

## بررسی و بهینه سازی رفتار جاذب‌های انرژی چند جداره و چندسلولی با مقاطع مختلف

محمد علی دهقانیان

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

مسعود عسگری\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله به مطالعه رفتار جذب انرژی لوله‌های چند جداره و چند سلولی با مقاطع مختلف پرداخته شده است. شبیه‌سازی عددی برای مقاطع دایره‌ای و مربعی در نرم افزار آباکوس انجام شد. ابتدا نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مقایسه شده است. سپس به مدلسازی چندین طرح مختلف از ترکیب لوله‌های مخروطی و سلول‌بندی، پرداخته شده است. نتایج حاصل از چند سلولی کردن جاذب‌ها که گویای افزایش درصد بالای جذب انرژی مخصوص بوده و برای طراحی سه نوع جاذب با پارامترهای ضخامت، زاویه رأس، فاصله دو لوله و تعداد سلول استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی این سه جاذب با پارامترهای مختلف استخراج شده و معادلات توابع هدف بر حسب پارامترهای طراحی با استفاده از روش روبه پاسخ از نتایج طراحی آزمایشات به دست آمده است. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی معادلات بدست آمده از روش روبه پاسخ، مشخصات جاذب بهینه مشخص و با نتایج شبیه سازی مربوط به آن جاذب صحت گذاری شده و به این ترتیب طرح بهینه برای مقاطع مختلف به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** جذب انرژی، لوله‌های دوجداره، لوله‌های مخروطی و چندسلولی.

## Investigation and Optimization of Multi-walled Multi-cell Energy Absorbers considering Different Cross-sections

M. A. Dehghanian

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

M. Asgari

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In this paper, the behavior of energy absorption and maximum force of multi-walled and multi-cell tubes with different cross sections have been studied. Energy-absorption behavior has been simulated using finite element method in ABAQUS software. Numerical simulations with quasi-static load assumption for circle and square-shaped peripheral sections were performed. In the first step, the numerical results of applied force displacement curve caused by movement of the upper barrier have been compared with existing experimental results in different sources. In addition, the tube geometry has been changed to obtain better energy absorption. Then, several models of multi-cell sections have been modeled. Using multi-cellular results indicating a high percentage of specific energy absorption, three types of adsorbents were designed with specified thickness parameters, vertex angle, tube spacing and number of cells. Using the design of experiments, the results of the simulation of these three absorbers were extracted with different parameters. The objective function equations are extracted from experimental design results according to the parameters considered using the response procedure method. Also, by using the genetic algorithm on the equations obtained by the response surface model, the optimal absorber characteristics were determined and correlated with the simulation results.

**Keywords:** Energy absorption, double layer tubes, conical and multicellular tubes.

### ۱- مقدمه

مقارن محوری یک لوله با مقطع گرد با مد نظر قرار دادن تا شدن لوله به صورت جزئی داخلی و خارجی را مطالعه نمودند. آبرامویچ [۳] در سال ۱۹۸۴ مطالعات گسترده ای روی لوله‌های با مقطع مربع و دایره تحت بارهای فشاری شبه استاتیک و دینامیک انجام داد. در سال ۲۰۰۱ در تحقیقی که توسط مگد و همکارانش [۴] در شرکت BMW انجام گرفت، نشان داده شد که مدل‌های تحلیل میزان جذب انرژی که تاکنون توسط معیارهای ساده شکست انجام گرفته نمی‌تواند معیار مناسبی در تحلیل پدیده ضربه در تصادف باشد. کیم و ویرزبیک [۵] در سال ۲۰۰۴ جنبه‌های مختلف طراحی سازه ریل جلو خودرو، نظیر شکل و نوع سطح مقطع را مورد بررسی قرار دادند. باردی و همکارانش [۶] به طور تجربی و تحلیلی شروع فروریزش، ایجاد و گسترش چین در لوله‌هایی با ضخامت متوسط را تحت بارهای دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. لانگست و هاپرستاد پژوهش آزمایشگاهی ارزشمندی با در نظر گرفتن لوله‌های آلومینیومی حرارت دیده مختلف تحت هر دو بار استاتیکی و دینامیکی انجام دادند [۷]. ویرزبیک و چن تقریباً برای

خودروه‌های مدرن امروزی همراه با مجموعه‌ای از امکانات ایمنی برای محافظت از سرنشینان و عابران پیاده در هنگام تصادف به دست خریداران می‌رسند. برخورد وسایل متحرک با سرعت‌های بالا در مدت زمان‌های بسیار کوتاه رخ می‌دهد و هرچه زمان تصادف کوتاه‌تر باشد، نیروی بیشتری تولید می‌شود. انرژی برخورد به جای این‌که مستقیماً به بدن سرنشینان منتقل شود از طریق تغییر شکل اجزاء، جذب سازه خودرو می‌شود. در فواصل کوتاه زمانی، یک افزایش کوچک در زمان باعث می‌شود تا نیرو به مقدار زیاد کاهش یابد. گسترش نواحی مجال‌شونده به معنی افزایش زمان مؤثر برخورد و در نتیجه کاهش مقدار خرابی واقعی است. مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی مختلفی به منظور پیش‌بینی و مقایسه مشخصه‌های جذب انرژی در انواع لوله‌های جدار نازک انجام شده است. الکساندر [۱] در سال ۱۹۶۰ اولین مدل سینماتیکی ساده قابل قبول برای فروریزش در مقاطع جدار نازک را ارائه نمود. ویرزبیک و همکارانش [۲] در سال ۱۹۸۳ تغییر فرم

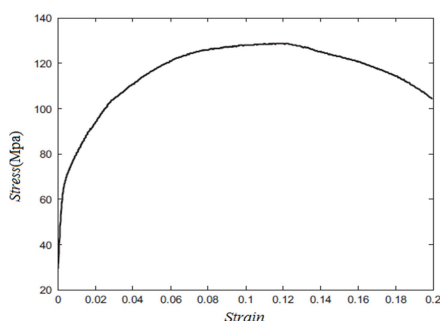
و نتایج شبیه‌سازی جاذب بهینه با نتایج پیش‌بینی شده از روابط بدست آمده از آنالیز ANOVA مقایسه گردید که درصد خطای قابل قبولی داشته است.

## ۲- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی فرآیند شبه استاتیک بارگذاری بر جاذب انرژی سه قطعه که شامل فک بالایی دستگاه (متحرک)، لوله که از سمت فک پایینی به صورت گیردار می‌باشد و فک پایینی دستگاه (ثابت) در نظر گرفته می‌شود. فک‌های بالایی و پایینی به صورت جسم صلب تعریف شده ولی لوله‌ها به صورت تغییرشکل پذیر تعریف می‌شود. برای شبکه بندی لوله‌ها از المان‌هایی از نوع سطحی (پوسته‌ای) چهار گره‌ای با استفاده از انتگرال‌گیری کاهش یافته، استفاده شده و اندازه طول اضلاع مربع‌های المان‌بندی هم پس از انجام آنالیز حساسیت ۲/۵ میلی‌متر انتخاب شده است و همچنین برای شبکه‌بندی فک‌ها از المان‌های جسم صلب سه‌بعدی و چهارگره‌ای استفاده شده و طول اضلاع آن‌ها ۵ میلی‌متر انتخاب شد. در این شبیه‌سازی دو نوع برخورد بین سطوح وجود دارد که یکی برخورد فک‌ها با قسمت‌های انتهایی لوله‌هاست و دیگری تماس بین سطوح دیواره‌های لوله و همچنین صفحات داخلی لوله‌های چندسولوی در حین تغییر شکل می‌باشد. برای تعریف برخورد بین فک‌ها و لوله از الگوریتم برخورد سطح به سطح استفاده شده است. یکی از فک‌ها کاملاً در همه راستاها ثابت شده و دیگری در راستای محور لوله می‌تواند جابجا شود. بارگذاری هم بدین صورت است که فک متحرک به اندازه ۱۰۰ میلی‌متر به سمت فک ثابت به صورت شبه استاتیک دچار جابجایی می‌شود. همچنین رفتار ساختاری ماده به صورت الاستوپلاستیک با تئوری چندخطی لحاظ شده و رفتار تنش کرنش از داده‌های تست تجربی کشش استخراج شده است.

