

ماهنامه علمى پژوهشى

دسی مکانیک مدر س





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

مريم عليصادقى<sup>1</sup>، جمشيد فضيلتى<sup>2\*</sup>

1 - كارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران
 2 - استادیار، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران
 3 تهران، صندوق پستی 834-865 ffazilati@ari.ac.ir

در این تحقیق، مجموعه جاذب انرژی از نوع لانهزنبوری با پیادهسازی الگوریتم ژنتیک بهینهسازی شدهاست. هدف بهینهسازی، جذب تمام یا 139 139	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 07 تیر 94 پذیرش: 16 مهر 4'
آبان 1394 آبان 1394 جاذب انرژی وظیفه مستهلککردن انرژی برخورد و کاهش آسیب به سازه و محموله آن را برعهده دارد. بنابراین قابلیت جذب انرژی، همزمان با	ارانه در سایت. <u>۲۷۵</u> کلید واژگان:
اعمال محدودیت شوک نیرویی عوامل طراحی تلقی میشود. همزمان رعایت قیود حجمی و جرمی مجموعه جاذب از محدودیتهای طراحی <sup>نا</sup> 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 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	لانه زنبوری کد المان محدود دای جاذب انرژی سطوح پاسخ بهینهسازی

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

# Maryam Alisadeghi, Jamshid Fazilati<sup>\*</sup>

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

#### 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.

LS-Dyna finite element code impact attenuator response surface optimization

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

lares.ac.ir on 2024-04-28]

ساختارهای سلولی مانند لانهزنبوریها، به دلیل ظرفیت جذب انرژی و نسبت استحکام به وزن و حجم بالا، به صورت گسترده به عنوان جاذب انرژی و محافظ، در خودروها و صنعت هوافضا، راهآهن و بخشهای دیگر مهندسی به کار می رود. ویژگی هندسی مهم این دست ساختارها، تکرار شوندگی آن ها است که رفتار همسان را در نقاط مختلف تضمین می کند. در سالیان اخیر به دلیل افزایش نیاز به تامین ایمنی و قابلیت استهلاک انـرژی در طـی حـوادث برخورد وسايل نقليه، تحقيق بر روى خصوصيات مكانيكي لانهزنبورىها بيشتر مورد توجه قرار گرفته است [1]. مقاومت سازه در برابر ضربه و برخورد یکی از ملاحظات بحرانی در کاربردهای مهندسی است. از آنجا که غالبا در ضربه و برخورد، بارگذاری به صورت دینامیکی اتفاق میافتد، طراحی سازه هایی 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 [3،2]. علاوه بر تمام مزایای این سازه ها، وزن سبک آن ها باعث می شود 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 پایے ماژول ماہنشین آن جہت جندب انرژی ناشی از برخورد فرود، لانهزنبوریهای فلزی به کار گرفته شده است [4]. مطالعات گستردهای به منظور شناخت خصوصيات مكانيكي ساختارهاي لانهزنبوري تحت شرايط بارگذاری مختلف انجام شدہ است. در سال 2006 زارعے 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 بیشینهسازی انرژی جذب شده و انرژی ویژه حل شده است [5]. در سال 2007 هـ و همكاران با استفاده از روش سطوح پاسخ و طراحي آزمایشها بهینهسازی ستونهای جدار نازک شش وجهی را با مقاطع متفاوت و قیود انرژی ویژه تابع هدف و نیروی بیشینه 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 شبیه سازی عددی و با استفاده از سطوح پاسخ و طراحي 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 لانەزنبورى فلزى براى استفادە بە عنوان جاذب انرژى يىک 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]. یین و همکاران در سال 2011 بهینهسازی جاذب انرژی لانهزنبوری با مشخصات سلول مختلف را انجام دادند. در بهینهسازی، انرژی ویژه و تنش بیشینه 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 ضربه پذیری قوطی های چند ضلعی پرشده از لانهزنبوری را با استفاده از نرمافزار المان محدود داینا مورد بررسی قرار دادند؛

سپس بهینهسازی چند هدفه برای بیشینهسازی انرژی ویژه جذب شده و کمینهسازی نیروی بیشینه، 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 بیشینه 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 بیشینه 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 صحت آزمایی شده است و نتایج جدیدی برمبنای 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 پیش گفته 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 شکل1 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.

