



بررسی تاثیر شکل و عيوب صفحات لانه زنبوری در قابليت جذب انرژی به روش المان محدود

بنیامین طهماسبور^۱، رامین مشک آبادی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

* اهر، صندوق پستی: ۵۴۵۱۱۶۷۱۴، r-meshkabadi@iau-ahar.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، اثرات عیوب موجود در ساختار لانه زنبوری در قابلیت جذب انرژی این سازه ها که به عنوان جاذب انرژی در زیر کابین آسانسورها استفاده می شوند با به کار گیری روش المان محدود در نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. با شبیه سازی المان محدود سازه لانه زنبوری و با استفاده از تحلیل های شبه استاتیکی، به بررسی تأثیر پارامترهایی مانند ابعاد هندسی عیوب و هندسه های مختلف سلولی بر روی میزان جذب انرژی سازه پرداخته شده است. در انجام تحلیل ها درصد عیوب مختلف شامل ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد عیب مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می دهند که در پنل لانه زنبوری با هندسه سلولی نوع A، ساختار به صورت کامل تخریب می شود که این امر می تواند در نتیجه عدم تقارن سلول های سازه باشد. در دو مدل دیگر، سازه شکل کلی خود را حفظ کرده و با تغییر شکل منظم ایجاد شده در سلول ها، این نوع هندسه ها توانایی بیشتری در قابلیت جذب انرژی حین برخورد را دارا هستند. همچنین، نتایج نشان می دهند وجود عیب در ساختار پنل ها تأثیر قابل ملاحظه ای بر قابلیت جذب انرژی در این سازه ها دارد و با افزایش میزان عیوب قابلیت جذب انرژی نیز کاهش می یابد. بررسی نتایج نشان می دهد که تأثیر عیوب بر میزان کاهش قابلیت جذب انرژی در سازه های لانه زنبوری با ساختار سلول از نوع A، به مراتب بسیار بیشتر از دو نوع دیگر می باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ مهر ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۸ آذر ۱۳۹۷

ارائه در سایت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۷

کلیدواژگان

سازه لانه زنبوری

قابلیت جذب انرژی

عیب

روش المان محدود

نرم افزار ABAQUS

Investigating the effect of shape and defects of honeycomb structure on its energy absorption capability by finite element method

Benyamin Tahmaspour¹, Ramin Meshkabadi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

* P.O.B. 5451116714 Ahar, Iran, r-meshkabadi@iau-ahar.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 12 October 2018

Accepted 9 December 2018

Available Online 30 January

2019

Keywords

Honeycomb Structure

Energy Absorption capability

Defect

Finite Element method

ABAQUS software

ABSTRACT

In the present study, the effects of defects in the honeycomb structure on the capability of the energy absorption are investigated using the finite element method in ABAQUS software. By simulation using quasi-static analysis, the effects of the geometric dimensions of the defect and different geometries of honeycomb cells on the energy absorption of the structure have been investigated. In the analysis, for each case three percent of defects, including 0, 10 and 30% were studied. The results show that the honeycomb structure with A-type cell geometry is completely destroyed, which can be due to the asymmetry of the structural cells. In the other two models, the structure retains its overall shape and by systematic modification of the cells, they have the ability to absorb energy during the collision. Also, the results show that the defects in these structures have a significant effect on their energy absorption capacity in which by increasing the defects, the energy absorption capacity decreases. It can be concluded that the effect of defects on the amount of energy absorption in a A-type honeycomb structure is much more than the two others.

Please cite this article using:

Benyamin Tahmaspour, Ramin Meshkabadi, Investigating the effect of shape and defects of honeycomb structure on its energy absorption capability by finite element method, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 4, pp. 37-44, 2018 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با توسعه سریع صنایع هوافضا، حمل و نقل و صنایع اتومبیل‌سازی بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه‌های محافظ به عنوان یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی تبدیل شده است. در دهه گذشته، انواع مختلفی از مواد و سازه‌ها با ظرفیت جذب انرژی بالا نظیر سازه‌های لانه‌زنبوری و سازه‌های جدار نازک بررسی شده است [۱].

از مهم‌ترین خصوصیات سازه‌های لانه‌زنبوری می‌توان به وزن کم، پایداری خوب، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب تحت نیروهای صفحه‌ای فشاری و جذب‌کننده انرژی در طی حوادث ضربه اشاره نمود. شکل ۱ طرحواره ای از یک سازه لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد. یکی از مهم‌ترین مزایای سازه‌های لانه‌زنبوری در عین داشتن وزن کم این است که با تغییر پارامترهای هندسی سازه از قبیل ارتفاع، ضخامت، اندازه و هندسه سلول و زاویه داخلی می‌توان به خواص مکانیکی متفاوتی دست پیدا نمود. لذا توسعه روش‌های تحلیلی محاسباتی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی سازه‌های لانه‌زنبوری بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۲].

