن نرم، استفاده می شود. تحقیقات انجام شده در زمینه ی جذب انرژی ضربه، نشان میدهد که نحوه لهیدگی در اثر ضربه و میزان انرژی جذب شده در لوله های جدار نازک می تواند با ایجاد

هدف از این تحقیق، بهبود جذب انرژی لوله های مخروطی جدار نازک، با بررسی تاثیرات متغیر های طراحی شامل چگالی فوم و همچنین برخی پارامتر های هندسی مربوط به لوله های جدار نازک شیار دار، است. برای مدلسازی المان محدود نمونه های مورد نیاز در روش سطح پاسخ، از نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

## ۲- متدولوژی

در این تحقیق باتوجه به تحقیقات انجام شده بر روی لوله های مخروطی جدار نازک و میزان موثر بودن پارامترها در ابتدا به تعیین اهداف و متغیرهای طراحی و محدوده ی آنها و سپس به بهینه سازی این نوع لوله ها پرداخته می شود. گامهای در نظر گرفته شده جهت دستیابی به این هدف در شکل ۱ مشاهده میگردد.



شکل ۱ گام های در نظر گرفته شده برای بهبود جذب انرژی با ترکیب تکنیک های تحلیل المان محدود و طراحی آزمایشات

در این پژوهش پارامتر هایی که در جدول ۱ آمده است به عنوان ثوابت و متغیر های طراحی در نظر گرفته شده و محدوده ی تغییرات آنها با توجه به ادبیات تحقیق تعیین شده است.

جدول ۱ ثوابت طراحی

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

و عددی بررسی شد نتایج نشان داد ایجاد نقص در لوله از جمله ایجاد برشها و شیارها و دندانه ها باعث مد فروپاشی متقارن، مد فروپاشی محوری و کاهش نیروی ماکزیمم می شود [۲]. ایجاد شیار با فاصله ی کمتر (افزایش تعداد شیار) تغییر شکل پایدار در حالت متقارن ایجاد می کند اما ایجاد شیار با فاصله بیشتر تاثیری در کنترل تغییر شکل ندارد [۳]. جذب انرژی با کاهش عمق شیار افزایش یافت [۴]. اثر نوع شیار (مثلثی، دوزنقه ای، حلقوی و مربعی) روی لوله آلومینیومی جدار نازک استوانه ای به طور تجربی بررسی شد با مقایسه پارامترهای ضربه پذیری، بین هندسه شیارها، مشاهده شد که با ایجاد شیار حلقوی دلیل ساخت راحت تر روی سطوح داخلی و خارجی می توان لوله را به عنوان جاذب انرژی کارآمد بکار برد [۵]. افزایش شیار موجب کاهش نیروی متوسط لهیدگی، نوسانات منحنی نیرو - جابجایی و کاهش جذب انرژی شد که افزایش ضخامت و پرکردن با فوم جذب انرژی را بالا برد [۶]. در سال ۲۰۱۲ اثر زاویه هرم، ضخامت دیواره و زاویه بارگذاری در لوله های آلومینیومی با مقطع مربع بصورت هرم و مستقیم بر نیروی ماکزیمم لهیدگی و جذب انرژی به روش شبیه سازی بررسی شد نتایج نشان داد که افزایش زاویه هرم موجب جذب انرژی بیشتر و ماکزیمم نیروی لهیدگی کمتر می شود [۷]. ۸. تاثیر ایجاد رینگ و تغییر عمق و عرض آن بر لوله های استوانه ای از جنس استیل به روش شبیه سازی در سال ۲۰۱۱ بر جذب انرژی بررسی شد نتایج نشان داد مقادیر بالای عمق و عرض رینگ موجب افزایش وزن لوله ها میشوند بدون این که تاثیری بر روی بهبود جذب انرژی داشته باشد [۹]. در سال ۲۰۱۳ تفاوت فوم تک سلولی و چند سلولی در لوله های آلومینیومی با مقطع مربع و پر شده از فوم بر جذب انرژی به روش شبیه سازی یافت شد [۱۰]. در سال ۲۰۱۰ بهینه سازی جذب انرژی ویژه و نیروی متوسط لهیدگی در ستون های شش ضلعی تک سلولی و سه سلولی تقویت شده با فوم انجام شد و متغیرهای طراحی شامل هندسه ی لوله و چگالی فوم بود مشاهده شد که نیروی لهیدگی در چگالی های بالاتر فوم، در سطح بالاتری قرار دارد در نتیجه در چگالی های بالاتر، مقدار جذب انرژی بیشتر است همچنین جذب انرژی ویژه در حالت ۳ سلولی تا حدود ۱۲/۳٪ نسبت به تک سلولی، افزایش داشت [۱۱].