## ۲-۱- صحنه‌گذاری

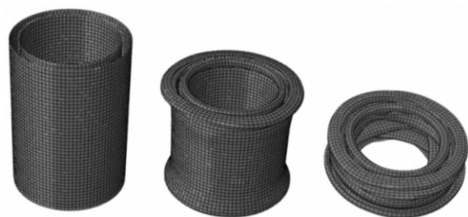
برای صحنه‌گذاری جاذب انرژی دوجداره استوانه‌ای با ضخامت ۲.۵ میلی‌متر ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر و قطر لوله داخلی ۷۹ میلی‌متر و قطر لوله خارجی ۹۴ میلی‌متر همانند یکی از جاذب‌های آزمایش شده در مرجع [۱۹] شبیه‌سازی شده و با نتایج مرجع [۱۹] صحنه‌گذاری شد. لوله‌ها از جنس آلیاژ آلومینیوم AL۶۰۶۳ ساخته شده که نمودار تنش-کرنش استخراج شده از تست کشش این آلیاژ در شکل ۱ مشخص است. جدول ۱ خواص مکانیکی این آلیاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار تنش-کرنش مهندسی حاصل از تست کشش استاندارد [۱۹]

اولین بار به بررسی عددی و تحلیلی لوله‌های چندسولوی پرداختند نشان دادند که مشخصه‌های جذب انرژی این لوله‌ها حدوداً ۱۴۰ الی ۱۸۰ درصد بهبود یافته است [۸]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۷، با ارائه یک مدل ساده و مؤثر توانستند رابطه محاسبه نیروی متوسط لهیدگی را پیشنهاد نمایند [۹]. در سال ۲۰۱۱ نجفی و رئیس روحی جاذب‌های انرژی چندسولوی با سلول‌های غیرمسوای را به صورت عددی و تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ علوی‌نیا و پارساپور لوله‌های چندسولوی از جنس آلومینیوم را مورد مطالعه‌ی تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی قرار دادند و رابطه‌ی محاسبه نیروی متوسط لهیدگی<sup>۱</sup> برای لوله‌های چندسولوی با سلول‌های غیرمسوای را صحنه‌گذاری نمودند [۱۱]. مملی و جانسون که نیرو بیشینه لهیدگی و نیرو متوسط لهیدگی در لوله‌های مخروطی وابسته به زاویه رأس مخروط هم می‌باشد [۱۲]. راید و ردی به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی به بررسی لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی مستطیلی از جنس فولاد تحت بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی پرداختند، نتایج تست شبه‌استاتیکی نشان داد که مشخصه‌های لوله‌های مخروطی بیشتر از استوانه‌ای پایدار می‌باشد [۱۳]. ناگل و دامبیرانام به بررسی رفتار جاذب‌های انرژی مخروطی و استوانه‌ای تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی محوری و مایل پرداختند [۱۴ و ۱۵]. علوی‌نیا و همدانی جاذب‌های انرژی با سطح مقطع‌های متنوعی را شامل دایره، مربع، مستطیل، ۳ و ۵ ضلعی را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد بالاترین انرژی جذب شده و نیرو متوسط متعلق به لوله‌های دایره‌ای می‌باشد. هرچند که کمترین اختلاف بین نیرو متوسط و بیشینه نیروی لهیدگی متعلق به لوله‌های مخروطی است [۱۶]. عظیمی و عسگری جذب انرژی در لوله‌های یک، دو جداره مخروطی و استوانه‌ای حاوی و بدون فوم آلومینیومی را به صورت عددی مورد مقایسه قرار داد. نتایج نشان داد که ظرفیت جذب انرژی در لوله‌های چندجداره به مراتب بیشتر از یک جداره می‌باشد [۱۷]. حقی کاشانی طی یک پژوهش آزمایشگاهی و همچنین مدلسازی اجزا محدود به آنالیز لوله‌های دوجداره تحت بار شبه‌استاتیکی پرداخت. مشخص شد که انرژی جذب شده توسط لوله‌های دوجداره بیشتر از مجموع انرژی جذب شده توسط تک تک لوله‌ها می‌باشد [۱۸]. شریفی و همکاران در دانشگاه امیرکبیر، جذب انرژی در لوله‌های دایره‌ای دو جداره با جنس AL۶۰۶۳ تحت بار شبه‌استاتیکی بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و به تاثیر پارامترهای قطر، ضخامت، ارتفاع لوله‌ها و خواص تماسی بین آن‌ها پرداختند [۱۹]. در این مقاله ابتدا برای صحنه‌گذاری نتایج عددی تغییرات بار وارده بر حسب جابجایی فک بالایی با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مقایسه گردید. سپس رفتار مقاطع مختلف جاذب‌های چند جداره و چند سلولی تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از روش طراحی آزمایشات و استفاده از مدل رویه پاسخ و آنالیز ANOVA فاکتورهای نظیر ضخامت، تعداد سلول، زاویه راس و فواصل جداره‌ها مورد بررسی قرار گرفته و همچنین روابطی بر اساس داده‌های آماری ارائه شده است. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک نقاط بهینه توابع هدف بدست آمده از آنالیز ANOVA مشخص

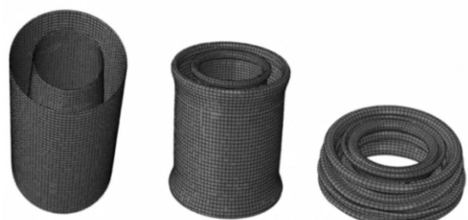
1 Mean crush load (MCL)



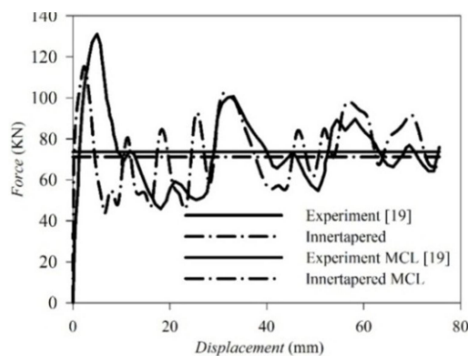
شکل ۴- تغییر شکل لوله دوجداره طی بارگذاری (شبیه سازی)

۲-۲- نتیجه و بحث

در ادامه شبیه سازی، لوله از لحاظ هندسی دستخوش تغییرات شده تا مشخصات جذب انرژی بهتر حاصل شود. در تمامی این مدل ها ارتفاع لوله ها ۱۳۰ میلی متر و مطابق با مدل آزمایشگاهی که در مرجع [۱۹] می باشد در نظر گرفته شده است. با الهام گیری از پژوهش های پیشین در ادامه همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود ابتدا لوله داخلی به صورت مخروطی طراحی شد. اما در نمودار شکل ۶ ملاحظه می شود که نیروی بیشینه در این مدل لوله به مقدار ۱۱ درصد کاهش یافته است. با توجه به جدول ۳ مشخص می شود که مخروطی کردن لوله داخلی تاثیر چشم گیری در انرژی مخصوص جذب شده نداشته است ولی مقدار نیروی بیشینه را به مقدار مناسبی کاهش داده است.