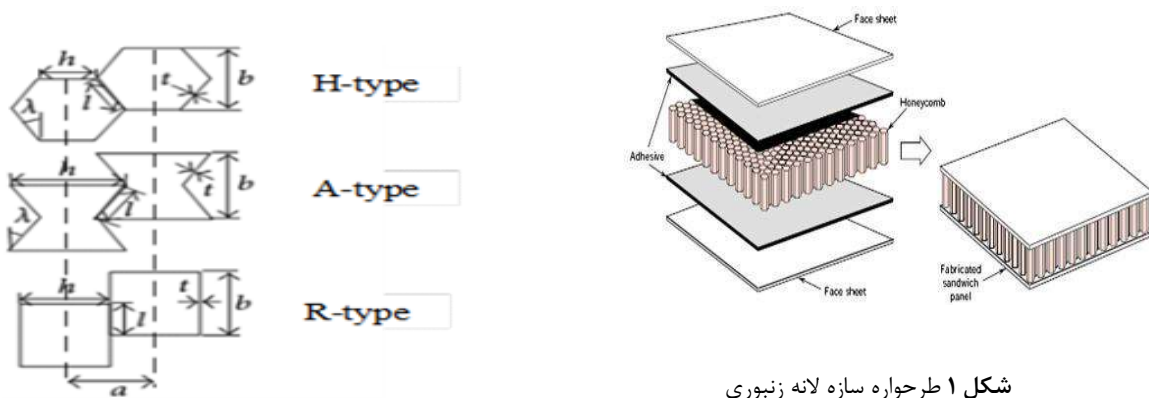
تاکنون تحقیقات متعددی در مورد سازه‌های لانه‌زنبوری انجام شده که در ادامه به صورت اختصار به چند مورد اشاره می‌شود. اسمیت و همکاران [۳] خواص جذب انرژی سازه‌های لانه‌زنبوری و ورق‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری را در اثر برخورد به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در آن تحقیق، سطح بارگذاری استاتیکی سطح بارگذاری از سطح سلول بزرگتر بود و به هنگام بارگذاری ضخامت ورق و انرژی جذب شده اندازه‌گیری می‌شد. آزمایش‌ها نشان دادند که فشار لازم برای چین خوردگی بیشتر تابع چگالی لانه‌زنبوری می‌باشد به طوری که برای دو هسته با چگالی‌های یکسان ولی اندازه سلول و ضخامت متفاوت تقریباً با هم برابرند. لیاقت و همکاران [۴] مقاومت فشاری پنج نوع سازه لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم با اندازه سلول، ضخامت دیواره و ارتفاع سلولی متفاوت را در حالت‌های پر شده از فوم پلی‌اورتان و خالی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با نرخ بارگذاری ۲/۵ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه اینسپایرون انجام شد. برای اطمینان از صحت آزمایش‌ها هر آزمایش را در حدود سه تا پنج مرتبه تکرار کردند و میانگین نتایج را در نظر گرفتند. شروع چین خوردگی گاهی از

بالای هسته لانه‌زنبوری (محل متصل به صفحه ثابت) و گاهی از پایین آن (محل متصل به صفحه متحرک) مشاهده گردید. نیا و همکاران [۵] یک سری آزمایشات تجربی برای محاسبات سرعت حد بالستیک، انرژی جذب شده و ناحیه خرابی لانه‌زنبوری‌های آلومینیومی بر اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای فولادی انجام دادند. آن‌ها متوجه شدند که تا کردن دیواره‌های سلول نقشی موثری در جذب انرژی دارد. بویتراگو و همکاران [۶] ضربه‌های با سرعت بالا را بر روی سازه‌های ساندویچی متشکل از هسته‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی و رویه‌های کربن-اپوکسی به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. برای بررسی عددی از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و یک مدل سه بعدی از یک چهارم هدف را شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. مدل ارائه شده آنها تنها دو درصد با داده‌های تجربی اختلاف داشت.

هوفت و پارک [۷] برخورد بالستیک پرتابه‌های استوانه‌ای سرسخت و سرکروی به پانل آلومینیومی لانه‌زنبوری را به صورت تحلیلی بررسی کردند. در این مدل، نیز فرآیند نفوذ پرتابه در سه مرحله در نظر گرفته شده است: نفوذ پرتابه در لایه بالایی، نفوذ پرتابه در لانه‌زنبوری و در نهایت نفوذ پرتابه در لایه زیری. مدل ارائه شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد اما مهم‌ترین عیب آن پیچیدگی معادلات حاکم و وابسته بودن معادلات هر مرحله به مرحله قبل است.

ویلانوا و کانتول تاثیر برخورد با سرعت بالا بر پنل‌های ساندویچی را با استفاده از تفنگ گازی نیتروژن بررسی کردند [۸]. ماینس و همکاران [۹] آزمایشات برخورد سرعت پایین را بر روی پنل‌های مربعی با روکش‌های کامپوزیتی پلیمری و هسته لانه‌زنبوری انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که سرعت‌های ضربه بالاتر منجر به افزایش انرژی جذب شده توسط پنل‌ها می‌شود. که علت آن را می‌توان به افزایش تنش خرابی هسته و تنش خرابی روکش در نرخ کرنش بالا نسبت داد.

