



## بررسی تحلیلی، عددی و تجربی جذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج تحت بارگذاری صفحه‌ای ضربه‌ای با سرعت کم

سید علی گله‌داری<sup>1</sup>، مهران کدخدایان<sup>2\*</sup>، سعید حدیدی مود<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177948944، um.ac.ir@kadkhoda

### چکیده

با توجه به اهمیت جذب انرژی در صنایع مختلف، جاذب‌های ضربه سبک از جمله سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق ابتدا رابطه تحلیلی برای تنش مسطح با در نظر گرفتن مدل سخت شونده‌گی توانی ارائه شده است. با استفاده از رابطه کرنش قفل شدگی و انرژی کرنشی، رابطه‌ی میزان انرژی ویژه جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج استخراج شده است. به منظور راستی‌آزمایی روابط تحلیلی استخراج شده، مسئله برای پنج نوع آلومینیوم مختلف در محیط نرم افزار آباکوس برای مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی و مدل کشسان-کاملاً مومسان شبیه سازی شده است. به منظور صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی عددی، آزمون ضربه بر روی یک سازه لانه زنبوری مدرج انجام شده است. پس از مقایسه نتایج عددی و تجربی، انطباق مناسبی بین نتایج وجود دارد. برای دو مدل ماده، میزان انرژی جذب شده حاصل از حل عددی با حل تحلیلی مقایسه شده که مدل سخت شونده‌گی توانی انطباق بیشتری را نشان داده است. در مرحله اول بهینه‌سازی با استفاده از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی و الگوریتم ژنتیک، نسبت جرم سازه به انرژی جذب شده کمینه شده است. در مرحله دوم، با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی بهینه، خواص مادی هر ردیف یا هدف افزایش انرژی ویژه تغییر داده شده است. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، با ثابت نگه داشتن جرم سازه ظرفیت جذب انرژی آن نسبت به مدل اولیه در مرحله اول 18% و در مرحله دوم 264% افزایش یافته است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 03 شهریور 1393  
پذیرش: 10 مهر 1393  
ارائه در سایت: 17 آبان 1393  
کلید واژگان:  
سازه لانه زنبوری مدرج  
بارگذاری ضربه‌ای درون صفحه‌ای  
سخت شونده‌گی توانی  
انرژی ویژه  
بهینه‌سازی

## Analytical, numerical and experimental study of energy absorption of graded honeycomb structure under in-plane low velocity impact

Seyed Ali Galehdari<sup>1</sup>, Mehran Kadkhodayan<sup>1\*</sup>, Saied Hadidi-Moud<sup>1</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
\*P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, kadkhoda@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 August 2014  
Accepted 02 October 2014  
Available Online 08 November 2014

#### Keywords:

Graded honeycomb structure (GHS)  
In-plane impact load  
Power hardening  
Specific absorbed energy  
Optimization

### ABSTRACT

Given the significance of energy absorption in various industries, light shock absorbers such as honeycomb structure under in-plane and out of plane loads are receiving a great deal of attention. In this research an analytical equation for plateau stress is represented, taking power hardening model into consideration. The equation of specific absorption of graded honeycomb structure with the locking strain and strain energy equation is represented. The structure, made from five aluminum grades is simulated in ABAQUS/CAE for elastic-perfectly plastic and power hardening model; numerical value of absorbed energy is compared to that of analytical method. A drop weight test on a graded honeycomb structure was performed. Based on the numerical simulation results, the experimental and numerical results showed good agreement. Based on the conducted comparisons, the numerical and analytical results are more congruent for power hardening model rather than elastic-perfectly plastic one. In the first step of optimization, by applying SQP method and genetic algorithm, the ratio of structure mass to the absorbed energy is minimized. In the second step, regarding the optimum value of parameters obtained in the first step, the material property of each row is changed. According to the optimization results, while keeping the mass of structure constant, the structure capacity of absorbing energy is increased by 18% in the first step and 264% in the second model, compared to the primary model.

### 1- مقدمه

با توسعه سریع صنایع اتومبیل‌سازی، حمل و نقل و مهندسی هوا- فضا، بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه‌های محافظ به یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی تبدیل شده است. 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 [1]. یکی از مهمترین

Please cite this article using:

S. A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-Moud, Analytical, numerical and experimental study of energy absorption of graded honeycomb structure under in-plane low velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 261-271, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

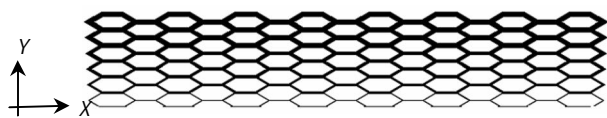
دادند. در این مدل با کاهش ضخامت لایه‌ها در راستای ضخامت ساندویچ پانل، سختی ماده کاهش یافت. مقایسه نتایج رابطه‌ی تحلیلی با نتایج حاصل از حل عددی نشان دهنده اختلاف زیادی بین نتایج است. پاپکا و همکاران [12] رفتار سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری تک محوره و دو محوره درون صفحه‌ای را توسط آزمایشات بررسی و سپس نتایج تجربی را با نتایج عددی صحت سنجی نمودند. در منابع فوق‌الذکر برای محاسبه تنش مسطح و انرژی جذب شده سازه لانه زنبوری از مدل ایده‌آل ماده کشسان - کاملاً مومسان استفاده شده است. بعلاوه، رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه میزان انرژی جذب شده بر حسب هندسه و خواص مادی وجود ندارد. بنابراین در مطالعه جاری با در نظر گرفتن مدل سخت شونده‌ی توانی، رابطه‌ای تحلیلی برای تنش مسطح ارائه شده است. با استفاده از این رابطه و رابطه کرنش قفل‌شدگی، رابطه‌ی میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج استخراج گردید. برای راستی‌آزمایی روابط ارائه شده، میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج از جنس 5 نوع آلومینیوم مختلف برای هر دو مدل ماده در محیط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. همچنین بهینه‌سازی ظرفیت جذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج انجام شده است.

## 2- مکانیک سازه لانه زنبوری

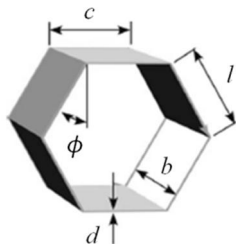
سلول ساختار لانه زنبوری به همراه پارامترهای موجود در شکل 1 نشان داده شده است. دو پارامتر موثر در میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری، چگالی نسبی و تنش مسطح ( $\sigma_p$ ) می‌باشند.

به منظور مطالعه رفتار سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای، نمودار تنش-کرنش برای آن استخراج می‌گردد. در این نمودار، تنش از تقسیم نیرو بر سطح مقطع عمود بر راستای بارگذاری ( $A$ ) و کرنش از تقسیم تغییر طول بر طول اولیه ( $L$ ) سازه در راستای بارگذاری بدست می‌آید. بارگذاری در خلاف جهت محور  $Y$  می‌باشد. برای سلول شکل (2)، کرنش دارای تنش ثابتی باشد به آن مقدار، تنش مسطح  $\sigma_p$  گویند. در واقع مقدار تنش مسطح ثابت نمی‌باشد اما تغییرات آن ناچیز است [13]. جذب انرژی توسط سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه‌ای با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی کرنشی و فشردگی سازه انجام می‌شود. این انرژی کرنشی همان انرژی لازم برای ایجاد مفصل پلاستیک در سازه می‌باشد. در استخراج

