



## بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت جذب انرژی هسته ساندویچی مخروطی در برخورد مورب

نادر وحدت آزاد<sup>۱</sup>، سعید ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* یزد، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵، [ebrahimi@yazd.ac.ir](mailto:ebrahimi@yazd.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۱/۲۸

پذیرش: ۹۵/۵/۹

### کلیدواژه‌ها:

پروفیل مخروطی هسته ساندویچی

جذب انرژی مخصوص

مچالگی

بهینه‌سازی چند هدفه

آنالیز حساسیت

در این مقاله خصوصیات جذب انرژی پروفیل مخروطی با هسته ساندویچی در برخورد مورب با دیواره سخت با روش المان محدود غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان جذب انرژی در این فرآیند تا حد زیادی به اثر برهم کنش بین هسته ساندویچی و دیواره خارجی، و همچنین جنس و هندسه موادی که وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌شوند بستگی دارد. بدین منظور ویژگی‌های مربوط به جذب انرژی و تأثیر پارامتر زاویه برخورد و ضخامت مورد توجه است. به منظور کاهش هزینه محاسباتی در مدل‌سازی مچالگی بر پایه نتایج حاصل از روش المان محدود، توابع درجه سه جذب انرژی مخصوص و ماکزیمم نیروی مچالگی با استفاده از روش پاسخ سطح تعیین می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل برخورد نشان می‌دهند که با افزایش زاویه برخورد و کاهش ضخامت پروفیل مخروطی هسته ساندویچی، جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه برخورد و افزایش ضخامت، بیشینه نیروی مچالگی کاهش می‌یابد. در ادامه، بهینه‌سازی چندهدفه برای بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص و کمینه کردن بیشینه نیروی مچالگی اعمال می‌شود. مسأله بهینه‌سازی دوم در جهت بیشینه شدن همزمان جذب انرژی مخصوص و زاویه برخورد می‌باشد. در بخش نهایی، آنالیز حساسیت موضعی و جامع برای توابع جذب انرژی مخصوص و ماکزیمم نیروی مچالگی بر حسب پارامترهای مورد مطالعه زاویه برخورد و ضخامت مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که حساسیت جامع تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به زاویه برخورد بیشتر از ضخامت پروفیل می‌باشد، در حالیکه حساسیت جامع تابع بیشینه نیروی مچالگی نسبت به ضخامت بیشتر از زاویه برخورد است.

## Oblique crashworthiness optimization and sensitivity analysis of tapered sandwich columns

Nader Vahdatazad<sup>1</sup>, Saeed Ebrahimi<sup>1\*</sup>, Gholamhossein Liaghat<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, [ebrahimi@yazd.ac.ir](mailto:ebrahimi@yazd.ac.ir)

### Keywords

Tapered Sandwich columns,  
 Specific energy absorption,  
 Crashworthiness,  
 Multiobjective optimization,  
 Sensitivity analysis

### Abstract

In this paper, crashworthiness analysis of a tapered sandwich column under oblique impact loading against a rigid wall is investigated by nonlinear finite element analysis. The energy absorption characteristics of honeycomb sandwich cylindrical columns in oblique crushing process depend greatly on the amount of material which participates in the plastic deformation. The interaction effects between the honeycomb and column walls greatly improve the energy absorption efficiency. The response surface method with cubic basis functions is employed to formulate specific energy absorption and peak crushing force, which reduces considerably the computational cost of crush simulations by finite element method. Based on the results of crash modeling, it is observed that the specific energy absorption has a decreasing trend by increasing the impact angle and decreasing the column thickness. On the other hand, the peak crushing force reduces when the impact angle and the column thickness are increased. Therefore, multiobjective optimization is done to maximize the specific energy absorption and minimize the peak crushing force at the same time. Furthermore, maximizing the specific energy absorption and maximizing impact load angle is performed. Finally, both local and global sensitivity analyses are employed to assess the effect of impact angle and thickness on the specific energy absorption and peak crushing force. The global sensitivity of the specific energy absorption with respect to the impact angle is observed to be more than the column thickness, while the peak crushing force has more global sensitivity to the column thickness compared to the impact angle.

### Please cite this article using:

Vahdatazad, N. Ebrahimi, S. and Liaghat, Gh., "Oblique crashworthiness optimization and sensitivity analysis of tapered sandwich columns", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 25-34, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

در آنالیز برخورد مربوط به کاربردهای مهندسی شامل مهندسی خودرو، کشتی‌سازی، هواپیماسازی و سایر صنایع مرتبط، به ویژگی‌های جذب انرژی و مچالگی پروفیل‌های ساندویچی توجه ویژه شده است. یکی از مهمترین کاربردهای سیستم‌های جاذب انرژی در صنعت مهندسی خودرو است. پارامترهای مختلفی مانند تغییر شکل خودرو پس از تصادف و شتاب خودرو در حین ضربه و مچالگی برای پیش‌بینی صدمه بررسی می‌گردند. در زمان طراحی یک جاذب انرژی برای یک سازه مانند خودرو برای رسیدن به ایمنی مطلوب سرنشین، لازم است تا توانایی جذب انرژی مخصوص (نسبت انرژی جذب شده به جرم پروفیل) بیشینه و ماکزیمم نیروی مچالگی کمینه باشد. جذب انرژی مخصوص بالاتر مهمترین فاکتور در طراحی جاذب می‌باشد. هدف مهم این است که انرژی جنبشی اولیه توسط پروفیل‌ها جذب و دامنه نوسانات نیرو به اندازه کافی پایین باشد تا سرنشین صدمه نبیند.

استفاده از جاذب‌های انرژی به شکل پروفیل‌های استوانه‌ای یا مخروطی بسیار متداول می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از کمانش پروفیل‌های استوانه‌ای نشان می‌دهد که این پروفیل‌ها توانایی جذب انرژی کمتری نسبت به پروفیل‌های مخروطی دارند [۱]. در پروفیل‌های مخروطی متوسط نیروی مچالگی بر حسب تغییر شکل پروفیل ثابت می‌باشد و در ضربه‌های محوری نسبت به پروفیل‌های استوانه‌ای بهتر هستند [۲]. در نتیجه پروفیل‌های مخروطی بر پروفیل‌های استوانه‌ای مقدم می‌باشند. ویژگی جذب انرژی پروفیل‌های مخروطی تحت ضربه محوری در تحقیق [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، در تحقیق [۴] رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ، تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار گرفته است.

با استفاده از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> نتایج قابل توجهی در زمینه بررسی محاسباتی تصادف و مچالگی به‌دست آمده است. در این راستا، برای بهینه‌سازی هندسی پروفیل‌ها با توجه به نیاز به تعریف رفتار پروفیل در دامنه طراحی، از این روش برای تعریف قابلیت جذب انرژی و نیروی مچالگی استفاده شده است [۵-۷]. پروفیل‌های چند سلولی جدید را کیم<sup>۲</sup> [۸] مورد توجه قرار داد، به‌طوری‌که در آن مطالعه روش سطح پاسخ برای محاسبه نیروی متوسط مچالگی به کار برده شد و مسأله بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن انرژی جذب شده مخصوص<sup>۳</sup> انجام گرفت. بر اساس نتایج حاصل از آن، انرژی جذب شده مخصوص برای سازه چندسلولی جدید تا ۱۹۰ درصد نسبت به پروفیل‌های قبلی افزایش یافت. در اغلب مسائل برخورد و مچالگی تلاش طراح بر این است که بیشترین توانایی جذب انرژی را با مقید کردن برخی شرایط بر مسأله داشته باشد. در [۹] بهینه‌سازی چند هدفه با قید نیروی مچالگی<sup>۴</sup> کمینه و جذب انرژی مخصوص بیشینه صورت پذیرفته است. در تحقیقی دیگر، بهینه‌سازی برای جذب انرژی پروفیل‌های لانه زنبوری به کار گرفته شد [۱۰]. علاوه بر موارد فوق، جاذب‌های انرژی به شکل‌های مختلف مانند پوسته‌های پیش شکل‌دهی شده [۱۱، ۱۲] و پوسته‌های مخروطی و استوانه‌ای [۱۳، ۱۴] مورد استفاده قرار می‌گیرند. پارامترهای هندسی و تأثیر سرعت و جرم پرتابه بر میزان کوتاه شدگی و جذب انرژی پوسته‌هایی که در فرآیند وارونگی داخلی تحت ضربه محوری قرار گرفته‌اند، در [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است.

