



بهینه‌سازی جاذب انرژی لانه‌زنبوری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر اساس سطوح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها؛ بخش دوم: فرایند بهینه‌سازی

مریم علیصادقی¹، جمشید فضیلتی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

* تهران، صندوق پستی 14665-834، jfazilati@ari.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 تیر 1394

پذیرش: 16 مهر 1394

ارائه در سایت: 20 آبان 1394

کلید واژگان:

لانه زنبوری

کد المان محدود داینا

جاذب انرژی

سطوح پاسخ

بهینه‌سازی

چکیده

در این تحقیق، مجموعه جاذب انرژی از نوع لانه‌زنبوری با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌است. هدف بهینه‌سازی، جذب تمام یا بخش عمده انرژی حرکتی سازه و هم‌زمان محدودسازی سطح شوک ایجادشده است. ابتدا، مشخصه‌های ضربه‌پذیری و حساسیت رفتاری ساختار لانه‌زنبوری در ضربه به صورت روابط صریح ریاضی استخراج و در ادامه از روابط رفتاری استخراج‌شده جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. جاذب انرژی وظیفه مستهلک کردن انرژی برخورد و کاهش آسیب به سازه و محموله آن را برعهده دارد. بنابراین قابلیت جذب انرژی، هم‌زمان با اعمال محدودیت شوک نیرویی عوامل طراحی تلقی می‌شود. هم‌زمان رعایت قیود حجمی و جرمی مجموعه جاذب از محدودیت‌های طراحی برای استفاده صنعتی است. با استفاده از نتایج بخش نخست مقاله، سطوح پاسخ ساختار لانه‌زنبوری برای تغییر پارامترهای ضربه‌پذیری مانند تنش میانگین و بیشینه استخراج شده‌است. بهینه‌سازی چندهدفه جاذب انرژی با روش الگوریتم ژنتیک و با استفاده از روابط پاسخ انجام شده‌است. در بهینه‌سازی، هدف اصلی کمینه‌سازی جرم و حجم جاذب قرار داده شده است و حداکثر مجاز نیروی بیشینه و انرژی جذب شده به صورت قید در مساله وارد شده است. خصوصیات هندسی لانه‌زنبوری شامل اندازه سلول، ضخامت، ارتفاع و مساحت از متغیرهای طراحی و ظرفیت جذب، حجم و جرم و سطح شوک خروجی بهینه‌سازی هستند. صحت الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از نتایج مراجع ارزیابی شده و مشخصات مجموعه جاذب انرژی برای یک مساله نمونه به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی جرمی و حجمی نتایج مشابهی ارائه می‌کند و کاهش سطح شوک مجاز، ابعاد جاذب بهینه را به سمت افزایش ارتفاع تغییر داده است.

Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment; Part II: Optimization

Maryam Alisadeghi, Jamshid Fazilati*

Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14665-834, Tehran, Iran, jfazilati@ari.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 June 2015
Accepted 08 October 2015
Available Online 11 November 2015

Keywords:

Honeycomb structure
LS-Dyna finite element code
impact attenuator
response surface
optimization

ABSTRACT

In this study, honeycomb energy absorber is optimized using genetic algorithm. The design goal is to absorb whole impact energy within a limited shock load level. First the crashworthiness and parameter sensitivity of honeycomb structure are extracted as explicit functions that are utilized to find optimized shock absorber configuration. Energy absorber must depreciate the impact kinetic energy and mitigate its defects on the structure and aboard. So the energy absorption capacity while the shock load is kept limited is the main design objective. The volume and mass restrictions are also important objectives from an application point of view. Based on the simulation results available in the article Part I, the honeycomb response surfaces of crashworthiness parameters including the mean and peak crushing stresses are extracted. Utilizing the genetic algorithm based on response functions, the multi-objective optimized energy absorber is investigated. The main objective of the optimization problem is set to minimization of mass or volume while the maximum allowable shock and minimum energy absorption capacity are included as the problem constraints. The geometric specifications of honeycomb structure including cell-size, foil thickness, height and absorber face area are among the design variables with optimization outputs of energy absorption capacity, volume, mass, and shock level. Some optimization results are compared with those available in the literature and a typical problem is handled. Results show that mass and volume optimized geometries are almost similar and reduction of acceptable shock level causes the optimized geometry height to rise.

Please cite this article using:

M. Alisadeghi, J. Fazilati, Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment; Part II: Optimization, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 37-45, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

ساختارهای سلولی مانند لانه‌زنبوری‌ها، به دلیل ظرفیت جذب انرژی و نسبت استحکام به وزن و حجم بالا، به‌صورت گسترده به عنوان جاذب انرژی و محافظ، در خودروها و صنعت هوافضا، راه‌آهن و بخش‌های دیگر مهندسی به کار می‌رود. ویژگی هندسی مهم این دست ساختارها، تکرارشوندگی آن‌ها است که رفتار همسان را در نقاط مختلف تضمین می‌کند. در سالیان اخیر به دلیل افزایش نیاز به تامین ایمنی و قابلیت استهلاک انرژی در طی حوادث برخورد وسایل نقلیه، تحقیق بر روی خصوصیات مکانیکی لانه‌زنبوری‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [1]. مقاومت سازه در برابر ضربه و برخورد یکی از ملاحظات بحرانی در کاربردهای مهندسی است. از آن‌جا که غالباً در ضربه و برخورد، بارگذاری به صورت دینامیکی اتفاق می‌افتد، طراحی سازه‌هایی که توانایی مقاومت در برابر ضربه و کاهش اثر ضربه و برخورد را داشته باشند نیازمند دانش دینامیک سازه و فهم خصوصیات و مکانیزم‌های تغییر شکل مواد و اجزا است [2،3]. علاوه بر تمام مزایای این سازه‌ها، وزن سبک آن‌ها باعث می‌شود که این سازه‌ها در کاربردهای هوایی نیز مقبول و مورد استفاده باشد؛ همچنین ماژول جذب ضربه و انرژی، قسمتی مهم از زیرسیستم بازیابی یک کپسول بازگشتی است. به عنوان مثال آپولو 11 نمونه‌ای است که در 4 پایه ماژول ماه‌نشین آن جهت جذب انرژی ناشی از برخورد فرود، لانه‌زنبوری‌های فلزی به کار گرفته شده است [4]. مطالعات گسترده‌ای به منظور شناخت خصوصیات مکانیکی ساختارهای لانه‌زنبوری تحت شرایط بارگذاری مختلف انجام شده است. در سال 2006 زارعی و کروگر، پاسخ دینامیکی فروریزش لوله‌های آلومینیمی را به صورت شبیه‌سازی بررسی کرده است. با کمک روش طراحی آزمایش‌ها و سطوح پاسخ، مساله بهینه‌سازی چندهدفه بهینه‌سازی انرژی جذب شده و انرژی ویژه حل شده است [5]. در سال 2007 هو و همکاران با استفاده از روش سطوح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها بهینه‌سازی ستون‌های جدار نازک شش وجهی را با مقاطع متفاوت و قیود انرژی ویژه تابع هدف و نیروی بهینه ارائه کرده‌اند [6]. در سال 2008 زارعی و کروگر، در تحقیقی ضربه محوری و مورب روی جاذب انرژی لوله‌ای با مقطع مربعی پر شده از لانه‌زنبوری را به صورت تجربی ارائه کردند. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی و با استفاده از سطوح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها، قابلیت جذب انرژی لوله‌ها با مقطع مربع، مستطیل و دایره بهینه شده است [7]. بی و همکاران در سال 2010 مدل‌سازی و بهینه‌سازی ستون‌های شش ضلعی پر شده از فوم را انجام دادند. در تحقیق آن‌ها بهینه‌سازی انرژی ویژه جذب شده در ستون‌های شش وجهی تک سلولی و سه سلولی پر شده از فوم آلومینیمی با در نظر گرفتن هندسه، ضخامت ستون و چگالی فوم بررسی شده است [8]. در تحقیقی توسط لی و همکاران در سال 2011، ساختار لانه‌زنبوری فلزی برای استفاده به عنوان جاذب انرژی یک نمونه ماه‌نشین طراحی و با استفاده از روابط استخراج شده به روش سطوح پاسخ، بهینه‌سازی نسبت به حجم و جرم برای آن انجام شده است [4]. بین و همکاران در سال 2011 بهینه‌سازی جاذب انرژی لانه‌زنبوری با مشخصات سلول مختلف را انجام دادند. در بهینه‌سازی، انرژی ویژه و تنش بهینه به عنوان دو تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده‌اند در حالی که اندازه و ضخامت سلول و زاویه سلول متغیرهای بهینه‌سازی هستند [9]. به‌علاوه، همان محققان در 2011، مشخصات ضربه‌پذیری قوطی‌های چند ضلعی پرشده از لانه‌زنبوری را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود داینا مورد بررسی قرار دادند؛

سپس بهینه‌سازی چند هدفه برای بهینه‌سازی انرژی ویژه جذب شده و کمینه‌سازی نیروی بهینه، انجام گرفته است [10].