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 [2]. جاذب‌های ضربه، انرژی جنبشی ورودی را به انرژی‌های دیگری از جمله انرژی فشاری در سیالات، انرژی الاستیک در جامدات و انرژی پلاستیک در جامدات تغییر شکل‌پذیر تبدیل می‌نمایند. هنگام اعمال بارگذاری ضربه‌ای به سیال، موج ضربه باعث تراکم مولکول‌های سیال شده و انرژی ضربه صرف تغییر مکان و فشردگی سیال می‌گردد. بدین ترتیب انرژی جنبشی به انرژی فشاری سیال تبدیل می‌گردد. از اینرو انرژی ضربه با تبدیل به انرژی فشاری میرا می‌گردد. مهم‌ترین هدف و کاربرد این وسایل کاهش بار ضربه‌ای وارده از طریق پخش نمودن این بار در یک بازه‌ی زمانی مشخص می‌باشد. یکی از جاذب‌های ضربه طبیعی، استخوان بدن انسان و پرندگان می‌باشد. ساختار اسفنجی استخوان موجب جذب انرژی ضربه‌ای وارده و کاهش تنش لهیدگی در مفاصل می‌گردد [3]. در برخورد جسم با سازه‌های سلولی در محل برخورد، تغییر شکل بزرگ رخ می‌دهد که این تصادم باعث ایجاد سطح تماس بزرگ‌تر، کاهش تنش تماسی و انرژی ضربه‌ای کمتر می‌شود [4]. سازه‌های لانه زنبوری از جمله‌ی اولین جاذب‌های ضربه مورد استفاده در صنایع خودروسازی، هوا فضا و بسته بندی می‌باشند. در یک مثال دیگر، ساختار داخلی استخوان یک سازه‌ی بهینه شده از لحاظ وزن در برابر اعمال تنش‌های اصلی و برشی می‌باشد [5]. بر اساس این مثال‌های طبیعی و الهام گرفتن از ساختار آن‌ها، می‌توان سازه‌های بهینه، با قابلیت جذب بیشترین انرژی ضربه‌ای طراحی نمود. در ساختار موز، وظیفه‌ی پوست موز حفاظت مغز نرم موز در برابر بارهای ضربه‌ای خارجی می‌باشد. ساختار پوست موز تقریباً با سازه لانه زنبوری مدرج (شکل 1) مدل‌سازی شده است [4]. در مقاله‌ی دکیانگ و همکارانش [6] یک مدل المان محدود جهت بررسی رفتار این نوع سازه تحت بار ضربه‌ای در نرم افزار ال اس داین‌ا ارائه شد. سانگ و همکاران [7] رفتار فشردگی دینامیکی سازه سه بعدی از جنس فوم با چیدمان ورونی<sup>۲</sup> را با روش تجربی بررسی نمودند. همچنین شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده و تنش مسطح و میزان انرژی کرنشی با استفاده از این شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. بعلاوه، اثر شکل سلول‌ها، نیروی ضربه‌ای، چگالی نسبی و سخت‌شوندگی کرنشی بر مود تغییر شکل و تنش مسطح بررسی گردید. بر اساس نتایج بدست آمده، تنش مسطح و میزان جذب انرژی با افزایش نامنظمی سلول‌ها افزایش یافت. روان و همکارانش [8] تخریب درون صفحه‌ی سازه‌های لانه زنبوری را مطالعه نمودند. آن‌ها اثر ضخامت دیواره سلول و سرعت بار ضربه‌ای را بر مود تغییر شکل و تنش مسطح با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>۳</sup> بررسی و یک فرمول تحلیلی برای محاسبه‌ی تنش مسطح در سرعت‌های بالا ارائه نمودند. لیاقت و همکارانش [9] بهینه‌سازی سازه لانه زنبوری را تحت بارگذاری فشاری انجام دادند و حل تحلیلی به همراه بهینه‌سازی هندسه‌های مختلف سلول سازه بررسی شد. ازدری و همکارانش [10] رفتار تخریب دینامیکی و میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری منظم و نامنظم و تابعی مدرج را بررسی و با استفاده از روش اجزاء محدود، مدهای مختلف تغییرشکل و میزان جذب انرژی را در این‌گونه سازه‌ها تحلیل نمودند. محمد علی و همکارانش [11] رفتار سازه لانه زنبوری مدرج را تحت بارگذاری ضربه‌ای مدل‌سازی نموده‌اند و رابطه‌ای تحلیلی برای تنش مسطح بر اساس مدل ماده کشسان-کاملاً مومسان ارائه



شکل 1 مدل بهبود یافته پوست موز [4]



شکل 2 سلول ساختار لانه زنبوری

1- Ls-Dyna  
2- Vroni  
3- ABAQUS

نمی‌دهد، طول این مفصل ( $d/2$ ) در محاسبه گشتاور (شکل 5) از بازوی گشتاور کاسته می‌شود. در این حال با توجه به اینکه در دو سر وجه مایل مفصل پلاستیک ایجاد می‌گردد، اندازه دو مفصل پلاستیک ( $2 \times d/2 = d$ ) از طول وجه مایل ( $l$ ) کسر شده و طول بازوی پلاستیک به  $l - d$  تقلیل یافته است. بر اساس تئوری حد پایین، نیروی نظیر فروپاشی از مساوی قرار دادن ممان داخلی سلول با ممان خارجی وارد شده (شکل 4) مطابق رابطه (6) بدست می‌آید،

$$2M_p = P(l - d)\sin\phi \quad (6)$$

با جایگذاری روابط (3) و (5) در رابطه (6) و در نظر گرفتن اثر اندازه مفصل پلاستیک بر بازوی گشتاور پلاستیک، رابطه تنش مسطح برای رفتار ماده سخت شوندگی توانی مطابق رابطه (7) حاصل می‌شود،

$$\sigma_p = \left(\frac{\sigma_u}{n+2}\right) \frac{d^2}{(c + l\sin\phi)(l-d)\sin\phi} \quad (7)$$

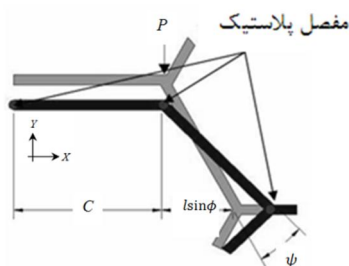
کرنش نظیر فشردگی و یا قفل‌شدگی بر اساس چگالی نسبی مطابق رابطه (8) قابل محاسبه است [14].

$$\rho = \frac{\left(\frac{d}{l}\right)\left(\frac{c}{l} + 2\right)}{2(\sin\phi + \frac{c}{l})\cos\phi} \rho_s \quad (8)$$

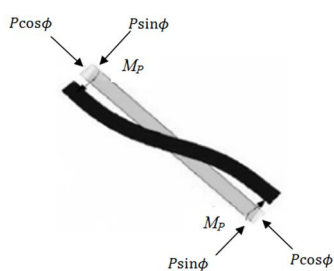
لازم به ذکر است که  $\rho^*$  نسبت چگالی سلول‌های سازه به چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنبوری می‌باشد ( $\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s}$ ). در رابطه (8) چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنبوری است و نسبت حجمی روزه سلول - های سازه برابر  $1 - \frac{\rho}{\rho_s}$  می‌باشد. این مقدار تقریباً برابر کرنش قفل‌شدگی و مطابق رابطه (9) می‌باشد [14].

$$\varepsilon_d = 1 - \rho^* = 1 - \frac{\left(\frac{d}{l}\right)\left(\frac{c}{l} + 2\right)}{2(\sin\phi + \frac{c}{l})\cos\phi} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که با افزایش ضخامت دیواره سلول لانه زنبوری، کرنش قفل‌شدگی ایجاد شده کمتر از رابطه فوق می‌شود که مقدار دقیق آن برای سازه‌های لانه زنبوری موجود نیست و می‌توان آن را از با استفاده از روش تجربی بدست آورد.  $\varepsilon_d$  کرنش نظیر انتهای تغییر شکل در هر ردیف است. به منظور استخراج رابطه انرژی ویژه سازه، فرض شده است که انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری برابر انرژی کرنشی کل سازه می‌باشد. بر این اساس



شکل 3 فروپاشی پلاستیک اضلاع شیب‌دار در راستای Y



شکل 4 ممان داخلی و خارجی بر روی ضلع شیب دار سلول

روابط تحلیلی مقدار تنش مسطح ثابت فرض می‌شود. رابطه‌ی تنش مسطح را می‌توان با توجه به گشتاور نظیر مفصل پلاستیک و تئوری‌های حد پایین و حد بالا بدست آورد. بر اساس تئوری حد بالا، نیروی خارجی وارد شده بر پایه‌ی سازه همیشه بزرگتر و یا مساوی نیروی نظیر فروپاشی می‌باشد و بر اساس تئوری حد پایین، نیروی خارجی وارد شده بر پایه‌ی سازه همواره کوچک‌تر و یا مساوی نیروی نظیر فروپاشی است [14]. تاکنون برای استخراج رابطه تنش مسطح از رفتار ماده ایده‌آل کشسان - کاملاً مومسان استفاده شده است. از آنجایی که رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان بیانگر رفتار واقعی ماده نمی‌باشد، تنش بدست آمده از این رابطه اختلاف زیادی با نتایج شبیه‌سازی عددی دارد. بر این اساس گشتاور نظیر مفصل پلاستیک و تنش مسطح برای هر دو مدل ماده محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

میزان گشتاور نظیر مفصل پلاستیک بر مقطع دیواره سلول لانه زنبوری مطابق رابطه (1) می‌باشد،

$$M_p = 2b \int_0^{\frac{d}{2}} y \sigma dy \quad (1)$$

بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان این گشتاور مطابق رابطه (2) بدست می‌آید،

$$M_p = \frac{b \sigma_y d^2}{4} \quad (2)$$

با جاگذاری  $\sigma = K \varepsilon^n$  و  $\varepsilon = \frac{2y}{d} \varepsilon_{max}$  در رابطه (1) برای رفتار ماده با سخت‌شوندگی توانی، گشتاور نظیر مفصل پلاستیک مطابق رابطه (3) بدست می‌آید،

$$M_p = \frac{b \sigma_u d^2}{2(n+2)} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (3)،  $\sigma_u$  مقاومت نهایی ماده‌ی سازنده سلول سازه می‌باشد. با استفاده از رابطه (2) و تئوری‌های حد پایین و حد بالا، تنش مسطح برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان مطابق رابطه (4) بدست می‌آید [14].

$$\sigma_p = \frac{\sigma_y d^2}{2(c + l\sin\phi)l\sin\phi} \quad (4)$$

در مطالعه جاری با هدف کاهش خطای موجود بین مقدار تنش تحلیلی (رابطه (4)) و نتایج عددی، از رفتار سخت‌شوندگی توانی مطابق روش ذیل به منظور استخراج رابطه‌ی گشتاور نظیر ایجاد مفصل پلاستیک و تنش مسطح استفاده شده است.

