



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

سید علی گله‌داری<sup>۱</sup>، مهران کدخدایان<sup>۲\*</sup>، سعید حدیدی مود<sup>۳</sup>

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

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

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

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

### 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 تشخیص مدل سخت شوندگی 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 راستی آزمایی روابط تحلیلی استخراج شده، مسئله برای پنج نوع آلومینیوم مختلف در محیط نرم افزار آباکوس برای مدل ماده با ساخت شوندگی توانی و مدل کشسان-کامل موسمان شبیه سازی شده است. به منظور صحبت‌سنجی 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، میزان انرژی جذب شده حاصل از حل عددی با حل تحلیلی مقایسه شده که مدل سخت شوندگی توانی انطباق بیشتری را نشان داده است. در مرحله اول بهینه سازی با استفاده از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متواലی 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 با هدف افزایش انرژی ویژه تغییر داده شده است. بر اساس نتایج بهینه سازی، با ثابت نگه داشتن جرم سازه ظرفیت جذب انرژی آن نسبت به مدل اولیه در مرحله اول ۱۸% و در مرحله دوم 264% افزایش یافته است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۳ شهریور ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۰ مهر ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

سازه لانه زنبوری مدرج

بارگذاری ضربه‌ای دون صفحه‌ای

سخت شوندگی 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>, Saeid 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.

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 [۱]. یکی از مهمترین

با توسعه سریع صنایع اتومبیل‌سازی، حمل و نقل و مهندسی هوا-فضا، بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسائل نقلیه و سازه‌های محافظه به یکی از

### - مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

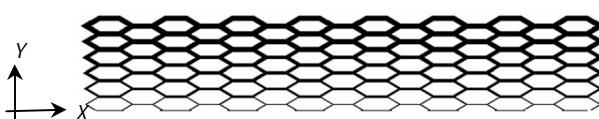
S. A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-Moud, Analytical, numerical and experimental study of energy absorption of graded honeycomb structure under in-plane low velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 261-271, 2015 (In Persian)

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 موسمان 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 شوندگی 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 راستی آزمایی 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.

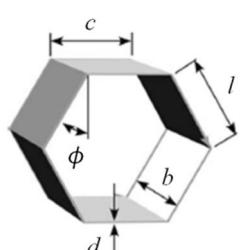
## 2- مکانیک سازه لانه زنبوری

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 نیرو بر طول اولیه (L) سازه در راستای بارگذاری بدست می‌آید. بارگذاری در خلاف جهت محور 2 می‌باشد. برای سلول شکل (2)،  $b = 2l \cos\phi$  و  $A = (c + 2l \sin\phi)$  می‌باشد. اگر قسمتی از نمودار تنش-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 تنش سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه‌ای با تبدیل انرژی کرنشی به انرژی کرنشی و فشردگی سازه انجام می‌شود. این انرژی کرنشی همان انرژی لازم برای ایجاد مفصل پلاستیک در سازه می‌باشد. در استخراج



شکل 1 مدل بهینه‌سازی پوست موز [4]



شکل 2 سلول ساختار لانه زنبوری

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 سیلات، انرژی الاستیک در جامدات و انرژی پلاستیک در جامدات تغییر شکل پذیر تبدیل می‌نمایند. هنگام اعمال بارگذاری ضربه ای 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 وسائل 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 پرنده‌گان می‌باشد. ساختار اسفنجی استخوان موجب جذب انرژی ضربه‌ای وارد و کاهش تنش لهیگی 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 تمامی و انرژی ضربه‌ای کمتر می‌شود [4]. سازه‌های لانه زنبوری از جمله 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 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 وروني 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 صفحه‌ای 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>3</sup> بررسی و یک فرمول تحلیلی برای محاسبه 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. اژدری 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، مودهای مختلف تغییر شکل 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 موسمان ارائه

1- Ls-Dyna

2- Voroni

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 ( $d = 2 \times d/2 = l$ ) تقلیل یافته از طول وجه مایل ( $l$ ) کسر شده و طول بازوی پلاستیک به  $l - d$  مطالعه شده است. بر اساس تئوری حد پایین، نیروی نظیر فروپاشی از مساوی قرار دادن ممان داخلی سلول با ممان خارجی وارد شده (شکل 4) مطالعه 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 مطالعه (7) حاصل می‌شود.