در مقاله حاضر با استفاده از نتایج ارائه شده در بخش نخست مقاله، مشخصات جاذب انرژی تعیین و بهینه‌سازی شده است. قابلیت جذب انرژی و هم‌زمان، محدودسازی شوک نیرویی در کنار قیود حجمی یا جرمی سامانه جاذب به عنوان عوامل کلیدی و اهداف طراحی در نظر گرفته شده است. جاذب انرژی از نوع ساختار لانه‌زنبوری آلومینیمی است. با استفاده از سطوح پاسخ استخراج شده بر مبنای نتایج شبیه‌سازی عددی، رفتار لانه‌زنبوری با تغییر پارامترهای ضربه‌پذیری مانند تنش میانگین و بهینه به دست آمده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انجام شده است. با توجه به چند وجهی بودن اهداف بهینه‌سازی، هدف اصلی به صورت کمینه‌سازی جرم یا حجم لانه‌زنبوری با رعایت قید حد بالا برای نیروی بهینه و قید حد پایین برای سطح انرژی جذب شده قرار داده شده است. خصوصیات هندسه پنل لانه‌زنبوری مانند اندازه سلول، ضخامت، ارتفاع و مساحت پنل لانه‌زنبوری متغیرهای طراحی و مجهولات مساله است که برای رسیدن به بهترین پارامترهای کارایی جاذب انرژی بهینه شده است. همچنین فرایند بهینه‌سازی با استفاده از نتایج موجود در مراجع صحت‌آزمایی شده است و نتایج جدیدی بر مبنای یک مساله مطرح شده جدید ارائه شده است.

2- روش حل مساله

در بخش نخست مقاله با استفاده از رویکرد روش طراحی آزمایش‌ها، تعداد نمونه‌های کافی از ساختار لانه‌زنبوری با هندسه مختلف انتخاب و رفتار آن‌ها در برخورد به صورت عددی در کد اجزای محدود داینا شبیه‌سازی و تحلیل شد. در ادامه، تاثیر مشخصات هندسی لانه‌زنبوری بر پارامترهای مختلف نیرویی و تنش بررسی گردید. در این بخش و در ادامه فرایند، با استفاده از نتایج پیش‌گفته و اعمال روش سطوح پاسخ، رفتار ساختار لانه‌زنبوری به شکل تابعی صریح از مشخصات هندسی آن استخراج می‌شود و سپس با پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی جاذب انرژی لانه‌زنبوری انجام می‌شود. در شکل 1 نمودار فرایند بهینه‌سازی جاذب انرژی با استفاده از سطوح پاسخ و طراحی آزمایش‌ها ارائه شده است. در ادامه این بخش مراحل اولیه پیش از عملیات بهینه‌سازی ارائه شده است.

2-1- روش سطوح پاسخ

روش سطوح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که در آن پاسخ مطلوب تحت تاثیر چند متغیر است و هدف بهینه کردن پاسخ است به کار می‌رود. روش سطوح پاسخ اولین بار توسط باکس و ویلسون¹ در سال 1951 معرفی شده است [11]. با این که روش سطوح پاسخ اولیه برای مدل کردن نتایج آزمایش استفاده می‌شد و سپس برای مدل‌سازی شبیه‌سازی‌های عددی به کار گرفته شد، در حال حاضر این روش، روشی مناسب برای بهینه‌سازی بر اساس داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی به شمار می‌رود [4]. طراحی آزمایش‌ها روشی با کارایی بالا برای انتخاب نمونه‌ها در فضای طراحی است تا با انجام تعداد مشخصی آزمایش، اطلاعاتی در مورد رفتار یک فرایند به دست آید به‌گونه‌ای که حداکثر میزان اطلاعات با حداقل تعداد آزمایش حاصل شود. چندین روش طراحی آزمایش در دسترس هستند. از میان این روش‌ها می‌توان به روش

1- Box and Wilson

اجزای محدود سلول از المان پوسته با فرمولاسیون پیش فرض بلیچکو-تسای⁵ و سه نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. شکل 4 نمای مدل عددی و راستای بارگذاری سلول تکرارشونده Y شکل را نمایش می‌دهد. با استفاده از این مدل عددی تحلیل رفتاری تعداد 25 مدل مورد نظر انجام گرفت که نتایج حاصل از آن در بخش نخست مقاله ارائه و مورد تحلیل پارامتری قرار گرفت. با استفاده از نتایج مستخرج از حل عددی، میزان تنش بیشینه و تنش میانگین فروریزش تعیین شده است. تنش بیشینه، حداکثر تنش مشاهده شده در نمودار تنش-کرنش لانه‌زنبوری حین فروریزش است و تنش میانگین با استفاده از رابطه (2) محاسبه شده است.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A} = \frac{\int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d\delta}{A \times \delta} \quad (2)$$

2-3- استخراج سطوح پاسخ

سطوح پاسخ با برازش یک منحنی مناسب بر روی نتایج حاصل از تحلیل یا آزمایش به دست می‌آید. پارامترهای متغیر در این توابع دو پارامتر هندسی ضخامت فویل و اندازه سلول لانه‌زنبوری است. چندجمله‌ای مورد استفاده در این جا به فرم معادله جبری از درجه 4 انتخاب شده است. برای ایجاد سطوح پاسخ با درجه 4 در فضای دو بعدی، حداقل تعداد 5x5، یعنی 25 نمونه لانه‌زنبوری مورد نیاز است که در این جا این تعداد نتایج وجود دارد. استفاده از توابع درجه بالاتر نیازمند نمونه‌های شبیه‌سازی بیشتر و استفاده از چندجمله‌ای‌های با درجه پایین‌تر فاقد دقت کافی است. فرم درجه چهار مرسوم از توابع پایه، از توابعی به شکل روابط (3) استفاده می‌کند که در آن Xn ها نقاط طراحی به دست آمده از آزمایش یا شبیه‌سازی هستند.