در هنگام اعمال نیروی خارجی، نیروی فشاری در جهت Y به اضلاع شیب‌دار سلول منتقل شده و باعث خمش آنها می‌گردد. در این تحلیل، فروپاشی کامل مکانیزم با ایجاد 6 مفصل پلاستیک رخ می‌دهد. بنابراین ضلع شیب‌دار سلول دچار پیچش  $\psi$  می‌شود. زاویه  $\psi$  در شکل (3) نمایش داده شده است. بر اساس نظریه حد بالا، نیروی وارد شده بر دیواره سلول مطابق رابطه‌ی (5) می‌باشد،

$$P = \sigma_p (c + l\sin\phi) b \quad (5)$$

برای  $\frac{d}{l} < 0.25$  تغییر شکل برشی و محوری بسیار کوچکتر از تغییر شکل خمشی می‌باشد. بنابراین، این دو تغییر شکل بر تنش مسطح تأثیر ناچیزی دارند. بازوی گشتاور تأثیر زیادی بر میزان گشتاور خمشی پلاستیک دارد [15]. اندازه‌ی بازوی گشتاور با در نظر گرفتن میزان گشتاور خمشی، کرنش پلاستیک معادل و تنش فن میز [16-17] در نقاط انگرالی با استفاده از حل اجزاء محدود به دست می‌آید. اندازه مفصل پلاستیک در هر گوشه از ضلع سلول، برابر نصف ضخامت ضلع سلول می‌باشد، از آنجایی که مفصل پلاستیک مانند لولا عمل نموده و در برابر خمش مقاومتی از خود نشان

می‌باشد که با استفاده از روابط فوق می‌توان رابطه‌ای برای میزان انرژی ویژه سازه لانه زنبوری مدرج بدست آورد. مطابق شکل (1) سازه دارای 6 ردیف بوده و در هر ردیف 15 سلول قرار دارد. با توجه به تفاوت ضخامت در هر ردیف، جرم کل سازه مطابق رابطه (17) بدست می‌آید.

$$m = \rho_s b (32l + 23c) \sum_{i=1}^6 d_i \quad (17)$$

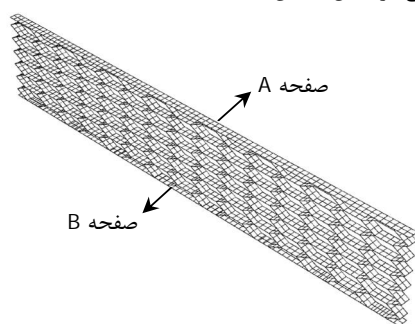
بنابراین رابطه انرژی ویژه برای سازه مورد مطالعه بشکل ذیل خواهد بود که مطلوبست این کمیت همواره بیشینه باشد (رابطه (18)).

$$e = \frac{U}{m} = \frac{2bl \cos \phi (15c + 16l \sin \phi) \sum_{i=1}^6 \sigma_{p_i} \varepsilon_{d_i}}{\rho_s b (32l + 23c) \sum_{i=1}^6 d_i} \quad (18)$$

با جایگذاری رابطه تنش مسطح (روابط (4) و (7)) در رابطه (18)، مقدار انرژی ویژه برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان و سخت شوندگی توانی قابل محاسبه است. به منظور راستی‌آزمایی نتایج تحلیلی بدست آمده از تحلیل عددی (روش اجزاء محدود) استفاده شده است.

### 3- راستی‌آزمایی روابط تحلیلی

برای راستی‌آزمایی روابط تحلیلی بدست آمده بر اساس رفتار ماده با سخت شوندگی توانی، جذب انرژی یک سازه لانه زنبوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. همچنین برای مقایسه نتایج آن با نتایج روابط تحلیلی بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان، جذب انرژی همان سازه لانه زنبوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. در هر حالت، سازه تحت یک انرژی جنبشی قرار گرفته و میزان جذب انرژی جذب شده عددی با تحلیلی مقایسه شده است. در جدول 1 مشخصات هندسی سازه آمده است. مشخصات مادی آلومینیوم‌های بکار رفته و میزان انرژی جنبشی اعمال شده به سازه برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی و کشسان - کاملاً مومسان به ترتیب در جداول (2) و (3) نشان داده شده است. به منظور شبکه‌بندی سازه لانه زنبوری از المان پوسته‌ای 4 گره‌ای S4R و برای صفحات صلب A و B از المان دو خطی چهار گره‌ای R3D4 استفاده شده است. شبکه‌بندی سازه لانه زنبوری با استفاده از المان S4R انجام گرفته که در این المان کرنش برشی در راستای ضخامت ثابت فرض شده است. با توجه به اینکه سازه دارای هندسه منظم است و از ورق نازک ساخته شده، از المان پوسته‌ای 4 گره‌ای استفاده شده و به دلیل هندسه منظم صفحه صلب از المان 4 گره‌ای استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل از جنس آلومینیوم 1100-O شامل 4950 المان S4R، 906 المان R3D4 و 7648 گره است. شبکه بندی مدل به همراه صفحات بالایی و پایینی در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 6 مدل المان محدود سازه لانه زنبوری مدرج و صفحات بالا و پایینی از جنس آلومینیوم 1100-O

برای محاسبه انرژی کرنشی بر واحد حجم، می‌توان مساحت زیر نمودار تنش - کرنش را بدست آورد. رابطه انرژی کرنشی مطابق رابطه (10) می‌باشد.

$$U = \int (\int \sigma d\varepsilon) dV \quad (10)$$

در رابطه فوق  $\sigma$  تانسور تنش وارد شده به سازه،  $\varepsilon$  تانسور کرنش و  $V$  حجم سازه می‌باشند. از آنجایی که ضخامت سلول‌ها در هر ردیف با ردیف دیگر متفاوت است (از بالا به پایین ضخامت کاهش می‌یابد) برای محاسبه انرژی، به طور جداگانه برای هر ردیف از روابط تحلیلی فوق استفاده می‌شود. بر اساس روابط تحلیلی ارائه شده، نمودار تنش مسطح - کرنش قفل‌شدگی سازه مطابق شکل (6) است. برای محاسبه میزان انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه لانه زنبوری مدرج با توجه به شکل (5)، سطح زیر نمودار تنش - کرنش سازه محاسبه می‌شود. هر ردیف از سازه در یک تنش مسطح و یک کرنش قفل‌شدگی دچار تغییر شکل می‌گردد. این نمودار برای AL1100-O با هندسه مطابق جدول (1) ترسیم شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن  $\sigma = \sigma_p$  و  $\varepsilon = \varepsilon_d$  (برابری تنش با تنش مسطح و کرنش با کرنش قفل‌شدگی) برای هر یک از 6 ردیف، انرژی کرنشی بر واحد حجم سازه مطابق رابطه (11) است.

$$u = \sum_{i=1}^6 \sigma_{p_i} \varepsilon_{d_i} \quad (11)$$

با استفاده از روابط تنش مسطح و کرنش قفل‌شدگی، انرژی کرنشی کل سازه مطابق رابطه (12) می‌گردد.

$$U = \int (\int \sigma_p d\varepsilon_d) dV = AL \sum_{i=1}^6 \sigma_{p_i} \frac{\varepsilon_{d_i}}{6} \quad (12)$$

در رابطه (12) تنش مسطح هر ردیف،  $\varepsilon_{d_i}$  کرنش نظیر قفل‌شدگی هر ردیف،  $A$  مساحت سازه لانه زنبوری عمود بر راستای اعمال ضربه و  $L$  ارتفاع سازه در راستای طولی (راستای برخورد) می‌باشد. بر اساس هندسه سلول، رابطه انرژی مطابق رابطه (13) قابل باز نویسی است.

$$U = 2bl \cos(\phi) (15c + 16l \sin(\phi)) \sum_{i=1}^6 \sigma_{p_i} \varepsilon_{d_i} \quad (13)$$

که  $\sigma_{p_i}$  مطابق رابطه (14) است.