بسیاری از تحقیقات بر روی برخورد مستقیم پروفیل‌ها تمرکز کرده‌اند. به هر حال در برخورد خودرو بحث جذب انرژی در دو مورد برخورد مستقیم و غیرمستقیم (مورب) مهم است. در مقایسه با برخورد مستقیم، تحقیقات کمتری برای برخورد مورب صورت پذیرفته است [۱۶، ۱۷]. این تحقیقات نشان می‌دهند که قابلیت جذب انرژی برخورد مورب در مقایسه با برخورد مستقیم کمتر است. در تحقیق دیگری، خصوصیات جذب انرژی پروفیل‌ها با شکل مقاطع متفاوت در برخورد مستقیم و مورب بررسی و مقایسه شده‌اند [۱۸]. تحت برخورد مورب، پروفیل به دو صورت خمشی و محوری تغییر شکل پیدا می‌کند. در مقایسه با تغییر شکل محوری، تغییر شکل خمشی ناپایدارتر می‌باشد و همین امر باعث کاهش میزان جذب انرژی در برخورد مورب نسبت به برخورد محوری می‌شود. در مطالعه [۱۹] پارامترهای پروفیل مخروطی با مقطع مربعی در برخورد مورب مطالعه شده است. مطالعات نشان می‌دهند که پروفیل‌های چندسلولی مخروطی نسبت به پروفیل‌های چندسلولی استوانه‌ای قابلیت جذب انرژی بالاتری در برخورد مورب دارند. در تحقیقات دیگر، بارگذاری شبه استاتیکی پروفیل در حالت تو خالی [۲۰، ۲۱] و پر شده با فوم نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که تغییر شکل مود خمشی در برخورد مورب باعث کاهش جذب انرژی پروفیل می‌شود. همچنین، جذب انرژی پروفیل مقطع مستطیلی در دو شکل استوانه‌ای و مخروطی تحت برخورد مورب و محوری مطالعه شده است [۲۲]. نتایج نشان داد که پروفیل‌های مخروطی مزایای بیشتری در برخورد مورب دارند [۲۳، ۲۴].

علاوه بر موارد فوق، مطالعات دیگری به‌منظور بررسی اثر تغییر شکل هندسی لوله‌های آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و همچنین، بررسی اثر وجود فوم درون آن جهت جذب انرژی بیشتر ناشی از بارگذاری ضربه‌ای عرضی انجام شده است [۲۵]. در تحقیق [۲۶] مطالعات تحلیلی و تجربی بر روی مقاطع جدار نازک با سطح مقطع‌های مختلف تحت بار دینامیکی و استاتیکی انجام گرفته است. در آن مطالعه، به‌منظور به کارگیری قابلیت‌های تحلیلی در پیش‌بینی رفتار لوله‌های مختلف، نتایج تحلیلی با نتایج تجربی مقایسه شدند. در این راستا، تحقیقات دیگری نیز به‌صورت تحلیلی و تجربی بر روی جاذب‌های مشبک صورت گرفته است [۲۷، ۲۸].

در دهه گذشته، انواع مختلفی از مواد و سازه‌ها با ظرفیت جذب انرژی ویژه بالا نظیر سازه‌های لانه زنبوری و سازه‌های جدار نازک بررسی شده است [۲۹]. یکی از مهمترین مزایای سازه‌های لانه زنبوری این است که با تغییر پارامترهای هندسی سازه از قبیل ارتفاع، ضخامت، اندازه سلول و زاویه داخلی آن می‌توان به خواص مکانیکی متفاوتی دست پیدا نمود [۳۰، ۳۱]. لیاقت و همکارانش [۳۲] بهینه‌سازی سازه لانه زنبوری را تحت بارگذاری فشاری انجام دادند و حل تحلیلی به همراه بهینه‌سازی هندسه‌های مختلف سلول سازه بررسی شد. ایده افزایش منطقه تغییر شکل پلاستیک برای پروفیل‌های نازک در پروسه کمانش با استفاده از هسته ساندویچی این است که ناحیه بیشتری دچار کمانش موضعی شود. اثر بر هم کنش بین پروفیل و هسته باعث بهبود نیروی مچالگی و افزایش جذب انرژی می‌شود. استفاده از مواد سبک مانند هسته ساندویچی بر روی مودهای خمشی لوله توخالی مؤثر بوده و طول خمشی را کاهش و تعداد حلقه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین اثر بر هم‌کنش بین لوله و هسته باعث افزایش جذب انرژی پروفیل می‌شود. قابل ذکر است وقتی از فوم‌ها به عنوان هسته استفاده می‌شود میزان قابل توجهی از فوم وارد فاز پلاستیک نمی‌شود که باعث کاهش میزان عملکرد و بازدهی در جذب انرژی ضربه می‌شود [۳۳، ۳۴]. بهینه‌سازی و آنالیز

1. Response surface method (RSM)  
2. HS Kim  
3. Specific Energy Absorption (SEA)  
4. Peak crushing force (PCF)

موردی استفاده از روش‌های جایگزین به منظور تعیین مدل تحلیلی کارساز است.

در این تحقیق نیز، تعریف روابط تحلیلی برای توابع جذب انرژی و نیروی مچالگی با توجه به پارامترهای مربوط به شکل، مواد و اصولاً غیرخطی بودن پدیده ضربه و مچالگی پروفیل بسیار مشکل است. برای این منظور از روش سطح پاسخ استفاده می‌شود [۳۶، ۳۷]. در این روش  $y(x)$  تابع واقعی و  $\tilde{y}(x)$  تابع تخمین می‌باشد.  $e$  مقدار خطای موجود بین تابع تخمین و تابع اصلی است. رابطه (۴) تابع  $y(x)$  را تعریف می‌کند.

$$y(x) = \tilde{y}(x) + e = \sum_{j=1}^m a_j \beta_j(x) + e \quad (4)$$

در رابطه (۴) ضرایب  $a$  مجهول می‌باشند و برای تعیین آن‌ها از  $m$   $(x_i | j = 1, \dots, m, m > n)$  نقطه کمکی استفاده می‌شود. برای کمینه کردن میزان خطا در مدل‌سازی مطابق با رابطه (۵) از روش کمینه مربعات استفاده می‌شود [۳۵].

$$E(a) = \sum_{i=1}^m e_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - \sum_{j=1}^m a_j \beta_j(x_i))^2 \quad (5)$$

که حل آن منجر به رابطه خطی (۶) می‌شود.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1(x_1) & \dots & \beta_n(x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_1(x_m) & \dots & \beta_m(x_m) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \Rightarrow y = \beta a \quad (6)$$

از حل رابطه (۶) مقادیر  $a$  به صورت رابطه (۷) به دست می‌آیند.

$$a = (\beta^T \beta)^{-1} \beta^T y \quad (7)$$

به منظور محاسبه دقت روش سطح پاسخ و محاسبه خطای نسبی از روابط (۸) تا (۱۳) استفاده می‌شود [۳۵].

$$RE = \frac{y(x) - \tilde{y}(x)}{y(x)} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{k}} \quad (9)$$

$$MAX = \max |y_i - \tilde{y}_i|, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (12)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (12)$$

$$SST = \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2 \quad (13)$$

مقادیر کوچکتر رابطه‌های (۹) و (۱۰) و مقادیر بزرگتر رابطه (۱۱) نمایانگر دقت بالاتر مدل‌سازی می‌باشند. تشریح کامل این روابط در مقاله اخیر نویسندگان این تحقیق آورده شده است [۳۵].