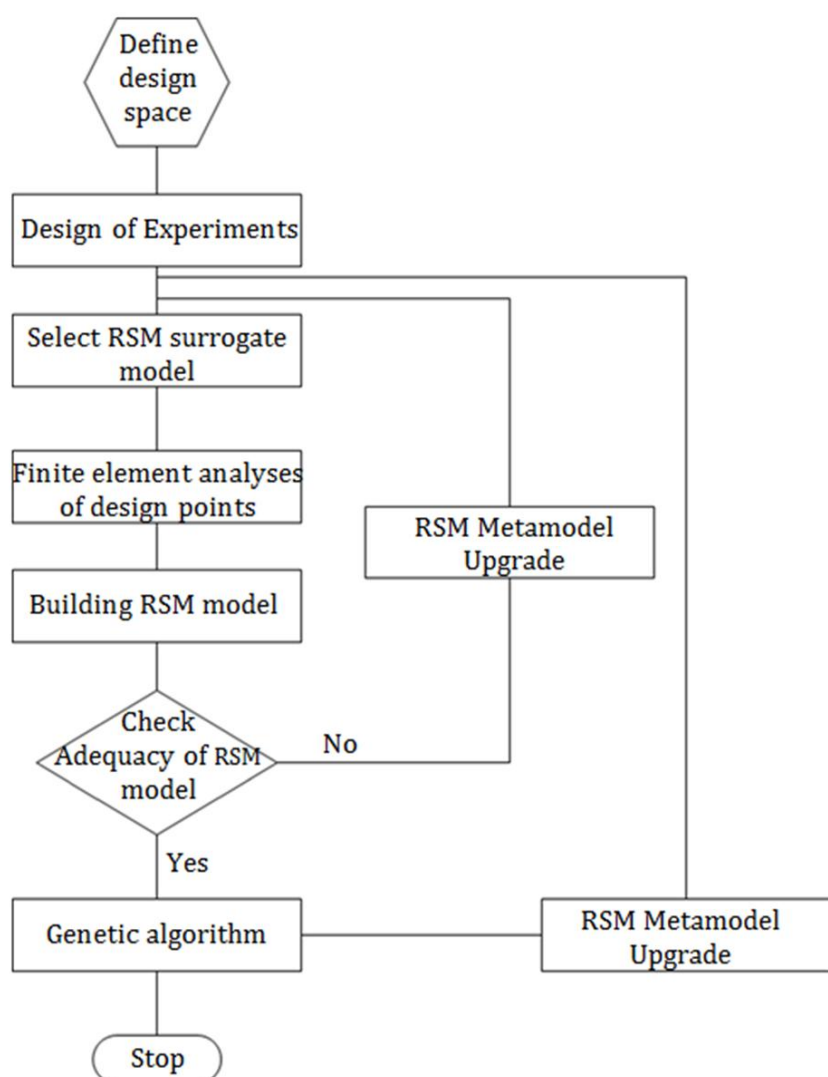


Fig. 1 Flowchart of design and optimization process using response surface method

شکل 1 نمودار فرایند بهینه‌سازی با استفاده از سطوح پاسخ

فاکتوریل کامل اشاره کرد. در روش فاکتوریل کامل، از تعداد r نقطه نمونه که در فواصل مساوی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، استفاده شده است (یک محدوده مکعب n بعدی). در این روش، n تعداد فاکتورها یا متغیرهای مورد بررسی و r تعداد سطوح انتخاب شده برای هر فاکتور یا متغیر است. در این صورت r^n یا داده‌برداری مورد نیاز است. در روش سطوح پاسخ برای ایجاد تقریبی از درجه m حداقل $(m+1)^n$ نقطه طراحی فاکتوریل مورد نیاز است [13,12,9]. در این روش معادلات تجربی پارامترهای مورد بررسی مانند نیروی بیشینه یا انرژی جذب شده ویژه توسط چندجمله‌ای‌های اولیه‌ای به صورت رابطه (1) بیان و تخمین زده می‌شود.

$$y^r(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i \varphi_i(c, t) \quad (1)$$

داده‌های مورد استفاده برای تعیین سطوح پاسخ از حل عددی یا شبیه‌سازی مدل‌های تعیین شده توسط روش طراحی آزمایش‌ها قابل استخراج است. در معادله اخیر n تعداد توابع اولیه $\varphi_i(c, t)$ است که در این جا به صورت تابعی از دو پارامتر هندسی ضخامت فویل و اندازه سلول بیان شده است. بر اساس نتایج حاصل، یک چندجمله‌ای جبری بر روی نتایج تصویر می‌شود.

در تعیین مدل‌ها دو پارامتر متغیر ضخامت فویل و اندازه سلول ساختار لانه‌زنبوری هر کدام در 5 سطح مقداری مطابق با ابعاد نمونه‌های لانه‌زنبوری معرفی شده توسط شرکت هگز-وب¹ انتخاب شده است [14]. بنابراین در مجموع نتایج تحلیلی برای تعداد 25 نقطه داده‌ای در بخش نخست مقاله در دسترس است.

2-2- شبیه‌سازی عددی

با توجه به این که سازه لانه‌زنبوری، ساختاری تکرارشونده دارد، قسمت تکرار شونده ساختار با در نظر گرفتن شرایط مرزی و قیود مناسب در شبیه‌سازی استفاده شده است. این رویکرد بدون تاثیر بر کلیت مساله، تنها شرایط ساختار در مجاورت با لبه را کنار می‌گذارد و به کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت تحلیل کمک می‌کند. الگوی مورد بررسی و شرایط مرزی آن در شکل 2 و شکل 3 ارائه شده است. مدل ماده آلومینیم 5052-H39 با رفتار الاستیک-سخت‌شوندگی خطی² است [15].

شبیه‌سازی عددی در کد اجزای محدود داینا انجام شد و در آن، سلول لانه‌زنبوری بین دو صفحه صلب نزدیک شونده قرار داده شده است. شرایط مرزی گره‌های لبه بالایی سلول، در تمام درجات آزادی جابه‌جایی و چرخش به جز در راستای جابه‌جایی صفحه صلب و گره‌های لبه پایینی سلول در تمام درجات آزادی مقید شده است. مطابق شکل 3 شرایط مرزی متقارن در لبه‌های سلول اعمال شده است. جابه‌جایی در راستای y و چرخش حول محور x و z در دستگاه مختصات محلی، مقید شده است. با بررسی حساسیت به اندازه مش‌ها برای اندازه المان‌های 0.06 تا 0.15 میلی‌متر، برای دقت بالاتر، اندازه المان 0.07 میلی‌متر نتایج به اندازه کافی همگرا شده را ارائه کرده است. برای جلوگیری از فرورفتن دیواره‌های شبکه مدل در خودش و سطوح صلب، به ترتیب تماس از نوع سطح به سطح³ و تماس از نوع گره با سطح⁴ در نظر گرفته شده است. بین کلیه سطوح دارای تماس، ضریب اصطکاک استاتیکی 0.3 و دینامیکی 0.2 فرض شده است. در شبکه‌بندی

1- HexWeb

2- Elastic-linear hardening

3- Automatic single surface contact

4- Automatic nodes to surface contact

5- Belytschko-Tsay formulation

در این ماتریس، M تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی شده است. از طریق دو معادله فوق ضرایب جملات و توابع استفاده شده، استخراج می‌شود [12,4,3]. روش مدل‌سازی و تحلیل و ابعاد نمونه‌های مورد بررسی به همراه نتایج شبیه‌سازی 25 نمونه لانه‌زنبوری در جدول 1 ارائه شده است. در شکل 5 تا شکل 8 سطوح پاسخ مرتبط با تنش میانگین، تنش بیشینه و انرژی ویژه نسبت به جرم و حجم ترسیم شده است.

معادلات (6) تا (9) به ترتیب رابطه جبری تنش بیشینه، تنش میانگین، انرژی ویژه نسبت به جرم و انرژی ویژه نسبت به حجم را با پارامترهای اندازه سلول و ضخامت فویل لانه‌زنبوری بیان می‌کند. در این معادلات c و t به ترتیب نماینده مقادیر اندازه سلول و ضخامت فویل هستند. نسبت انرژی به جرم تخریب شده با افزایش اندازه سلول کاهش و با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. نسبت انرژی به حجم تخریب شده با افزایش اندازه سلول، کاهش و با افزایش ضخامت رفتار افزایشی دارد.

$$\sigma_p = 1.61 - 6.757c + 1275t + 2.392c^2 - 300.1ct - 1.129e4t^2 - 0.3506c^3 + 41.09c^2t + 400.4ct^2 + 1.178e5t^3 + 0.019c^4 - 2.316c^3t + 17.52c^2t^2 - 3570ct^3 - 4.136e5t^4 \quad (6)$$

$$\sigma_m = -6.897 + 5.533c + 346.6t - 1.399c^2 - 230.7ct + 5406t^2 + 0.1769c^3 + 33.58c^2t + 225.8ct^2 - 5.835e4t^3 - 0.009185c^4 - 1.652c^3t - 6.548c^2t^2 - 2903ct^3 + 3.442e5t^4 \quad (7)$$

$$SEA_{cm} = -40.91 + 60.58c + 1442t - 20.68c^2 - 785.9ct + 1.332e4t^2 + 3.263c^3 + 16c^2t + 1.304e4ct^2 - 5.457e5t^3 - 0.192c^4 + 4.273c^3t - 705.7c^2t^2 - 4.262e4ct^3 + 3.442e6t^4 \quad (8)$$

$$SEA_{cv} = -1.096e5 + 1.62e5c + 3.86e6t - 5.54e4c^2 - 2.106e6ct + 3.571e7t^2 + 8745c^3 + 4.286e4c^2t + 3.496e7ct^2 - 1.463e9t^3 - 514.5c^4 + 1.145e4c^3t - 1.891e6c^2t^2 - 1.142e8ct^3 + 9.224e9t^4 \quad (9)$$