با توجه به اینکه تاکنون تأثیر عيوب و حفرات بر عملکرد جذب انرژی سازه‌های لانه‌زنبوری مورد مطالعه قرار نگرفته است، بنابراین با در نظر قرار دادن هندسه‌های مختلف سلول‌ها و همچنین موقعیت و ابعاد حفره‌ها، تأثیر این پارامترها بر قابليت جذب انرژی سازه‌های لانه‌زنبوری در این مقاله بررسی خواهد شد.

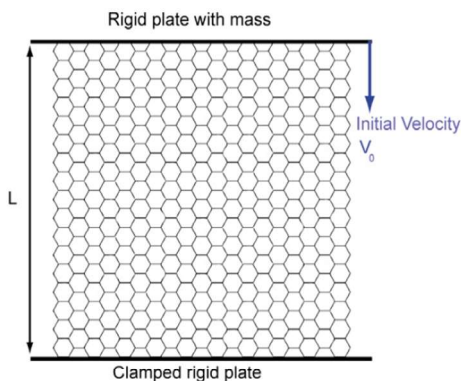


شکل ۱ طرحواره سازه لانه زنبوری

۲- مواد و روش ها

به منظور بررسی رفتار دینامیکی سازه لانه زنبوری یک مدل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس ایجاد شد. هندسه های مختلف سلولی مورد استفاده که عبارتند از آرایش های R، A و H به همراه پارامترهای مرتبط در شکل ۲ نشان داده شده است. در این طرح ها طول لبه هسته لانه زنبوری برابر $T_c=50\text{mm}$ و ضخامت دیواره در دو سمت هسته لانه زنبوری برابر $T=1\text{mm}$ می باشند. نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می دهند که در این نوع مسائل شرایط مرزی تأثیر چندانی بر دقت نتایج ندارند [۵]، با این وجود به منظور حذف اثرات شرایط مرزی، طول سازه لانه زنبوری برابر $w=300\text{mm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین در شکل ۲ جزئیات هندسه یک سلول مجزا از هسته لانه زنبوری نشان داده شده است.

پارامترهای مورد نیاز به منظور تعریف هندسه سلولی شش ضلعی عبارتند از: طول جداره افقی (h)، طول جداره مایل (l)، زاویه سلول (λ)، ضخامت جداره (t) و عمق سلول (d) عمود بر صفحه X-Y که برابر ۲ میلی متر می باشد. مقادیر زاویه λ برای سه هندسه سلولی مورد بررسی عبارتند از: $\lambda=30$ برای پیکربندی منظم (آرایش H)، $\lambda=0$ برای پیکربندی مستطیلی شکل (آرایش R) و $\lambda=-30$ برای پیکربندی شش ضلعی (آرایش A). به منظور مقایسه عملکرد لانه زنبوری تحت بررسی، در تمامی هندسه های تحت بررسی تعداد سلول در راستای محور افقی $N_x=50$ و تعداد سلول در راستای محور قائم $N_y=7$ می باشد. با در نظر گرفتن شرایط فوق فاصله بین دو سلول متوالی هسته لانه زنبوری برابر $a \times b = 36\text{mm} \times 36.928\text{mm}$ (شکل ۲) به دست می آید و در نتیجه ابعاد هر سلول برای آرایش های مختلف به ترتیب برابر خواهند بود با: $l=h=24\text{mm}$ برای سلول H، $l=23.464\text{mm}$ ، $h=26\text{mm}$ برای سلول R و $l=14\text{mm}$ ، $h=28\text{mm}$ برای سلول