با توجه به مطالعات ذکر شده، استفاده از فوم و ایجاد شیار در لوله های جدار نازک می توانند نقش موثری در قابلیت ضربه پذیری ایفا کنند. بنابراین در این تحقیق سعی شده است که پارامتر های مربوط به ابعاد شیار و لوله و چگالی فوم به طور همزمان مورد بررسی قرار گیرند و تاثیر آن ها مشخص گردد و در نهایت مقادیر بهینه ی این پارامتر ها مشخص شود. طراحی آزمایشات (DOE) ابزار خیلی مهم و مفید برای بهبود و بهینه سازی فرایندهای تولید است و میتواند نقش مهمی در فعالیتهای طراحی مهندسی شامل طراحی و توسعه محصولات نیز ایفا نماید [۱۲] با توجه به تعدد متغیرها در طراحی ضربه گیر مخروطی و زیاد بودن سطوح متغیرها، امکان بررسی همزمان چندین متغیر با کمترین دفعات انجام آزمایشات، تحلیل منطقی نتایج آزمایشات با استفاده از فرضیات آماری و آنالیز واریانس، و نهایتا مدلسازی ریاضی اهداف بر مبنای متغیرهای طراحی، تنها به کمک تکنیکهای طراحی آزمایشات، روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> [۱۳، ۱۴] امکانپذیر است. روش سطح پاسخ (RSM) به عنوان یک زیر گروه از روش های طراحی آزمایشات می تواند ترکیب بهینه ی عامل هایی را تعیین کند که یک پاسخ مطلوب را نتیجه می دهند.

1. Response surface method

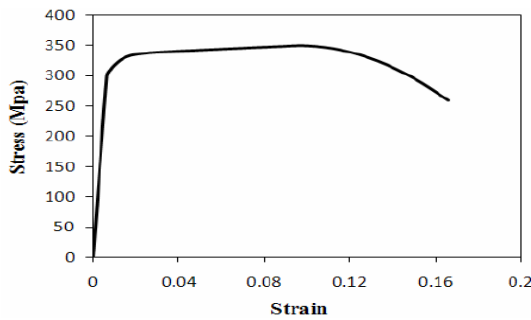
جدول ۲ متغیر های طراحی

$f = SEA (t', d, \rho, \lambda, \alpha)$ $0.6 \leq t' (\text{mm}) \leq 1.7$ $0.4 \leq d (\text{mm}) \leq 1.3$ $60 \leq \rho (\text{kg/m}^3) \leq 300$ $6 \leq \lambda (\text{mm}) \leq 10$ $0 \leq \alpha [\text{deg}] \leq 15$	
--	--

در تمامی مقاله ها رنج مناسب برای زاویه مخروط ۰ تا ۱۵ مشاهده گردید ضمناً علوی نیا و حداد همدانی [۱] نشان داده اند لوله های مخروطی و هرمی نیروی ماکزیمم را بیشتر کاهش می دهند. حسینی پور و دانشی [۳] در ۲۰۰۴ نشان داده اند که ایجاد شیار سبب کاهش نوسانات نیرو در طول تغییر شکل، بهبود یکنواختی منحنی نیرو - جابجایی و معیار های جذب انرژی میشود لذا محدوده ی متغیر فاصله شیارها ( $\lambda$ ) از میان مقادیر فاصله های شیار در پژوهش ذکر شده با بررسی مود های تغییر شکل و فاصله های شیار انتخاب شده است. استفاده از فوم جذب انرژی را بالا می برد و تحقیقات زیادی نیز بر روی تغییر چگالی فوم ( $\rho$ ) انجام شده است و تأثیرات آن را بر روی معیار های جذب انرژی نشان داده اند. محدوده ی تغییرات این پارامتر بر اساس تغییرات نسبت  $\rho/\rho_s$  در پژوهش انجام شده توسط اشبی و مدالیست [۱۵] انتخاب شده است که مقدار پارامتر  $\rho_s$  برای فوم های پلی اورتان ۱۲۰۰ می باشد. پارامترهای عمق شیار ( $d$ ) و ضخامت لوله در محل شیار ( $t'$ ) با رابطه ی  $t' = t - d$  به هم مربوط می شوند، که در آن  $t$  ضخامت لوله و  $d$  عمق شیار است. در این پژوهش تغییر  $d$  و  $t'$  منجر به تغییر ضخامت میشود. محدوده ی تغییرات  $d$  و  $t'$  بر اساس محدوده ضخامت لوله تعیین شده است. همچنین ثوابت طراحی شامل شکل شیار، طول ( $L$ ) و عرض شیار ( $w$ ) است که مقادیر آن ها در جدول ۱ بیان شده است. مقدار عرض شیار با توجه به رابطه ی  $w = \pi - d$  در [۳] و محدوده های انتخاب شده برای عمق شیار، انتخاب شده است.