2-4- بررسی دقت مدل

برای تعیین دقت مدل تخمینی سطوح پاسخ، پارامترهای آماری تعریف و مقادیر آن‌ها کنترل می‌شود. مقدار R^2 نسبت مجذور مجموع رگرسیون به مجموع مجذورها، و R^2_{adj} برای اصلاح آماری R^2 در حالتی که پارامترهای غیر ضروری به مدل وارد می‌شود به کار گرفته می‌شوند. این پارامترها در معادلات (10) تا (15) به صورت ریاضی تعریف و بیان شده است. در این روابط، y_i نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و $\bar{y}$ میانگین مقادیر y_i هستند. پاسخ‌های به دست آمده از روابط تخمینی سطوح پاسخ است. مقادیر R^2 و R^2_{adj} محاسبه شده، مقداری در محدوده 0 و 1 دارد و هر چه این دو مقدار بزرگ‌تر و به یک نزدیک‌تر و RSME کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقیق‌تر بودن مدل تخمین به دست آمده است [12,10,4,3].

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (10)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{m-1}{m-n} (1 - R^2) \quad (11)$$

مجموع کل مربعات:

$$SST = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (12)$$

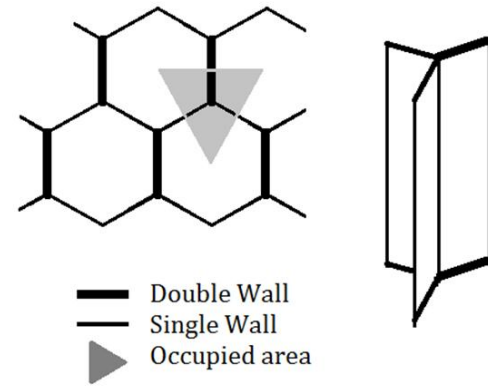


Fig. 2 Honeycomb section structure and repeatable “Y” cross section column element

شکل 2 هندسه مقطع لانه زنبوری و موقعیت الگوی تکرار شونده Y شکل

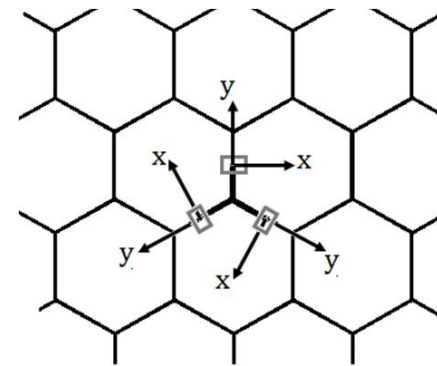


Fig. 3 Symmetric boundary condition

شکل 3 شرایط مرزی متقارن

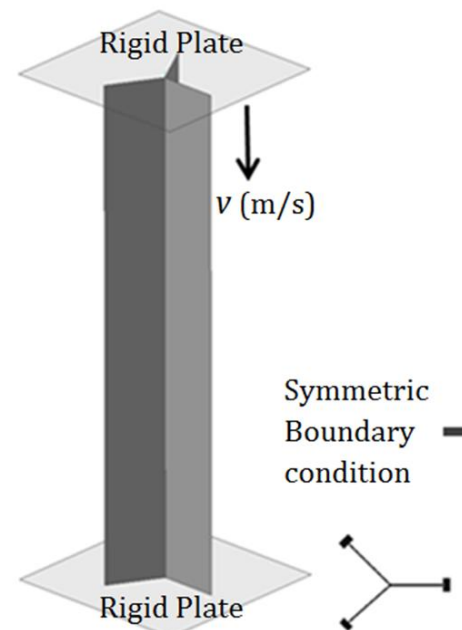


Fig. 4 “Y” column model with loading and constraints

شکل 4 مدل عددی سلول تکرار شونده Y شکل و شرایط بارگذاری آن

$$1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_1^2, x_1x_2, \dots, x_1x_n, \dots, x_n^2, x_1^3, x_1^2x_2, \dots, x_1^2x_n, x_1x_2^2, \dots, x_1x_n^2, \dots, x_n^3, x_1^4, x_1^3x_2, \dots, x_1^3x_n, x_1^2x_2^2, \dots, x_1^2x_n^2, \dots, x_1x_2^3, \dots, x_1x_n^3, \dots, x_n^4 \quad (3)$$

معادله پایه دارای ترم‌های ضربی و کوپل شده است که اثر مثبتی بر روی دقت تقریب دارد. با استفاده از روش حداقل مربعات، ضرایب $b = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ چندجمله‌ای‌ها می‌تواند از معادله (4) به دست آید.

$$b = (\Phi^T \Phi)^{-1} (\Phi^T y) \quad (4)$$

که ماتریس Φ به صورت معادله (5) تعریف شده است.

$$\phi = \begin{bmatrix} \varphi_1(x^{(1)}) & \cdot & \cdot & \cdot & \varphi_n(x^{(1)}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi_1(x^{(M)}) & \cdot & \cdot & \cdot & \varphi_n(x^{(M)}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

جدول 1 نتایج شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف

Table 1 Simulation results for different geometries

σ_m (MPa)	σ_p (MPa)	t (mm)	C (mm)	ردیف
1.7128	7.0309	0.0254	3.175	1
3.1743	10.9758	0.0381	3.175	2
5.3575	14.4168	0.0508	3.175	3
7.6174	17.9242	0.0635	3.175	4
10.5127	21.4866	0.0762	3.175	5
1.1426	5.6154	0.0254	3.9688	6
2.1985	8.8204	0.0381	3.9688	7
3.5830	11.5724	0.0508	3.9688	8
5.4039	14.3537	0.0635	3.9688	9
7.6150	17.1540	0.0762	3.9688	10
0.8498	4.6806	0.0254	4.7625	11
1.6466	7.3595	0.0381	4.7625	12
2.7081	9.6952	0.0508	4.7625	13
3.9746	11.9637	0.0635	4.7625	14
5.6101	14.3056	0.0762	4.7625	15
0.6631	4.0074	0.0254	5.5562	16
1.2725	6.3032	0.0381	5.5562	17
2.1784	8.3335	0.0508	5.5562	18
3.2323	10.293	0.0635	5.5562	19
4.5536	12.3133	0.0762	5.5562	20
0.5455	3.4971	0.0254	6.35	21
1.0568	5.5131	0.0381	6.35	22
1.7776	7.3023	0.0508	6.35	23
2.7792	9.0148	0.0635	6.35	24
3.6662	10.7845	0.0762	6.35	25

مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها:

$$SSE = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (13)$$

خطای ریشه میانگین مربعات:

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{m}} \quad (14)$$

خطای نسبی:

$$RE = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \quad (15)$$

در جدول 2 نتایج حاصل از بررسی دقت معادله‌های حاصل از تقریب با درجات مختلف، برای تنش‌های بیشینه و میانگین ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که چندجمله‌ای‌های با درجه 4 دقت بالاتری از تخمین را ارائه کرده است و پارامترهای معیار آن مقادیر مناسب‌تری دارد. استفاده از تقریب‌های با مرتبه پایین‌تر دقت کمتری به دست می‌دهد. ضمن این که استفاده از تقریب درجه چهار در تخمین تابع تنش بیشینه دقت بالاتری دارد.