# 1-2- 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 ویلسون<sup>1</sup> در سال 1951 معرفی شده است [11]. با این که

روش سطوح پاسخ اولیه برای مدل کردن نتایج ازمایش 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 به گونهای
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

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

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  $n(\mathbf{t} + \mathbf{t})$  نقطه طراحی فاکتوریل مورد نیاز است درجه یا دادهبرداری مورد نیاز است. در معادلات تجربی پارامترهای مورد بررسی مانند نیروی بیشینه یا انرژی جذب شده ویژه توسط چندجملهایهای اولیهای به صورت رابطه (1) بیان و تخمین زده می شود.

$$y^{r}(x) = \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} \varphi_{i}(c, t)$$
(1)

دادههای مورد استفاده برای تعیین سطوح پاسخ از حل عددی یا شبیه ازی مدلهای تعیین شده توسط روش طراحی آزمایشها قابل استخراج است. در معادله اخیر n تعداد توابع اولیه (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 می شود.

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-وب<sup>1</sup> انتخاب شده است [14]. بنابراین در مجموع نتایج تحلیلی برای تعداد 25 نقطه دادهای در بخش نخست مقاله در دسترس است.

#### 2-2- شبيهسازى عددى

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 شکل2 و شکل3 ارائه شده است. مدل ماده آلومینیم H39-5052 با رفتار الاستیک-سختشوندگی خطی<sup>2</sup> 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 بهجز در راستای جابهجایی صفحه صلب و گرههای لبه پایینی سلول در تمام درجات آزادی مقید شده است. مطابق شکل3 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 7.00 میلیمتر نتایج به اندازه کافی همگرا شده را ارائه مطوح صلب، به ترتیب تماس از نوع سطح به سطح<sup>٤</sup> و تماس از نوع گره با سطح<sup>4</sup>در نظر گرفته شده است. بین کلیه سطوح دارای تماس، ضریب اصطکاک استاتیکی 0.3 و دینامیکی 0.2 فرض شده است. در شبکهبندی

اجزای محدود سلول از المان پوسته با فرمولاسیون پیش فرض بلیچکو-تسای<sup>5</sup> و سه نقطه انتگرال گیری 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.

مريم عليصادقي و جمشيد فضيلتي

$$\sigma_{\rm m} = \frac{F_{\rm m}}{A} = \frac{\int_0^{\delta_{\rm max}} F(\delta) d\delta}{A \times \delta}$$
(2)

# 3-2- استخراج سطوح پاسخ

سطوح پاسخ با برازش یک منحنی مناسب بر روی نتایج حاصل از تحلیل یا آزمایش به دست میآید. پارامترهای متغییر 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 اینجا این تعداد نتایج وجود دارد. استفاده از توابع درجه بالاتر نیازمند نمونههای شبیه سازی بیشتر و استفاده از چندجملهای های با درجه پایین تر فاقد دقت کافی است. فرم درجه چهار مرسوم از توابع پایه، از توابعی به شکل روابط (3) استفاده می کند که در آن Xn ها نقاط طراحی به دست آمده از آزمایش یا شبیه سازی هستند.



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

**شکل 1** نمودار فرایند بهینهسازی با استفاده از سطوح پاسخ

5- Belytschko-Tsay formulation

39

- 1- HexWeb
- 2- Elastic-linear hardening
- 3- Automatic single surface contact
- 4- Automatic nodes to surface contact

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

در این ماتریس، *M* تعداد نمونه های شبیه سازی شده است. از طریق دو معادله فوق ضرایب جملات و توابع استفاده شده، استخراج می شود [12،4،3]. روش مدل سازی و تحلیل و ابعاد نمونه های مورد بررسی به همراه نتایج شبیه سازی 25 نمونه لانه زنبوری 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 بهترتیب 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.