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

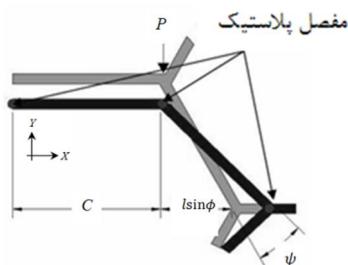
کرنش نظیر فشردگی و یا قفل شدگی بر اساس چگالی نسبی مطالعه (8) قابل محاسبه است [14].

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

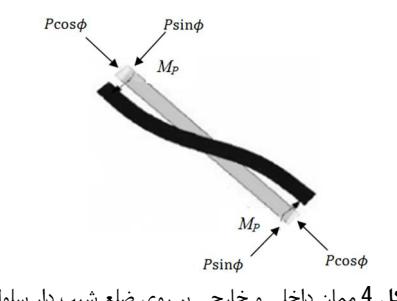
لازم به ذکر است که  $\rho^*$  نسبت چگالی سلول‌های سازه به چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنیوری می‌باشد ( $\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s}$ ). در رابطه (8) چگالی ماده تشکیل دهنده سازه لانه زنیوری است و نسبت حجمی روزنه سلول‌های سازه برابر  $\frac{\rho}{\rho_s} - 1$  می‌باشد. این مقدار تقریباً برابر کرنش قفل شدگی و مطالعه 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 زنیوری، کرنش قفل شدگی ایجاد شده کمتر از رابطه فوق می‌شود که مقدار دقیق آن برای سازه‌های لانه زنیوری 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 زنیوری برابر انرژی کرنشی کل سازه می‌باشد. بر این اساس



شکل 3 فروپاشی پلاستیک اصلاح شیبدار در راستای  $\gamma$



شکل 4 ممان داخلی و خارجی بر روی ضلع شیبدار سلول

رابطه 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 موسمان استفاده شده است. از آنجایی که رفتار ماده کشسان - کاملاً موسمان 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 زنیوری مطالعه رابطه (1) می‌باشد،

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

براساس رفتار ماده کشسان - کاملاً موسمان این گشتاور مطالعه رابطه (2) بدست می‌آید،

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

با جاگذاری  $(2y/d)^{2n}$  و  $\sigma = K\varepsilon^{2n}$  در رابطه (1) برای رفتار ماده با سخت شوندگی توانی، گشتاور نظیر مفصل پلاستیک مطالعه (3) بدست می‌آید،

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

در رابطه (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 موسمان مطالعه 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 (4) و نتایج عددی، از رفتار سخت شوندگی توانی مطالعه (4) بدست می‌آید [14]. منظور استخراج رابطه گشتاور نظیر ایجاد مفصل پلاستیک و تنش مسطح استفاده شده است.

در هنگام اعمال نیروی خارجی، نیروی فشاری در جهت  $\gamma$  به اخلاع شیبدار سلول منتقل شده و باعث خمش آنها می‌گردد. در این تحلیل، شبیه‌سازی کامل مکانیزم با ایجاد 6 مفصل پلاستیک رخ می‌دهد. بنابراین ضلع شبیه‌دار 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 مطالعه (5) می‌باشد،

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

برای  $0.25 < \frac{d}{l} < 1$  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 میزز [16-17] در نقاط انتگرالی 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 زنیوری 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.

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

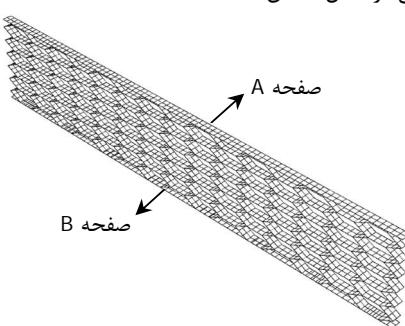
بنابراین رابطه انرژی ویژه برای سازه مورد مطالعه بشکل ذیل خواهد بود که مطابق است این کمیت همواره بیشینه باشد (رابطه (18)).