۲-۱-۲-۲- فوم

خواص فوم در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۲ نمودار تنش - کرنش برای آلومینیوم 6061-T6

جدول ۴ خواص فوم های مورد استفاده در مدل طراحی آزمایشات

چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	خصوصیات الاستیک		خصوصیات پلاستیک	
	ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)	$\sigma_p$	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

۲-۲- مدل طراحی آزمایشات

هدف طراحی، معیار جذب انرژی ویژه SEA است که برای ارزیابی قابلیت ضربه پذیری و بهبود ایمنی سازه در نظر گرفته می شود که از منحنی نیرو - جابجایی سازه بدست می آید.

SEA (جذب انرژی ویژه) <sup>۱</sup> بیان کننده ی نسبت انرژی جذب شده ی کل <sup>۲</sup> ( $E_{absorbed}$ ) به جرم لوله است :

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

در شرایطی که از فوم برای پر کردن جاذب استفاده می شود، وزن کلی بالا می رود ولی به دلیل بالا بودن نسبت استحکام به وزن در فوم، جذب انرژی ویژه نیز بالا می رود.

1. Specific Energy Absorption  
2. Total Absorbed Energy

۲۹	۱/۱۵	۰/۴	۱۸۰	۸	۷/۵
۴۰	۱/۱۵	۱/۳	۱۸۰	۸	۷/۵
۴۱	۰/۶	۰/۸۵	۱۸۰	۸	۷/۵
۴۲	۱/۷	۰/۸۵	۱۸۰	۸	۷/۵
۴۳	۱/۱۵	۰/۸۵	۱۸۰	۸	۷/۵

بر اساس محدوده ی معین شده برای متغیر های طراحی ، مقادیر آنها در فرآیند طراحی آزمایشات شامل ۴۳ حالت آزمایش می باشد که از طریق نرم افزار Design-Expert بر مبنای روش سطح پاسخ به دست آمده و در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ طرح آزمایشات محاسباتی

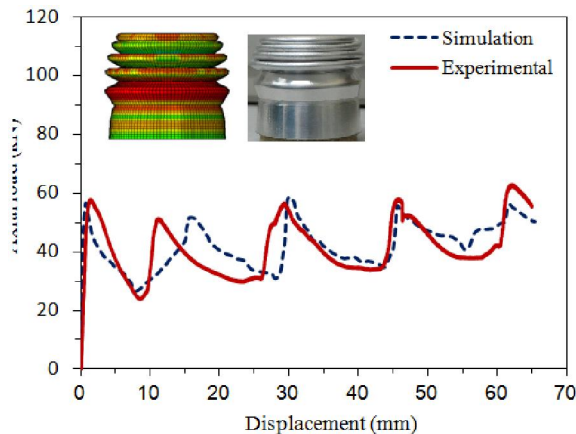
ردیف	عمق شیار	چگالی فوم	فاصله ی شیارها	زاویه مخروط	ضخامت لوله در محل شیار
	mm	Kg/m <sup>3</sup>	mm	deg	mm
۱	۰/۶۶	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۰/۹۲
۲	۰/۶۶	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۳	۰/۶۶	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۰/۹۲
۴	۰/۶۶	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۵	۰/۶۶	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۰/۹۲
۶	۰/۶۶	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۷	۰/۶۶	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۰/۹۲
۸	۰/۶۶	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۹	۱/۰۴	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۰/۹۲
۱۰	۱/۰۴	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۱۱	۱/۰۴	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۱۲	۱/۰۴	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۱۳	۱/۰۴	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۰/۹۲
۱۴	۱/۰۴	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۱۵	۱/۰۴	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۰/۹۲
۱۶	۱/۰۴	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۰/۹۲
۱۷	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۱/۳۸
۱۸	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۱۹	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۱/۳۸
۲۰	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۲۱	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۱/۳۸
۲۲	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۲۳	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۱/۳۸
۲۴	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۲۵	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۱/۳۸
۲۶	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۲۷	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۱/۳۸
۲۸	۱/۳۸	۱۲۹/۵۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۲۹	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۴/۳۵	۱/۳۸
۳۰	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۷/۱۶	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۳۱	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۴/۳۵	۱/۳۸
۳۲	۱/۳۸	۲۳۰/۴۵	۸/۸۴	۱۰/۶۵	۱/۳۸
۳۳	۱/۱۵	۰/۸۵	۱۸۰	۸	۱/۱۵
۳۴	۱/۱۵	۰/۸۵	۱۸۰	۱۵	۱/۱۵
۳۵	۱/۱۵	۰/۸۵	۱۸۰	۷/۵	۱/۱۵
۳۶	۱/۱۵	۰/۸۵	۱۸۰	۱۰	۱/۱۵
۳۷	۱/۱۵	۰/۸۵	۶۰	۷/۵	۱/۱۵
۳۸	۱/۱۵	۰/۸۵	۳۰۰	۷/۵	۱/۱۵