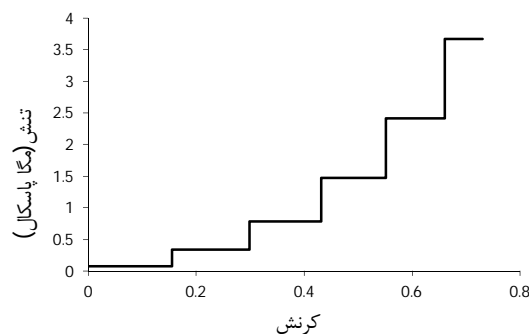
$$\sigma_{p_i} = \left( \frac{\sigma_u}{n+2} \right) \frac{d_i^2}{(c + l \sin \phi)(l - d_i) \sin \phi} \quad (14)$$

با توجه به شکل (3)، حجم و جرم سلول لانه زنبوری به ترتیب عبارتند از: (رابطه (15) و (16)).

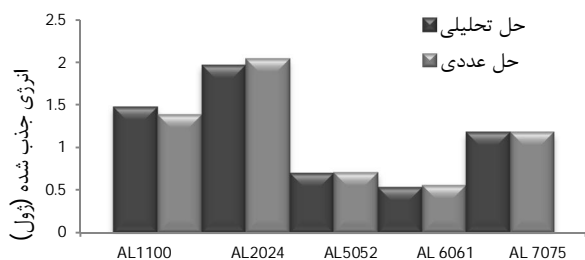
$$V_c = db(4l + 2c) \quad (15)$$

$$m_c = \rho_s db(4l + 2c) \quad (16)$$

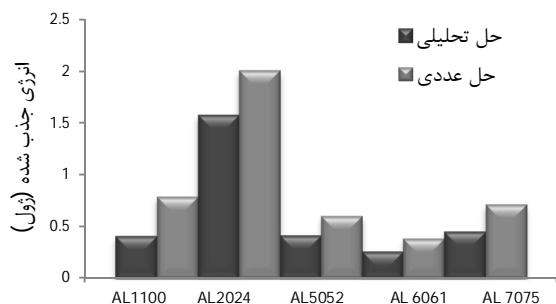
از جمله پارامترهای مهم در طراحی جاذب‌های انرژی، انرژی ویژه



شکل 5 نمودار تنش - کرنش سازه لانه زنبوری مدرج



شکل 7 نمودار مقایسه میزان انرژی جذب شده تحلیلی و عددی برای سازه لانه زنبوری مدرج با جنس‌های مختلف آلومینیوم برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی



شکل 8 نمودار مقایسه میزان انرژی جذب شده تحلیلی و عددی برای سازه لانه زنبوری مدرج با جنس‌های مختلف آلومینیوم برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان آمده است.

نتایج عددی و تحلیلی میزان جذب انرژی برای دو مدل ماده مختلف در جداول 4 و 5 نیز مقایسه و میزان خطا گزارش شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده، نتایج عددی و تحلیلی برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی انطباق مناسب‌تری داشته و در نمودار شکل 8 میزان انرژی جذب شده تحلیلی انطباق مناسبی با نتایج عددی دارد. در حالی که برای مدل کشسان - کاملاً مومسان نتایج عددی اختلاف زیادی با نتایج تحلیلی دارد. حداکثر خطا برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی 6/4% و برای مدل کشسان - کاملاً مومسان 48/08% بدست آمده است. با توجه به اینکه روابط تحلیلی برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی بر اساس رفتار واقعی مواد است، اختلاف بین نتایج عددی و تحلیلی نسبت به مدل ایده‌آل کشسان - کاملاً مومسان کاهش یافته است. بنابراین مناسب است که از روابط تحلیلی جدید بدست آمده برای استخراج نمودار تنش - کرنش و محاسبه میزان انرژی جذب شده استفاده شود.

جدول 4 میزان انرژی جذب شده در حل عددی و رابطه تحلیلی برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی

درصد خطای نسبی	انرژی جذب شده با استفاده از رابطه (13) (ژول)		نوع آلومینیوم
	انرژی جذب شده در حل عددی (ژول)	انرژی جذب شده با استفاده از رابطه (13) (ژول)	
6/4	1/385	1/48	1100-0
3/2	0/555	0/537	6061-0
0/1	0/705	0/704	5052-0
0/4	1/185	1/18	7075-0
3/4	2/04	1/97	2024-T4

اتصال لایه‌های مختلف سازه با استفاده از قید Tie انجام شده است. همچنین تماس بین صفحه A و سازه از اتصال صفحه به صفحه جنبشی و برای تماس صفحه صلب B به سازه از اتصال پنالتی بدون اصطکاک استفاده شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه A حرکت تنها در راستای Y (راستای برخورد) آزاد بوده در حالی که تمام درجات آزادی صفحه B بسته است. لازم به ذکر است که صفحه A به جرم یک کیلوگرم با سرعت مشخص (بسته به انرژی جنبشی اعمال شده)، به سازه برخورد کرده است. بر اساس نتایج شبیه سازی عددی و رابطه تحلیلی (13) میزان جذب انرژی برای سازه‌هایی با انواع مختلف آلومینیوم برای رفتار ماده با سخت شوندگی توانی و مدل کشسان - کاملاً مومسان به ترتیب در شکل‌های 7 و 8

جدول 1 مشخصات هندسی سازه

نماد	برای آلومینیوم 1100-0	برای آلومینیوم 6061-0، 7075-0 و 2024-T4
$d_1$	0/6 میلی‌متر	0/35 میلی‌متر
$c$	2/7 میلی‌متر	2/7 میلی‌متر
$l$	2/5 میلی‌متر	2/5 میلی‌متر
$d_2$	0/499 میلی‌متر	0/3 میلی‌متر
$d_3$	0/399 میلی‌متر	0/25 میلی‌متر
$d_4$	0/299 میلی‌متر	0/2 میلی‌متر
$d_5$	0/2 میلی‌متر	0/15 میلی‌متر
$d_6$	0/1 میلی‌متر	0/1 میلی‌متر
$\phi$	63 درجه	63 درجه

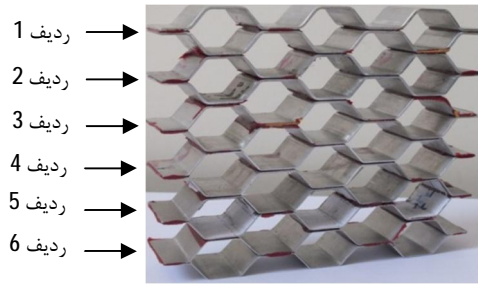
جدول 2 مشخصات مادی آلومینیوم و انرژی جنبشی اعمال شده به سازه برای رفتار ماده با سخت شوندگی توانی

نوع آلومینیوم	انرژی جنبشی اعمال شده به سازه (ژول)	تنش بحرانی (مگا پاسکال)	توان ضریب رابطه نمایی (مگا پاسکال)
1100-0	1/385	137	0/2 [18]
6061-0	0/555	150	0/2 [18]
5052-0	0/705	172	0/13 [18]
7075-0	1/185	290	0/17 [18]
2024-T4	2/04	437	0/16 [18]

جدول 3 مشخصات مادی آلومینیوم و انرژی جنبشی اعمال شده به سازه برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان

نوع آلومینیوم	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	انرژی جنبشی اعمال شده به سازه (ژول)
1100-0	34/47	0/784
6061-0	55/15	0/38
5052-0	89/63	0/6
7075-0	103/42	0/71
2024-T4	324/05	2

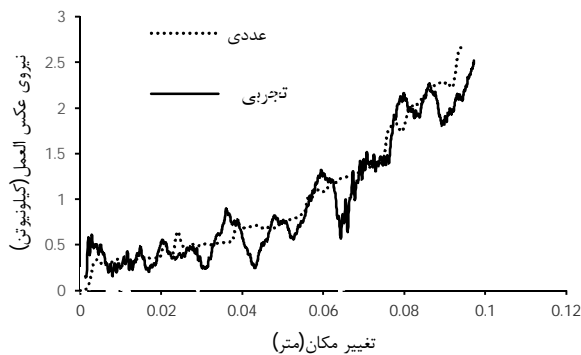
ترسیم شده است. همچنین مدل تغییر شکل یافته سازه پس از آزمون تجربی و شبیه سازی عددی در شکل (12) با هم مقایسه شده است.