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

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

### 3- راستی آزمایی روابط تحلیلی

برای راستی آزمایی روابط تحلیلی بدست آمده بر اساس رفتار ماده با سخت شوندگی توانی، جذب انرژی یک سازه لانه زنیوری 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 موسمان، جذب انرژی همان سازه لانه زنیوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً موسمان 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 سازه ای اینستی اینرژی جنبشی اعمال شده مشخصات مادی آلومینیوم‌های بکار رفته و میزان انرژی جنبشی اعمال شده به سازه برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی و کشسان - کاملاً موسمان به ترتیب در جداول (2) و (3) نشان داده شده است. به منظور شبکه‌بندی سازه لانه زنیوری از المان پوسته‌ی 4 گره‌ای S4R و برای صفحات صلب A و B از المان دو خطی چهار گره‌ای R3D4 استفاده شده است. شبکه‌بندی سازه لانه زنیوری 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 پوسته‌ی 4 گره‌ای استفاده شده و به دلیل هندسه منظم صفحه سازه از المان 4 گره‌ای استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل از جنس آلومینیوم 0-1100 شامل 4950 المان R540 و 906 المان R3D4 و 7648 گره است. شبکه‌بندی مدل به همراه صفحات بالایی و پایینی در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 6 مدل المان محدود سازه لانه زنیوری مدرج و صفحات بالا و پایینی از جنس آلومینیوم 0-1100

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 قفل شدگی سازه مطابق شکل (6) است. برای محاسبه میزان انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه لانه زنیوری 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 قفل شدگی دچار تغییر شکل می‌گردد. این نمودار برای AL1100-0-0 هندسه مطابق جدول (1) ترسیم شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن  $\sigma_p = \sigma$  و  $\varepsilon_d = \varepsilon$  (برابری تنش با تنش مسطح و کرنش با کرنش قفل شدگی) 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 قفل شدگی، 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)  $\sigma_{p_i}$  تنش مسطح هر ردیف،  $\varepsilon_{d_i}$  کرنش نظیر قفل شدگی هر ردیف،  $A$  مساحت سازه لانه زنیوری 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 بازنویسی است،

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

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

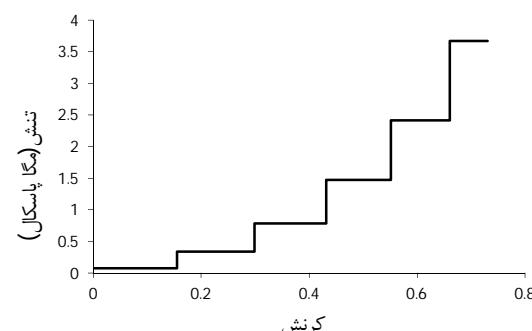
$$\sigma_{p_i} = \left( \frac{\sigma_u}{n+2} \right) \frac{d_i^2}{(c+lsin\phi)(l-d_i)sin\phi} \quad (14)$$

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

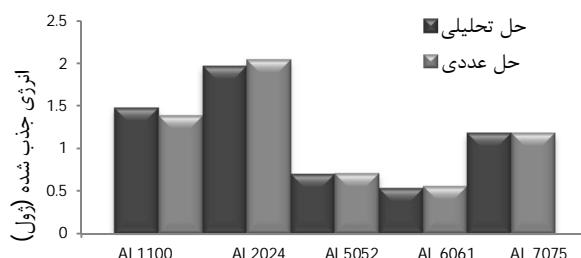
$$V_c = db(4l + 2c) \quad (15)$$

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

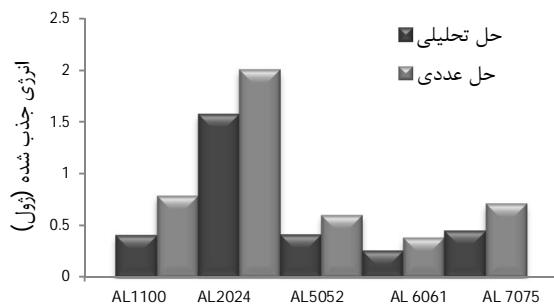
از جمله پارامترهای مهم در طراحی جاذبهای انرژی ویژه



شکل 5 نمودار تنش - کرنش سازه لانه زنیوری مدرج



شکل 7 نمودار مقایسه میزان انرژی جذب شده تحلیلی و عددی برای سازه لانه زنیبوری 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 زنیبوری مدرج با جنس‌های مختلف آلومینیوم برای رفتار ماده کشسان - کاملاً موسمان آمده است.