شکل ۵- لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی لوله دوجداره استوانه ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی

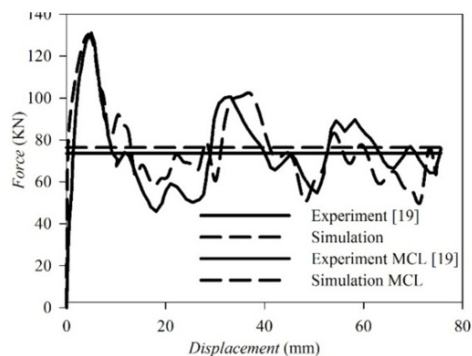
جدول ۳- مشخصه های جذب انرژی لوله دوجداره استوانه ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی

انرژی جذب شده مخصوص (KJ/Kg)	بیشینه نیروی اولیه (KN)	نیروی متوسط لهیدگی (KN)	
۱۱/۸۵	۱۳۲/۵	۷۳/۶۵	آزمایشگاهی [۱۹]
۱۲/۷	۱۱۵/۲	۷۱/۲۶	لوله مخروطی

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AL۶۰۶۳

مقدار	واحد	نماد	خواص
۶۸/۹	Gpa	E	مدول یانگ
۵۱	Mpa	$\sigma_y$	تنش تسلیم
۰/۳	-	$\nu$	ضریب پواسون
۲۶۸۵	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	چگالی

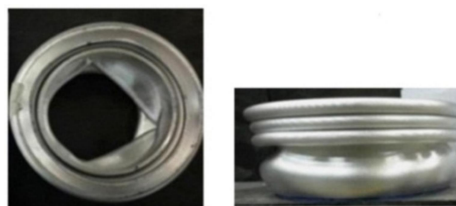
پس از مدل سازی، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آنالیزی که برای صحنه گذاری انجام شده با نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۹]، در شکل ۲ مشاهده می شوند. در این نمودار خطوط موازی با محور افقی معرف نیروی متوسط لهیدگی می باشد. این شکل تطابق قابل قبول نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می دهد. همچنین در جدول ۲، مشخصه های جذب انرژی این لوله ملاحظه می شود. شکل ۳ و ۴ به ترتیب تغییر شکل ایجاد شده در جذب انرژی به صورت آزمایشگاهی که از مرجع [۱۹] برگرفته و آنالیز انجام شده را در حین بارگذاری و پایان بارگذاری نشان می دهد.



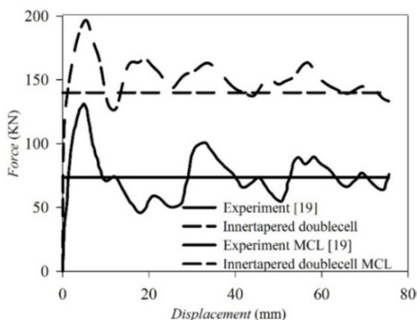
شکل ۲- نمودار نیرو-جابجایی لوله دوجداره آنالیز شده مرجع [۱۹]

جدول ۲- نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایشگاهی مرجع [۱۹]

خطا	انرژی جذب شده	بیشینه نیروی جذب شده	نیروی متوسط لهیدگی	
	مخصوص (KJ/Kg)	اولیه (KN)	(KN)	
-	۱۱/۸۵	۱۳۲/۵	۷۳/۶۵	آزمایشگاهی [۱۹]
۲/۱٪	۱۲/۱	۱۳۰.۳۸	۷۶/۳۷	شبیه سازی



شکل ۳- لوله دوجداره استوانه ای تغییر شکل یافته (آزمایشگاهی [۱۹])

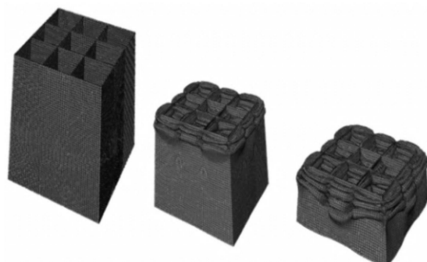


شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی و سلول بندی شده

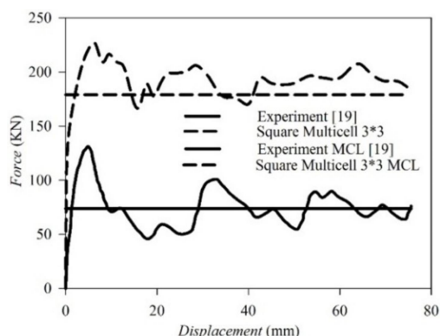
جدول ۵- مشخصه‌های جذب انرژی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی و سلول بندی شده

انرژی جذب شده مخصوص (KJ/Kg)	بیشینه نیروی اولیه (KN)	نیروی متوسط لهیدگی (KN)	
۱۱/۸۵	۱۳۲/۵	۷۳/۶۵	آزمایشگاهی [۱۹]
۱۸/۹۵	۱۹۱/۴	۱۳۹/۹	مخروطی چندسلولی

در ادامه به جاذب‌های انرژی چندسلولی با مقطع مربعی که سطح مقطع و ارتفاع آن برابر با سطح مقطع دایره در مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده، پرداخته می‌شود. در شکل ۱۱ مراحل تغییر شکل لوله مربعی ۳×۳ با زاویه رأس ۱۰ درجه و ضخامت ۳ میلیمتر نشان داده شده است. در نمودار شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که نمودار نیرو-جابجایی به طور کلی افزایش پیدا کرده و مقدار جذب انرژی مخصوص به میزان حدود ۷۶ درصد بهبود یافته است. جدول ۶ نیز موید همین موضوع است.



شکل ۱۱- لوله چند سلولی مخروطی با مقطع مربعی

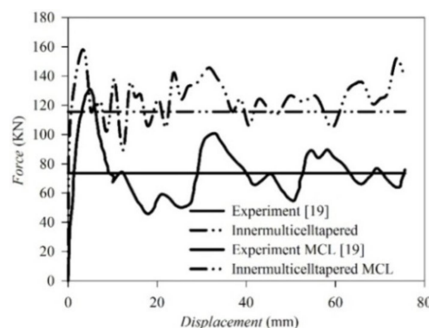


شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع [۱۹] و لوله چند سلولی مخروطی با مقطع مربعی

حال همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود به داخل لوله داخلی دو ورقه آلومینیومی به منظور سلول بندی کردن لوله داخلی اضافه شد. در نمودار شکل ۸ ملاحظه می‌شود که نمودار نیرو-جابجایی به طور کلی افزایش پیدا کرده است. اعداد گزارش شده در جدول ۴ حاکی از آن است که اضافه کردن ورقه‌های داخلی لوله میانی توانسته انرژی جذب شده مخصوص را به میزان حدود ۳۵ درصد بهبود دهد.



شکل ۷- لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی چندسلولی



شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی چند سلولی

جدول ۴- مشخصه‌های جذب انرژی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع [۱۹] و آنالیز لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی و چندسلولی

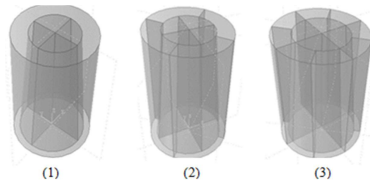
انرژی جذب شده مخصوص (KJ/Kg)	بیشینه نیروی اولیه (KN)	نیروی متوسط لهیدگی (KN)	
۱۱/۸۵	۱۳۲/۵	۷۳/۶۵	آزمایشگاهی [۱۹]
۱۶/۷۵	۱۵۷/۹	۱۱۵/۷	لوله داخلی مخروطی چندسلولی

در آخرین مرحله نیز همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مجدداً بین لوله داخلی و خارجی هم ورقه‌های آلومینیومی اضافه شد. به این ترتیب فضای بین دو لوله هم سلول بندی شد. در نمودار شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که نمودار نیرو-جابجایی به طور کلی افزایش پیدا کرده و مقدار جذب انرژی مخصوص به میزان حدود ۵۸ درصد بهبود یافته است. جدول ۵ نیز موید همین موضوع است.