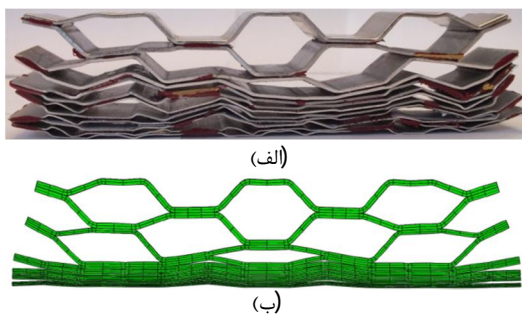
شکل 9 نمونه تست سازه لانه زنبوری مدرج شش ردیفه



شکل 10 دستگاه آزمون سقوط وزنه



شکل 11 نمودار نیرو- تغییر مکان سازه لانه زنبوری مدرج برای آزمون تجربی و حل عددی



شکل 12 نمای تغییر شکل یافته سازه لانه زنبوری مدرج حاصل از (الف) آزمون تجربی و (ب) حل عددی

جدول 5 میزان انرژی جذب شده در حل عددی و رابطه تحلیلی برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان

نوع آلومینیوم	انرژی جذب شده با استفاده از رابطه (13) (ژول)		درصد خطای نسبی
	انرژی جذب شده در حل عددی (ژول)	رابطه تحلیلی (ژول)	
1100-O	0/407	0/784	48/08
6061-O	0/255	0/38	32/89
5052-O	0/415	0/6	30/8
7075-O	0/448	0/71	36/9
2024-T4	1/574	2	21/3

#### 4- آزمون تجربی

به منظور صحت سنجی روش شبیه سازی عددی در نرم افزار آباکوس، آزمون تجربی سقوط وزنه با سرعت پایین بر روی سازه لانه زنبوری مدرج انجام شده است. این سازه با توجه به امکانات ساخت، مطابق شکل 9 طراحی و ساخته شده است.

ردیف‌های این سازه با استفاده از سمبه و ماتریس شکل داده شده و سپس با استفاده از چسب فیلمی<sup>1</sup> به یکدیگر چسبانده شده است. ضخامت ردیف‌های اول تا ششم سازه به ترتیب برابر 1/6، 1/27، 1/016، 1/08125، 0/635 و 0/508 میلی‌متر است. همچنین برای این سازه  $t=12$  mm،  $c=15$  mm و  $\phi=36^\circ$  است. ارتفاع و عرض سازه 130 و عمق آن 28/5 میلی‌متر است. جنس تمامی ردیف‌ها از AL6061-O می‌باشد. برای استخراج خواص مادی این آلیاژ و تحلیل با دقت بیشتر، جنس هر شش ضخامت تحت آزمون تست کشش قرار گرفته است. خواص مکانیکی هر یک از ردیف‌ها در جدول 6 آمده است.

آزمون ضربه با استفاده از دستگاه تست سقوط آزاد انجام شده است. نمایی از این دستگاه در شکل 10 نشان داده شده است. در این آزمون یک مجموعه به جرم 9776/6 گرم (برابر جرم وزنه و متعلقات) از ارتفاع 1/2 متری رها شد. به دلیل وجود عوامل اتلاف انرژی جنبشی از جمله اصطکاک، با استفاده از سرعت سنج سرعت وزنه هنگام برخورد به نمونه اندازه گیری شده است. این سرعت برابر 4/5 m/s است. همچنین با استفاده از شتاب سنج، شتاب وزنه در طول زمان برخورد به سازه و جذب انرژی اندازه گیری شده است. با ضرب نمودن مقدار شتاب در جرم وزنه نیروی عکس العمل سازه و با دو بار انتگرال گیری عددی از شتاب مقدار تغییر شکل سازه بدست آمده است.

#### 4-1- شبیه سازی عددی

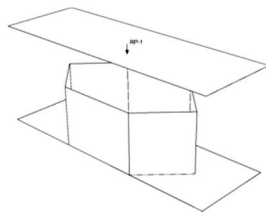
با توجه به مشخصات هندسی و مادی سازه، جرم و سرعت برخورد وزنه، شرایط بارگذاری و مرزی، آزمون تجربی بر روی نمونه تست در محیط نرم-افزار آباکوس شبیه سازی شده است. برای مدل سازی برخورد، وزنه با جرم ذکر شده و بستر سازه به ترتیب با صفحات صلب در بالا و پایین صفحه شبیه سازی شده است. برای شبکه بندی سازه از المان C3D8R و برای صفحات بالایی و پایینی از المان R3D4 استفاده شده است. بقیه شرایط شبیه سازی عددی مطابق بخش 3 می‌باشد.

نمودار نیرو- تغییر مکان سازه تحت بار ضربه‌ای با سرعت کم با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمون تجربی و شبیه سازی عددی مطابق شکل 11

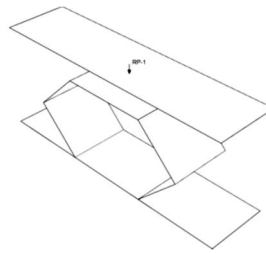
1- Adhesive-film

جدول 6 خواص مکانیکی ورق آلومینیومی 6061-O با ضخامت‌های مختلف

ضخامت (میلی‌متر)	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)	توان رابطه توانی	ضریب رابطه توانی (مگاپاسکال)	کرنش زوال %	تنش بحرانی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
1/6	68/28	0/213	202/77	23/76	131/39	51/59
1/27	66/98	0/245	242/66	25/142	141	51/92
1/016	62/5	0/291	220/8	25/168	131	50/7
0/8125	63/51	0/229	205/6	30/72	141	50
0/635	64/3	0/247	228	27/06	134	48/152
0/508	66/81	0/303	217/27	31/092	124	53

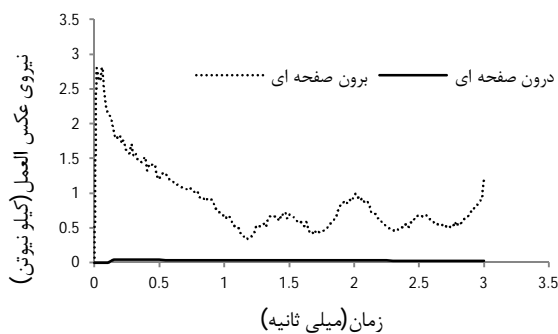


(الف)



(ب)

شکل 13 نحوه‌ی بارگذاری، (الف) درون صفحه‌ای و (ب) برون صفحه‌ای



شکل 14 نمودار نیرو بر حسب زمان در دو حالت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای

در مطالعه جاری مدرج بودن سازه باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربه‌ای به جسم محافظت شونده می‌شود. به منظور بررسی اهمیت مدرج بودن سازه و کاهش سختی سازه از بالا به پایین، انتقال نیرو توسط سازه مدرج و سازه با ضخامت یکسان تحت بارگذاری ضربه‌ای در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی و مقایسه شده است. در شبیه‌سازی عددی سازه مدرج  $c=2.96$ ،  $l=2.466$  mm و  $\phi = 54.4^\circ$  است. ضخامت ردیف‌های اول تا ششم به ترتیب 0/599، 0/499، 0/4، 0/299، 0/1449 و 0/0692 میلی‌متر، ارتفاع سازه 17/16 و عرض آن 76/4 میلی‌متر است. برای سازه با ضخامت یکسان تمام ردیف‌ها با ضخامت ثابت 0/6 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر دو مدل، جنس

با توجه به شکل‌های 11 و 12، نتایج عددی انطباق مناسبی با نتایج تجربی دارد. به طوری که حداکثر خطا بین نیروی عکس العمل تجربی و عددی 5/4% است. بنابراین روش شبیه‌سازی عددی و پارامترهای کاربردی در این شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفته است.