نتایج عددی و تحلیلی میزان جذب انرژی برای دو مدل ماده مختلف در جداول 4 و 5 نیز مقایسه و میزان خطای گزارش شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده، نتایج عددی و تحلیلی برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی انتباخ مناسبتری داشته و در نمودار شکل 8 میزان انرژی جذب شده تحلیلی انتباخ مناسبی با نتایج عددی دارد. در حالی که برای مدل کشسان - کاملاً موسمان نتایج عددی اختلاف زیادی با نتایج تحلیلی دارد. حداکثر خطای برای مدل ماده با سخت شوندگی توانی 6/4% و برای مدل کشسان - کاملاً موسمان 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 موسمان 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 نسی	انرژی جذب			
	انرژی جذب عددی (ژول)	انرژی جذب شدید در حل رایطه (13)	شدید با استفاده از رایطه (13)	نوع آلومینیوم (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 به سازه از اتصال پنالتی بدون اصطکاک استفاده شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه A حرکت تنها در راستای 7 (راستای برخورد) آزاد بوده در حالی که تمام درجات آزادی صفحه B بسته است. لازم به ذکر است که صفحه A به صفحه B 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 موسمان به ترتیب در شکل‌های 7 و 8

جدول 1 مشخصات هندسی سازه

نامد	برای آلومینیوم 0-1100	برای آلومینیوم 0-6061	برای آلومینیوم 0-7075	برای آلومینیوم 0-2024-T4
0/35	0/6 میلی‌متر	d <sub>1</sub>		
2/7	2/7 میلی‌متر	c		
2/5	2/5 میلی‌متر	l		
0/3	0/499 میلی‌متر	d <sub>2</sub>		
0/25	0/399 میلی‌متر	d <sub>3</sub>		
0/2	0/299 میلی‌متر	d <sub>4</sub>		
0/15	0/2 میلی‌متر	d <sub>5</sub>		
0/1	0/1 میلی‌متر	d <sub>6</sub>		
63	63 درجه	ϕ		

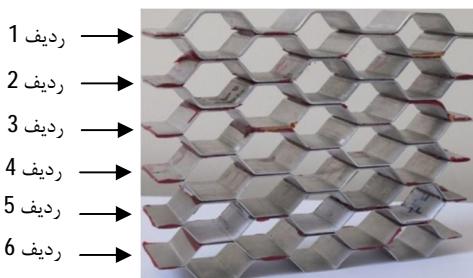
جدول 2 مشخصات مادی آلومینیوم و انرژی جنبشی اعمال شده به سازه برای رفتار ماده با سخت شوندگی توانی

نوع آلومینیوم	انرژی جنبشی اعمال شده به سازه (ژول) [18]	تنش بحرانی (مگا پاسکال) [19]	ضریب رابطه نمایی [18]	تون [18]
1100-0	1/385	137	0/2	180
6061-0	0/555	150	0/2	205
5052-0	0/705	172	0/13	210
7075-0	1/185	290	0/17	400
2024-T4	2/04	437	0/16	690

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

نوع آلومینیوم	انرژی جنبشی اعمال شده به سازه (ژول) [19]	تنش تسليم (مگا پاسکال) [19]
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

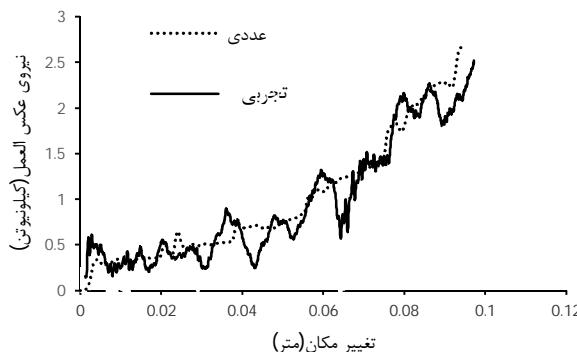
ترسیم شده است. همچنین مدل تغییر شکل یافته سازه پس از آزمون تجربی و شبیه سازی عددی در شکل (12) با هم مقایسه شده است.