شکل ۹- لوله دوجداره با لوله داخلی مخروطی و سلول بندی شده

رأس و تعداد سلول بین دو لوله بر روی مشخصه‌های جاذب انرژی انجام شده است.



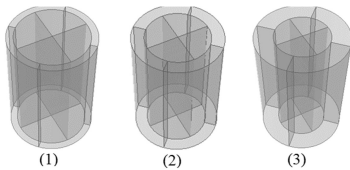
شکل ۱۳- مقاطع جاذب گروه اول بر اساس تغییرات تعداد سلول میان لوله‌ها

جدول ۷- متغیرهای در نظر گرفته شده برای جاذب گروه اول

متغیر طراحی	واحد	نشانه	سطح	
ضخامت $T$	میلیمتر	A	۲	۲/۵
زاویه راس $\alpha$	درجه	B	۰	۵
مقطع جاذب $S$	-----	C	۱	۲

همانطور که از جدول ۷ و شکل ۱۶ مشخص است پارامتر C مربوط به سه نوع مختلف سلول بندی جاذب است و مقاطع جاذب شماره ۱ تا ۳ در شکل ۱۳ به ترتیب از چپ به راست می‌باشد. پارامتر B مربوط به زاویه رأس لوله داخلی و مقادیر صفر، ۵ و ۱۰ درجه می‌باشد. و پارامتر A مربوط به ضخامت کل لوله جاذب انرژی بوده و مقادیر ۲، ۲/۵ و ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

در گام بعدی نتایج مربوط به جاذب‌های دوجداره با لوله داخلی استوانه‌ای و چهار سلولی به انضمام سه مدل سلول بندی بین دو لوله انجام شده است ولی این بار همانطور که در جدول ۸ مشخص شده، هدف از آزمایشات بررسی تأثیر ضخامت، تعداد سلول و فاصله بین دو لوله بر روی مشخصه‌های جاذب انرژی می‌باشد.



شکل ۱۴- مقاطع مختلف جاذب گروه دوم بر اساس تغییرات فاصله دو لوله

جدول ۸- متغیرهای در نظر گرفته شده برای جاذب گروه دوم

متغیر طراحی	واحد	نشانه	سطح	
ضخامت $T$	میلیمتر	A	۲	۲/۵
اختلاف شعاع $r$	میلیمتر	B	۷/۵	۱۳/۲۵
مقطع جاذب $S$	-----	C	۱	۲

در جدول ۸ پارامتر C مربوط به سه نوع مقطع جاذب است. پارامتر B مربوط به اختلاف شعاع که مقادیر ۷/۵، ۱۳/۲۵ و ۱۹ می‌باشد. و پارامتر A مربوط به ضخامت کل لوله جاذب انرژی بوده که مقادیر ۲، ۲/۵ و ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. به منظور تحلیل رویه پاسخ تعداد ۲۷ آنالیز برای هر تابع هدف از هر جاذب انرژی انجام شده است.

در گام نهمی نتایج مربوط به جاذب‌های با سطح مقطع مربعی و چندسلولی انجام شده است. همانطور که در جدول ۹ مشخص شده،

جدول ۶- مشخصه‌های جاذب انرژی لوله دوجداره استوانه‌ای مرجع

[۱۹] و آنالیز لوله چند سلولی مخروطی با مقطع مربعی

آزمایشگاهی [۱۹]	نیروی متوسط (KN)	بیشینه نیروی اولیه (KN)	انرژی جذب شده مخصوص (KJ/Kg)
۷۳/۶۵	۱۳۲/۵	۱۱/۸۵	
۱۷۴/۵	۲۲۶/۵	۲۰/۸	

### ۳-۲- طراحی آزمایشات

در این بخش یک طراحی سیستماتیک برای بررسی تاثیر پارامترهای هندسی جاذب‌های انرژی بر روی عملکرد میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه بر اساس روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> انجام شده است. بر پایه نتایج بدست آمده از آنالیزهای قبلی سه گروه جاذب در نظر گرفته شده است که پارامترهای طراحی از جمله ضخامت، زاویه راس و شکل هندسی مقطع برای جاذب انرژی گروه اول و سوم و همچنین پارامترهای ضخامت، اختلاف شعاع دو لوله و شکل هندسی مقطع برای جاذب انرژی نوع دوم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میزان جذب انرژی، نیروی بیشینه و ترکیب هر دو پارامتر با الویت برابر به عنوان معیارهای عملکرد در نظر گرفته شده‌اند. نتایج آنالیزها، تاثیر هر یک از فاکتورها بر بیشینه کردن جذب انرژی و به طبع آن کاهش نیروی بیشینه را آشکار می‌کند. در کل تعداد ۲۷ آزمایش برای هر گروه جاذب انجام شده و توابع پاسخ مورد بررسی، انرژی مخصوص جذب شده در هر جاذب (E)، نیروی بیشینه (F) و نیروی بیشینه و انرژی مخصوص به طور همزمان با الویت برابر به طوری که در معادله (۱) مشاهده می‌شود در نظر گرفته شده است.

$$R = (0.5 * E) + (0.5 * F) \quad (1)$$

از آنجایی که مقدار انرژی مخصوص و نیروی بیشینه دارای واحدهای یکسان نیستند و همینطور مقدار آن‌ها در یک گستره عددی نمی‌باشند و به دلیل آنکه تابع هدف تشکیل شده از این دو تابع را می‌خواهیم بیشینه کنیم باید اعداد را به گونه ای نرمالایز کنیم که مطلوب تابع هدف ما بیشینه آن باشد. برای این حالت اگر مقادیر بزرگتر خروجی مطلوب باشد داده های خروجی با استفاده از رابطه (۲) نرمال می‌شود و به طور مشابه اگر مقادیر کوچک خروجی مورد نظر باشد داده‌های خروجی با استفاده از رابطه (۳) نرمال می‌شود.

$$X_i^0 = \frac{X_i^{(0)}(K) - \min(X_i^{(0)}(K))}{\max(X_i^{(0)}(K)) - \min(X_i^{(0)}(K))} \quad (2)$$

$$X_i^0 = \frac{\max(X_i^{(0)}(K)) - X_i^{(0)}(K)}{\max(X_i^{(0)}(K)) - \min(X_i^{(0)}(K))} \quad (3)$$

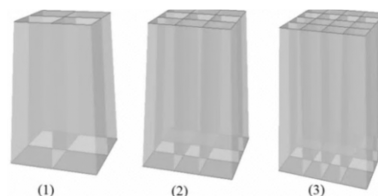
در مرحله اول نتایج مربوط به جاذب‌های دوجداره با لوله داخلی مخروطی و چهار سلولی به انضمام سه مدل سلول بندی بین دو لوله انجام شده است (همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این مرحله به منظور بررسی تأثیر ضخامت، زاویه

<sup>1</sup>Response surface Modeling (RSM)

هدف از آزمایشات بررسی تعداد سلول، ضخامت و زاویه رأس لوله‌ها بر روی مشخصه‌های جذب انرژی می‌باشد.