### ۲-۳- شبیه سازی عددی لوله های مخروطی شیاردار داخلی و خارجی پر شده از فوم پلی اورتان

۱ در این تحقیق، سعی شده است تا با استفاده از نرم افزار آباکوس به تحلیل عددی فروریزش لوله های مخروطی جدار نازک شیاردار و پر شده از فوم با استفاده از روش المان محدود پرداخته شود. پیش از مدلسازی نمونه ها، به منظور صحت شبیه سازی عددی نمونه ای از مخروط ۱۱ شیاردار پر شده از فوم بر اساس ابعاد هندسی داده شده در جدول ۶ بر اساس مرجع [۱۷] شبیه سازی شد. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود مطابقت خوبی بین تست تجربی و شبیه سازی عددی ایجاد شده است. لذا شبیه سازی عددی می تواند پارامترهای ضربه پذیر در لوله های مخروطی شیاردار پر شده از فوم را به خوبی برآورد کند.

جدول ۶ پارامترهای طراحی نمونه آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی شبیه سازی مرجع [۱۷]

مقادیر	واحد	ابعاد لوله
۱۱۶/۷۱	mm	طول
۲	mm	ضخامت
۵۵/۲۶	mm	قطر قاعده پایین
۳۸/۸۸	mm	قطر قاعده بالا
۳	mm	عرض شیار
۰/۶	mm	عمق شیار
۱۰	mm	فاصله ی شیارها
۲۶۶	Kg/m <sup>3</sup>	چگالی فوم

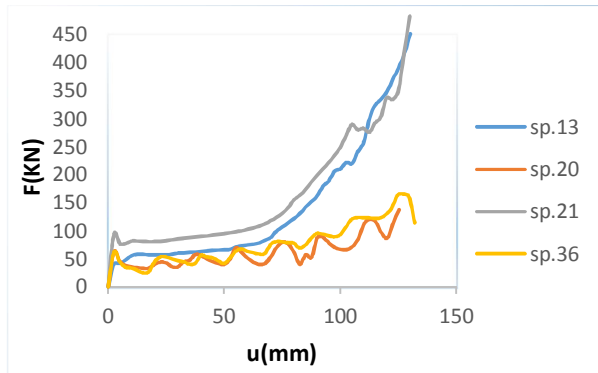


شکل ۳ مقایسه تست تجربی و شبیه سازی عددی نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه ۱۱ شیار مخروطی پر شده از فوم مرجع [۱۷]

به منظور شبیه سازی لوله های مخروطی شیاردار از روش آنالیز دینامیکی صریح استفاده شده است. لوله آلومینیومی و فوم پلی اورتان با المانهای C3D8R 8-nodes brick با تغییر شکل نامتقارن غیر خطی مدل شدند و برای مدل

### ۳-۱- نتایج شبیه سازی

نمودارهای نیرو-جا به جایی که مشخص کننده ی مراحل مربوط به تغییرات نمونه ها است، برای نمونه های ۱۳، ۲۰، ۲۱ و ۳۶ در شکل ۵ ارائه گردیده است. اولین پیک، بار ماکزیمم لهیدگی است سپس وارد ناحیه الاستیک شده و چین ها به ازای هر بیشینه بار تشکیل می شوند. نوسانات کمتر منحنی بار مطلوب می باشد.



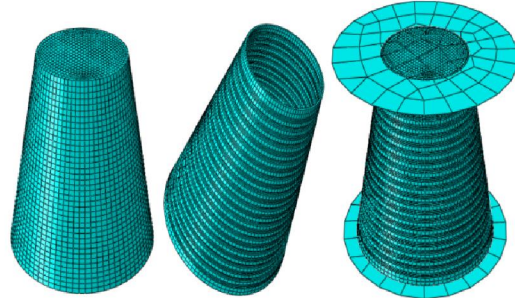
شکل ۵ نمودار های نیرو - جابجایی نمونه های ۱۳، ۲۰، ۲۱ و ۳۶