### ۳-۲- آنالیز حساسیت موضعی

در آنالیز حساسیت موضعی<sup>۱</sup> به طور ویژه به بررسی اینکه چگونه نامعینی خروجی سیستم به نامعینی ورودی سیستم ربط پیدا می‌کند پرداخته می‌شود [۳۸]. یکی از روش‌های متداول در بررسی موضعی یعنی نسبت مشتق جزئی خروجی به ورودی به صورت معادله (۱۴) می‌باشد.

$$S = \frac{\partial Y}{\partial x_i} \Big|_{x_{i,0}} \quad (14)$$

به منظور مقایسه حساسیت برای پارامترهای مختلف طراحی لازم است تا از حساسیت نرمال شده به صورت رابطه (۱۵) استفاده شود.

$$NS = \frac{\partial Y/Y}{\partial x_i/x_{i,0}} = \frac{\partial Y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_{i,0}}{Y} = S \cdot \frac{x_{i,0}}{Y} \quad (15)$$

حساسیت لوله‌های هسته ساندویچی برخورد مستقیم در مقاله اخیر نویسندگان این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است [۳۵].

با توجه به اینکه استفاده از پروفیل‌های مخروطی در مقایسه با استوانه‌ای قابلیت جذب انرژی مخصوص را افزایش می‌دهد، در این مقاله خصوصیات جذب انرژی پروفیل مخروطی با هسته ساندویچی در برخورد مورب با دیواره سخت با روش المان محدود غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نوآوری شاخص این تحقیق بر روی مطالعه تأثیر زاویه برخورد و ضخامت پروفیل مخروطی بر روی میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی متمرکز است. علاوه بر آن، بهینه‌سازی چندهدفه برای بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص و کمینه کردن بیشینه نیروی مچالگی اعمال می‌شود. مسأله بهینه‌سازی دوم نیز در جهت بیشینه شدن همزمان جذب انرژی مخصوص و زاویه برخورد انجام می‌گیرد. در بخش نهایی، آنالیز حساسیت موضعی و جامع برای توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی بر حسب پارامترهای مورد مطالعه زاویه برخورد و ضخامت مطالعه می‌شود.

## ۲- تئوری

### ۲-۱- مچالگی

در مطالعه پدیده مچالگی پروفیل‌های نازک در برخورد مورب و بهینه‌سازی عملکرد این پروفیل‌ها، بررسی نمودار نیرو بر حسب طول مچالگی و یا بر حسب زمان مچالگی معمول است. شکل ۱ مدل برخورد مورب با جرم متمرکز را نشان می‌دهد. در این مدل پروفیل با یک جرم متمرکز ۵۰۰ کیلوگرمی که به انتهای آن نصب شده است (جرم متمرکز نشان دهنده اثر اینرسی خودرو است) با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به صفحه صلب برخورد می‌کند. انرژی جذب شده معادل کار مکانیکی انجام شده توسط نیرو در طول مچالگی به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

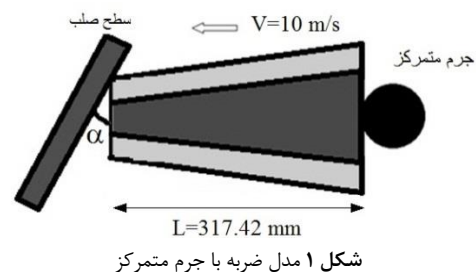
$$E(\delta) = \int_0^\delta F(x) dx \quad (1)$$

نیروی متوسط برای این طول مچالگی به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$F_{avg} = E(\delta) / \delta \quad (2)$$

برای تعریف جذب انرژی مواد مختلف با جرم‌های گوناگون، از جذب انرژی مخصوص استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود.

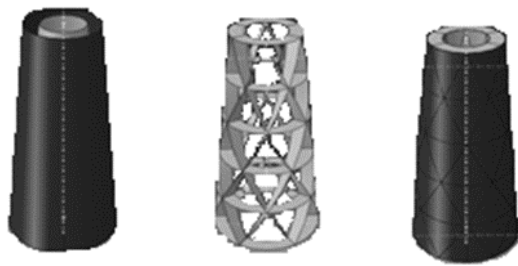
$$SEA = E/M \quad (3)$$



### ۲-۲- روش سطح پاسخ

در علوم مهندسی بسیاری از پدیده‌ها بر مبنای تئوری‌های مربوط به خودشان مدل‌سازی می‌شوند. این درحالیست که پدیده‌های بسیاری به علت وابستگی به تعداد پارامترهای زیاد، ناشناخته بودن مکانیزم یا پیچیده بودن روابط حاکم، قابلیت داشتن مدل ریاضی رضایت‌بخشی را ندارند. در چنین

1. Local sensitivity analysis



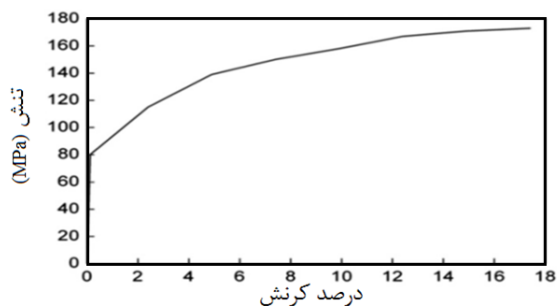
پروفیل هسته ساندویچی      هسته ساندویچی      پوسته داخلی و خارجی  
شکل ۲ ساختار هندسی پروفیل با هسته ساندویچی

### ۲-۲- مشخصات مواد

آلومینیوم و آلیاژهایش یکی از مطلوب‌ترین مواد برای جذب انرژی بین مواد مختلف می‌باشند و در صنعت خودروسازی به طور گسترده استفاده می‌شوند. آلومینیوم به خوبی شکل‌پذیر است و در نتیجه قابل تولید در شکل‌ها و مقاطع گوناگون به روش اکستروژن را دارا می‌باشد. پروفیل جدار نازک و هسته ساندویچی آن در این مقاله از جنس آلومینیوم آلیاژی<sup>۴</sup> با چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته ۶۸/۲۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۸، تنش تسلیم ۸۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۱۷۳ مگاپاسکال می‌باشد. با در نظر گرفتن اثر کرنش سختی، تنش جریان از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود [۴۱].

$$S_0 = \sqrt{\frac{S_y S_u}{1+n}} \quad (17)$$

که  $n$  توان سختی کرنشی ماده و در این مقاله برای آلومینیوم ۰/۲۳ در نظر گرفته شده است. رابطه کامل بین تنش و کرنش برای این آلیاژ آلومینیوم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تنش کششی بر حسب کرنش برای آلومینیوم آلیاژی [۴۱]

### ۳-۳- صحنه گذاری روش سطح پاسخ

در این قسمت ابتدا صرفاً جهت ارزیابی روش سطح پاسخ در تقریب توابع جذب انرژی و نیروی مچالگی، یک مدل بر مبنای مطالعات قبلی محققان دیگر تحلیل می‌شود. با توجه به عدم دستیابی به نتایج تجربی پروفیل مخروطی با هسته ساندویچی، برای این منظور پروفیل استوانه‌ای با مقطع مربعی (مدل S-1 مرجع [۴۲]) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق مورد نظر آزمایش تجربی و تحلیل عددی مربوط به ضربه دینامیکی انجام شده است. بیشینه نیروی ضربه حاصل از تست تجربی و تحلیل عددی به ترتیب ۶۸ و ۷۸ کیلونیوتن می‌باشد. نتایج مدل‌سازی و تحلیل در نرم افزار آباکوس در مقاله پیش رو برای بیشینه نیروی ضربه ۷۷ کیلو نیوتن می‌باشد

در این مقاله حساسیت نرمال شده برای دستیابی به اثر هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی در دامنه طراحی به کار گرفته می‌شود.

### ۴-۲- آنالیز حساسیت جامع

آنالیز حساسیت جامع<sup>۱</sup> یک روش بر پایه واریانس می‌باشد که استفاده از آن برای نشان دادن اهمیت و ارزش یک ورودی است و بر پایه روش‌های نمونه‌برداری و گسترش پارامترهای ورودی است. اندازه‌گیری ارزش هر یک از پارامترهای ورودی به معنای اندازه‌گیری حساسیت می‌باشد که اغلب به صورت توزیع واریانس خروجی نسبت به نامعینی در ورودی تعریف می‌شود. در این مقاله از روش سوبول<sup>۲</sup> [۳۹، ۴۰] استفاده شده که بر مبنای واریانس است. مبنای این تئوری در تحقیق [۳۵] توضیح داده شده است.