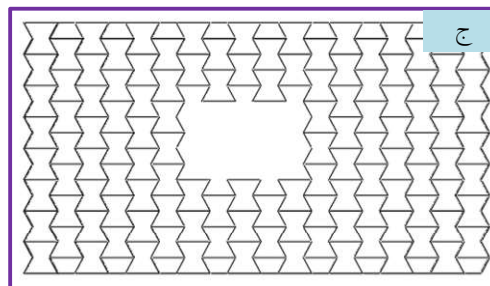
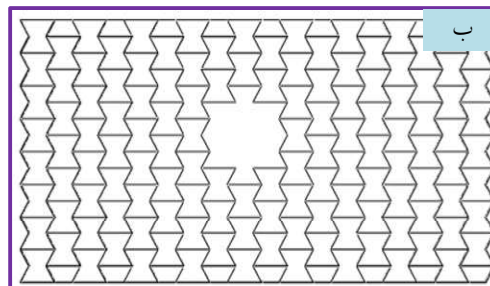
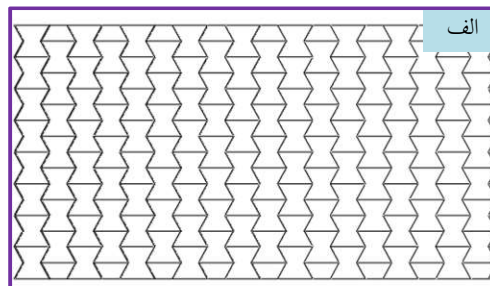
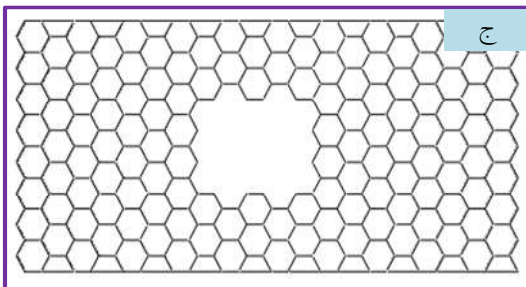
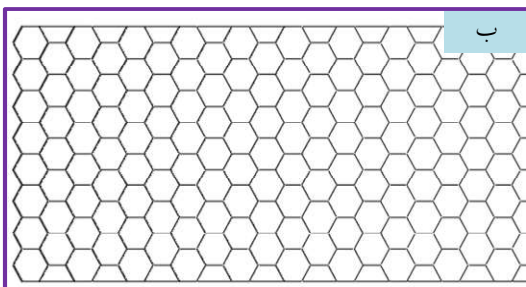
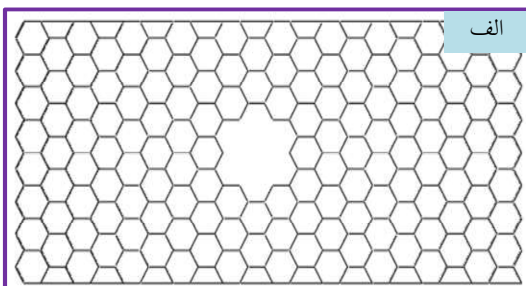


شکل ۲ هندسه سیستم مورد بررسی

A. مشخصات مکانیکی صفحه برخورد کننده عبارتند از: مدول یانگ $E=115\text{GPa}$ و نسبت پواسون $\nu=0.307$. هسته لانه زنبوری و پوسته های مورد استفاده در دو سمت آن از جنس آلایژ آلومینیوم AA6060 T4 می باشد که خواص آنها عبارتند از: مدول یانگ $E=68.2\text{GPa}$ ، تنش تسلیم $\sigma_y=80\text{MPa}$ ، استحکام نهایی $\sigma_u=173\text{MPa}$ ، نسبت پواسون $\nu=0.3$ و چگالی آن $\rho=2700\text{Kg/m}^3$ می باشد.

مدل ساختاری مورد استفاده برای سازه لانه زنبوری، مدل بهبود یافته جانسون-کوک [۶] می باشد که برای مدل سازی موادی مورد استفاده قرار می گیرد که تحت بارگذاری های با نرخ کرنش بالا هستند. المان های مورد استفاده در شبیه سازی حاضر، المان پوسته ای چهار گره ای S4R با پنج نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت برای شبکه بندی سازه لانه زنبوری و المان دو خطی چهار گره ای R3D4 برای دو صفحه رویی و پایینی می باشند. برای مش بندی سازه لانه زنبوری از المان های S4R که دارای کرنش برشی ثابتی در راستای ضخامت هستند استفاده شده است. با توجه به اینکه سازه دارای هندسه منظم است و از ورق

نازک ساخته شده، از المان پوسته‌ای چهار گره‌ای استفاده شده است. تعداد المان و گره برای هر جز طبق جدول ۱ می‌باشد. ورق‌های روکش و دیواره‌های لانه زنبوری به وسیله المان‌های چهار گره‌ای از نوع S4 مدل شده‌اند. اندازه المان‌ها برابر ۰/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. کرنش و اماندگی پلاستیک بحرانی برای همه‌ی المان‌ها برابر ۰/۸ تعریف شد که برای کرنش‌های بزرگ‌تر از این مقدار، المان‌های پوسته دچار خرابی می‌شوند و معیار حذف المان برقرار می‌شود و المان مورد نظر از مدل حذف می‌شود. پرتابه نیز توسط المان‌های R3D4 مدل شده است. در تمام تحلیل‌ها جرم جسم برخورد کننده برابر ۱۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است و درصد عيوب بدون عيب، ۵٪ و ۱۰٪ برای هر حالت مورد مطالعه قرار گرفته می‌شود. در شکل‌های ۳ تا ۵ هندسه نمونه‌های تحت بررسی نشان داده شده است.