در ماکزیمم نیروی لهیدگی، ماده در انتهای باریک لوله تسلیم شده و با ایجاد اولین لولا پلاستیک نیرو به شدت کاهش می یابد. کاهش نیرو تا زمانی که یک چین به صورت کامل شکل بگیرد ادامه پیدا می کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجددا کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می شود. بنابراین می توان گفت که هر یک از قله های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین است. البته در تعداد شیارهای کم (فاصله شیار بیشتر و مصداق نمونه های ۲۰ و ۳۶) یک سری ناپایداری هایی در منحنی دیده می شود که برای نمونه های با تعداد شیار بالا (فاصله بین شیار کمتر و مصداق نمونه های ۱۳ و ۲۱) به صورت پایدار بوده و نوسانات منحنی نیرو - جابجایی کم است. اگر چه با وجود شیار میزان جذب انرژی کاهش می یابد، ولی باعث ایجاد لولاهای پلاستیک یکنواخت در طول فرآیند لهیدگی لوله می شود. بر اساس روابطی که در قسمت تعیین اهداف طراحی بیان شد و مقادیر بدست آمده از شبیه سازی، معیار جذب انرژی و سایر معیارها از جمله نیروی متوسط و ماکزیمم لهیدگی محاسبه شده است و نتایج در جدول ۷ مشاهده می شود.

جدول ۷ معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای نمونه ها

SP	جرم سازه	نیروی ماکزیمم لهیدگی	نیروی متوسط لهیدگی	انرژی جذب شده ی کل	انرژی جذب ویژه
۱	۰/۵۹۴	۴۲/۹۳۸	۴۵/۱۴	۳/۶۱۵	۶/۰۸۲
۲	۰/۴۶	۳۰/۹۷	۳۱/۲۱۷	۲/۴۹۷	۵/۴۲
۳	۰/۶۳	۳۷/۷۴	۳۷/۳۷	۲/۹۸۷	۴/۷۴
۴	۰/۴۹	۳۲/۲۹	۲۹/۰۷	۲/۳۲۹	۴/۷۵

کردن صفحات بالایی و پایینی که در واقع بیانگر فک های دستگاه یونیورسال در تحلیل شبه استاتیکی است. از جسم صلب استفاده شده و المانهای به کار رفته برای این صفحات از نوع R3D4(4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral) می باشد. شکل ۴ مدل سه بعدی مخروط شیاردار که با نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است را نشان می دهد.



شکل ۴ شبیه سازی قطعات در نرم افزار آباکوس

صفحه پایینی در همه جهات مقید شده، در حالی که صفحه بالا با جابجایی در امتداد محور مخروط به سمت پایین حرکت دارد بنابراین هیچ اثر اینرسی در شکل گیری مکانیزم رخ نمی دهد و از اثرات دینامیکی نیز صرف نظر شده است. بعد از انجام مدل سازی باید مشخصات فوم و آلومینیوم که تغییر شکل پذیرند به نرم افزار داده شود. سپس ماژول Step در حالت Dynamic Explicit قرار داده می شود و دامنه بارگذاری نیز به مناسبت شبه استاتیکی بودن تحلیل، Tabular انتخاب می شود. علاوه بر این، برای تعریف تماس بین صفحه صلب قابل حرکت و صفحه صلب مقید شده با لوله از تماس سطح به سطح<sup>۱</sup> استفاده می شود. همچنین، از آنجا که در زمان فروریزش نمونه ها، المان های دیواره لوله با یکدیگر تماس پیدا می کنند از خود تماسی<sup>۲</sup> استفاده شده است تا از نفوذ المان ها به داخل یکدیگر جلوگیری شود. از آنجایی که لوله های مخروط پر شده از فوم شامل دو نوع مواد با سختی های مختلف می باشند (لوله آلومینیوم و فوم پلی اورتان) و لوله مخروط بین دو صفحه صلب قرار دارد، وضعیت تماس به طور کامل شبیه سازی شده است. اصطکاک یکی از مهمترین مشخصه هایی است که در فرآیند شبیه سازی باید مشخص گردد. در شبیه سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزا مدل از فرمولاسیون اصطکاک پنالتی<sup>۳</sup> استفاده می شود که مقدار اصطکاک بین نمونه و صفحات صلب برابر ۰/۳ و در خود تماسی حین لهیدگی برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.

پس از پروسه همگرایی مش اندازه برای لوله ۳/۵ mm و برای فوم ۴/۵ mm تعیین شد.