### ۵-۲- بهینه‌سازی چندهدفه

منظور از بهینه‌سازی چندهدفه حلی است که بتواند بهترین مقادیر را برای توابع هدف به دست آورد. در این نوع بهینه‌سازی تعدادی تابع هدف وجود دارد که باید بهینه گردند. توابع هدف ممکن است با هم در تعارض باشند به این معنی که بهبود یکی با عدم بهبود دیگری همراه باشد. برای این مسائل نمی‌توان حل یگانه‌ای یافت بصورتیکه تمام توابع هدف در یک نقطه، همزمان به جواب بهینه دست یابند. یک روش حل چنین مسائلی حل بهینه پارتویی می‌باشد. به طور کلی مسأله بهینه‌سازی به صورت معادله (۱۶) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min. } F(x) &= [f_1(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t. } x_L &\leq x \leq x_U \\ h_v(x) &= 0, \quad v = 1, \dots, p \\ g_u(x) &\geq 0, \quad u = 1, \dots, q \end{aligned} \quad (16)$$

### ۳- مدل‌سازی برخورد مورب

#### ۳-۱- مدل المان محدود

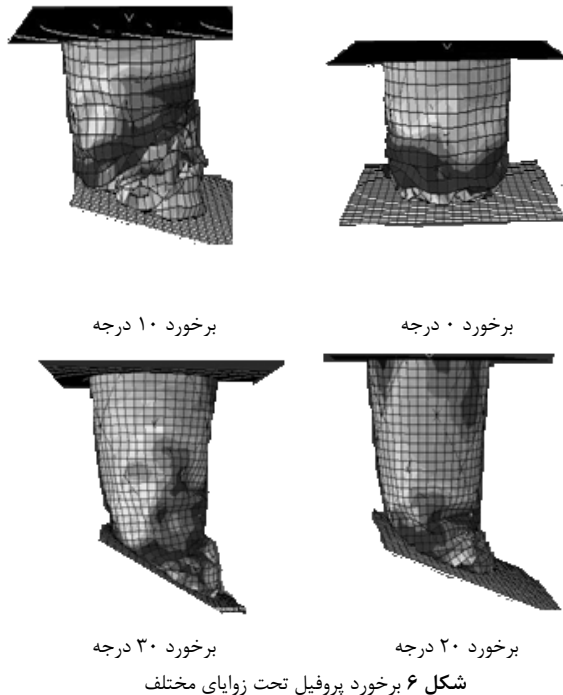
پروفیل ساندویچی با مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس شامل هسته کیگوم<sup>۳</sup> به صورت نشان داده شده در شکل ۲ بررسی می‌شود. طول پروفیل در راستای محور ۳۱۷/۴۲ میلی‌متر می‌باشد. قطر داخلی و خارجی در صفحه بالایی به ترتیب ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر و در صفحه پایینی ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره‌های داخلی و خارجی و ضخامت هسته ساندویچی با پارامتر  $t$  تعریف شده است. تعداد سلول‌ها برای مدل در جهت محیطی ۶ و در جهت طولی ۵ است. در حل مسأله فرض بر این است که سرعت پروفیل در لحظه برخورد ۱۰ متر بر ثانیه باشد و مدت زمان آنالیز برخورد ۱۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

همچنین جرم متمرکز الحاقی به پروفیل ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار آباکوس المان پوسته داخلی و خارجی از نوع S4R در نظر گرفته شده است. تماس پوسته‌ها و سطح صلب از نوع surface-to-surface با ضریب اصطکاک ۰/۱ تعریف شده است. تماس سطوح با خودشان در هنگام فرو ریزش self-contact، و تماس هسته با پوسته داخلی، خارجی و دیواره صلب general-contact می‌باشد. تعداد کل المان‌ها برابر با ۲۱۷۳۳ المان می‌باشد.

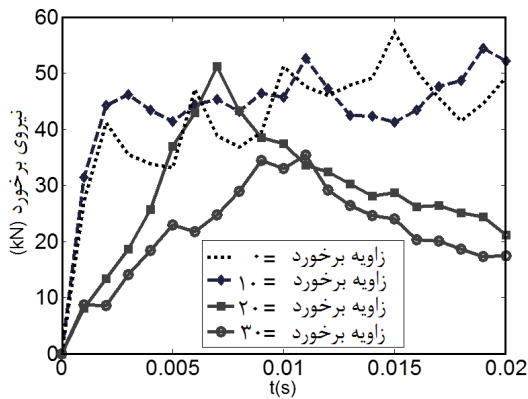
1. Global sensitivity analysis  
2. Sobol method  
3. Kagom

4. AA6060-T4

افزایش زاویه برخورد مقدار مچالگی و تغییر شکل پلاستیک کمتر شده است. در شکل ۷ نیروی مچالگی بر حسب زمان برخورد برای پروفیل با ضخامت ۱ میلی‌متر با زوایای مختلف ۰ تا ۳۰ درجه نشان داده شده است.



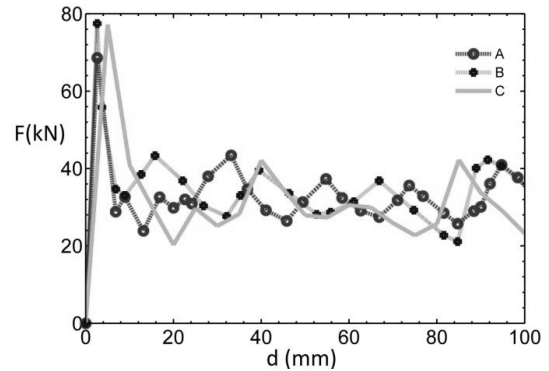
شکل ۶ برخورد پروفیل تحت زوایای مختلف



شکل ۷ نیروی مچالگی پروفیل بر حسب زمان برای زوایای ۰ تا ۳۰ درجه

خصوصیات طراحی پروفیل مخروطی هسته ساندویچی و نتایج حاصل از برخورد مورب در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد ۱۶ مدل‌سازی و تحلیل برای زوایای و ضخامت‌های مختلف انجام شده است که در آن میزان جذب انرژی، جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی برای هر نمونه محاسبه شده است. با استفاده از تئوری سطح پاسخ که در مباحث قبل به آن اشاره شد برای مدل‌سازی توابعی برای جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی، توابع درجه یک، دو، سه و چهار را با استفاده از ۱۶ نمونه آنالیز شده می‌توان به دست آورد. نکته مهم در این مقوله انتخاب یکی از چهار تابع برای مدل‌سازی رفتار پروفیل می‌باشد که بیشترین دقت را داشته باشد. بدین منظور توابع درجه یک تا چهار با استفاده از تئوری بیان شده در بخش سطح پاسخ بررسی شده است. نتایج مربوطه در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با بررسی مقادیر مختلف تابع  $R^2$ ، توابع درجه سه بیشترین دقت را برای تعریف رفتار توابع جذب

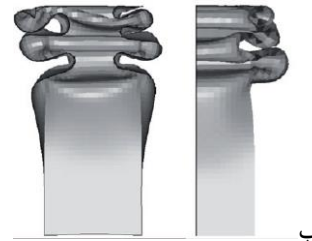
که تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع مورد نظر دارد. شکل ۴ تغییرات نیروی مچالگی را در طول مچالگی پروفیل نشان می‌دهد. شکل ۵ تغییر شکل پروفیل را در آزمایش تجربی و عددی و مقاله پیش رو نشان می‌دهد.