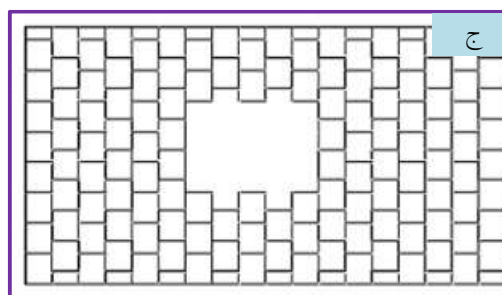
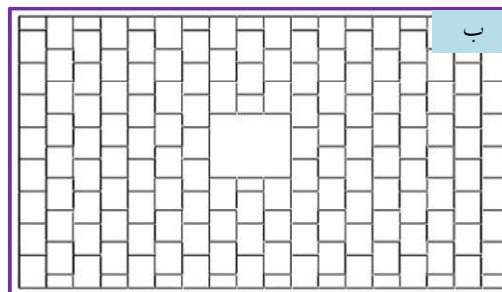
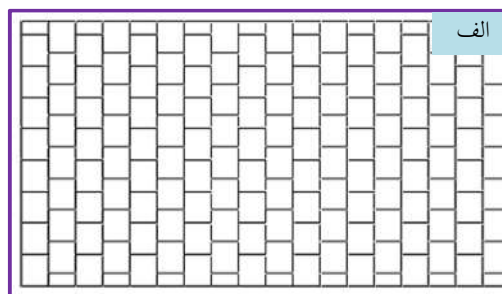
شکل ۴ هندسه لانه زنبوری نوع H به ازای (الف) بدون عيب، (ب) ۵٪ عيب و (ج) ۱۰٪ عيب

شکل ۳ هندسه لانه زنبوری نوع A به ازای (الف) بدون عيب (ب) ۵٪ عيب و (ج) ۱۰٪ عيب

جدول ۱ تعداد گره و المان برای سازه لانه زنبوری

اجزای مدل	صفحه رویی	صفحه هسته لانه زنبوری	صفحه پشتی
تعداد المان	۱۰۰۰۰	۶۴۶۰۰۰	۱۰۰۰۰
تعداد گره	۳۵۰۰۰	۵۳۰۰۰۰	۳۵۰۰۰

ساندویچی هستند و عبارتند از: ورق سطح بالایی، هسته لانه زنبوری و ورق سطح پایینی مورد استفاده در زیر هسته. در ناحیه اول، صفحه جلویی باعث افت ناگهانی سرعت در شروع برخورد می‌شود که در نتیجه آن جسم با سرعتی کمتر به هسته لانه زنبوری می‌رسد. در ناحیه دوم سرعت به صورت پیوسته کاهش می‌یابد. در حین تخریب هسته لانه زنبوری و زمانی که جسم با سلول‌های مورد استفاده برخورد می‌کند سرعت آن به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. با مقایسه تغییر شکل نهایی نشان داده شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در پنل لانه‌زنبوری با هندسه سلول نوع A، پنل به صورت کامل تخریب شده است که این امر می‌تواند در نتیجه عدم تقارن سلول‌های سازه باشد. در دو مدل دیگر، سازه شکل کلی خود را حفظ کرده و با تغییر شکل منظم ایجاد شده در سلول‌ها، این نوع هندسه‌ها توانایی بیشتری در قابلیت جذب انرژی حین برخورد را دارا هستند. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که حداکثر تنش به وجود آمده در نمونه‌های تحت بررسی سه نوع هندسه سلولی A، H و R به ترتیب برابر با ۷۲۰، ۱۷۳ و ۱۷۲ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود نمونه نوع A بیشترین تنش را دارا می‌باشد.

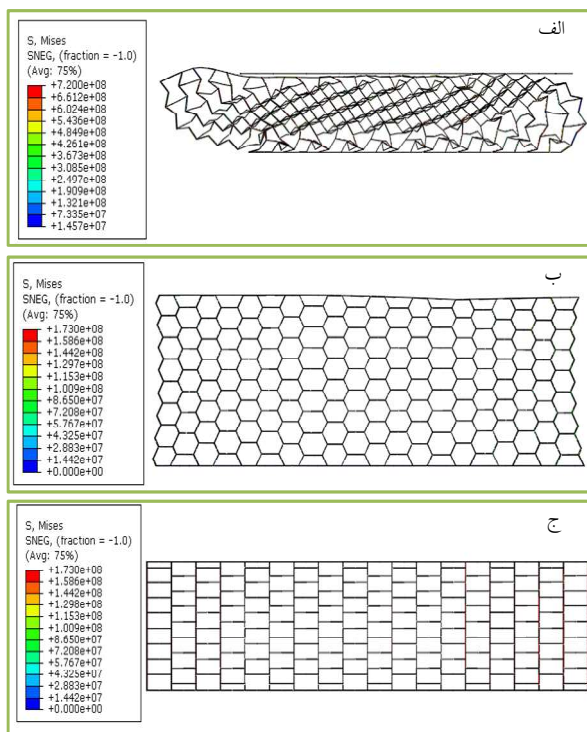


شکل ۵ هندسه لانه زنبوری نوع R به ازای (الف) بدون عیب، (ب) ۵٪ عیب و (ج) ۱۰٪ عیب

۳- نتایج و بحث

در شکل ۶ تغییر شکل نهایی هر سه نوع هندسه‌های A، H و R تحت بررسی در حین تخریب به ازای سرعت برخورد ۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود طرح لانه زنبوری با هندسه سلول A، در مقایسه با طرح‌های دیگر عملکرد نامطلوبی دارد. با توجه به اینکه این طرح به لحاظ عملیاتی نیز پیچیده است، بنابراین استفاده از این مدل اقتصادی نخواهد بود. کل زمان برخورد صفحه ۱/۲ ثانیه محاسبه شده است که می‌تواند به صورت زمان بین تماس صلب با ورق سطح جلویی و تا لحظه‌ای که سرعت صفحه به طور کامل صفر می‌شود، تعیین شود.