#### 5- اهمیت بارگذاری ضربه‌ای درون صفحه‌ای و مدرج بودن سازه

به طور کلی، سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری خارج صفحه، قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به بارگذاری درون صفحه‌ای دارد. بارگذاری خارج صفحه در موردی که هدف فقط جذب میزان بالاتری از انرژی باشد، کاربرد دارد. مدت زمان انتقال نیروی ضربه‌ای از جمله پارامترهای مهم در جذب انرژی است. در شرایطی که هدف، محافظت از بدن انسان یا یک قطعه حساس در برابر آسیب ناشی از بار ضربه‌ای باشد، اهمیت مدت زمان انتقال نیرو، افزایش می‌یابد. زیرا هرچه بار ضربه‌ای در مدت زمان بیشتری انتقال یابد، آسیب کمتری به بدن انسان یا قطعه وارد می‌آید. اگر بارگذاری بر روی سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه‌ای انجام پذیرد، مدت زمان انتقال نیرو در مقایسه با بارگذاری خارج از صفحه افزایش می‌یابد. به منظور مطالعه این موضوع در این تحقیق، برخورد یک جرم یک کیلوگرمی با سرعت 5 m/s بر دو سلول مشابه لانه زنبوری منظم در جهت درون و برون صفحه‌ای در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. اندازه ضلع و عمق سلول یک سانتی‌متر است. نحوه‌ی بارگذاری درون و برون صفحه‌ای در شکل (13) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج عددی بدست آمده نمودار نیرو بر حسب زمان در دو حالت بارگذاری مطابق شکل 14 است.

با توجه به این شکل، در حالت بارگذاری درون صفحه‌ای نسبت به بارگذاری برون صفحه‌ای، مدت زمان رسیدن نیروی انتقالی به مقدار بیشینه بیشتر است. همچنین مقدار نیروی بیشینه برای بارگذاری درون صفحه‌ای به مراتب کمتر از مقدار نیروی بارگذاری برون صفحه‌ای است. این مهم در شرایطی است که میزان کمتری انرژی را جذب نموده است. بنابراین در بارگذاری درون صفحه‌ای هدف، کاهش نیروی انتقالی می‌باشد. این نوع بارگذاری برای مواردی که جسم محافظت شونده نسبت به نیروی اعمالی آسیب پذیر باشد (مانند اعضای بدن انسان)، کاربرد دارد. جمله کاربردهای سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری درون صفحه‌ای می‌تواند به گودال آسانسور جهت کاهش اثر بار ضربه‌ای ناشی از سقوط و صندلی نوزاد در خودرو به منظور کاهش آسیب به بافت نرم بدن نوزاد در هنگام تصادف اشاره نمود.



جهت انطباق با محیط و تداوم بقاء، جستجو را در فضای کاوش از جمعیت نقاط اولیه آغاز می‌نماید و با بکارگیری عملکردهای ژنتیکی تا رسیدن به نمونه‌های بهتر و احتمالاً بهترین آنها، جستجو ادامه می‌یابد. یکی از مهمترین ویژگی این الگوریتم‌ها امکان پردازش موازی می‌باشد [20]. از دیگر روش‌ها، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی است. این الگوریتم یک روش تکرارپذیر برای بهینه‌سازی غیر خطی می‌باشد. برای استفاده از این روش باید تابع هدف و قیود دو بار مشتق پذیر باشد. این روش به دنبال نقاط مناسب<sup>1</sup> ارضا کننده قیود، می‌باشد. در این روش تابع هدف به یک تابع لاگرانژ تبدیل شده و با حل زیرمسئله‌های درجه دوم ضریب مناسب لاگرانژ بدست می‌آید و تابع هدف با اعمال قید غیرخطی کمینه می‌گردد [21].

در مرحله اول بهینه‌سازی با ثابت نگه داشتن جرم سازه و تغییر پارامترهای هندسی انرژی ویژه بیشینه شده است. سازه اولیه متشکل از 6 سلول در راستای Y و 15 سلول در راستای X است. جنس تمام ردیف‌های مدل اولیه از آلومینیوم 1100-O است. مشخصات هندسی مدل اولیه در جدول 1 آمده است. سازه تحت برخورد یک صفحه به جرم یک کیلوگرم با سرعت اولیه 1/664 m/s است. هدف از بهینه‌سازی در این مرحله کمینه کردن نسبت جرم به انرژی جذب شده توسط سازه است. بهینه‌سازی با استفاده از دو الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی و ژنتیک در محیط نرم افزار متلب انجام شده است. در هر دو الگوریتم تابع هدف نسبت جرم به انرژی جذب شده توسط سازه بوده و متغیرهای طراحی در جدول 7 آمده است. حد بالایی و حد پایینی متغیرها به ترتیب برابر بردارهای  $ub$  و  $lb$  است:  $lb=[0/0005; 0/0025; 0/002; 0/0004; 0/0003; 0/0002; 0/0001; 0/00005; 0/9]$   $ub=[0/0006; 0/003; 0/0025; 0/0005; 0/0004; 0/0003; 0/0002; 0/0001; 1/3]$  مطلوبست که به منظور اعمال تأثیر گسستاور خمشی در تغییر شکل سازه شرط  $\frac{d}{l} < 0.25$  برقرار باشد. در طراحی سازه مطلوبست که نیروی عکس‌العمل احساس شده توسط محافظت شونده کاهش یابد. بنابراین قیود مسئله برای هر دو الگوریتم مطابق روابط ذیل می‌باشند،

$$\begin{aligned} m &= 0.0012 \text{ kg} \\ \frac{d}{l} &< 0.25 \\ \sigma_p A &< 250 \text{ N} \end{aligned} \quad (19)$$

در روش الگوریتم ژنتیک جمعیت اولیه 30 و دو معیار توقف اعمال شده است که عبارتند از اینکه تعداد حداکثر نسل‌های تولیدی به 100 و تعداد نسل‌های پیاپی بدون تغییر نقطه بهینه به 20 برسد. همچنین تکرار نسل قید و تابع برابر  $10^{-9}$  در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک توسعه یافته بعد از 31 تکرار با معیار توقف دوم خاتمه یافته است. نسبت جرم سازه به انرژی جذب شده برابر  $7/475 \times 10^{-4}$  کیلوگرم بر ژول بدست آمده است. اما در روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی با در نظر گرفتن تکرار نسل قید و تابع برابر  $10^{-6}$  و نقطه شروع برابر حد پایینی ( $lb$ )، بعد از 20 تکرار با معیار توقف تکرار نسل قید و تابع متوقف شده است.

در این حالت نسبت جرم سازه به انرژی جذب شده برابر  $8/088 \times 10^{-4}$  کیلوگرم بر ژول بدست آمده است. در جدول 8 متغیرهای طراحی بدست آمده از دو الگوریتم بهینه‌سازی آمده است. پس از مقایسه نتایج بدست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی، با توجه به اینکه نسبت جرم به انرژی جذب شده بدست آمده از الگوریتم ژنتیک کمتر از مقدار آن در الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی بوده، نتایج الگوریتم ژنتیک به عنوان نتایج بهینه مد نظر قرار گرفته است.

تمام ردیف‌ها از آلومینیوم با نوع 1100-O با چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$  است. برای تعریف رفتار ناحیه مومسان آلومینیوم از مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی استفاده شده است. شکل تغییر شکل یافته سازه با ضخامت ثابت در شکل 15 و تغییرات نیروی عکس‌العمل صفحه پایینی بر حسب زمان در شکل 16 نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در سازه مدرج، با وجود جذب انرژی مناسب و برابر با سازه با ضخامت ثابت، حداکثر نیروی وارد شده به محافظت شونده در مراحل اولیه بارگذاری کاهش یافته است. به عبارت دیگر انتقال نیرو به صورت تدریجی و با تأخیر زمانی انجام شده و بنابراین خسارت کمتری به سازه محافظت شونده وارد شده است.

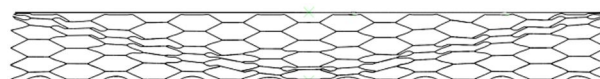
در تعریف سازه لانه زنبوری مدرج باید از محل اعمال بار به سمت پایین سختی سازه کاهش یابد. این مهم به این دلیل است که هر ردیف، از پایین به سمت بالا، در بارگذاری با سرعت کم به صورت مجزا تغییر شکل دهد و بعد از قفل‌شدگی کامل ردیف بعدی شروع به تغییر شکل نماید. با این نوع تغییر شکل، انتقال نیرو به سازه محافظت شونده به صورت تدریجی بوده و موج ضربه‌ای با تأخیر زمانی به جسم محافظت شونده می‌رسد.