بیشینه و انرژی مخصوص به طور همزمان با الویت برابر می‌باشند. حال در این مرحله برای ارزیابی میزان تاثیر این پارامترهای مستقل بر روی پاسخ، آنالیز واریانس را با استفاده از نرم افزار Minitab انجام و نتایج بر اساس مقدار اطمینان بیش از ۹۵٪ ( $\alpha = 0.5$ ) به دست آمده است. در ادامه هر کدام از پاسخ‌ها برای هر گروه جاذب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین باید متذکر شد که اعداد استفاده شده برای مقاطع مختلف جاذب در آنالیز ANOVA متناسب با ورق‌های جاگیر شده در مقطع به منظور سلول‌بندی شدن مقطع برای جاذب‌های گروه اول و دوم برای مقاطع ۱ تا ۳ به ترتیب ۴، ۸ و همچنین برای جاذب‌های گروه سوم برای مقاطع ۱ تا ۳ به ترتیب ۲، ۴ و ۶ در نظر گرفته شده است.

هدف از آزمایشات بررسی تعداد سلول، ضخامت و زاویه رأس لوله‌ها بر روی مشخصه‌های جذب انرژی می‌باشد.



شکل ۱۵- مقاطع مختلف جاذب گروه سوم بر اساس تغییرات سلول

جدول ۹- متغیرهای در نظر گرفته شده برای جاذب گروه سوم

متغیر طراحی	واحد	نشانه	سطح
ضخامت $T$	میلیمتر	A	۲/۵، ۳
زاویه راس $\alpha$	درجه	B	۵، ۱۰
مقطع جاذب S	---	C	۱، ۲، ۳

در این مقاله با استفاده از مجموعه‌ای دیتاهای آزمایشی، تابع  $f$  با استفاده از مدل رگرسیون چند جمله ای مرتبه دوم تخمین زده می‌شود. مدل مرتبه دوم  $f$  مطابق رابطه (۴) می‌باشد:

$$f = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{ii}x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii}x_i^2 + \sum_{i<j}^n a_{ij}x_ix_j + \varepsilon \quad (4)$$

$a_{ii}$  بیانگر تاثیر خطی  $x_i$ ،  $a_{ij}$  تاثیر مرتبه دوم  $x_i$  و  $x_j$  و  $a_{ij}$  تاثیر متقابل خطی-خطی بین  $x_i$  و  $x_j$  می‌باشد. سطح پاس  $f$  شامل ترم‌های خطی، مرتبه دوم و ترم‌های متقابل می‌باشد.

همانطور که از جدول ۹ و شکل ۱۵ مشخص است پارامتر C مربوط به سه نوع مختلف مقطع جاذب است و مقاطع جاذب شماره ۱ تا ۳ به ترتیب از چپ به راست می‌باشد. پارامتر B مربوط به زاویه رأس لوله‌ها بوده که مقادیر صفر، ۵ و ۱۰ درجه می‌باشد. و پارامتر A مربوط به ضخامت کل لوله جاذب انرژی بوده و مقادیر ۲، ۲/۵ و ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. به منظور تحلیل رویه پاسخ تعداد ۲۷ آنالیز برای هر تابع هدف از هر جاذب انرژی انجام شده است.

### ۳- نتایج

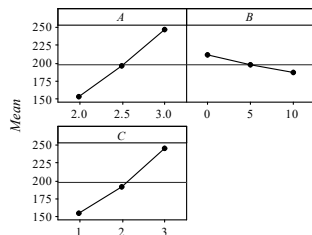
در این قسمت با توجه به مطالبی که در قسمت‌های گذشته گفته شد ۸۱ آنالیز انجام شده که سهم هر گروه جاذب ۲۷ آنالیز می‌باشد. در جدول ۱۰ مقادیر انرژی مخصوص، نیروی بیشینه اولیه و وزن هر جاذب بر اساس ترتیب مقادیر پارامترهایی که روش رویه پاسخ به ازای آن‌ها روابط را استخراج می‌کند ارائه شده است.

همانطور که اشاره شد پارامترهای مستقل طراحی جاذب انرژی شامل ضخامت، زاویه راس و مقطع جاذب برای جاذب گروه اول و سوم و ضخامت، اختلاف شعاع و مقطع جاذب برای جاذب گروه دوم هستند که در آنالیز واریانس به ترتیب با A، B و C نمایش داده شدند و پاسخ مورد نظر میزان جذب انرژی مخصوص و نیروی بیشینه و همچنین نیروی

جدول ۱۰- مقادیر به دست آمده از شبیه سازی برای مشخصه های جاذب‌های انرژی

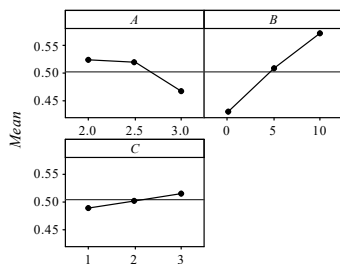
آزمایشات	مقادیر پارامترها											
	جاذب‌های گروه اول			جاذب‌های گروه دوم			جاذب‌های گروه سوم			نتایج		
	وزن (KG)	بیشینه نیرو (KN)	انرژی مخصوص (KJ/KG)	وزن (KG)	بیشینه نیرو (KN)	انرژی مخصوص (KJ/KG)	وزن (KG)	بیشینه نیرو (KN)	انرژی مخصوص (KJ/KG)	ضخامت گروه ۱ و ۲ و ۳	اختلاف شعاع گروه ۲	زاویه راس ۱ و ۳
۱	۰/۷۷۶	۲۹۰	۳۲	۰/۷۷	۲۶۵/۶	۳۴/۰۲	۱/۰۴	۳۰۶/۷	۳۴/۲	۱۹	۱۰	۳
۲	۰/۴۸۵	۱۴۸/۲	۲۱/۶	۰/۴۸۵	۱۴۵/۸	۲۲/۶۱	۰/۵۳	۱۷۶/۹	۲۲/۷	۱۳/۲۵	۵	۲
۳	۰/۵۳۰	۲۰۹	۲۵/۱	۰/۵۳۰	۲۰۹	۲۵/۱	۰/۵۸۱	۲۴۰	۲۹/۳	۷/۵	۰	۲
۴	۰/۶۶۳	۲۶۷/۹	۲۶/۹۷	۰/۶۶۳	۲۶۷/۹	۲۷/۹۷	۰/۷۲۷	۲۸۳/۳	۲۷/۶	۷/۵	۰	۲/۵
۵	۰/۶۳۷	۲۰۰	۲۳/۸	۰/۶۳۷	۲۰۰	۲۳/۸	۰/۵۸۱	۲۳۵	۲۴/۲۶	۷/۵	۰	۲/۵
۶	۰/۵۱۱	۱۴۰/۳	۲۳	۰/۵۰۹	۱۴۱/۲	۲۳	۰/۵۶۲	۱۲۸/۲	۲۳/۵	۱۹	۱۰	۲/۵
۷	۰/۷۸۶	۲۹۳	۳۰/۱۷	۰/۷۷۱	۲۸۶/۵	۳۲/۰۶	۰/۹۷۲	۳۸۰	۳۲/۲	۱۳/۲۵	۵	۳
۸	۰/۴۴۹	۱۱۵/۳	۱۸/۳۸	۰/۴۴۸	۱۲۹/۷	۱۹/۱۸	۰/۳۹۷	۱۱۳/۵	۱۹/۲۴	۱۳/۲۵	۵	۲
۹	۰/۵۰۹	۱۴۵/۳	۱۹/۳	۰/۵۰۹	۱۴۵/۳	۱۹/۳	۰/۴۶۵	۱۵۹/۸	۱۹/۶	۷/۵	۰	۲
۱۰	۰/۶۳۹	۲۲۹	۲۸/۲	۰/۶۴۱	۲۲۸/۷	۲۹/۳۳	۰/۸۹۶	۲۷۰	۳۱/۳۳	۱۹	۱۰	۲/۵
۱۱	۰/۴۶۱	۱۳۳/۷	۲۲/۷۵	۰/۴۶۶	۱۳۷/۸	۲۳/۴	۰/۵۹۸	۱۵۷	۲۳/۵	۱۹	۱۰	۲
۱۲	۰/۵۰۶	۱۹۳	۲۶/۵	۰/۵۱۳	۱۹۴/۱	۲۷/۳	۰/۷۴۶	۲۳۱/۵	۲۷/۵	۱۹	۱۰	۲
۱۳	۰/۷۲۹	۲۴۷/۴	۲۶/۰۹	۰/۷۲۳	۲۴۴	۲۶/۱۵	۰/۷۹۵	۲۸۸/۳	۲۶/۲۱	۱۳/۲۵	۵	۳
۱۴	۰/۵۷۷	۱۸۰/۶	۲۵/۶۷	۰/۵۷۵	۱۸۳/۶	۲۶/۴	۰/۷۴۷	۲۱۷/۱	۲۶/۹۹	۱۹	۱۰	۲/۵