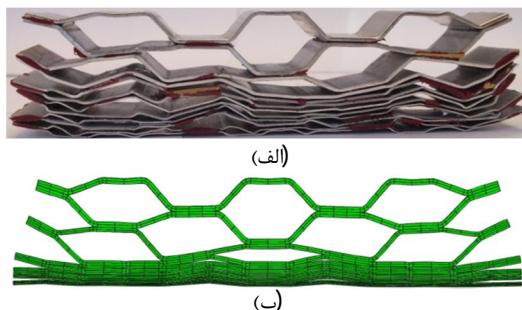
شکل 9 نمونه تست سازه لانه زنبوری مدرج شش ردیفه



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 مومنسان

ردیف	انرژی جذب درصد خطای نسی	انرژی جذب شدۀ با شدۀ در حل عددي (13) راطه (ژول)	نوع آلومینیوم (ژول)
48/08	0/784	0/407	1100-0
32/89	0/38	0/255	6061-0
30/8	0/6	0/415	5052-0
36/9	0/71	0/448	7075-0
21/3	2	1/574	2024-T4

#### 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 1/16, 1/12, 1/8, 1/6, 1/4 و 0/635 میلی‌متر است. همچنین برای این سازه  $I=12 \text{ mm}$ ,  $c=15 \text{ mm}$  و  $\phi = 36^\circ$  است. ارتفاع و عرض سازه 130 و عمق آن 28/5 میلی‌متر است. جنس تمامی ردیفها از AL6061-T6 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 اتفاق 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- شبیه سازی عددی

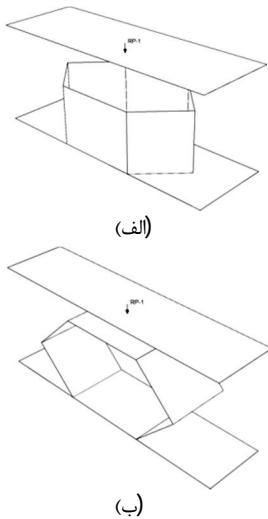
با توجه به مشخصات هندسی و مادی سازه، جرم و سرعت برخورد وزنه، شرایط بارگذاری و مرزی، آزمون تجربی بر روی نمونه تست در محیط نرم-افزار آباکوس شبیه سازی شده است. برای مدل‌سازی برخورد، وزنه با جرم ذکر شده و بستر سازه به ترتیب با صفحات صلب در بالا و پایین صفحه شبیه سازی شده است. برای شبکه بندهی سازه از المان 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

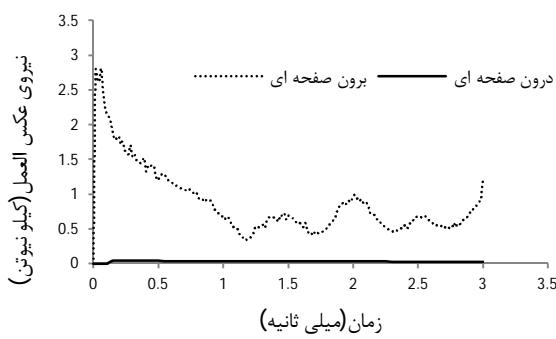
1- Adhesive-film

جدول 6 خواص مکانیکی ورق آلمینیومی 0-6061 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