### ۳- نتایج و بحث و بررسی

نتایج شبیه سازی شامل منحنی های نیرو-جابجایی و مقادیر هدف طراحی نمونه ها از نرم افزار آباکوس می باشد، نتایج تحلیل اماری شامل تاثیر متغیر های طراحی روی پاسخ ها با استفاده از نرم افزار Design-Expert می باشد.

1. Surface to Surface  
2. Self Contact  
3. Penalty

۵/۳۵	۲/۷۸۲۳	۳۴/۸۶	۳۸/۰۵۵	۰/۵۱۹	۳۴	۷/۰۲۷	۵/۹۱۹	۷۳/۹۳	۵۵/۱۳	۰/۸۴	۵
۵/۴۴	۳/۸۴	۴۸/۰۵	۳۶/۱۷	۰/۷۰	۳۵	۶/۲	۴/۰۳۶	۵۰/۵۱۳	۴۰/۱۲	۰/۶۵	۶
۵/۶۲	۴/۱۲۶	۵۱/۷	۶۱/۸۲	۰/۷۳	۳۶	۶/۴۵۷	۵/۷۰۸	۷۱/۳۴	۶۳/۵۱	۰/۸۸	۷
۴/۰۴	۱/۸۲۱	۲۲/۷۲	۳۹/۱۸	۰/۴۵	۳۷	۵/۸۷	۳/۹۸۶	۴۸/۳۱۹	۳۵/۸۸	۰/۶۷	۸
۷/۱۱	۶/۸۷۱	۸۵/۹۲	۵۶/۶۹	۰/۹۶	۳۸	۴/۹۳	۳/۱۳۷	۳۹/۲۲	۳۰/۷۹۹	۰/۶۳	۹
۵/۸۰۶	۳/۸۳۲	۴۸/۳۸	۴۴/۸۷	۰/۶۶	۳۹	۴/۳۶۹	۲/۱۸۶	۲۷/۳۷	۲۲/۵۱	۰/۵	۱۰
۵/۴۸۷	۴/۲۱۹	۵۲/۶۴	۴۱/۳۹	۰/۷۶	۴۰	۴/۲۳	۲/۷۹۶	۳۵/۲۴	۲۹/۱۸	۰/۶۶	۱۱
۴/۸	۲/۹۵۸	۳۶/۹	۲۴/۳۴	۰/۶۱	۴۱	۴/۵	۲/۳۶۵	۲۹/۵۷	۳۲/۲۶	۰/۵۲	۱۲
۶/۸۸۷	۵/۵۵۱	۶۹/۳۴	۹۱/۴۴	۰/۸	۴۲	۶/۰۷	۵/۳۵۹	۶۶/۹۹	۴۰/۴۰۷	۰/۸۸	۱۳
۵/۲۵	۳/۷۳۲	۴۶/۶۱	۴۲/۸۹	۰/۷۱	۴۳	۵/۵۷۹	۳/۸۰۵	۴۷/۶۲	۳۴/۴۳	۰/۶۸	۱۴
						۵/۶۳	۵/۱۶۶	۶۴/۶۲	۴۶/۱۶	۰/۹	۱۵
						۴/۲۷۹	۳/۹۲۶	۴۹/۰۵	۴۰/۶۸	۰/۹	۱۶
						۷/۱۷	۶/۶۰۵	۸۲/۶۸	۷۴/۴۹	۰/۹۲	۱۷
						۶/۶۵	۳/۵۹۶	۴۵/۳۸	۵۲/۲۲	۰/۵۴	۱۸
						۶/۵۶۵	۴/۵۹۷	۵۷/۴۹	۷۴/۳۹	۰/۷	۱۹
						۶/۸۳۷	۳/۸۲۲	۴۷/۷۳	۶۲/۶۵	۰/۵۵	۲۰
						۸/۱۶۸	۷/۵۶۴	۹۴/۵۲	۹۴/۹۲	۰/۹۲	۲۱
						۷/۲۳	۵/۲۰۷	۶۵/۰۱	۶۱/۵۹	۰/۷۲	۲۲
						۶/۴	۶/۱۲	۷۶/۳۹	۷۶/۶	۰/۹۵	۲۳
						۷/۲۹۷	۵/۴۲۱	۶۷/۶۹	۷۲/۵۴	۰/۷۴	۲۴
						۶/۲۱۱	۴/۴۹۷	۵۶/۱۶	۵۰/۱۶۵	۰/۷۲	۲۵
						۵/۵۱	۳/۱۴۱	۳۹/۶۳	۳۶/۴۹	۰/۵۷	۲۶
						۴/۹۳	۳/۷۰۱۹	۴۶/۱۹	۴۴/۸۸	۰/۵۷	۲۷
						۵/۵۷۷	۳/۳۴	۴۱/۶۹	۵۱/۰۳۱	۵۹/۰	۲۸
						۶/۳۸	۶/۱۵۴	۷۶/۹۲	۵۰/۴۱	۹۴/۰	۲۹
						۶/۸۴۸۸	۵/۱۷۰۹	۶۴/۶۹	۴۸/۸۲	۰/۵۷	۳۰
						۵/۵۷	۵/۵۸۸	۶۹/۸۱	۶۲/۴۵۸	۱/۰۲	۳۱
						۶/۴۳۶	۵/۰۱۷۸	۶۲/۵۹	۵۹/۲۶	۰/۷۷	۳۲
						۵/۵	۵/۱۵۸	۶۴/۴۸	۴۹/۵۱	۰/۹۳	۳۳