محمدعلی دهقانپور و مسعود عسگری	۲۱/۱۸	۹۳/۸	-.۴۴۹	۳۱/۰۸	۱۲۱/۸	-.۴۰۷	۱۹/۵	۹۸/۸۵	-.۴۰۹	۱	۱۹	۱۰	۳	۱۵
	۲۴/۸۳	۲۰۰	-.۵۹۶	۲۴/۷۱	۲۰۵/۱	-.۶۷۳	۲۳/۴	۱۹۹/۶	-.۶۷۴	۱	۱۳/۲۵	۵	۳	۱۶
	۲۸/۸۱	۲۸۷/۳	-.۸۹۷	۲۸/۷۵	۲۳۱	-.۶۹	۲۷/۳	۲۲۹	-.۶۹۲	۲	۱۹	۱۰	۳	۱۷
	۲۷/۸۶	۱۶۳/۵	-.۶۷۴	۲۷/۷۵	۲۱۴/۷	-.۶۱۱	۲۴/۵	۱۸۱/۵	-.۶۱۴	۱	۱۹	۱۰	۳	۱۸
	۲۵/۴	۲۳۳	-.۶۶۲	۲۵	۱۹۴/۶	-.۶۰۷	۲۴/۵	۱۹۶/۴	-.۶۰۵	۲	۱۳/۲۵	۵	۲/۵	۱۹
	۲۲/۵۱	۱۵۵/۶	-.۴۹۷	۲۲/۴۱	۱۵۵/۱	-.۵۶	۲۲/۳	۱۵۲	-.۵۶۱	۱	۱۳/۲۵	۵	۲/۵	۲۰
	۲۸/۷۲	۲۶۱/۷	-.۶۹۸	۲۵/۴	۲۵۲/۶	-.۷۶۵	۲۵/۴	۲۵۲/۶	-.۷۶۵	۲	۷/۵	۰	۳	۲۱
	۲۱/۶۳	۱۸۰/۶	-.۵۲۳	۲۱/۵۵	۲۱۳/۸	-.۷۳۵	۲۱/۵۵	۲۱۳/۸	-.۷۳۵	۱	۷/۵	۰	۳	۲۲
	۲۶/۵۲	۲۳۷/۸	-.۶۶۲	۲۶/۴	۱۷۳/۸	-.۵۲۲	۲۵/۹	۱۹۹	-.۵۲	۳	۱۳/۲۵	۵	۲	۲۳
	۱۹/۶۳	۱۲۹/۳	-.۴۳۶	۱۹/۹۶	۱۶۹/۵	-.۶۱۲	۱۹/۹۶	۱۶۹/۵	-.۶۱۲	۱	۷/۵	۰	۲/۵	۲۴
	۲۸/۶۲	۳۴۶/۱	-.۸۷۲	۲۸/۷۲	۳۱۲/۲	-.۷۹۶	۲۸/۷۲	۳۱۲/۲	-.۷۹۶	۳	۷/۵	۰	۳	۲۵
	۱۷/۷۱	۱۰۲/۳	-.۳۴۹	۱۷/۵۳	۱۲۸	-.۴۸۹	۱۷/۵۳	۱۲۸	-.۴۸۹	۱	۷/۵	۰	۲	۲۶
	۲۹/۳۹	۳۰۲	-.۸۲۷	۲۹/۳۴	۲۲۹/۶	-.۶۵۲	۲۷/۶	۲۲۵/۸	-.۶۴۹	۳	۱۳/۲۵	۵	۲/۵	۲۷



شکل ۱۷- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه اول

• نتایج آنالیز ANOVA ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو جاذب گروه اول رابطه (۷) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو جاذب اول انرژی می‌باشد. در شکل ۱۸ تاثیر هر فاکتور بر تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه اول مشخص است که با افزایش زاویه راس و تعداد سلول تابع پاسخ افزایش با افزایش ضخامت تابع پاسخ در ابتدا ثابت و در ادامه کاهش می‌یابد.

$$R = -0.05361 + 0.438556 A + 0.010375 B + 0.018932 C - 0.098402 A^2 - 0.000274 B^2 - 0.000214 C^2 + 0.003183 AB - 0.004988 AC - 0.000427 BC \quad (7)$$


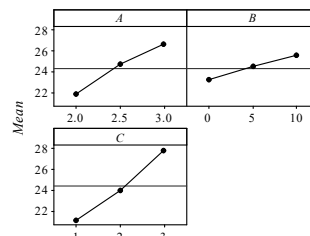
شکل ۱۸- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه اول

• نتایج آنالیز ANOVA برای انرژی مخصوص جاذب گروه دوم رابطه (۸) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم انرژی مخصوص برای گروه دوم جاذب انرژی می‌باشد. همچنین در شکل ۱۹ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه دوم نمایش داده شده است که افزایش انرژی مخصوص با افزایش هر سه پارامتر رابطه مستقیم دارد.

• نتایج آنالیز ANOVA برای انرژی مخصوص جاذب گروه اول

رابطه (۵) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم انرژی مخصوص برای گروه اول جاذب انرژی می‌باشد. در شکل ۱۶ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه اول مشخص است که افزایش انرژی مخصوص با افزایش هر سه پارامتر نسبت مستقیم دارد.

$$E = -3.0414 + 13.8533 A + 0.2067 B + 0.7232 C - 1.8467 A^2 - 0.0047 B^2 + 0.0249 C^2 + 0.0437 AB - 0.0271 AC - 0.0085 BC \quad (5)$$

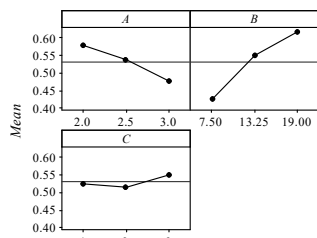


شکل ۱۶- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه اول

• نتایج آنالیز ANOVA برای بیشینه نیرو جاذب گروه اول

رابطه (۶) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم بیشینه نیرو گروه اول جاذب انرژی می‌باشد. در شکل ۱۷ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه اول مشخص است که کاهش بیشینه نیرو با کاهش ضخامت و سلول‌های جاذب نسبت مستقیم و با کاهش زاویه راس لایه داخلی نسبت معکوس دارد.