شکل 13 نحوه 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 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,  $\phi=54.4^\circ$  و  $0/599$  میلی‌متر است. ضخامت ردیف‌های اول تا ششم به ترتیب  $0/0692$ ,  $0/0499$ ,  $0/0299$ ,  $0/0449$  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 حداقل خطای بین نیروی عکس العمل تجربی و عددی  $5/4\%$  است، بنابراین روش شبیه‌سازی عددی و پارامترهای کاربردی در این شبیه‌سازی مورد تائید 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  $5 \text{ m/s}$  بر روی مشابه لانه زنبوری منظم در جهت درون و برون انتقال نیرو در افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. اندازه ضلع و عمق سلول یک سانتی‌متر است. نحوه 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 می‌توان به گودال آنسانسور 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 انتباط 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 موادی می‌باشد [20]. از دیگر روش‌ها، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متواالی 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> ارضاء کننده قیود، می‌باشد. در این روش تابع هدف به یکتابع لگرانژ تبدیل شده و با حل زیرمسئله‌های درجه دوم ضریب مناسب لگرانژ 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 مشکل از 6 سلول در راستای 2 و 15 سلول در راستای X است. جنس تمام رهیف‌های مدل اولیه از آلومینیوم 1100-0 است. مشخصات هندسی مدل اولیه در جدول 1 آمده است. سازه تحت بخورد 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 متواالی 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:  $lb=[0/0005; 0/0025; 0/002; 0/0004; 0/0003; 0/0002; 0/0001; 0/0005; 0/9]$   $ub=[0/0006; 0/003; 0/0025; 0/0005; 0/0004; 0/0003; 0/0002; 0/0001; 1/3]$  مطلوب است که به منظور اعمال تأثیرگشتوار خمشی در تغییر شکل سازه شرط  $\frac{d}{l} < 0.25$  برقرار باشد. در طراحی سازه مطلوب است که نیروی عکس العمل احساس شده توسط محافظت شونده کاهش یابد. بنابراین قیود مسئله برای هر دو الگوریتم مطابق روابط ذیل می‌باشند:

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

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 ترانس 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 متواالی با در نظر گرفتن ترانس قید و تابع برابر  $10^{-6}$  و نقطه شروع برابر حد پایینی (lb)، بعد از 20 تکرار با معیار توقف ترانس 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 متواالی، با توجه به اینکه نسبت جرم به انرژی جذب شده بدست آمده از الگوریتم ژنتیک کمتر از مقدار آن در الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متواالی بوده، نتایج الگوریتم ژنتیک به عنوان نتایج بهینه مدنظر قرار گرفته است.

تمام رهیف‌ها از آلومینیوم با نوع 1100-0 با چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$  است. برای تعریف رفتار ناحیه مومسان آلومینیوم از مدل ماده با ساخت شوندگی توانی استفاده شده است. شکل تغییر شکل یافته سازه با ضخامت ثابت در شکل 15 و تغییرات نیروی عکس العمل 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.

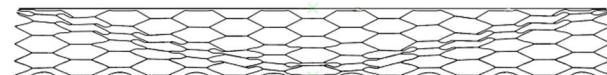
در تعریف سازه لانه زنپوری مدرج باید از محل اعمال بار به سمت پایین سختی سازه کاهش یابد. این مهم به این دلیل است که هر رهیف، از پایین به سمت بالا، در بارگذاری با سرعت کم به صورت مجزا تغییر شکل دهد و بعد از قفل شدگی کامل رهیف بعدی شروع به تغییر شکل نماید. با این نوع تغییر شکل، انتقال نیرو به سازه محافظت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

## 6- بهینه‌سازی

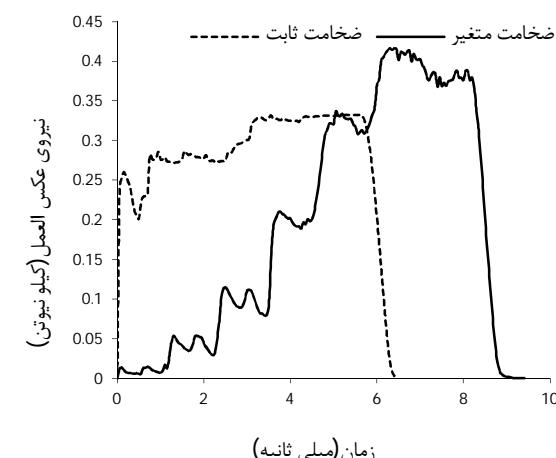
انرژی ویژه برای جاذی‌های ضربه از جمله پارامترهای مهم می‌باشد. در طراحی جاذب‌های انرژی مطلوب است که هندسه و جنس سازه به گونه‌ای انتخاب شود تا همواره میزان انرژی ویژه سازه بیشینه باشد. بر این اساس با توجه به روابط تحلیلی بدست آمده بهینه‌سازی سازه انجام شده است. در مرحله اول هندسه و در مرحله دوم جنس سازه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