2-5- بهینه‌سازی ساختار لانه‌زنبوری

تأثیر ضخامت و اندازه سلول بر رفتار سازه‌های لانه‌زنبوری پیش از این نیز در مراجع مختلف بررسی شده است با این حال کماکان پیدا کردن و انتخاب چیدمان مناسب لانه‌زنبوری به‌گونه‌ای که بهترین عملکرد را در جذب انرژی داشته باشد و هم‌زمان کمترین شوک نیرویی را به جرم متحرک اعمال نماید، موضوعی مهم و قابل توجه است. دلیل این امر تقابل سطح شوک و میزان جذب انرژی با قیود حجمی و جرمی مساله است. حل این تقابل و استخراج پارامترهای قابل قبول مساله طی فرایندی تکراری با عنوان کلی بهینه‌سازی یا بنا بر تعریفی بهینه‌یابی قابل انجام است.

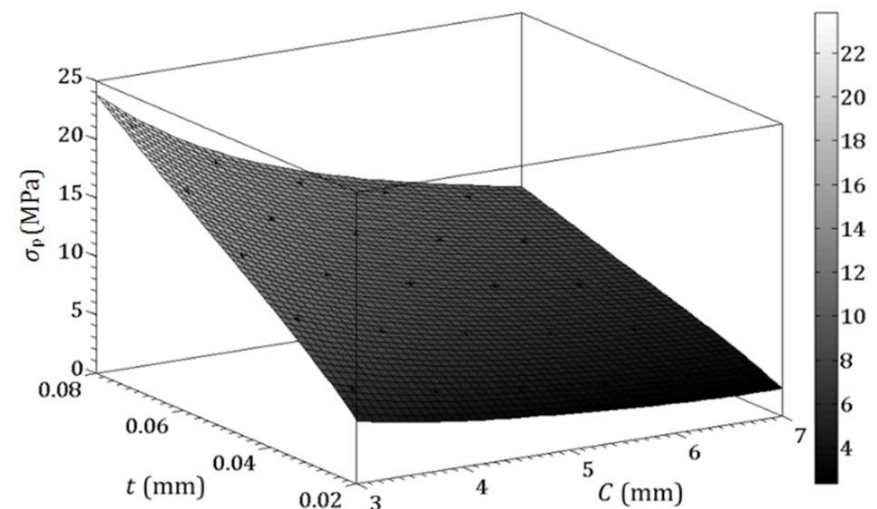


Fig. 5 Response surface for peak stress

شکل 5 سطوح پاسخ برای تنش پیک

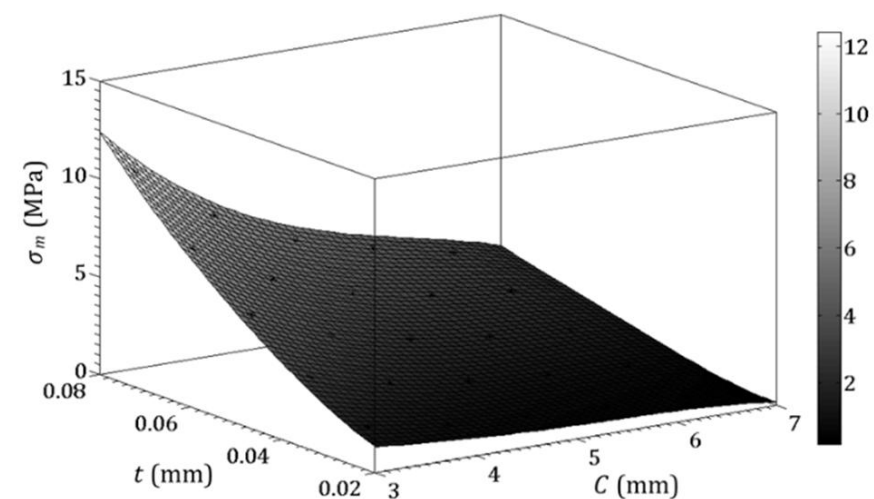
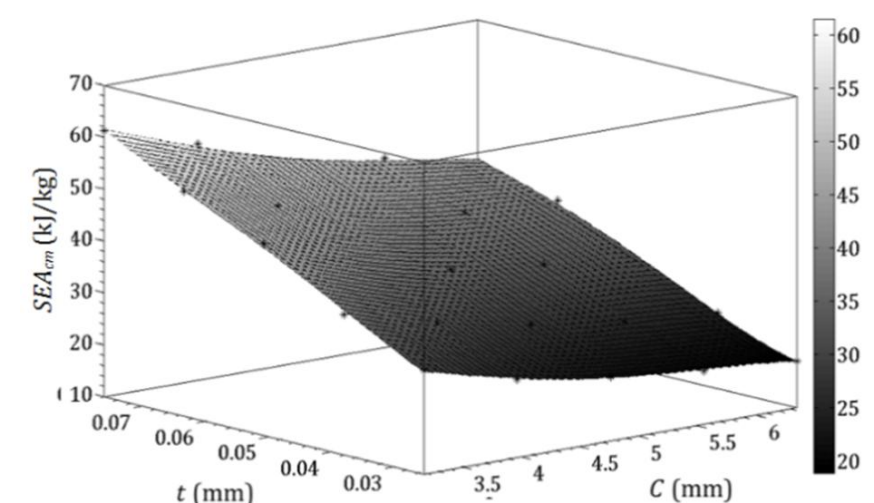
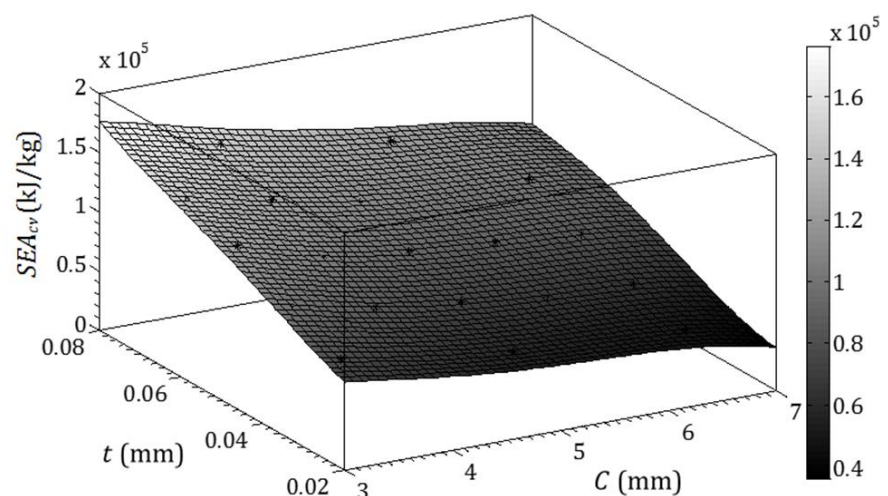


Fig. 6 Response surface for mean stress

شکل 6 سطوح پاسخ برای تنش میانگین

Fig. 7 Response surface for SEA_{cm}

شکل 7 سطوح پاسخ برای نسبت انرژی جذب شده به جرم تخریب شده

Fig. 8 Response surface for SEA_{cv}

شکل 8 سطوح پاسخ برای نسبت انرژی جذب شده به حجم تخریب شده

جدول 2 بررسی دقت چندجمله‌ای‌های تخمین سطوح پاسخ

تابع تقریب	R^2	R^2_{adj}	RSME	RE %
درجه 1	0.9469	0.9421	1.102	[-22.5593,54.2441]
درجه 2	0.9976	0.997	0.2507	[-10.0628,5.8281]
درجه 3	0.9999	0.9998	0.05656	[-1.7033,1.5453]
درجه 4	1	1	0.02061	[-0.2571,0.3241]
درجه 1	0.8817	0.871	0.899	[-45.3254,305.7322]
درجه 2	0.9924	0.9904	0.2455	[-79.5059,35.7174]
درجه 3	0.9995	0.9993	0.0672	[-10.1237,9.3055]
درجه 4	0.9997	0.9993	0.0669	[-4.7980,3.9299]

با استفاده از روش سطوح پاسخ، اثر ضخامت فویل و اندازه سلول ساختار لانه‌زنبوری بر روی قابلیت‌های جذب انرژی به صورت روابط ریاضی صریح استخراج و بیان شد. این شکل از بیان اثرات پارامترها در کاهش حجم محاسبات و حجم داده در فرایند بهینه‌سازی بسیار کمک‌کننده است. از این روابط در فرایند بهینه‌یابی برای استخراج بهترین مشخصات هندسی لانه‌زنبوری جهت رعایت قیود طراحی استفاده می‌شود.