### 6- بهینه‌سازی

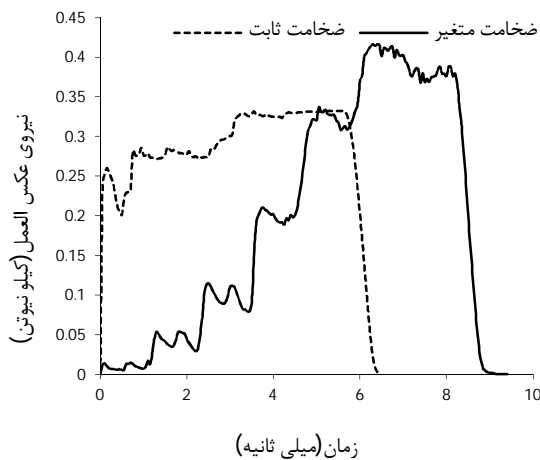
انرژی ویژه برای جاذب‌های ضربه از جمله پارامترهای مهم می‌باشد. در طراحی جاذب‌های انرژی مطلوبست که هندسه و جنس سازه به گونه‌ای انتخاب شود تا همواره میزان انرژی ویژه سازه بیشینه باشد. بر این اساس با توجه به روابط تحلیلی بدست آمده بهینه‌سازی سازه انجام شده است. در مرحله اول هندسه و در مرحله دوم جنس سازه بهینه شده است.

### 1- بهینه‌سازی مرحله اول

الگوریتم‌های ژنتیک با الهام از طبیعت و مطالعه عملکرد آن جهت بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده بدست می‌آیند. این روش با الگو گرفتن از اصل انتخاب طبیعی موجودات زنده، در نظر گرفتن سیستم طبیعی و تکامل ژن‌های آنها



شکل 15 نمونه تغییر شکل یافته مدل با ضخامت ثابت در زمان 8 میلی ثانیه



شکل 16 نمودار تغییرات نیروی عکس‌العمل بر حسب زمان برای سازه مدرج و ضخامت ثابت

1- Feasible points



جدول 7 متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی

نماد	متغیر طراحی
$d_1$	$x(2)$
$c$	$x(3)$
$l$	$x(1)$
$d_2$	$x(4)$
$d_3$	$x(5)$
$d_4$	$x(6)$
$d_5$	$x(7)$
$d_6$	$x(8)$
$\phi$	$x(9)$

جدول 8 متغیرهای طراحی بدست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و SQP

متغیر	مقدار اولیه	الگوریتم ژنتیک	روش SQP
$d_1$	0/6 میلی‌متر	0/599 میلی‌متر	0/5826 میلی‌متر
$c$	2/7 میلی‌متر	2/96 میلی‌متر	2/94 میلی‌متر
$l$	2/5 میلی‌متر	2/466 میلی‌متر	2/47 میلی‌متر
$d_2$	0/499 میلی‌متر	0/499 میلی‌متر	0/4868 میلی‌متر
$d_3$	0/399 میلی‌متر	0/4 میلی‌متر	0/3868 میلی‌متر
$d_4$	0/299 میلی‌متر	0/299 میلی‌متر	0/286 میلی‌متر
$d_5$	0/2 میلی‌متر	0/1449 میلی‌متر	0/186 میلی‌متر
$d_6$	0/1 میلی‌متر	0/0692 میلی‌متر	0/0899 میلی‌متر
$\phi$	63 درجه	54/43 درجه	55/4 درجه
انرژی جذب شده	1/388 ژول	1/6053 ژول	1/4837 ژول

جدول 9 جنس هر ردیف از سازه بهینه

ردیف	جنس آلومینیوم
اول	2024-T4
دوم	7075-0
سوم	5052-0
چهارم	6061-0
پنجم	6061-0
ششم	1100-0

### 2-6- بهینه‌سازی مرحله دوم

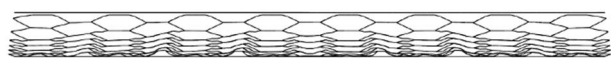
در مرحله دوم با در نظر گرفتن جرم و پارامترهای هندسی مرحله اول، با تغییر خواص مادی ردیف‌ها مجدداً انرژی ویژه بیشتری شده است. مقاومت نهایی جنس‌های آلومینیوم انتخاب شده از بالا به پایین کاهش است. ترتیب مواد انتخاب شده برای هر ردیف در جدول 9 آمده است. دلیل بکارگیری ترتیب انتخاب شده در مواد این است که باید سختی ردیف‌ها از بالا به پایین کاهش یابد تا از نظر جنس هم سازه مدرج باشد. چون جنس همه مواد آلومینیوم است، جرم سازه ثابت باقی مانده است. اما چون نسبت به مدل بهینه اول (جنس AL-1100-O) از آلیاژی با مقاومت نهایی بالاتر استفاده شده است، ظرفیت جذب انرژی افزایش یافته است. مطابق رابطه (7) هر چه مقاومت نهایی بیشتر باشد تنش مسطح بیشتر بوده و در نتیجه انرژی جذب شده (رابطه 13) افزایش می‌یابد. با توجه به در اختیار داشتن خواص مادی تنها پنج نوع آلومینیوم، جنس ردیف‌های چهارم و پنجم یکسان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده سازه اولیه قابلیت جذب کامل 1/388 ژول، سازه بهینه مرحله اول 1/6053 ژول و سازه بهینه مرحله دوم 5/0625 ژول انرژی جنبشی را دارند. بنابراین با بهینه‌سازی انجام شده با ثابت نگه داشتن جرم سازه، ظرفیت جذب انرژی آن تا 3/6 برابر افزایش یافته است.

### 7- تحلیل عددی

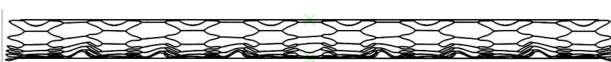
به منظور راستی‌آزمایی رابطه انرژی کرنشی، فرضیات و پارامترهای مورد استفاده در بهینه‌سازی، جذب انرژی توسط سازه اولیه، بهینه مرحله اول و دوم در محیط نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و میزان جذب انرژی سه مدل با نتایج بهینه‌سازی مقایسه شده است. برای سازه بهینه مرحله اول  $l=2.466$  mm،  $c=2.96$  mm و  $\phi=54.4^\circ$  و ضخامت ردیف‌های اول تا ششم به ترتیب 0/599، 0/499، 0/4، 0/299، 0/1449 و 0/0692 میلی‌متر، ارتفاع سازه 17/16 و عرض آن 76/4 میلی‌متر است. در مدل اولیه و بهینه مرحله اول، جنس تمام ردیف‌ها از آلومینیوم با نوع 1100-0 با چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$  است. برای تعریف رفتار ناحیه مومسان آلومینیوم از مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل اولیه شامل 4950 المان S4R، 906 المان R3D4 و 7648 گره و مدل بهینه شامل 5364 المان S4R، 916 المان R3D4 و 8216 گره است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه A حرکت تنها در راستای Y (راستای برخورد) آزاد است،

در حالی که تمام درجات آزادی صفحه B بسته شده است. با توجه به انرژی جنبشی بدست آمده از بهینه‌سازی، در حالت بهینه مرحله اول صفحه صلب A با جرم یک کیلوگرم و سرعت اولیه 1/791 m/s و در حالت بهینه مرحله دوم صفحه صلب A با جرم 2 کیلوگرم و سرعت اولیه 2/25 m/s به سازه برخورد نموده است. نمای از مدل تغییر شکل یافته سازه اولیه و بهینه مرحله اول و دوم را در زمان 5/5 میلی ثانیه جذب کامل انرژی در شکل‌های (17)، (18) و (19) آمده است. نمودار جذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج مدل اولیه، مدل بهینه اول و دوم بر حسب زمان در شکل (20) نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، با ثابت بودن جرم سازه اولیه قابلیت جذب 1/388، سازه بهینه مرحله اول قابلیت جذب 1/6053 و سازه بهینه مرحله دوم قابلیت جذب 5/0625 ژول انرژی جنبشی را دارند.

با توجه به شکل (20) علت افزایش انرژی جنبشی سازه بعد از رسیدن به مقدار صفر، انرژی کشسانی (فنی) ذخیره شده در سازه می‌باشد. این انرژی پس از جذب انرژی جنبشی آزاد شده و وزنه را به سمت بالا پرتاب می‌کند. بنابراین با توجه به نتایج عددی، ظرفیت جذب انرژی سازه مطابق ظرفیت جذب انرژی حاصل از نتایج بهینه‌سازی است. بر این اساس رابطه تحلیلی ارائه شده برای میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری مدرج و روش بهینه‌سازی راستی‌آزمایی شده است. با توجه به انطباق مناسب نتایج عددی با روابط تحلیلی، فرضیات و پارامترهای استفاده شده در استخراج تابع هدف تأیید شده‌اند.