### 6-1- بهینه‌سازی مرحله اول

الگوریتم‌های ژنتیک با الهام از طبیعت و مطالعه عملکرد آن جهت بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده بدست می‌آیند. این روش با 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 عکس العمل بر حسب زمان برای سازه مدرج و ضخامت ثابت

1- Feasible points

جدول 8 متغیرهای طراحی بدست آمده از دو الگوریتم زنتیک و SOP

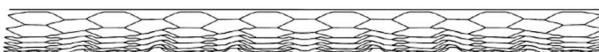
متغیر	مقادیر اولیه	الگوریتم زنتیک	SOP	روش
$d_1$	0/6 میلی‌متر	0/599 میلی‌متر	0/5826 میلی‌متر	
$c$	2/7 میلی‌متر	2/96 میلی‌متر	2/94 میلی‌متر	
$l$	2/5 میلی‌متر	2/466 میلی‌متر	2/47 میلی‌متر	
$d_2$	0/499 میلی‌متر	0/499 میلی‌متر	0/4868 میلی‌متر	
$d_3$	0/399 میلی‌متر	0/4 میلی‌متر	0/3868 میلی‌متر	
$d_4$	0/299 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	1/388 ژول	1/6053 ژول	1/4837 ژول	
جذب شده				

جدول 9 جنس هر ردیف از سازه بهینه

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

در حالی که تمام درجات آزادی صفحه  $B$  بدست آمده 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  $1/791 \text{ m/s}$  و در حالت بهینه مرحله دوم صفحه صلب  $A$  با جرم ۲ کیلوگرم و سرعت اولیه  $2/25 \text{ m/s}$  به سازه برخورد نموده است. نمایی 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 داردند.

با توجه به شکل (20) علت افزایش انرژی جنبشی سازه بعد از رسیدن به مقدار صفر، انرژی کشسانی(فنری) 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 راستی آزمایی شده است. با توجه به انطباق مناسب نتایج عددی با روابط تحلیلی، فرضیات و پارامترهای استفاده شده در استخراج تابع هدف تائید شده‌اند.

شکل 17 نمونه تغییر شکل یافته مدل اولیه در زمان  $5/5$  میلی ثانیهشکل 18 نمونه تغییر شکل یافته مدل بهینه مرحله اول در زمان  $5/5$  میلی ثانیه

جدول 7 متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی

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

## 6-2- بهینه‌سازی مرحله دوم

در مرحله دوم با در نظر گرفتن جرم و پارامترهای هندسی مرحله اول، با تغییر خواص مادی ردیف‌ها مجدداً انرژی ویژه بیشینه شده است. مقاومت نهایی جنس‌های آلومینیوم انتخاب شده از بالا به پایین کاهشی است. ترتیب مواد انتخاب شده برای هر ردیف در جدول ۹ 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-1100-0) از آلیاژهایی 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 تنفس هوا 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 قابلیت نگه داشتن جرم سازه، ظرفیت جذب انرژی آن  $3/6$  برابر افزایش یافته است.

## 7- تحلیل عددی

به منظور راستی آزمایی 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 بهترین نتایج بهینه‌سازی می‌باشد. مدل اول از  $17/16$  و عرض آن  $76/4$  میلی‌متر است. در مدل اولیه و بهینه مرحله اول، جنس تمام ردیف‌ها از آلومینیوم با نوع ۰-1100 با چگالی  $2700 \text{ kg/m}^3$  است. برای تعریف رفتار ناحیه موسمان آلومینیوم از مدل ماده با سخت شوندگی توانی استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل اولیه شامل ۵364 گره و مدل بهینه شامل ۷648 گره و مدل R3D4 و S4R ۹06 المان ۴950 المان ۹16 S4R و ۸216 R3D4 گره است. به منظور اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه A حرکت تنها در راستای y (راستای برخورد) آزاد است،

راستی آزمایی روابط تحلیلی ارائه شده و نتایج بهینه‌سازی، شبیه سازی عددی جذب انرژی توسط سازه اولیه و بهینه مرحله اول و دوم در محیط نرم افزار 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 راستی آزمایی 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 علامت