### ۳-۲- نتایج تحلیل آماری

تاثیر متغیرهای طراحی روی پاسخها با استفاده از نرم افزار Design-Expert تخمین زده شده است. برای مطالعه اهمیت عاملها، تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده گردید. در تحلیل مدل، مجموع مربعات 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 دهنده نسبت MS و MSerror است و P-Value اهمیت یک عامل یا را بیان می کند.  $P\text{-Value} = 1$  مشخص می کند که یک فاکتور کم اهمیت ترین است و  $P\text{-Value} = 0$  پر اهمیت ترین فاکتور را نشان می دهد. به طور معمول، در مدل RSM جملات دارای  $P\text{-Value} < 0.05$  می توانند در پیش بینی رفتار پاسخ مورد استفاده قرار گیرند، بنابراین در مدل ریاضی حفظ می شوند.

جدول ۸ نتایج ANOVA برای جذب انرژی ویژه را نشان می دهد که کمتر بودن P-Value مدل از 0.001 بیانگر این مطلب است که مدل خطی از نظر آماری معتبر است. بررسی P-Value برای پارامترهای مدل نشان می دهد که عامل های تاثیر گذار اصلی، فاصله بین شیارها، چگالی فوم، عمق شیار و ضخامت لوله در محل شیار هستند.

جدول ۸ نتایج ANOVA برای جذب انرژی ویژه در لوله های مخروطی شیار دار

P-Value Prob > F	F Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
<۰/۰۰۰۱	۲۳/۹۲	۵/۹۹	۵	۲۹/۹۶	Model
۰/۲۸۷۷	۱/۱۶	۰/۳۹	۱	۰/۳۹	زاویه مخروط ( $\alpha$ )
۰/۰۰۷۴*	۸/۰۴	۲/۰۱	۱	۲/۰۱	فاصله شیارها ( $\lambda$ )
<۰/۰۰۰۱*	۳۷/۹۰	۹/۵۰	۱	۹/۵۰	چگالی فوم

	(ρ)			
۱. ضخامت لوله ، چگالی فوم ، عمق شیار و فاصله بین شیارها به ترتیب ذکر شده و بصورت خطی با میزان جذب انرژی ارتباط دارند.	۶/۳۵	۱	۶/۳۵	<۰/۰۰۰۱*
۲. افزایش ضخامت لوله و چگالی فوم موجب افزایش جذب انرژی و افزایش عمق شیار و فاصله بین شیارها موجب کاهش جذب انرژی گردید.	۱۱/۸۱	۱	۴۷/۱۵	<۰/۰۰۰۱*
	۹/۲۷	۳۷	۰/۲۵	
	۳۹/۲۴	۴۲		
	<b>Residual</b>			
	<b>Cor Total</b>			

فهرست علائم

علائم	معادله (۲)
* فاکتورهای قبل توجه	
α زاویه مخروط	
λ فاصله بین شیارها	
ρ چگالی فوم	
d عمق شیار :	
t' ضخامت لوله	
L طول لوله	
W عرض شیار	
E <sub>absorbed</sub> انرژی جذب شده کل	
σ <sub>yield</sub> تنش تسلیم	
δ طول لهیدگی	

معادله (۲) نشان می دهد که چگونه تغییرات در انرژی جذب شده کل توسط یک مدل مرتبه ۱ (خطی) قابل پیش بینی خواهد بود. با توجه به اینکه مقدار R-Square برابر با 0.76 می باشد این بدین معناست که تنها 76 درصد از تغییرات جذب انرژی ویژه بوسیله فاصله بین شیارها، چگالی فوم ، عمق شیار و ضخامت لوله در محل شیار قابل پیش بینی است.

$$SEA = 5.54016 - 0.25640 \times \lambda + 0.00928118 \times \rho - 2.02341 \times d + 2.25841 \times t' \quad (2)$$