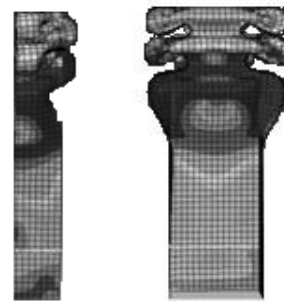
شکل ۴ نمودار نیروی مچالگی-جابجایی در برخورد محوری پروفیل: (A) تست تجربی [۴۲]، (B) مدل‌سازی در نرم افزار [۴۲]، (C) مدل‌سازی در این مقاله



الف



ب



پ

شکل ۵ الگوی مچالگی در برخورد محوری: (a) تست تجربی [۴۲]، (b) تحلیل عددی [۴۲]، (c) تحلیل عددی در این مقاله

### ۳-۴- بررسی جذب انرژی در برخورد مورب

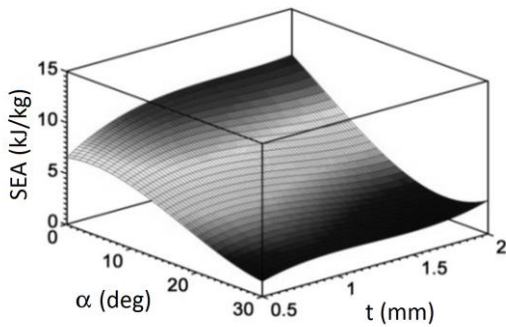
در این مقاله مدل‌سازی برخورد پروفیل با زوایای مختلف از صفر تا ۳۰ درجه و ضخامت ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. شکل ۶ تغییر شکل و مچالگی را برای پروفیل تحت زوایای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است با

انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی را دارند.

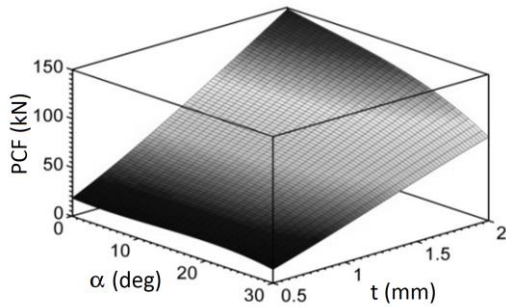
با استفاده از تئوری سطح پاسخ، توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی به صورت رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) تعریف می‌شوند.

$$EA(\alpha, t) = -1.1823 + 0.4627\alpha + 21.4696t - 0.0307\alpha^2 - 0.6588at - 13.5143t^2 + 0.0005\alpha^3 + 0.0122\alpha^2t + 0.0977at^2 + 2.8478t^3 \quad (18)$$

$$PCF(\alpha, t) = -10.5582 - 0.5833\alpha + 46.3931t + 0.079\alpha^2 + 0.2049\alpha t + 25.3359t^2 - 0.0018\alpha^3 - 0.0249\alpha^2t - 0.3009\alpha t^2 - 4.4017t^3 \quad (19)$$



شکل ۸ تابع جذب انرژی مخصوص بر حسب زاویه برخورد و ضخامت



شکل ۹ تابع بیشینه نیروی مچالگی بر حسب زاویه برخورد و ضخامت

برای نمایش بهتر رفتار پروفیل در برخورد، توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش زاویه برخورد پروفیل جذب انرژی مخصوص کاهش می‌یابد و به طور کلی با افزایش ضخامت، جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه برخورد بیشینه نیروی مچالگی کاهش می‌یابد. این مورد به طور خاص با افزایش ضخامت نمود بیشتری دارد. به طوری که به ازای یک زاویه برخورد مشخص، با افزایش ضخامت، مقدار بیشینه نیروی مچالگی افزایش می‌یابد.

جدول ۱ ماتریس طراحی پروفیل مخروطی هسته ساندویچی

شماره	زاویه برخورد	ضخامت (میلی‌متر)	انرژی جذب شده (ژول)	بیشینه نیروی مچالگی (کیلو نیوتن)	جرم (کیلوگرم)	جذب انرژی مخصوص
۱	۰	۰/۵	۲۹۱۵	۱۷/۷۹۲	۰/۴۵	۶۴۷۹
۲	۰	۱	۸۰۱۳	۵۷/۳۵۴	۰/۸۹	۹۰۰۳
۳	۰	۱/۵	۱۴۰۹	۱۰۰/۵۱	۱/۳۴	۱۰۴۶۲
۴	۰	۲	۱۹۴۲	۱۴۹/۰۷۴	۱/۷۸	۱۰۹۱۴
۵	۱۰	۰/۵	۲۸۹۷	۱۹/۶۲۲	۰/۴۵	۶۴۳۸
۶	۱۰	۱	۸۰۳۳	۵۴/۳۷۴	۰/۸۹	۹۰۲۵
۷	۱۰	۱/۵	۷۰۸۲	۹۱/۰۷۳	۱/۳۴	۵۲۸۵
۸	۱۰	۲	۸۳۱۱	۱۳۶/۰۷۵	۱/۷۸	۴۶۶۹
۹	۲۰	۰/۵	۱۲۲۱	۱۶/۶۲۸	۰/۴۵	۲۷۱۴
۱۰	۲۰	۱	۲۷۲۳	۵۱/۱۸۴	۰/۸۹	۳۰۵۹
۱۱	۲۰	۱/۵	۴۶۷۲	۸۸/۷۸۲	۱/۳۴	۳۴۸۶
۱۲	۲۰	۲	۵۹۷۲	۱۱۶/۷۷۷	۱/۷۸	۳۳۵۵
۱۳	۳۰	۰/۵	۸۹۷	۱۵/۷۱۶	۰/۴۵	۱۹۹۳
۱۴	۳۰	۱	۱۸۵۸	۳۵/۴۱۴	۰/۸۹	۲۰۸۸
۱۵	۳۰	۱/۵	۳۳۲۸	۶۱/۷۶۲	۱/۳۴	۲۴۸۳
۱۶	۳۰	۲	۵۰۷۹	۸۶/۰۳۵	۱/۷۸	۲۸۵۳

جدول ۲ بررسی دقت روش سطح پاسخ برای درجه توابع

تابع	درجه تابع	RE	R <sup>2</sup>	MAX	RMSE
جذب انرژی مخصوص	یک	(۳۵/۳۶ و -۴۷/۱۹)	۰/۹۴۹	۲/۷	۱/۳۲
	دو	(۳۸/۶۶ و -۳۲/۶۷)	۰/۹۶۳	۲/۹۳	۱/۱۳
	سه	(۲۹/۷۱ و -۲۹/۲۷)	۰/۹۸۲	۱/۷۷	۰/۷۷
	چهار	(۱۳۷۰ و -۶۸/۹۹)	۰/۹۹۲	۳۳	۱۵/۵
بیشینه نیروی مچالگی	یک	(۹۳/۶۲ و -۷۶/۴۲)	۰/۹۸۵	۱۹/۸	۹/۱۷
	دو	(۱۷/۲۰ و -۲۱/۷۲)	۰/۹۹۸	۷/۲۴	۲/۷۲
	سه	(۱۱/۹۷ و -۱۸/۸۱)	۰/۹۹۹	۴/۱۶	۱/۸
	چهار	(۳۴۰۰ و -۶۴/۶۰)	-۱۴/۶۱	۶۱۴	۲۹۸

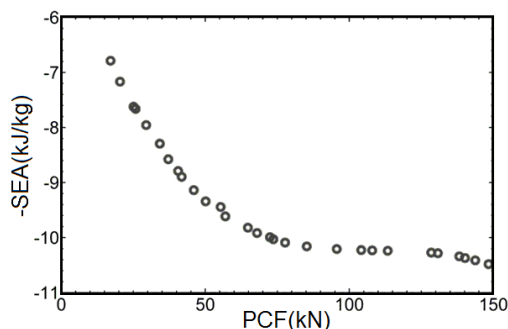


۳-۵- اثر برهم‌کنش

اثر برهم‌کنش بین جداره‌های خارجی و داخلی پروفیل و هسته‌ساندویچی در این قسمت بررسی می‌شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمودار نیروی فروریزش و انرژی را بر حسب مدت زمان فروریزش (۲۰ میلی‌ثانیه) در حالت‌های مختلف شامل هسته‌ساندویچی، پوسته داخلی و خارجی، پوسته‌های داخلی و خارجی + هسته‌ساندویچی (بدون اثر برهم‌کنش) و پروفیل با هسته‌ساندویچی نشان می‌دهند. مطابق با این شکل‌ها و در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش، سطح نیروی فروریزش و انرژی جذب شده برای پروفیل هسته‌ساندویچی بیشتر از جمع هسته و پوسته‌ها بدون اثر برهم‌کنش می‌باشد. سطح خاکستری نشان داده شده در شکل‌ها افزایش سطح در اثر برهم‌کنش هسته و پوسته‌ها را نشان می‌دهد. در اثر برهم‌کنش، جذب انرژی مخصوص برای پروفیل هسته‌ساندویچی به وضوح بیشتر از حالت هسته + پوسته‌هاست.