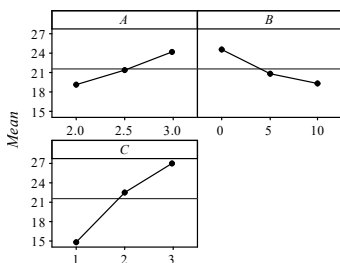
$$F = 31.7457 + 17.1306 A - 1.3801 B + 2.5853 C + 14.7644 A^2 + 0.0470 B^2 + 0.5248 C^2 - 0.7147 AB + 1.7296 AC + 0.0565 BC \quad (6)$$



شکل ۲۱- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه دوم

• نتایج آنالیز ANOVA برای انرژی مخصوص جاذب گروه سوم رابطه (۱۱) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم انرژی مخصوص گروه سوم جاذب انرژی می‌باشد. همچنین در شکل ۲۵ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه سوم نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول و ضخامت انرژی مخصوص افزایش و با افزایش زاویه راس میزان انرژی مخصوص کاهش می‌یابد.

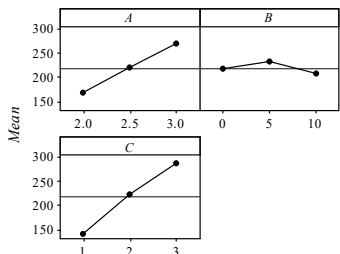
$$E = -0.1 - 0.2933 A - 0.3535 B + 5.9184 C + 0.94 A^2 + 0.049 B^2 - 0.4162 C^2 - 0.1353 AB + 0.3483 AC - 0.0835 BC \quad (11)$$



شکل ۲۲- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه سوم

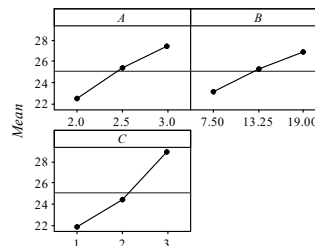
• نتایج آنالیز ANOVA برای بیشینه نیرو جاذب گروه سوم رابطه (۱۲) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم بیشینه نیرو گروه سوم جاذب انرژی می‌باشد. همچنین در شکل ۲۳ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه سوم نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ضخامت و تعداد سلول نیروی بیشینه اولیه کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه راس در ابتدا نیروی بیشینه اولیه افزایش و سپس در ادامه کاهش می‌یابد.

$$F = -144.969 + 72.641 A + 8.973 B + 36.759 C - 0.047 A^2 - 0.824 B^2 - 2.2 C^2 - 0.379 AB + 7.418 AC - 0.205 BC \quad (12)$$



شکل ۲۳- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه سوم

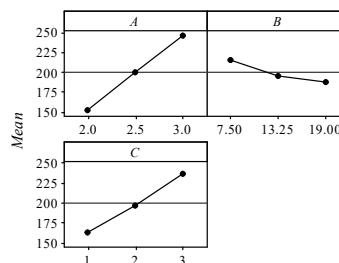
$$E = 0.1857 + 10.0198 A + 0.1265 B + 0.6285 C - 1.5289 A^2 - 0.0095 B^2 + 0.0591 C^2 + 0.2020 AB - 0.0175 AC - 0.0135 BC \quad (8)$$



شکل ۱۹- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع انرژی مخصوص در جاذب‌های گروه دوم

• نتایج آنالیز ANOVA برای نیرو بیشینه جاذب گروه دوم رابطه (۹) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم انرژی مخصوص برای گروه دوم جاذب انرژی می‌باشد. در شکل ۲۰ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه دوم مشخص است که با کاهش ضخامت و تعداد سلول، نیروی بیشینه اولیه کاهش و با افزایش فاصله دو لایه، بیشینه نیرو کاهش می‌یابد.

$$F = -45.099 + 113.305 A - 5.273 B + 5.351 C - 5.462 A^2 + 0.166 B^2 + 0.228 C^2 - 0.048 AB + 2.658 AC - 0.354 BC \quad (9)$$



شکل ۲۰- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه دوم

• نتایج آنالیز ANOVA ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو جاذب گروه دوم

رابطه (۱۰) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو گروه دوم جاذب انرژی می‌باشد. در شکل ۲۱ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه دوم مشخص است که با افزایش فاصله دو لایه و با کاهش ضخامت، تابع پاسخ افزایش و با افزایش تعداد سلول در ابتدا تابع پاسخ تغییر چندانی نمی‌کند اما در ادامه افزایش می‌یابد.

$$R = 0.412638 + 0.006237 A + 0.017687 B + 0.005003 C - 0.032012 A^2 - 0.000724 B^2 + 0.001194 C^2 + 0.006253 AB - 0.007511 AC + 0.000519 BC \quad (10)$$

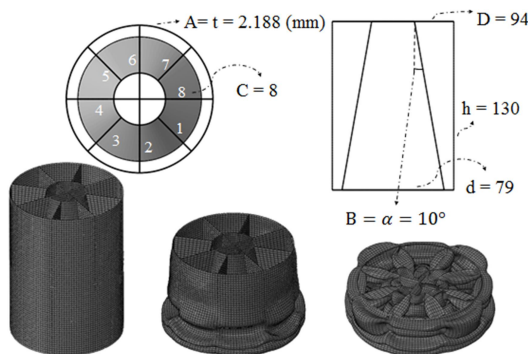


جدول ۱۲- مقادیر بهینه پارامترهای تاثیرگذار در سه گروه جاذب

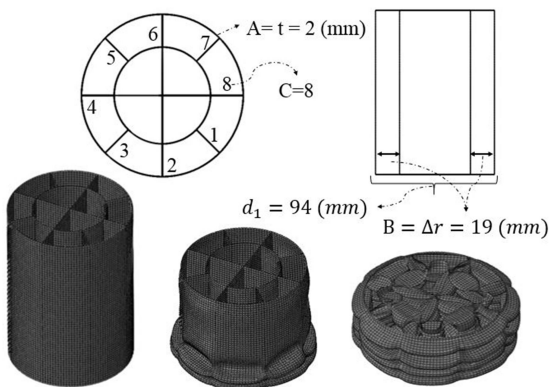
گروه سوم	گروه دوم	گروه اول	واحد	
۲	۲	۲/۱۸۸	mm	ضخامت T
۰	-----	۱۰	Degree	زاویه راس α
-----	۱۹	-----	mm	اختلاف شعاع r
۳	۳	۳	-----	مقطع جاذب S

جدول ۱۳- نتایج مشخصه‌های انرژی و نیرو حاصل از شبیه سازی و آنالیز

در صد خطا	بیشینه نیرو ANOVA [KN]	بیشینه نیرو شبیه سازی [KN]	درصد خطا	انرژی مخصوص ANOVA [KJ/KG]	انرژی مخصوص شبیه سازی [KJ/KG]	نوع اول
۰/۴	۲۰۴/۲	۲۰۵	۰/۳۷	۲۷/۲	۲۷/۱	نوع اول
۳/۴	۲۰۰/۷	۱۹۴/۱	۰/۲۵	۲۷/۲۳	۲۷/۳	نوع دوم
۳/۹	۲۳۰/۵	۲۴۰	۱/۲	۲۸/۹۵	۲۹/۳	نوع سوم



شکل ۲۵- مشخصات ابعادی و رفتار چین خوردگی جاذب بهینه گروه اول

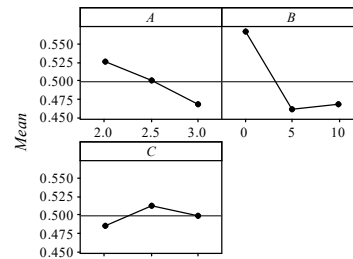


شکل ۲۶- مشخصات ابعادی و رفتار چین خوردگی جاذب بهینه گروه دوم

• نتایج آنالیز ANOVA ترکیب بیشینه نیرو و انرژی مخصوص جاذب گروه سوم

رابطه (۱۳) مدل رگرسیون چند جمله‌ای مرتبه دوم ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو گروه سوم جاذب انرژی می‌باشد. در شکل ۲۴ تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه سوم مشخص است که با افزایش ضخامت، تابع پاسخ کاهش و با افزایش تعداد سلول تابع پاسخ در ابتدا افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه راس در ابتدا تابع پاسخ به شدت کاهش و در ادامه کمی افزایش می‌یابد.

$$R = 0.008896 A - 0.023158 B + 0.055295 C - 0.011812 A^2 + 0.002276 B^2 - 0.005045 C^2 - 0.000825 AB - 0.000776 AC - 0.001878 BC + 0.501843 \quad (13)$$



شکل ۲۴- تاثیر هر فاکتور بر مقدار تابع ترکیب انرژی مخصوص و بیشینه نیرو در جاذب‌های گروه سوم

در جدول ۱۱ درصد اطمینان معادلات بدست آمده از آنالیز ANOVA آورده شده است. مشاهده می‌شود که تمامی درصدها نشان دهنده بالا بودن قابلیت اطمینان روابط ارائه شده از آنالیز ANOVA می‌باشد.