در حالت کلی سه ناحیه متفاوت در فرایند لهیدگی پنل لانه‌زنبوری می‌توان مشخص نمود که مربوط به سه ناحیه از پنل

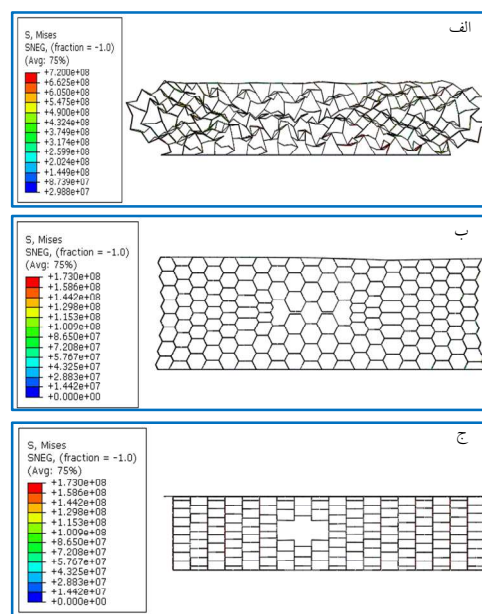


شکل ۶ نحوه توزیع تنش در هندسه‌های تحت بررسی به ازای سرعت برخورد ۳ متر بر ثانیه (الف) نوع A، (ب) نوع H و (ج) نوع R

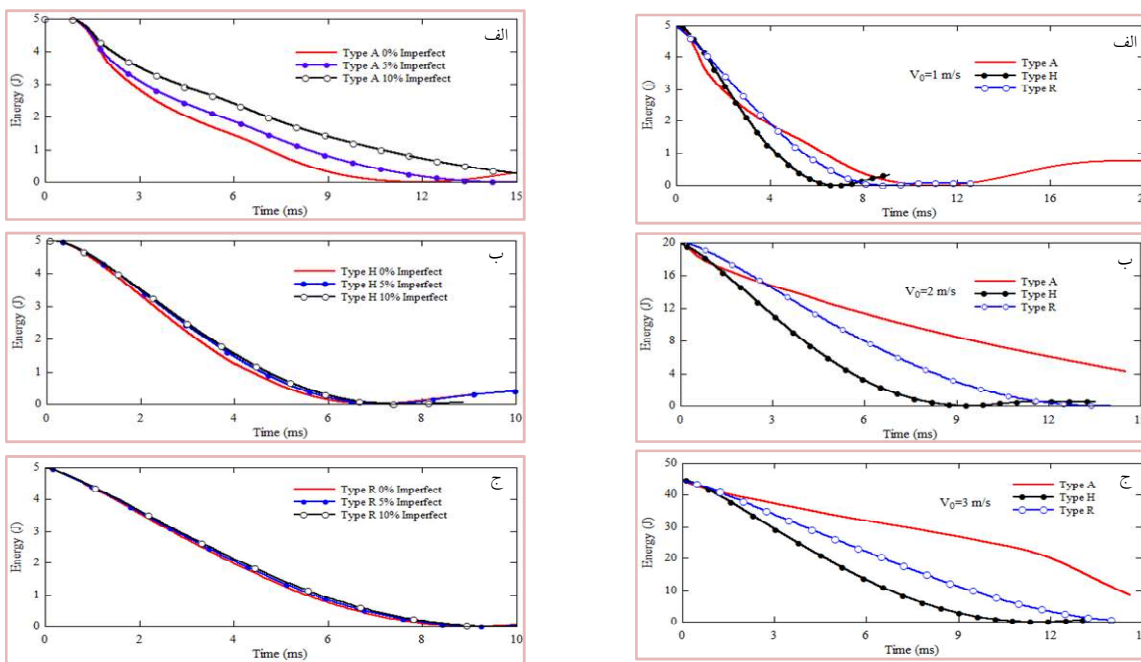
هندسه سلول‌های پنل ساندویچی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابليت جذب انرژی در این سازه‌ها دارد. هنگامی که میزان انرژی سازه به صفر می‌رسد، در واقع انرژی جنبشی صفحه پرتاب شده به صورت انرژی کرنشی که در نتیجه تغییر شکل‌های پلاستیک در سازه ایجاد می‌شود تلف شده و باعث توقف صفحه می‌شود. همچنین، با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که زمان توقف در این نمونه به ازای سرعت اولیه برخورد ۲ متر بر ثانیه به ترتیب برابر با ۲۳، ۱۳/۴ و ۹ میلی ثانیه و برای سرعت اولیه برخورد ۳ متر بر ثانیه برابر با ۲۶، ۱۴ و ۱۱/۵ میلی ثانیه می‌باشد. بر این اساس می‌توان چنین نتیجه گرفت که طرح هندسه سلولی از نوع H دارای بیشترین قابليت جذب انرژی بوده و توانایی بالایی را در جذب انرژی حین برخورد با سرعت‌های مختلف اجسام را دارد. علت بالای قابليت جذب انرژی این نوع ساختارهای لانه‌زنبوری را می‌توان در نوع نظم سلول‌ها دانست. علاوه بر این، با مقایسه این نتایج با تغییر شکل‌های نهایی پنل‌های ساندویچی با ساختار لانه‌زنبوری نوع R و H که در شکل ۷ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که این ساختارها بدون اینکه تخریب کلی در ساختار آنها ایجاد بشود توانایی جذب انرژی در حدود ۴۵ ژول را دارا هستند. بر این اساس با توجه به اینکه این نوع سازه‌ها ضمن سبک بودن به راحتی می‌توانند تولید شوند از این رو استفاده از آنها در مصارفی که به منظور جذب انرژی باشد، می‌تواند بسیار مقرون به صرفه بوده و در صورت طراحی مناسب و تعیین بهینه پارامترهای آن عملکرد بالایی را از خود نشان دهند.