با رابطه (۲۱) می‌باشد. در این رابطه با تغییر مقدار  $w$  از ۰ تا ۱ نقاط پارتویی به‌دست می‌آیند و نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimize } F = w \frac{PCF(k,t)}{PCF^*} + (1-w) \frac{SEA(k,t)}{SEA^*} \\ \text{subject to} \\ w \in [0,1] \\ 0.5\text{mm} \leq t \leq 2\text{mm} \\ 0 \leq \alpha \leq 30 \end{array} \right. \quad (21)$$



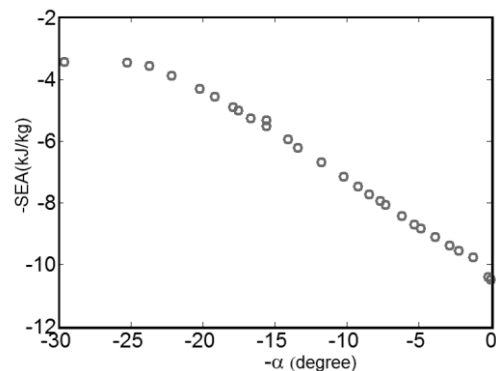
شکل ۱۲ نمودار پارتویی تابع جذب انرژی مخصوص بر حسب نیروی مچالگی

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۱۲، مقادیر بهینه‌ای که نیروی مچالگی را کمینه می‌کنند باعث کاهش میزان جذب انرژی نیز می‌شوند. در نقطه مقابل، مقادیر بهینه‌ای که میزان بیشینه جذب انرژی را نتیجه می‌دهند، باعث افزایش همزمان نیروی مچالگی می‌شوند. بنابراین، در این حالت با مجموعه‌ای از نقاط بهینه سروکار داریم.

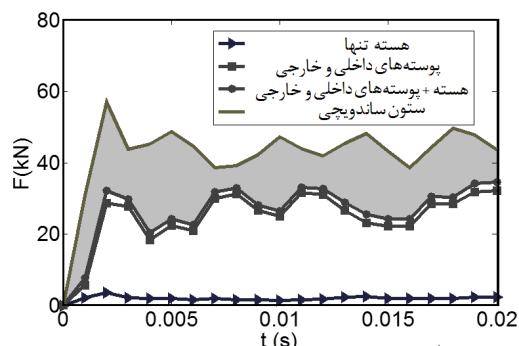
نکته مهم دیگر در بررسی فرآیند بهینه‌سازی برخورد مورب توجه به این نکته است که با افزایش زاویه برخورد میزان جذب انرژی مخصوص و نیروی بیشینه برخورد در پروفیل کاسته می‌شود. به طور قطع خواسته طراح این است که با برخورد مورب نیز جذب انرژی مخصوص مقدار بیشینه را داشته باشد. پس هدف طراحی می‌تواند بدین‌گونه تعریف شود که با افزایش زاویه برخورد، بیشینه جذب انرژی حاصل شود که به فرم رابطه (۲۲) می‌باشد. نتیجه حل پارتویی برای این حالت در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min. } f_1 = -\alpha, f_2 = -SEA(\alpha, t) \\ \text{s.t. } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ, 0.5\text{mm} \leq t \leq 2\text{mm} \end{array} \right. \quad (22)$$

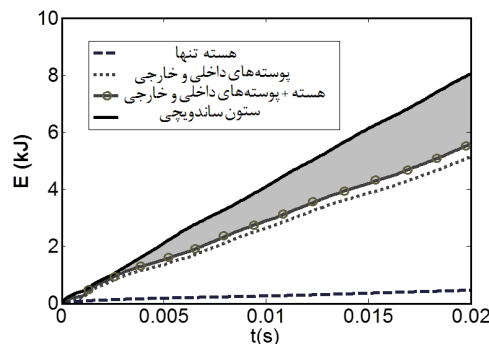
اکنون بر اساس نتایج حاصل از شکل ۱۳ می‌توان جواب بهینه‌ای را به عنوان شرایط مطلوب انتخاب کرد که در آن با وجود افزایش مقدار زاویه برخورد، میزان جذب انرژی نیز شرایط بهینه‌ای داشته باشد.



شکل ۱۳ حل پارتویی تابع جذب انرژی مخصوص و زاویه برخورد



شکل ۱۰ اثر برهم‌کنش در نیروی فروریزش پروفیل



شکل ۱۱ اثر برهم‌کنش در جذب انرژی ضربه

۳-۶- بهینه‌سازی

در آنالیز برخورد مورب پروفیل یک مسئله مهم تعیین شرایط بهینه مچالگی است. در مبحث برخورد و مچالگی، هدف طراحی بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص و کمینه کردن بیشینه نیروی مچالگی می‌باشد. به همین منظور معادله بهینه‌سازی به فرم رابطه (۲۰) شکل می‌گیرد.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min. } f_1 = -SEA(\alpha, t), f_2 = PCF(\alpha, t) \\ \text{s.t. } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ, 0.5\text{mm} \leq t \leq 2\text{mm} \end{array} \right. \quad (20)$$

که SEA جذب انرژی مخصوص و PCF بیشینه نیروی مچالگی می‌باشد. در این مقاله برای به‌دست آوردن نقاط بهینه، حل پارتویی برای توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی با استفاده از کد نویسی متلب به‌دست می‌آید. با استفاده از روش سطح پاسخ و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه حل پارتویی پروفیل هسته‌ساندویچی تحت برخورد مورب با رابطه (۲۰) به‌دست می‌آید. بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند به روش‌های مختلف به‌دست آید که یکی از روش‌های معمول با استفاده از روش وزن‌دهی به توابع

۳-۷- حساسیت موضعی

حساسیت جامع درجه اول و کلی برای تابع جذب انرژی مخصوص را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حساسیت تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به زاویه برخورد بیشتر از ضخامت پروفیل می‌باشد. از طرف دیگر، در مورد میزان حساسیت بیشینه نیروی مچالگی، ضخامت پروفیل نسبت به زاویه برخورد حساسیت بیشتری را باعث می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل آنالیز حساسیت جامع با نتایج کلی آنالیز حساسیت موضعی مطابقت دارند.

جدول ۳ آنالیز حساسیت به روش سوپول

تابع	حساسیت کلی		حساسیت درجه اول	
	نسبت به $t$	نسبت به $\alpha$	نسبت به $t$	نسبت به $\alpha$
جذب انرژی مخصوص	۰/۰۶۲۹	۰/۹۷۱۰	۰/۰۲۹۰	۰/۹۳۷۱
ماکزیمم نیروی مچالگی	۰/۹۴۵۳	۰/۰۸۰۱	۰/۹۱۹۹	۰/۰۵۴۷

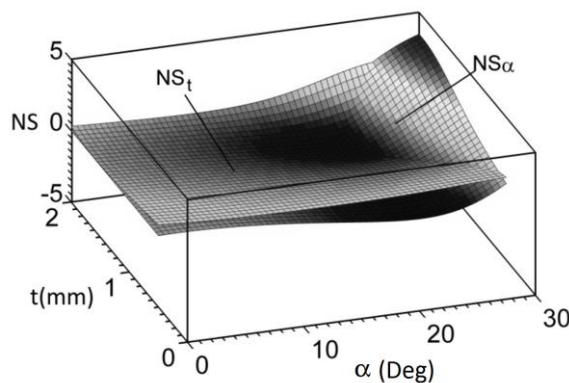
برای تابع بیشینه نیروی مچالگی نتیجه معکوس است و حساسیت تابع نسبت به ضخامت بیشتر از زاویه برخورد می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل برای تابع بیشینه نیروی مچالگی برای حساسیت موضعی و جامع مشابه یکدیگر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