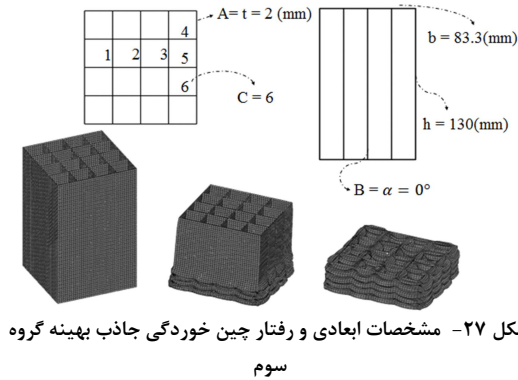
جدول ۱۱- درصد اطمینان روابط بدست آمده از آنالیز ANOVA

درصد اطمینان معادلات	درصد اطمینان معادلات انرژی مخصوص و بیشینه نیرو با الویت برابر	درصد اطمینان معادلات انرژی مخصوص	درصد اطمینان معادلات انرژی مخصوص
۹۸/۱	۹۸/۳۳	۹۸/۳۲	گروه اول
۹۸/۶۱	۹۷/۳۴	۹۷/۱۱	گروه دوم
۹۷/۱۲	۹۷/۰۴	۹۷/۴۱	گروه سوم

۳-۱- بهینه سازی

پس از بدست آوردن روابط انرژی مخصوص و بیشینه نیرو برای هر گروه از جاذب انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نقاط بهینه پارامترهای موثر در روابط ترکیب نیروی بیشینه و انرژی مخصوص، همانطور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود بدست آورده شد. در نهایت در جدول ۱۳ انرژی مخصوص و بیشینه نیرو حاصل از شبیه سازی و رابطه حاصل از آنالیز ANOVA با هم مقایسه و درصد خطا نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲۵ تغییر شکل جاذب بهینه در گروه اول و در شکل ۲۶ تغییر شکل جاذب بهینه در گروه دوم و در شکل ۲۷ تغییر شکل جاذب بهینه در گروه سوم مشخص شده است.

- [4] ElMagd. E, et al., Fracture criteria for automobile crashworthiness simulation of wrought aluminium alloy components, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol 32, No. 9, pp. 712-724, 2001.
- [5] Kim. H. S, Wierzbicki. T, Closed-form solution for crushing response of three-dimensional thin-walled "S" frames with rectangular cross-sections, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 30, No. 1, pp. 87-112, 2004.
- [6] Bardi. F. C, Yun. H. D, Kyriakides. S, On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression, *International Journal of Solids and Structures*, Vol 40, No. 12, pp. 3137-3155, 2003.
- [7] Langseth. M, Hopperstad. O. S, Static and Dynamic Axial Crushing of Square Thin-Walled Aluminum Extrusions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 18, No. 7-8, pp. 949-968, 1996.
- [8] Chen. W, Wierzbicki. T, Relative Merits of Single-Cell, Multi-Cell and Foam-Filled Thin-Walled Structures in Energy Absorption, *Thin-Walled Structures*, Vol 39, No. 4, pp. 287-306, 2001.
- [9] Zhang. X, Cheng. G, A Comparative Study of Energy Absorption Characteristics of Foam-Filled and Multi-Cell Square Columns, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 34, No. 11, pp. 1739-1752, 2007.
- [10] Najafi. A, Rais Rohani. M, Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol 49, No. 1, pp. 1-12, 2011.
- [11] Alavi Nia. A, Parsapour. M, An investigation on the energy absorption characteristics of multi-cell square tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol 68, pp. 26-34, 2013.
- [12] Mamalis. A. G, Manolakos D. E, Saigal. S, Viegelah. G, Johnson. W, Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 28, No. 4, pp. 219-229, 1986.
- [13] Reid. S. R, Reddy. T. Y, Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 28, No. 9, pp. 623-637, 1986.
- [14] Nagel. G. M, Thambiratnam. D. P, A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 46, No. 2, pp. 201-16, 2004.
- [15] Nagel. G. M, Thambiratnam. D. P, Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol 43, No. 8, pp. 1225-1242, 2005.
- [16] Alavi Nia. A, Haddad Hamedani. J, Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries, *Thin-Walled Structures*, Vol 48, No. 12, pp. 946-954, 2010.
- [17] Azimi. M. B, Asgari. M, A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 105, pp. 253-265, 2016.
- [18] Hagh Kashani. M, Shahsavari Alavijeh. H, Akbarshahi. H, Shakeri. M, Bitubular tubes with different arrangements under quasi-static axial compression loading, *Materials and Design*, Vol 51, pp. 1095-1103, 2013.
- [19] Sharifi. S, Shakeri. M, Ebrahimi Fakhari. H, Bodaghi M, Experimental investigation of bitubal circular energy absorbers under quasi-static axial load, *Thin-Walled Structures*, Vol 89, pp. 42-53, 2015.



#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه رفتار جذب انرژی لوله‌های چند جداره و چند سلولی با مقاطع مختلف با استفاده شبیه سازی اجزاء محدود پرداخته شد. ابتدا نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مقایسه شد که حاکی از تطابق قابل قبول بود. سپس با مدل‌سازی طرح‌های مختلف از ترکیب لوله‌های مخروطی و سلول‌بندی نتایج حاصل از چند سلولی کردن جاذبها بررسی شد که گویای افزایش درصد بالای جذب انرژی مخصوص بود. بر اساس نتایج سه طرح مناسب تر انتخاب شده و نتایج حاصل از شبیه سازی این سه جاذب با پارامترهای مختلف استخراج شده و معادلات توابع هدف بر حسب پارامترهای طراحی با استفاده از روش رویه پاسخ از نتایج طراحی آزمایشات به دست آمد. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی معادلات بدست آمده از روش رویه پاسخ، مشخصات جاذب بهینه مشخص و با نتایج شبیه سازی مربوط به آن جاذب صحت‌گذاری شد و به این ترتیب طرح بهینه برای مقاطع مختلف به دست آمده است.

#### ۵- فهرست علائم

E	مدول یانگ (GPa)
r	اختلاف شعاع
S	مقطع جاذب
T	ضخامت (mm)

#### علائم یونانی

$\alpha$	زاویه راس (Degree)
$\theta$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\sigma_y$	تنش تسلیم (MPa)

#### ۶- مراجع

- [1] Alexander. J. M, An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol 13, No. 1, pp. 10-15, 1960
- [2] Wierzbicki. T, Crushing Analysis of Metal Honeycombs, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 1, No. 2, pp. 157-174, 1983
- [3] Abramowicz. W, Jones. N, Dynamic Axial Crushing of Square Tubes, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 2, No. 2, pp. 179-208, 1984.