در ادامه به منظور مطالعه تأثیر عيوب بر قابليت جذب انرژی در سازه‌های لانه‌زنبوری با هندسه‌های مختلف هسته، منحنی انرژی جذب شده برای نمونه‌های تحت بررسی به ازای سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه و با فرض وجود ۵ و ۱۰ درصد عيب در آنها در شکل ۹ به ترتیب برای پنل‌های لانه‌زنبوری به نوع سلول A، H و R نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد وجود عيب در ساختار پنل‌های ساندویچی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابليت جذب انرژی در این سازه‌ها دارد و با افزایش میزان عيوب قابليت جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیر عيوب بر میزان کاهش قابليت جذب انرژی در سازه‌های لانه‌زنبوری با ساختار سلول از نوع A به مراتب بسیار بیشتر از دو نوع ساختار دیگر می‌باشد.

در ادامه تغییر شکل نهایی نمونه‌های تحت بررسی با ۱۰ درصد عيب و به ازای سرعت برخورد ۳ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار داده می‌شود که نتایج این تحلیل‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر شکل‌های ایجاد شده در سازه‌های لانه‌زنبوری با هندسه سلول نوع R و H از نظم خاصی برخوردار بوده و پس از جذب کامل انرژی ساختار اولیه خود را نسبتاً حفظ کرده‌اند. در مقابل نمونه با ساختار سلول از نوع A، دارای فروریزش غیریکنواختی بوده و در نتیجه آن، میزان انرژی جذب شده کمتر بوده و همچنین تغییر شکل ایجاد شده در این نمونه بیشتر از سایر نمونه‌های تحت بررسی می‌باشد. از جمله خصوصیات مهم سازه، مقدار انرژی جذب شده در حین فرایند برخورد می‌باشد. بدین منظور در ادامه به بررسی میزان انرژی جذب شده و تأثیر عيوب بر قابليت جذب انرژی توسط نمونه‌های مختلف تحت بررسی پرداخته می‌شود. در شکل ۸ تاریخچه زمانی انرژی کرنشی برای سازه‌های لانه‌زنبوری با سلول‌های نوع A، H و R و به ازای سرعت‌های برخورد ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. شکل (۸-الف) نشان می‌دهد که در حالت برخورد با سرعت اولیه ۱ متر بر ثانیه انرژی جنبشی اولیه منتقل شده به سازه برابر با ۵ ژول بوده و پنل‌های ساندویچی با هندسه سلول نوع A، R و H به ترتیب در زمان‌های ۱۱، ۸/۱ و ۶/۶ میلی ثانیه باعث جذب کامل انرژی صفحه شده و سبب توقف آن می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود نوع

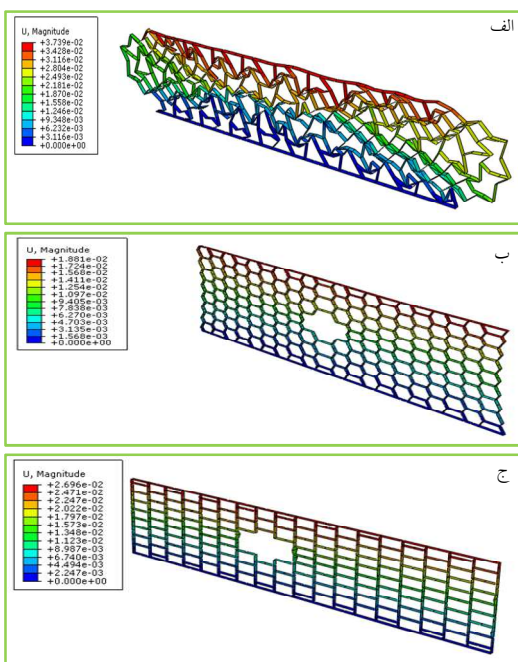


شکل ۷ تغییر شکل نهایی هندسه‌های تحت بررسی به ازای سرعت برخورد ۳ متر بر ثانیه (الف) نوع A، (ب) نوع H و (ج) نوع R