- $\sigma_p = 1.61 6.757 c + 1275t + 2.392 c^2 300.1ct 1.129e4 t^2 0.3506 c^3 + 41.09 c^2t + 400.4 ct^2 + 1.178e5 t^3 + 0.019 c^4 2.316 c^3t + 17.52 c^2t^2 3570 ct^3 4.136e5 t^4$ (6)
- $\sigma_m = -6.897 + 5.533c + 346.6 t 1.399 c^2 230.7 ct + 5406 t^2 + 0.1769 c^3 + 33.58 c^2 t + 225.8 ct^2 5.835e4 t^3 0.009185 c^4 1.652 c^3 t 6.548 c^2 t^2 2903 ct^3 + 3.442e5 t^4$

$$SEA_{cm} = -40.91 + 60.58 c + 1442 t - 20.68 c^{2} - 785.9 ct + 1.332e4 t^{2} + 3.263c^{3} + 16 c^{2}t + 1.304e4 ct^{2} - 5.457e5t^{3} - 0.192 c^{4} + 4.273 c^{3}t - 705.7c^{2}t^{2} - 4.262e4 ct^{3} + 3.442e6 t^{4}$$
(8)

$$SEA_{cV} = -1.096e5 + 1.62e5c + 3.86e6t - 5.54e4 c^{2}$$
  
-2.106e6 ct + 3.571e7t<sup>2</sup> + 8745 c<sup>3</sup> + 4.286e4 c<sup>2</sup>t  
+3.496e7 ct<sup>2</sup> - 1.463e9 t<sup>3</sup> - 514.5 c<sup>4</sup> +  
1.145e4 c<sup>3</sup>t - 1.891e6 c<sup>2</sup>t<sup>2</sup> - 1.142e8 ct<sup>3</sup>  
+ 9.224e9 t<sup>4</sup> (9)

2-4- بررسی دقت مدل

(7)

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 بهدست آمده از شبیه سازی و  $\overline{y}$  میانگین مقادیر  $y_i$  هستند.  $\hat{y}_i$ پاسخهای به دست آمده از روابط تخمینی سطوح پاسخ است. مقادیر  $R^2$  و



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

شکل 2 هندسه مقطع لانه زنبوری و موقعیت الگوی تکرار شونده 
$$m Y$$
 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 تکرارشونده Y شکل و شرایط بارگذاری آن

$$k = (\varphi^{T} \varphi)^{-1} (\varphi^{T} y)$$

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

مریم علیصادقی و جمشید فضیلتی



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



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



**جدول 1** نتایج شبیهسازی هندسههای مختلف

<b>Table 1</b> Simulation results for different geometries				
$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_p$ (MPa)	<i>t</i> (mm)	C (mm)	رديف
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:  

$$SSE = \sum_{i=1}^{m} (y_i - \hat{y}_i)^2$$
(13)
خطای ریشه میانگین مربعات:  

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

$$RE = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \tag{15}$$

خطای نسبی:

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 مناسب تری دارد. استفاده از تقریبهای با مرتبه پایین تر دقت کمتری به دست میدهد. ضمن این که استفاده از تقریب درجه چهار در تخمین تابع تنش بیشینه دقت بالاتری دارد.

Fig. 8 Response surface for SEA<sub>cv</sub> شکل 8 سطوح پاسخ برای نسبت انرژی جذب شده به حجم تخریب شده

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.36.4 ]

<b>Table 2</b> Accuracy check results for response surface metamodels				
RE %	RSME	$R^2_{ m adj}$	$R^2$	تابع تقريب
	$\sigma_p$			
[-22.5593,54.2441]	1.102	0.9421	0.9469	درجه 1
[-10.0628,5.8281]	0.2507	0.997	0.9976	درجه 2
[-1.7033,1.5453]	0.05656	0.9998	0.9999	درجه 3
[-0.2571,0.3241]	0.02061	1	1	درجه 4
	$\sigma_m$			
[-45.3254,305.7322]	0.899	0.871	0.8817	درجه 1
[-79.5059,35.7174]	0.2455	0.9904	0.9924	درجه 2
[-10.1237,9.3055]	0.0672	0.9993	0.9995	درجه 3
[-4.7980,3.9299]	0.0669	0.9993	0.9997	درجه 4

جدول 2 بررسی دقت چتدجملهای های تخمین سطوح پاسخ

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 می شود.