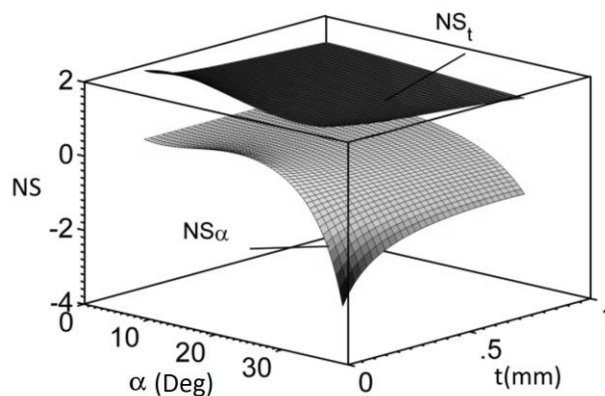
در این مقاله قابلیت جذب انرژی پروفیل مخروطی در برخورد غیر محوری (مورب) بررسی شد. ابتدا جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی برای پروفیل در دامنه طراحی (ضخامت اجزاء بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) و زاویه برخورد (صفر تا ۳۰ درجه) مورد مطالعه قرار گرفت. برای مدل‌سازی رفتار مچالگی پروفیل با استفاده از روش سطح پاسخ، توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی به صورت توابع درجه سه در نظر گرفته شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با افزایش زاویه برخورد پروفیل، جذب انرژی مخصوص کاهش یافته، و با افزایش ضخامت، جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار این است که با افزایش زاویه برخورد مقدار مچاله شدگی پروفیل کمتر می‌شود. در حقیقت در برخورد غیر مستقیم مومنوم اولیه پروفیل به صورت کامل صرف تغییر شکل پلاستیک نمی‌شود و مقداری صرف لغزیدن پروفیل به صورت اصطکاک می‌شود. با افزایش ضخامت میزان موادی که وارد ناحیه پلاستیک می‌شود بیشتر شده و در نتیجه جذب انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه برخورد بیشینه نیروی مچالگی کاهش یافته، و با افزایش ضخامت، مقدار بیشینه نیروی مچالگی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است در برخورد مورب نیروی برخورد مولفه کوچکتری نسبت به برخورد مستقیم دارد. در این تحقیق به مطالعه اثر برهم کنش نیز پرداخته شده است و نتایج نشان می‌دهند اثر برهم کنش تأثیر بسزایی در میزان جذب انرژی دارد.

در ادامه دو مسأله بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه کردن خصوصیات جذب انرژی مدل در نظر گرفته شدند. اولین مسأله در راستای بیشینه کردن جذب انرژی مخصوص و کمینه کردن بیشینه نیروی مچالگی به کار برده شد. مسأله بهینه‌سازی دوم در جهت بیشینه شدن همزمان جذب انرژی مخصوص و زاویه برخورد بود. در مرحله نهایی، آنالیز حساسیت توابع به دست آمده از روش سطح پاسخ برای جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی نسبت به پارامترهای ضخامت و زاویه برخورد انجام شد. در برخی نقاط حساسیت موضعی تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به ضخامت بیشتر و در نقاط دیگر

در این قسمت حساسیت توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی نسبت به پارامترهای طراحی شامل زاویه برخورد و ضخامت پروفیل بررسی می‌شود. شکل ۱۴ حساسیت موضعی نرمالایز شده را در محدوده طراحی برای جذب انرژی مخصوص نشان می‌دهد. در این نمودار سطح حساسیت بر روی محدوده طراحی مشاهده می‌شود. محل برخورد دو سطح یک منحنی در فضای سه بعدی تشکیل می‌دهد که تعبیر حساسیت موضعی یکسان تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به زاویه برخورد و ضخامت پروفیل می‌باشد (شکل ۱۴). در برخی نقاط حساسیت تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به ضخامت بیشتر و در مابقی نقاط طراحی، حساسیت نسبت به زاویه برخورد بیشتر است. شکل ۱۵ نیز حساسیت تابع بیشینه نیروی مچالگی را نسبت به پارامترهای طراحی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود سطوح با یکدیگر تلاقی ندارند و در تمام نقاط طراحی، حساسیت تابع بیشینه نیروی مچالگی نسبت به پارامتر ضخامت بیشتر از زاویه برخورد می‌باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که میزان حساسیت بیشینه نیروی مچالگی نسبت به ضخامت (سطح فوقانی) با تغییرات زاویه برخورد تغییر چندانی نمی‌یابد. در حالیکه میزان حساسیت بیشینه نیروی مچالگی نسبت به زاویه برخورد (سطح زیرین) به ازای مقادیر ضخامت کم و مقادیر زاویه برخورد بزرگ، تغییرات قابل توجهی دارد.



شکل ۱۴ آنالیز حساسیت نرمالایز موضعی برای تابع جذب انرژی مخصوص



شکل ۱۵ آنالیز حساسیت موضعی برای تابع ماکزیمم نیروی مچالگی

۳-۸- حساسیت جامع

در این مرحله به بررسی آنالیز حساسیت جامع توابع جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی مچالگی پرداخته می‌شود. جدول ۳ نتایج حاصل از بررسی



Shapes under Axial Loading," in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 60-68, 2015.

[5] Lee, S.H. Kim, H.Y. and Oh, I.S., "Cylindrical Tube Optimization using Response Surface Method Based on Stochastic Process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, No. 6, pp. 490-6, 2002.

[6] Chiandussi, G. and Avalle, M., "Maximization of the Crushing Performance of A Tubular Device by Shape Optimization," Computers & Structures, Vol. 80, No. 1, pp. 2425-32, 2002.

[7] Avalle, M. Chiandussi, G. and Belingardi, G., "Design Optimization by Response Surface Methodology: Application to Crashworthiness Design of Vehicle Structures," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.24, No. 4, pp. 325-32, 2002.

[8] Kim, H.S., "New Extruded Multi Cell Aluminum Profile for Maximum Crush Energy Absorption and Weight Efficiency," Thin-Walled Structures, Vol. 40, No. 7, pp. 311-27, 2002.

[9] Acar, E. Guler, MA. Gerçeker, B. Cerit, M.E. and Bayram, B., "Multiobjective Crashworthiness Optimization of Tapered Thin-Walled Tubes with Axisymmetric Indentations," Thin-Walled Structures, Vol. 49, No. 12, pp. 94-105, 2011.

[10] Alisadeghi, M. and Fazilati, J., "Optimization of Honeycomb Impact Attenuator using Genetic Algorithm Based on Response Surface Method and Design of Experiment; Part II: Optimization," in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 37-45, 2015.

[11] Darvizeh, A. Darvizeh, M. Ansari, R. and Meshkinzar, A., "Effect of Low Density, Low Strength Polyurethane Foam on The Energy Absorption Characteristics of Circumferentially Grooved Thick-Walled Circular Tubes," Thin-Walled Structures, Vol. 71, No. 10, pp. 81-90, 2013.

[12] Darvizeh, A. Darvizeh, M. Ansari, R. and Meshkinzar, A., "Analytical and Experimental Investigations into The Controlled Energy Absorption Characteristics of Thick-Walled Tubes with Circumferential Groove," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp. 4199-4212, 2014.

[13] Naddaf Oskouei, A. Khodarahmi, H. and Sohrabi, M., "Experimental and Numerical Study of Conical Thin Shells Collapse under Dynamic Axial Loadings," in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 392-402, 2015.

[14] Naddaf Oskouei, A. Khodarahmi, H. and Sohrabi, M., "Numerical and Experimental Study of a Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading," in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 169-178, 2015

[15] Rajabiehfarid, R. Darvizeh, A. Alitavoli, M. Ansari, R. and Maghdouri, E., "Experimental and Numerical Investigation of Internal Inversion of Metallic Cylindrical Shells under Axial Impact," in Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 1-11, 2014

[16] Borvik, T. Hopperstad, O.S. Reyes, A. Langseth, M. Solomos, G. and Dyngeland, T., "Empty and Foam Filled Circular Aluminum Tubes Subjected to Axial and Oblique Quasi Static Loading," International Journal of Crashworthiness, Vol. 8, No. 4, pp.481-94, 2003.

[17] Reyes, A. Langseth, M. and Hopperstad, O.S., "Square Aluminum Tubes Subjected to Oblique Loading," International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 1077-106, 2003.

[18] Tarlochan, F. Samer, F. Hamouda, A.M.S. Ramesh, S. and Khalid, K., "Design of Thin Wall Structures for Energy Absorption Applications: Enhancement of Crashworthiness Due to Axial and Oblique Impact Forces," Thin-Walled Structures, Vol. 71, No. 6, pp. 7-17, 2013.