به صورت عمومی یک مساله بهینه‌سازی به صورت یک معادله ریاضی مشابه با رابطه (16) قابل بیان است [17,16].

$$\begin{cases} \text{optimize} & F(x) = F(f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x)) \\ \text{s.t.} & x \in R^n \text{ and } X^L \leq X \leq X^U \\ & g_u(x) \geq 0, u = 1, \dots, s \\ & h_v(x) = 0, v = 1, \dots, p < n \end{cases} \quad (16)$$

در این رابطه، n تعداد ابعاد مساله، q تعداد توابع هدف برای بهینه‌سازی؛ s, p به ترتیب تعداد قیود از نوع برابری و از نوع نابرابری هستند. روش‌ها و رویکردهای متنوعی برای حل مساله بهینه‌سازی وجود دارد که بسته به نوع مساله و مقید و یا غیر مقید بودن آن و یا تعداد تابع هدف می‌تواند به کار گرفته شود. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی است که بر اساس سیر تکاملی در علم زیست‌شناسی پایه‌گذاری شده است. در این روش، در گام اول، یک جمعیت تصادفی در محدوده متغیرهای طراحی تولید می‌شود و در گام بعدی، جمعیت جدید با استفاده از افراد جمعیت قبلی به‌گونه‌ای ایجاد می‌شود که پاسخ‌ها به سمت پاسخ بهینه نزدیک شود. برای مسایلی که ضربه‌پذیری را بررسی می‌کنند، تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی به شدت غیرخطی است و برخلاف سایر روش‌های استاندارد بهینه‌سازی، نشان داده شده است که استفاده از الگوریتم ژنتیک دارای دقت کافی برای حل مساله هست [16].

مساله بهینه‌یابی مورد بررسی شامل انتخاب مشخصه‌های یک جاذب انرژی از نوع ساختار لانه‌زنبوری برای جذب و تخفیف اثرات برخورد یک کپسول فضایی بازگشتی مفروض است. مطابق با جدول 3 فرض شده است که سازه بازگشتی نوعی در لحظات پیش از برخورد دارای جرم 1000 کیلوگرم و سرعت 10 متر بر ثانیه معادل با انرژی حرکتی 50 کیلوژول باشد. همچنین برخورد با سطح خاک که صلب فرض می‌شود صورت می‌گیرد. از بخش جاذب انرژی دو کارکرد اصلی مورد انتظار است. نخست این که بتواند بخش عمده یا تمام انرژی حرکتی کپسول بازگشتی را با فروریزش درونی مستهلک کند. دوم این که در حین فروریزش نیروی وارد شده به کپسول و محموله آن از سطح مشخصی که می‌تواند با توجه به سطح شوک قابل تحمل برای انسان، محموله

جدول 3 شرایط طراحی برای جرم بازگشتی نمونه

پارامتر	اندازه
جرم فرود	1000 کیلوگرم
سرعت برخورد	10 متر بر ثانیه
حداکثر طول جذب	25 سانتی‌متر
سطح شتاب مجاز برخورد	45g

زیستی یا زیربخش‌های سازه تعریف شود تجاوز نکند.

علاوه بر این قیود طراحی این سامانه جاذب به صورت محدودیت حجمی جاذب (محدودیت طول جذب انرژی) و یا محدودیت جرمی آن قابل تعریف است. در طراحی سازه‌های جاذب انرژی، به خصوص در سازه‌های هوافضایی، یکی از مهم‌ترین خصوصیات برای هر زیرسیستم از جمله برای جاذب انرژی، حداقل بودن جرم و حجم آن است. مساله بهینه‌سازی مورد بررسی، تعیین ساختار لانه‌زنبوری با هدف اصلی کمینه‌سازی حجم و جرم جاذب انرژی است. دو هدف دیگر مساله شامل محدود بودن شتاب کاهنده به سطح 45g و برابر بودن انرژی جذب شده توسط ساختار طراحی شده با مجموع انرژی جنبشی جرم متحرک به میزان 50 کیلوژول به صورت قیود مساله اضافه شده است. اندازه سلول، ضخامت فویل، ارتفاع و سطح مقطع مورد نیاز پنل لانه‌زنبوری مورد استفاده به عنوان جاذب انرژی، متغیرهای مساله هستند. حل مساله بهینه‌سازی با استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب انجام شده است. معادلات مستخرج از روش سطوح پاسخ به صورت تابع هدف و یا تابع قید در الگوریتم بهینه‌یاب مورد استفاده قرار گرفته است.

2-6- صحت سنجی الگوریتم بهینه‌سازی

برای بررسی درستی کارکرد فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مساله بهینه‌سازی نیروی بیشینه فروریزش یک ستون جدارنازک به طول 400 میلی‌متر با مقطع شش ضلعی در برخورد با سطح صلب در سرعت 10 متر بر ثانیه و دارای یک جرم 500 کیلوگرمی در انتها بررسی شده است. روابط مربوط به سطوح پاسخ ظرفیت ویژه جذب انرژی و نیروی فروریزش بیشینه نسبت به مختصات هندسی ستون شامل ضخامت دیواره و طول ضلع بر اساس شبیه‌سازی عددی در مرجع [6] ارائه شده است.

دو مساله بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی ظرفیت ویژه جذب یکی بدون قید و دیگری در حضور قید سطح بالا برای نیروی بیشینه فروریزش حل شده است. این دو مساله در روابط (17) و (18) بیان شده است.

$$\begin{aligned} \text{minimize: } y &= -SEA(t, l); \\ 1.4 \text{ mm} &\leq t \leq 3 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} &\leq l \leq 60 \text{ mm} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{minimize: } y &= -SEA(t, l); \\ \text{Max } F(t, l) &\leq 70 \text{ kN} \\ 1.4 \text{ mm} &\leq t \leq 3 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} &\leq l \leq 60 \text{ mm} \end{aligned} \quad (18)$$

دو مساله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با تعداد جمعیت اولیه 50 حل شده است. برای مساله اول نتیجه بهینه مشخصات با اندازه $l=30$ و $t=3$ به دست آمده است که مطابق با نتیجه ارائه شده توسط مرجع [6] است. مقدار ظرفیت ویژه جذب انرژی 12.61 کیلوژول به کیلوگرم حاصل شده است.

برای مساله دوم نقطه بهینه با مشخصات $l=30$ و $t=2.29$ با مقدار SEA برابر 12.05 و نیروی بیشینه 69.9 به دست آمد که مطابقت بسیار خوبی با

نتیجه ارائه شده در [6] دارد؛ بنابراین صحت محاسبات الگوریتم بهینه‌سازی قابل تایید است.

3- نتایج مساله بهینه‌سازی

صورت مساله بهینه‌سازی برای پیدا کردن کمینه حجم ممکن به شکل مجموعه معادلات (19) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{تابع کمینه‌سازی هدف:} & \text{minimize: } V = A \times h \\ \text{قید نابرابری بیشینه شتاب کاهنده:} & F_p = \sigma_p \times A \leq 450 \text{ kN} \\ \text{برابری جذب کامل انرژی:} & E = \sigma_m \times A \times h = 50 \text{ kJ} \\ \text{محدوده متغیرهای طراحی:} & 0.0254 \text{ mm} \leq t \leq 0.0762 \text{ mm} \\ & 3.175 \text{ mm} \leq c \leq 6.35 \text{ mm} \\ & 0.01 \text{ m}^2 \leq A \leq 0.8 \text{ m}^2 \\ & 20 \text{ mm} \leq h \leq 250 \text{ mm} \end{aligned} \quad (19)$$

الگوریتم ژنتیک با تعداد جمعیت اولیه 50 استفاده شده است و نتایج مساله کمینه‌سازی حجم جاذب در حضور قیود انرژی و نیروی بیشینه در جدول 4 و جدول 5 ارائه شده است. پاسخ نهایی بهینه‌سازی از میان ابعاد قابل انتخاب، پنل لانه‌زنبوری با اندازه سلول 3.175 و ضخامت 0.0762 میلی‌متر و در ابعاد کلی مکعب مستطیلی با سطح مقطع 0.020 متر مربع و ارتفاع 0.234 متر حاصل شده است. جرم پنل جاذب در مجموع 814 گرم و انرژی قابل جذب آن 50 کیلوژول خواهد بود. بر اساس جرم سازه، بیشینه شتاب برخورد حدود 44g ایجاد شده است. در شکل 9 نمودار مقدار تابع برازندگی (در این مساله معادل با تابع هدف، یعنی تابع حجم است) و تعداد نسل تولید شده در حین اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ترسیم شده است.