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

optimize	$F(x) = F(f_1(x), f_2(x), \dots, f_q(x))$	
) <i>S</i> . <i>t</i> .	$x \in \mathbb{R}^n$ and $X^L \leq X \leq X^U$	
)	$g_u(x) \ge 0, u = 1, \dots s$	(1c)
l	$h_v(x) = 0, v = 1, p < n$	(16)

در این رابطه، n تعداد ابعاد مساله، q تعداد توابع هدف برای بهینهسازی؛ q , r بهترتیب 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 پایه گذاری شده است. در این روش، در گام اول، یک جمعیت تصادفی در محدوده متغیرهای طراحی تولید میشود و در گام یحدی، جمعیت به میتود با استفاده از افراد جمعیت قبلی به گونهای ایجاد میشود که پاسخها به سمت پاسخ بهینه نزدیک شود. برای مسایلی که ضربه پذیری را بررسی میکنند، تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی به ضربه پذیری را بررسی میکنند، تابع هدف نسبت به متغیرهای طراحی به مدت 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

Table 3 Impacting mass design constraints			
	اندازه	پارامتر	
	1000 كيلوگرم	جرم فرود	
	10 متر بر ثانيه	سرعت برخورد	
	25 سانتىمتر	حداكثر طول جذب	
	45g	سطح شتاب مجاز برخورد	

زیستی یا زیربخشهای سازه تعریف شود تجاوز نکند.

علاوه بر این قیود طراحی این سامانه جاذب بهصورت 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 مهم ترین خصوصیات برای هر زیرسیستم از جمله برای جاذب انرژی، حداقل بودن جرم و حجم آن است. مساله بهینه سازی مورد بررسی، تعیین ساختار لانه زنبوری با هدف اصلی کمینه سازی 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 کانه زنبوری مورد استفاده به عنوان جاذب انرژی، متغیرهای مساله هستند. حل مساله بهینه سازی 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 بهینه یاب مورد استفاده قرار گرفته است.

#### 2-6- صحت سنجى الگوريتم بهينهسازي

(18)

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.

Ninimize:  y = -SEA(t, l);	
.4 mm $\leq t \leq$ 3 mm	(17)
0 mm $\leq l \leq$ 60 mm	(17)

minimize: y = -SEA(t, l); Max  $F(t, l) \le 70$  kN

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 I=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

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

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

#### 3- نتایج مساله بهینه سازی

optic Times The test<math>cptic Times The test<math>cptic Times The test<math>cptic Times The test<math>cptic Times The test<math>optic Times Tim

الگوریتم ژنتیک با تعداد جمعیت اولیه 50 استفاده شده است و نتایج مساله کمینهسازی حجم جاذب در حضور قیود انرژی و نیروی بیشینه در جدول4 و جدول5 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 در ابعاد کلی مکعب مستطیلی با سطح مقطع 0.020 متر مربع و ارتفاع ابل جذب آن 50 کیلوژول خواهد بود. بر اساس جرم سازه، بیشینه شتاب برخورد حدود 44g ایجاد شده است. در شکل9 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

Tom volume optimization			
ار تفاع (m)	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )	ضخامت (mm)	اندازه سلول (mm)
0.2337	0.020303	0.07619	3.1750002

جدول 5 مشخصات رفتاری جاذب انرژی حاصل از انجام بهینهسازی حجمی Table 5 Honeycomb absorber design behavior characteristics obtained from volume optimization

مقدار	پارامتر
435.657	نیروی بیشینه (kN)
213.924	نیروی میانگین (kN)
50.000	انرژی جذب شده (kJ)
0.004745	حجم کل (m³)
0.814	جرم کل (kg)

0.00480

·[

Average Value

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.