شکل ۸ تغییرات انرژی کرنشی پنل‌های لانه‌زنبوری بدون عیب بر حسب زمان به ازای سرعت‌های مختلف برخورد (الف) ۱، (ب) ۲ و (ج) ۳ متر بر ثانیه

شکل ۹ منحنی انرژی جذب شده برای پنل ساندویچی به ازای سرعت برخورد ۱ متر بر ثانیه با هندسه سلول (الف) نوع A، (ب) نوع H و (ج) نوع R



شکل ۱۰ تغییر شکل نهایی نمونه‌های معیوب با ۱۰ درصد عیب و سرعت اولیه ۳ متر بر ثانیه با هندسه سلول (الف) نوع A، (ب) نوع H و (ج) نوع R

در شکل ۱۰ تغییر شکل نهایی نمونه‌های معیوب با ۱۰ درصد عیب و برای برخورد اولیه با سرعت ۳ متر بر ثانیه به منظور مقایسه تاثیر عیوب موجود در ساختار سازه لانه‌زنبوری، نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای این نمونه‌ها تغییر شکل نهایی ایجاد شده در سازه‌های لانه‌زنبوری برای توقف کامل صفحه برخورد کننده برای سلول‌های نوع A، H و R به ترتیب برابر با $\frac{3}{73}$ ، $\frac{1}{88}$ و $\frac{2}{70}$ سانتی متر می‌باشد. بر این اساس ساختار لانه‌زنبوری با سلول نوع A دارای بیشترین تغییر شکل بوده و ساختار لانه‌زنبوری با سلول نوع H دارای کمترین تغییر شکل می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که در شرایط یکسان، جابجایی ساختار لانه‌زنبوری با سلول نوع H نسبت به سلول نوع A در حدود ۹۸ درصد کمتر بوده و جابجایی آن نسبت به لانه‌زنبوری با ساختار نوع R در حدود ۳۸ درصد کمتر می‌باشد. علاوه بر آن، همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه در سلول نوع H و R، تغییر شکل‌های ایجاد شده در حین برخورد یکنواخت بوده و سازه تغییر شکل یافته دارای شکل هندسی مشابه سازه سالم می‌باشد.

- [8] G.R. Villanueva, and W. Cantwell, The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures, *Composites Science and Technology*, Vol.64, No. 1, pp.35-54, 2004.
- [9] R. Mines, , C. Worrall, and A. Gibson, The static and impact behaviour of polymer composite sandwich beams, *Composites*, Vol. 25, No.2, pp. 95-110, 1994.

۴- نتیجه‌گیری

۱- در پنل لانه‌زنبوری با هندسه سلول نوع A، در اثر برخورد، پنل به صورت کامل تخریب می‌شود که این امر می‌تواند در نتیجه عدم تقارن سلول‌های سازه باشد. در دو مدل دیگر سازه شکل کلی خود را حفظ کرده و با تغییر شکل منظم ایجاد شده در سلول‌ها، این نوع هندسه‌ها توانایی بیشتری در قابليت جذب انرژی حین برخورد دارند.

۲- مشاهده می‌شود که برای نمونه‌های تحت بررسی زمان توقف به ازای سرعت اولیه برخورد ۳ متر بر ثانیه برابر با ۲۶، ۱۴ و ۱۱/۵ میلی ثانیه می‌باشد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که طرح هندسه سلولی از نوع H دارای بیشترین قابليت جذب انرژی بوده و توانایی بالایی را در جذب انرژی حین برخورد با سرعت‌های مختلف اجسام را دارد.

۳- نتایج نشان می‌دهد وجود عیب در ساختار پنل‌های ساندویچی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابليت جذب انرژی در این سازه‌ها دارد و با افزایش میزان عيوب قابليت جذب انرژی نیز کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تاثیر عيوب بر میزان کاهش قابليت جذب انرژی در سازه‌های لانه‌زنبوری با ساختار سلول از نوع A به مراتب بسیار بیشتر از دو نوع ساختار دیگر می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] M.S.H. Fatt, and D. Sirivolu, A wave propagation model for the high velocity impact response of a composite sandwich panel, *International journal of impact engineering*, Vol. 37, NO.2, pp. 117-130, 2010.
- [2] S. Feli, and M.N. Pour, An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No.5, pp. 2439-2447, 2012.
- [3] W. Goldsmith, , G.T. Wang, K. Li, and D. Crane, Perforation of cellular sandwich plates, *International journal of impact engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 361-379, 1997.
- [4] G.H. Liaghat, , A.A. Nia, H.R. Daghyani, and M. Sadighi, Ballistic limit evaluation for impact of cylindrical projectiles on honeycomb panels, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 1, pp. 55-61, 2010.
- [5] A.A. Nia, , S. Razavi, and G. Majzoubi, Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—experimental study, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 488, No. 1, p p. 273-280, 2008.
- [6] B.L. Buitrago, , C. Santiuste, S. Sánchez-Sáez, E. Barbero, and C. Navarro, Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite structures*, Vol. 92, No.9, pp. 2090-2096, 2010.
- [7] M.H. Fatt, and K. Park, Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Vol. 31, No.8, pp. 889-899, 2000.