معادله (۳) نرمال شده معادله (۲) می باشد بطوریکه بزرگی قدر مطلق ضرایب نشان دهنده میزان تاثیر متغیرهای طراحی بر جذب انرژی ویژه را می باشد.

$$SEA = 5.84 - 0.22 \times \lambda + 0.47 \times \rho - 0.38 \times d + 0.52 \times t' \quad (3)$$

ترتیب عوامل تاثیر گذار و نوع اثر آنها بر جذب انرژی از رابطه (۳) مشخص است. بعنوان مثال ضخامت لوله در محل شیار با ضریب 0.52 و بصورت مثبت، چگالی فوم با ضریب 0.47 و بصورت مثبت با میزان جذب انرژی ارتباط دارند. افزایش ضخامت لوله در محل شیار و چگالی فوم موجب افزایش جذب انرژی ویژه و افزایش فاصله بین شیارها و عمق شیار موجب کاهش این معیار می شود.

نتایج نشان می دهد که:

۱. در نمونه های با چگالی بالاتر فوم جذب انرژی بیشتر است که در مراجع [۶، ۱۱] مورد تایید است.
۲. افزایش تعداد شیار یا کاهش فاصله بین شیارها موجب لهیدگی متقارن و کاهش نوسانات منحنی نیرو - جابجایی گردید که در مراجع [۱، ۲، ۴، ۱۸] مصداق دارد.
۳. ماکزیمم جذب انرژی در عمق شیار کمتر و زاویه مخروط کوچکتر مشاهده شد همانند آنچه در مراجع [۴، ۱۹] بیان شده است.

۴- نتیجه گیری:

هدف از این تحقیق، بررسی جذب انرژی ویژه در لوله های مخروطی جدار نازک پر شده از فوم پلی اورتان، با بررسی تغییرات چگالی فوم، ضخامت لوله، زاویه مخروط، تعداد و عمق شیارها بود.

روش سطح پاسخ نشان می دهد که:

۵- مراجع

- [1] Alavi Nia, A. and J. Haddad Hamedani, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*, 2010. 48(12): p. 946-954.
- [2] Yuen, S.C. and G. Nurick, The energy-absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications: an overview. *Applied Mechanics Reviews*, 2008. 61(2): p. 020802.
- [3] Hosseini-pour, S. and G. Daneshi, Experimental studies on thin-walled grooved tubes under axial compression. *Experimental mechanics*, 2004. 44(1): p. 101-108.
- [4] Rezvani, M. and M.D. Nouri, Analytical Model for Energy Absorption and Plastic Collapse of Thin-walled Grooved Frusta Tubes. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2013(just-accepted).
- [5] Nori, M.D. and M.J.Rezvani, Experimental and numerical investigation of grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression. *Int. J. Materials and Structural Integrity*, 2012.
- [6] Rezvani, M. and M.D. Nouri, Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014. 39(3): p. 2179-2190.
- [7] Qi, C., S. Yang, and F. Dong, Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading. *Thin-Walled Structures*, 2012. 59: p. 103-119.
- [8] Nagel, G. and D. Thambiratnam, Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. *Thin-Walled Structures*, 2005. 43(8): p. 1225-1242.
- [9] Salehghaffari, S., M. Rais-Rohani, and A. Najafi, Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes. *Thin-walled structures*, 2011. 49(3): p. 397-408.
- [10] Tarlochan, F., et al, Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. *Thin-Walled Structures*, 2013. 71: p. 7-17.
- [11] Bi, J., et al, Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2010. 46(9): p. 698-709.
- [12] Broughton, J., The benefits of improved car secondary safety. *Accident Analysis & Prevention*, 2003. 35(4): p. 527-535.

- [13] 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*, 2010. 69: p. 11-16.
- [14] Bahraminasab, M., et al., Multi-objective design optimization of functionally graded material for the femoral component of a total knee replacement. *Materials & Design*, 2014. 53: p. 159-173.
- [15] Ashby, M.F. and R.M. Medalist, The mechanical properties of cellular solids. *Metallurgical Transactions A*, 1983. 14(9): p. 1755-1769.
- [16] Rezvani, M., 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*, 2012. 6(2): p. 151-168.
- [17] Nori, M.D. and M.J.Rezvani, Experimental Investigation of Polymeric Foam and grooves Effects on Characteristics of Thin-Walled Conical tube. *Experimental Techniques* 2012.
- [18] S.J.Hosseiniipour and G.H.Daneshi, Experimental studies on thin walled grooved tubes under axial compression". *Society for Experimental Mechanics* 2004.
- [19] Acar, E., et al., Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations. *Thin-Walled Structures*, 2011. 49(1): p. 94-105.