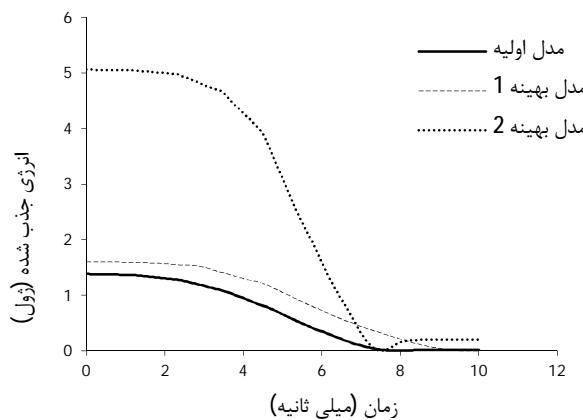
مساحت سازه لانه زنیبوری عمود بر راستای اعمال ضربه	<i>A</i>
عرض سلول لانه زنیبوری	<i>b</i>
وجه افقی سلول لانه زنیبوری	<i>c</i>
انرژی ویژه سازه	<i>e</i>
ضریب سخت شوندگی توانی	<i>K</i>
وجه مایل سلول لانه زنیبوری	<i>I</i>
ارتفاع سازه لانه زنیبوری	<i>L</i>
حد پایینی متغیرهای بهینه‌سازی	<i>lb</i>
جرم سلول لانه زنیبوری	<i>m</i>
جرم سازه لانه زنیبوری	<i>n</i>
توان سخت شوندگی توانی	<i>u</i>
انرژی کرنشی بر واحد حجم	<i>U</i>
انرژی کرنشی	<i>ub</i>
حد بالایی متغیرهای بهینه‌سازی	<i>V</i>
حجم سازه	<i>Vc</i>
حجم سلول لانه زنیبوری	<i>Vc</i>
علایم یونانی	
تش مسطح	$\sigma_p$
کرنش قفل شدنگی	$\epsilon_d$
زاویه سلول لانه زنیبوری	$\phi$
چگالی سازه لانه زنیبوری	$\rho$
چگالی ماده سازه لانه زنیبوری	$\rho$
چگالی نسبی سازه لانه زنیبوری	$\rho'$

## 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, *10th Iran Aerospace conference (AERO2011)*, Tarbiat Modares University, 2011 (in Persian).
- [2] S. Adibnazari and H. Mehrabi, Effect of cell size change on honeycomb structure equivalent mechanical property, *10th Iran Aerospace conference (AERO2011)*, Tarbiat Modares 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. Degiang, 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 سخت شوندگی توانی و تئوری حد پایین رابطه‌ای برای تنش مسطح سازه لانه زنیبوری با رفتار ماده کشسان- کاملاً مومنان و سخت شوندگی توانی بدست آمده است. با استفاده از رابطه کرنش قفل شدنگی و انرژی کرنشی، رابطه میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنیبوری مدرج استخراج شد. بر اساس این رابطه، میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنیبوری مدرج از جنس 5 نوع آلومینیوم مختلف برای هر دو مدل ماده محاسبه گردید. به منظور راستی آزمایی روابط تحلیلی استخراج شده برای مدل ماده با سخت شوندگی 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 مومنان، جذب انرژی همان سازه لانه زنیبوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف بر اساس رفتار ماده کشسان- کاملاً مومنان در محیط افزار آباکوس شبیه سازی شد. به منظور کسب اطمینان از روش شبیه سازی عددی، آزمون ضربه با سرعت کم بر روی یک سازه لانه زنیبوری ساخته شده از جنس ورق 0 AL6061-0 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 شوندگی توانی مقایسه شد که انطباق مناسبی را نشان داد به طوری که حداقل خطا 6/4% حاصل گردید. در حالیکه حداقل خطا برای رفتار ماده کشسان- کاملاً مومنان 48/08% بدست آمد که نشان دهنده مناسب بودن روابط تحلیلی بدست آمده در این تحقیق بر اساس مدل ماده با سخت شوندگی توانی برای محاسبه تنش مسطح و انرژی ویژه سازه لانه زنیبوری می‌باشد. در مرحله اول از بهینه‌سازی میزان جرم به انرژی جذب شده برای سازه لانه زنیبوری 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 Modares*, 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 Materialia*, 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.