شکل 17 نمونه تغییر شکل یافته مدل اولیه در زمان 5/5 میلی ثانیه



شکل 18 نمونه تغییر شکل یافته مدل بهینه مرحله اول در زمان 5/5 میلی ثانیه

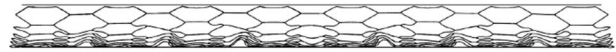
راستی‌آزمایی روابط تحلیلی ارائه شده و نتایج بهینه‌سازی، شبیه‌سازی عددی جذب انرژی توسط سازه اولیه و بهینه مرحله اول و دوم در محیط نرم‌افزار آباکوس انجام گردید. بر اساس نتایج عددی، سازه بهینه قابلیت جذب انرژی محاسبه شده را داشت. با انطباق مناسب نتایج عددی و تحلیلی، روابط تحلیلی و فرضیات راستی‌آزمایی شد. بطور خلاصه مشاهده شد که مدرج بودن سازه و بارگذاری درون صفحه‌ای باعث کاهش اعمال نیروی ضربه‌ای به جسم یا فرد و کاهش خسارت می‌شود.

#### 9- فهرست علائم

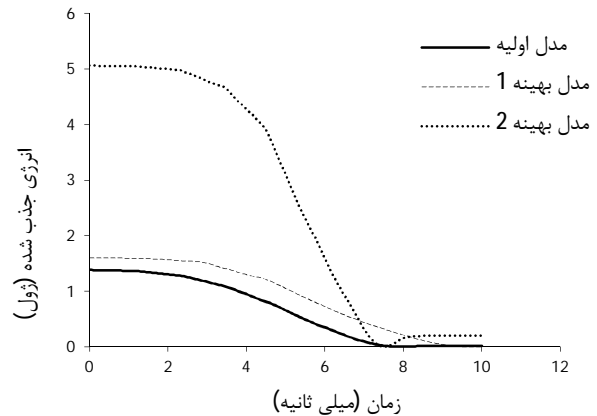
A	مساحت سازه لانه زنبوری عمود بر راستای اعمال ضربه
b	عرض سلول لانه زنبوری
c	وجه افقی سلول لانه زنبوری
e	انرژی ویژه سازه
K	ضریب سخت شونده‌گی توانی
l	وجه مایل سلول لانه زنبوری
L	ارتفاع سازه لانه زنبوری
lb	حد پایینی متغیرهای بهینه‌سازی
m <sub>c</sub>	جرم سلول لانه زنبوری
m	جرم سازه لانه زنبوری
n	توان سخت شونده‌گی توانی
u	انرژی کرنشی بر واحد حجم
U	انرژی کرنشی
ub	حد بالایی متغیرهای بهینه‌سازی
V	حجم سازه
V <sub>c</sub>	حجم سلول لانه زنبوری
علائم یونانی	
$\sigma_p$	تنش مسطح
$\varepsilon_d$	کرنش قفل‌شدگی
$\phi$	زاویه سلول لانه زنبوری
$\rho$	چگالی سازه لانه زنبوری
$\rho$	چگالی ماده سازه لانه زنبوری
$\rho$	چگالی نسبی سازه لانه زنبوری

#### 10- مراجع

- [1] A. Niknejad and G. Liaghat, Experimental study of Poly-orthan foam filler on hexagonal honeycomb structure behavior under axial load with constant rate, *10<sup>th</sup> Iran Aerospace conference (AERO2011)*, Tarbiat Modarres University, 2011 (in Persian).
- [2] S. Adibnazari and H. Mehrabi, Effect of cell size change on honeycomb structure equivalent mechanical property, *10<sup>th</sup> Iran Aerospace conference (AERO2011)*, Tarbiat Modarres University, 2011 (in Persian).
- [3] Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki and R.G. Ford., *Functionally graded materials: Design, Processing and Applications, Material Technology series*, 1999.
- [4] A. Muhammad, *Study of a compact energy absorber*, PhD Thesis, Iowa State University, 2007.
- [5] J.C. Koch, The laws of bone architecture, *American Journal of Anatomy*, Vol. 21, pp. 177-198, 1917.
- [6] S. Deqiang, Z. Weihong and W. Yanbin, Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 2609-2621, 2010.
- [7] Y. Song, Z. Wang, L. Zhao and J. Luo, Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model, *Materials and Design*, Vol.31, pp. 4281-4289, 2010.
- [8] D. Ruan, G. Lu, B. Wang and T.X. Yu, In-plane dynamic crushing of honeycomb a finite element study, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp. 161-182, 2003.



شکل 19 نمونه تغییر شکل یافته مدل بهینه مرحله دوم در زمان 5/5 میلی ثانیه



شکل 20 نمودار تغییرات انرژی جنبشی مدل اولیه و بهینه مرحله اول و دوم بر حسب زمان

#### 8- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن مدل ماده با سخت‌شونده‌گی توانی و تئوری حد پایین رابطه‌ای برای تنش مسطح سازه لانه زنبوری با رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان و سخت شونده‌گی توانی بدست آمده است. با استفاده از رابطه کرنش قفل‌شدگی و انرژی کرنشی، رابطه‌ی میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج استخراج شد. بر اساس این رابطه، میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج از جنس 5 نوع آلومینیوم مختلف برای هر دو مدل ماده محاسبه گردید. به منظور راستی‌آزمایی روابط تحلیلی استخراج شده برای مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی، مسئله در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. همچنین برای مقایسه نتایج آن با نتایج روابط تحلیلی بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان، جذب انرژی همان سازه لانه زنبوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. به منظور کسب اطمینان از روش شبیه سازی عددی، آزمون ضربه با سرعت کم بر روی یک سازه لانه زنبوری ساخته شده از جنس ورق AL6061-O انجام شده است. پس از شبیه سازی عددی این آزمون، نتایج عددی و تجربی انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. بنابراین میزان انرژی جذب شده حاصل از حل عددی با حل تحلیلی برای مدل ماده با سخت شونده‌گی توانی مقایسه شد که انطباق مناسبی را نشان داد به طوری که حداکثر خطا 6/4% حاصل گردید. درحالی‌که حداکثر خطا برای رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان 48/08% بدست آمد که نشان دهنده مناسب بودن روابط تحلیلی بدست آمده در این تحقیق بر اساس مدل ماده با سخت‌شونده‌گی توانی برای محاسبه تنش مسطح و انرژی ویژه سازه لانه زنبوری می‌باشد. در مرحله اول از بهینه‌سازی میزان جرم به انرژی جذب شده برای سازه لانه زنبوری مدرج با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده و الگوریتم‌های برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی و ژنتیک کمینه گردید. در مرحله دوم، با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی بهینه خواص مادی هر ردیف با هدف افزایش انرژی ویژه سازه تغییر یافت و برای هر ردیف نوع خاصی از آلومینیوم انتخاب شد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، در مرحله اول با ثابت نگه داشتن جرم سازه، ظرفیت جذب انرژی نسبت به مدل اولیه 18% و در مرحله دوم 264% افزایش یافت. در ادامه برای

- [14] L.J. Gibson and M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structures and Properties*, Cambridge University Press, 2nd edition, 1997.
- [15] W. Prager and P.G. Hodge, *Theory of perfectly plastic solids*, John Wiley, 1951.
- [16] M. Kojic and K.J. Bathe, *Inelastic analysis of solids and structures*, Springer, 2005.
- [17] A.S. Khan and S. Huang, *Continuum theory of plasticity*, John Wiley, 1995.
- [18] S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for engineering Materials*, 2<sup>nd</sup> edition, Adison-Wesley, 1991.
- [19] T. Lyman, *Metals Handbook*, American society of metals, Ohio, 1966.
- [20] D.E. Ggoldberg and M.P. Samadani, *Engineering Optimization Via genetic algorithm, 9th Conference of Electronic computation(ASCE)*, Alabama, University of Alabama, U.S.A, 1986.
- [21] B.J. Frédéric, Gilbert, J.C. Lemaréchal, C. Sagastizábal and A. Claudia, *Numerical optimization: Theoretical and practical aspects*. Springer-Verlag, 2006.
- [9] G. Liaghat and H. Sarailou, Optimum design of honeycomb core under compression load, *Technical and Engineering Journal of Modarres*, Vol.37, pp. 73-81, 2010(in Persian).
- [10] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi and A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, pp. 506–516, 2011.
- [11] A. Muhammad, J. Hoffman, J. Clark and S. Takak, Modeling of impact response of composite graded structure, *IMECE*, Denver, Colorado, U.S.A, 2011.
- [12] S.D. Papka, and S. Kyriakides, Experiments and full-scale numerical simulations of In-plane crushing of a honeycombs, *Acta Materiala*, Vol. 46, pp. 2765-2776, 1998
- [13] G. Lu and T.X. Yu, *Energy Absorption of structures and materials*, Woodhead Publishing Limited & CRC Press, 2003.