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

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

<b>minimize:</b> $m = HD \times V$	تابع هدف:
s. t. : $F_p$ = $\sigma_p$ × $A$ $\leq$ 450 kN	قيد نابرابري:
$E = \sigma_m \times A \times h = 50 \text{ kJ}$	قيد برابري:
0.0254 mm $\leq t \leq$ 0.0762 mm 3.175 mm $\leq c \leq$ 6.35 mm	محدوده متغيرها.
$0.01 \text{ m}^2 \le A \le 0.8 \text{ m}^2$	
<b>ZV mm</b> $\leq n \leq$ <b>ZOV mm</b>	(21)

با تعداد جمعیت 50 نفر مساله بهینهسازی جرم حل شده است. نتایج حاصل از بهینهسازی بر اساس قید جرمی برای نمونه منتخب در جدول6 و جدول7 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، بهینه یابی 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. جدول8 و جدول9 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



**شکل9** نمودار مقدار تابع برازندگی حجم با پیشروی نسل در بهینهسازی

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

$$F_{\rm avg} = \frac{E}{h} \tag{23}$$

$$a = \frac{F_{\text{avg}}}{m} \tag{24}$$

$$x = \frac{\left(-\nu + \sqrt{\nu^2 + 2ah}\right)}{a} \tag{25}$$

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

جدول 6 هندسه ساختار جاذب حاصل از انجام بهينهسازي جرم Table 6 Honeycomb absorber design geometry specifications obtained from mass optimization

 ارتفاع (m)	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )	ضخامت (mm)	اندازه سلول (mm)
0.2336	0.0203162	0.07620	3.175002

**جدول 7** مشخصات رفتاری جاذب انرژی حاصل از انجام بهینهسازی جرم Table 7 Honeycomb absorber design behavior characteristics obtained from mass optimization

مقدار	پارامتر
435.932	نیروی بیشینه (kN)
214.059	نیروی میانگین (kN)
50.000	انرژی جذب شده (kJ)
0.004745	حجم کل (m³)
0.814	جرم کل (kg)

جدول 8 هندسه ساختار جاذب حاصل از انجام بهينهسازي

Table 8 The optimized honeycomb absorber design geometry specifications

ار تفاع (m)	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )	ضخامت فویل (mm)	اندازه سلول (mm)	سطح شتاب مجاز
0.290	0.016365	0.07620	3.175	40g
0.234	0.020303	0.07619	3.175	45g
0.217	0.021851	0.07620	3.175	50g

**جدول 9** مشخصات رفتاري جاذب انرژي حاصل از انجام بهينهسازي

Table 9 The optimized honeycomb absorber design behavior characteristics in impact

50g	45g	40g	پارامتر
468.855	435.657	351.153	نیروی بیشینه (kN)
230.225	213.924	172.429	نیروی میانگین (kN)
50.000	50.000	50.000	انرژی جذب شده (kJ)
0.004745	0.004745	0.004745	حجم کل (m³ <b>)</b>
0.814	0.814	0.814	جرم کل (kg)
0.0180	0.0194	0.0240	زمان توقف (s)

# 4- جمع بندی

در این مقاله، با استفاده از روش طراحی آزمایش ها و تحلیل اجزای محدود صريح، سطوح پاسخ براي پارامترهاي ضربه پذيري سازه شامل تنش ميانگين و بیشینه استخراج شد. جاذب انرژی از نوع ساختار لانهزنبوری برای جذب انرژی ناشی از برخورد استفاده شده و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک در نرمافزار متلب، بهینهسازی بر اساس توابع هدف حجمی و جرمی جاذب انرژی صورت یذیرفته 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 قيود در الگوريتم مورد استفاده قرار گرفته است. سطوح پاسخ ويژه 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. سیس 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 یاسخ 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 می شود.

5- فهرست	، علائم
A	مساحت (m <sup>2</sup> )
а	شتاب <b>(</b> m/s <sup>2</sup> )
С	اندازه سلول (m)
E	انرژی <b>(J)</b>
F	نيرو (N)
h	ار تفاع (m)
L	طول (m)
l	اندازه یک ضلع شش ضلعی (m)
m	جرم (kg)
Т	ضخامت (m)
t	زمان <b>(</b> s <b>)</b>
v	سرعت (ms <sup>-1</sup> )







مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

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 Edittion, 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 foamfilled 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

#### 6- مراجع

45

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12