[19] Qi, C. Yang, S. Dong, F., "Crushing Analysis and Multiobjective Crashworthiness Optimization of Tapered Square Tubes under Oblique Impact Loading," Thin-Walled Structures, Vol. 59, pp.103-119, 2012.

[20] Reyes, A. Hopperstad, O.S. and Langseth, M., "Aluminum Foam-Filled Extrusions Subjected to Oblique Loading: Experimental and Numerical Study," International Journal of Solids and Structures, Vol.4, No. 5-6, pp. 1645-1675, 2004.

[21] Reyes, A. Hopperstad, O.S. and Langseth, M., "Crashworthiness of Aluminum Extrusions Subjected to Oblique Loading Experiments and Numerical Analyses," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 1965-1984, 2002.

[22] Nagel, G., "Anumerical Study on the Impact Response and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 2, pp. 201-216, 2004.

[23] Nagel, G. and Thambiratnam, D., "Computer Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Rectangular Tubes," Thin-Walled Structures, Vol. 43, No. 8, pp. 1225-1242, 2005.

[24] Nagel, G. and Thambiratnam, D., "Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes under Oblique Impact loading," International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 10, pp. 1595-1620, 2006.

[25] Niknejad, A. and Liaghat, G., "Experimental Study of Polyurethane Foam Filler on Hexagonal Honeycomb Structure Behavior under Axial Load with Constant Rate," in Persian, 10th Iran Aerospace Conference, Tarbiat Modarres University, 2011.

[26] Adibnazari, S. and Mehrabi, H., "Effect of Cell Size Change on Honeycomb Structure Equivalent Mechanical Property," in Persian, 10th Iran Aerospace Conference, Tarbiat Modarres University, 2011.

دامنه طراحی حساسیت نسبت به زاویه برخورد بیشتر مشاهده شد. در تمام نقاط طراحی حساسیت تابع بیشینه نیروی مچالگی نسبت به پارامتر ضخامت بیشتر از زاویه برخورد می‌باشد. همچنین مشاهده شد که حساسیت جامع تابع جذب انرژی مخصوص نسبت به زاویه برخورد بیشتر از ضخامت پروفیل، و حساسیت جامع تابع بیشینه نیروی مچالگی نسبت به ضخامت بیشتر از زاویه برخورد می‌باشد.

#### ۵- فهرست علائم

$E$	انرژی (J)
$e$	خطا
$F$	نیرو (N)
$F_{avg}$	نیروی متوسط مچالگی (N)
$f_n(x)$	تابع هدف $n$ ام
$g$	تابع قید نامساوی
$h$	تابع قید مساوی
$k$	تعداد نقاط نمونه برداری
$M$	جرم پروفیل (kg)
$NS$	حساسیت نرمالایز شده
$NS_{\alpha}$	حساسیت نرمالایز شده نسبت به زاویه برخورد
$NS_t$	حساسیت نرمالایز شده نسبت به ضخامت
$n$	تعداد توابع هدف
$PCF(\alpha, t)$	بیشینه نیروی مچالگی
$p$	تعداد قیود مساوی
$q$	تعداد قیود نامساوی
RE	خطای نسبی
$S$	حساسیت موضعی
$SEA(\alpha, t)$	جذب انرژی مخصوص
$t$	ضخامت دیواره داخلی و خارجی و هسته ساندویچی
$x_i$	ورودی سیستم
$x_{i,0}$	نقطه ثابت در دامنه ورودی
$x_L$	باند پایین پارامترهای طراحی
$x_U$	باند بالای پارامترهای طراحی
$y(x)$	تابع اصلی (تابع انرژی و نیروی مچالگی)
$\tilde{y}(x)$	تابع تقریبی
$Y$	خروجی سیستم
<b>علائم یونانی</b>	
$\delta$	طول مچالگی پروفیل (m)
$\alpha$	زاویه برخورد

#### ۶- مراجع

[1] Gupta, N.K. Easwara Prasad, G.L. and Gupta, S.K., "Plastic Collapse of Metallic Conical Frusta of Large Semi-Apical Angles," International Journal of Crashworthiness, Vol. 2, No. 3, pp. 456-67, 1997.

[2] Reid, S.R. and Reddy, T.Y., "Static and Dynamic Crushing of Tapered Sheet Metal Tubes of Rectangular Cross-Section," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 28, No. 1, pp.117-125, 1986.

[3] Nagel, G.M. and Thambiratnam D.P., "Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Tubes under Impact Loading," International Journal of Crashworthiness, Vol 9, No. 2, pp.17-28, 2004.

[4] Shariati, M. Davarpa nah, M. Chavoshan, H. and Allahbakhsh, H.R., "Numerical and Experimental Investigations on Buckling and Control Amount of Energy Absorption of Stainless Steel 304L Shells with Various

- [35] Ebrahimi, S. and VahdatAzad, N., "Multiobjective Optimization and Sensitivity Analysis of Honeycomb Sandwich Cylindrical Columns under Axial Crushing Loads," *Thin-Walled Structures*, Vol. 88, No.7, pp.112-25, 2015.
- [36] Forsberg, J. and Nilsson, L., "On Polynomial Response Surfaces and Kriging for use in Structural Optimization of Crashworthiness," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 29, No. 5, pp. 232-43, 2005.
- [37] Forsberg, J. and Nilsson, L., " Evaluation of Response Surface Methodologies used in Crashworthiness Optimization," *International Journal of Impact Engineering*, Vol 32, No. 6, pp. 759-77, 2006.
- [38] Saltelli A, Chan, K. Scott, E.M., "Sensitivity Analysis," John Wiley & Sons, 2000.
- [39] Sobol, I.M., "Global Sensitivity Indices for Nonlinear Mathematical Models and Their Montecarlo Estimates," *Mathematics and Computers in Simulations*, Vol. 55, No. 3, pp.271-280, 2001.
- [40] Sobol, I.M., "Sensitivity Analysis for Nonlinear Mathematical Models," *Mathematical Modeling & Computational Experiment*, Vol.1, No. 2, pp. 407-14, 1993.
- [41] Wierzbicki, T., "Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb or Foam," *Computers & Structures*, Vol.68, No. 11, pp. 343-67, 1998.
- [42] Zarei, H.R. and Kroger, M., "Optimization of The Foam-Filled Aluminum Tubes for Crush Box Application," *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 214-221, 2007.
- [27] Galehdari, S. Kadkhodayan, A.M. and Hadid-Moud, S., "Analytical, Numerical and Experimental Study of Energy Absorption of Graded Honeycomb Structure under In-Plane Low Velocity Impact," in Persian, *Tarbiat Modarres University*, Vol. 14, No. 15, pp. 261-271, 2015.
- [28] Liaghat, G. and Sarailou, H., "Optimum Design of Honeycomb Core under Compression Load," in Persian, *Technical and Engineering Journal of Modarres*, Vol. 37, pp. 73-81, 2010.
- [29] Chobini, M. and Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption and Deformation of Thin-Walled Tube with Various Geometry Cross-Section under Lateral Impact Loading," in Persian, *Tarbiat Modares University*, 2013.
- [30] Meshkin zar, A. Darvizeh, M. and Darvizeh, A., "Analytical and Experimental Study of Thin-Walled Sections for Energy Absorption under Static and Dynamic Loading," in Persian, *Gilan University*, 2012.
- [31] Pirmohammadi, N. Liaghat, G. Pol, M. H. Sabouri, H., "Analytical, Experimental and Numerical Investigation of Sandwich Panels Made of Honeycomb Core Subjected Projectile Impact," in Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014.
- [32] Damghani Nouri, Hatami, M. H. and Ghodsbin Jahromi, A., "Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading," in Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371-378, 2014.
- [33] Zhang, Z. Liu, S. and Tang, Z., "Crashworthiness Investigation of Kagome Honeycomb Sandwich Cylindrical Column under Axial Crushing Load," *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 4, pp.33-45, 2010.
- [34] Zhang, Z. Liu, S. and Tang, Z., " Comparisons of Honeycomb Sandwich and Foam-Filled Cylindrical Columns under Axial Crushing loads," *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 8, pp.1033-49, 2011.