جدول 4 هندسه ساختار جاذب حاصل از انجام بهینه‌سازی حجمی

Table 4 Honeycomb absorber design geometry specifications obtained from volume optimization

اندازه سلول (mm)	ضخامت (mm)	سطح مقطع (m ²)	ارتفاع (m)
3.1750002	0.07619	0.020303	0.2337

جدول 5 مشخصات رفتاری جاذب انرژی حاصل از انجام بهینه‌سازی حجمی

Table 5 Honeycomb absorber design behavior characteristics obtained from volume optimization

پارامتر	مقدار
نیروی بیشینه (kN)	435.657
نیروی میانگین (kN)	213.924
انرژی جذب شده (kJ)	50.000
حجم کل (m ³)	0.004745
جرم کل (kg)	0.814

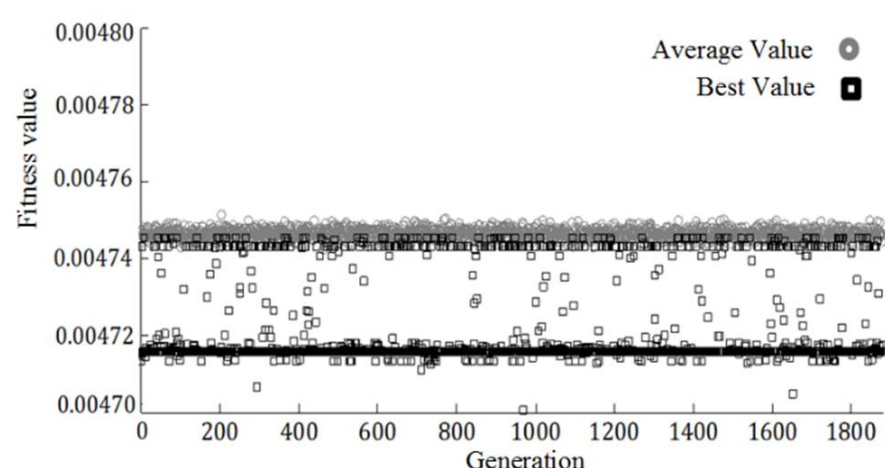


Fig. 9 Volume function Fitness value-generation curve

شکل 9 نمودار مقدار تابع برازندگی حجم با پیشروی نسل در بهینه‌سازی

مساله بهینه‌سازی برای هدف کمینه‌سازی جرم نیز انجام شده است. در مساله بهینه‌سازی جرم، تابع هدف عبارت است از کمینه بودن جرم ساختار لانه‌زنبوری که این پارامتر به صورت حاصل ضرب چگالی لانه‌زنبوری در حجم کل ساختار قابل محاسبه است. چگالی لانه‌زنبوری بر حسب اندازه سلول (c)، با استفاده از رابطه‌ای که در مرجع [18] بر حسب اندازه وجه سلول لانه‌زنبوری بیان شده است، به شکل رابطه (20) قابل ارائه است.

$$HD = \frac{1.54 t \rho}{\frac{c}{2 \sin 60}} \quad (20)$$

در این رابطه، ρ چگالی فلز سازنده لانه‌زنبوری (آلومینیم در این جا) و c اندازه سلول آن است. مساله بهینه‌سازی جرم به صورت معادله (21) نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{تابع هدف:} & \text{minimize: } m = HD \times V \\ \text{قید نابرابری:} & \text{s. t.: } F_p = \sigma_p \times A \leq 450 \text{ kN} \\ \text{قید برابری:} & E = \sigma_m \times A \times h = 50 \text{ kJ} \\ \text{محدوده متغیرها:} & 0.0254 \text{ mm} \leq t \leq 0.0762 \text{ mm} \\ & 3.175 \text{ mm} \leq c \leq 6.35 \text{ mm} \\ & 0.01 \text{ m}^2 \leq A \leq 0.8 \text{ m}^2 \\ & 20 \text{ mm} \leq h \leq 250 \text{ mm} \end{aligned} \quad (21)$$

با تعداد جمعیت 50 نفر مساله بهینه‌سازی جرم حل شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی بر اساس قید جرمی برای نمونه منتخب در جدول 6 و جدول 7 ارائه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که بهینه‌سازی جرمی نسبت به بهینه‌سازی بر مبنای حجم سطح مقطع بیشتر و در عین حال ارتفاع کمی کمتر را توصیه کرده است. با این حال و در مجموع می‌توان گفت، نتیجه فرایند بهینه‌سازی برای حجم با بهینه‌سازی برای جرم تفاوت بسیار کمی نشان داده و پاسخ مساله بهینه‌سازی بر اساس جرم و حجم یکسان است. این مشابهت به ویژه با عنایت به این که تابع جرمی نسبت به تابع حجمی مرتبه بالاتری از تابعیت به ضخامت و طول سلول را دارد، موضوعی جالب توجه خواهد بود.

به منظور بررسی اثر تغییر قیود مساله، مساله بهینه‌یابی برای سه سطح شوک مجاز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در این حل، بهینه‌یابی بر اساس کمینه‌سازی حجم و با تغییر در قیود نابرابری رابطه (19) انجام گرفته است. به عبارت دیگر مساله در حالتی مورد تحلیل قرار داده شده است که سطح شوک قابل تحمل سازه و محموله 40، 45 و یا 50 برابر شتاب جاذبه در نظر گرفته شود. مسایل بهینه‌سازی با شرایط مشابه اما با این تفاوت که ارتفاع مجاز برای پنل لانه‌زنبوری 30 سانتی‌متر باشد در نظر گرفته شده است. جدول 8 و جدول 9 به ترتیب مقایسه پاسخ حاصل از سه مساله بهینه‌یابی را ارائه نموده است. بر این اساس بهینه‌یابی برای هر سه مورد یک مشخصه هندسی با ضخامت فویل و اندازه سلول یکسان را پیشنهاد کرده است. با کاهش سطح شوک مجاز، سطح مقطع پیشنهادی کمتر شده است و در عوض ارتفاع لانه‌زنبوری مورد نیاز بیشتر شده است تا سطح نیروی وارد به سازه کاهش یابد. با این حال حجم و جرم کل لانه‌زنبوری در سه مساله یکسان حاصل شده است. در شکل 10 هندسه لانه‌زنبوری به دست آمده از بهینه‌سازی برای هر سه سطح شوک ترسیم شده است. همچنین در جدول 9 زمان توقف سازه نیز معرفی شده است. این پارامتر عبارت از زمانی است که کل انرژی حرکتی سازه مستهلک می‌شود.

روابط محاسبه زمان توقف در معادله‌های (22) تا (25) ارائه شده است.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (22)$$

4- جمع‌بندی

در این مقاله، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل اجزای محدود صریح، سطوح پاسخ برای پارامترهای ضربه‌پذیری سازه شامل تنش میانگین و بیشینه استخراج شد. جاذب انرژی از نوع ساختار لانه‌زنبوری برای جذب انرژی ناشی از برخورد استفاده شده و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب، بهینه‌سازی بر اساس توابع هدف حجمی و جرمی جاذب انرژی صورت پذیرفته است. سایر اهداف بهینه‌سازی شامل محدودیت سطح شوک و نیروها و نیز استهلاک انرژی به صورت قیود مساوی و نامساوی اعمال شده است. در بهینه‌سازی معادلات حاصل از سطوح پاسخ به صورت تابع هدف و قیود در الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است. سطوح پاسخ ویژه استخراج شده برای ساختارهای در دسترس از لانه‌زنبوری حاصل شده است که با توابع ارائه شده در سایر مراجع متفاوت بوده است. در بخش نتایج نشان داده شد که الگوریتم بهینه‌سازی کارایی و صحت لازم را دارا است. سپس برای یک مساله برخورد جدید بهینه‌سازی انجام شده است. بهینه‌سازی با کمینه‌سازی تابع حجم با کمینه‌سازی تابع جرمی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد این دو بهینه‌سازی علیرغم تفاوت در تابع برازش، به یک پاسخ یکسان منتهی شده است که به معنای هم‌ارزی بهینه‌سازی جرمی و بهینه‌سازی حجمی برای ساختار جاذب لانه‌زنبوری است. بررسی تاثیر تغییرات قیود اعمالی بر نتیجه بهینه‌سازی نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار لانه‌زنبوری قابلیت استفاده به عنوان جاذب انرژی و کاهنده شوک در مساله طرح شده را دارا است. به علاوه با تغییر قید مساله و کاهش سطح شوک مجاز برخورد، ابعاد جاذب انرژی به سمت بیشتر شدن ارتفاع در حجم ثابت تغییر کرده است که این تغییر به افزایش زمان توقف نیز منتهی می‌شود.

5- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
a	شتاب (m/s^2)
C	اندازه سلول (m)
E	انرژی (J)
F	نیرو (N)
h	ارتفاع (m)
L	طول (m)
l	اندازه یک ضلع شش ضلعی (m)
m	جرم (kg)
T	ضخامت (m)
t	زمان (s)
v	سرعت (ms^{-1})
V	حجم (m^3)

علائم یونانی

σ	تنش (Pa)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

avg	میانگین
m	میانگین
p	بیشینه

$$F_{avg} = \frac{E}{h} \quad (23)$$

$$a = \frac{F_{avg}}{m} \quad (24)$$

$$t = \frac{(-v + \sqrt{v^2 + 2ah})}{a} \quad (25)$$

هر چه سطح شتاب مجاز کمتر شود، طراحی به سمتی متمایل می‌شود که زمان توقف بالاتری را سبب می‌شود. به عبارت دیگر نیروی کمتر در مدت زمان بیشتر اعمال می‌شود.

جدول 6 هندسه ساختار جاذب حاصل از انجام بهینه‌سازی جرم

Table 6 Honeycomb absorber design geometry specifications obtained from mass optimization

اندازه سلول (mm)	ضخامت (mm)	سطح مقطع (m^2)	ارتفاع (m)
3.175002	0.07620	0.0203162	0.2336

جدول 7 مشخصات رفتاری جاذب انرژی حاصل از انجام بهینه‌سازی جرم

Table 7 Honeycomb absorber design behavior characteristics obtained from mass optimization

پارامتر	مقدار
نیروی بیشینه (kN)	435.932
نیروی میانگین (kN)	214.059
انرژی جذب شده (kJ)	50.000
حجم کل (m^3)	0.004745
جرم کل (kg)	0.814

جدول 8 هندسه ساختار جاذب حاصل از انجام بهینه‌سازی

Table 8 The optimized honeycomb absorber design geometry specifications

سطح شتاب مجاز	اندازه سلول (mm)	ضخامت فویل (mm)	سطح مقطع (m^2)	ارتفاع (m)
40g	3.175	0.07620	0.016365	0.290
45g	3.175	0.07619	0.020303	0.234
50g	3.175	0.07620	0.021851	0.217

جدول 9 مشخصات رفتاری جاذب انرژی حاصل از انجام بهینه‌سازی

Table 9 The optimized honeycomb absorber design behavior characteristics in impact

پارامتر	40g	45g	50g
نیروی بیشینه (kN)	351.153	435.657	468.855
نیروی میانگین (kN)	172.429	213.924	230.225
انرژی جذب شده (kJ)	50.000	50.000	50.000
حجم کل (m^3)	0.004745	0.004745	0.004745
جرم کل (kg)	0.814	0.814	0.814
زمان توقف (s)	0.0240	0.0194	0.0180

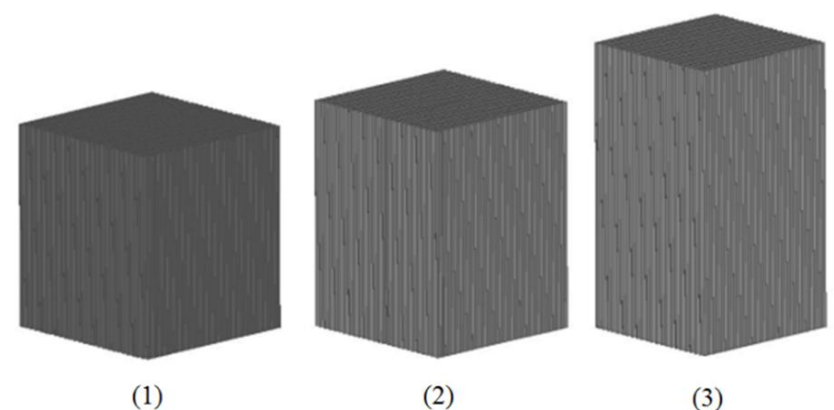


Fig. 10 Optimized honeycomb geometries for three shock level

1) 40g 2) 45g 3) 50g

شکل 10 هندسه بهینه برای سه سطح شوک. 1) 40g 2) 45g 3) 50g

6- مراجع

- structures under axial dynamic loading, *International Journal of Computational Methods*, Vol. 8, No. 4, pp. 863–877, 2011.
- [10] H. Yin, G. Wen, S. Hou, and K. Chen, Crushing analysis and multi objective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 8–9, pp. 4449–4460, 2011.
- [11] G. E. P. Box and K. B. Wilson, On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, Vol. 13, No. 1, pp. 1–45, 1951.
- [12] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang, and W. Li, Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 43, No. 6–7, pp. 555–565, 2007.
- [13] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. Seventh Edition, pp. 180–242, New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [14] *Technology Brochures: Honeycomb Attributes and Properties*, Accessed 20 June 2015; www.hexcel.com/Resources.
- [15] F. Zhu, L. Zhao, G. Lu, and E. Gad, A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels, *International Journal Impact Engineering*, Vol. 36, No. 5, pp. 687–699, 2009.
- [16] M. Shakeri, R. Mirzaeifar, and S. Salehghaffari, New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes under axial impact load, *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, No. 8, pp. 869–885, 2007.
- [17] S. Hou, X. Han, G. Sun, S. Long, W. Li, X. Yang, and Q. Li, Multiobjective optimization for tapered circular tubes, *Thin Walled Structures*, Vol. 49, No. 7, pp. 855–863, 2011.
- [18] T. Bitzer, *Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, First Edition, pp. 20–22, Usa: Chapman and Hall, 1997.
- [1] S. Xu, J. Beynon, D. Ruan, and T. Yu, Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 47, pp. 1–13, 2012.
- [2] G. Petrone, S. Rao, S. De Rosa, B. R. Mace, F. Franco, and D. Bhattacharyya, Behaviour of fibre-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading, *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 356–362, 2013.
- [3] M. Li, Z. Deng, H. Guo, R. Liu, and B. Ding, Optimizing crashworthiness design of square honeycomb structure, *Journal of Central South University*, Vol. 21, pp. 912–919, 2014.
- [4] M. Li, Z. Deng, R. Liu, and H. Guo, Crashworthiness design optimization of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 16, No. 4, pp. 411–419, 2011.
- [5] H. R. Zarei and M. Kröger, Multiobjective crashworthiness optimization of circular aluminum tubes, *Thin Walled Structures*, Vol. 44, No. 3, pp. 301–308, 2006.
- [6] S. Hou, Q. Li, S. Long, X. Yang, and W. Li, Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 43, No. 6–7, pp. 555–565, 2007.
- [7] H. Zarei and M. Kröger, Optimum honeycomb filled crash absorber design, *Materials and Design*, Vol. 29, No. 1, pp. 193–204, 2008.
- [8] J. Bi, H. Fang, Q. Wang, and X. Ren, Modeling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 46, No. 9, pp. 698–709, 2010.
- [9] H. Yin, G. Wen, and N. Gan, Crashworthiness design for honeycomb