



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Quasi-Static Energy Absorption of Hemispherical Truss Structures with Honeycomb and Triangular Cellular Geometries: A Numerical and Experimental Study

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors

Peyman Daneshi*

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Abas Niknejad

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Khadije Yousefi

Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

* Correspondence

peyman.daneshi9700@gmail.com

Article History

Received: 08 Jan, 2026

Accepted: 07 Jul, 2026

ePublished: 02 Aug, 2026

ABSTRACT

Abstracts

In this study, the quasi-static energy absorption behavior of a hemispherical truss structure with a porous core is investigated numerically and experimentally for two different cellular geometries, namely honeycomb and triangular. The hemispherical truss structures are fabricated by connecting metallic wires with specified lengths and diameters. To improve the accuracy and quality of the experimental specimens, a polymeric fixture is manufactured using a 3D printer, and the specimen is placed between two rigid plates in a universal testing machine (UTM). During the test, the moving rigid plate is displaced toward the fixed plate at a constant speed of 5mm/min. Under quasi-static loading conditions, progressive collapse and plastic deformation occur in the truss structure. The same process is simulated using the finite element method in ABAQUS software considering four different wire lengths, four different wire diameters, three different materials, and two different geometrical configurations. The results of the numerical and experimental analyses indicate that the structure with triangular cellular geometry, wire diameter of 6 mm, wire length of 30 mm, and aluminum material exhibits the highest energy absorption capacity within the investigated range.

Keywords: Energy absorbtion; Semi_spherical truss; Quasi-static analysis

مفتول ۶ میلی متر و طول مفتول ۳۰ میلی متر و جنس مفتول آلومینیوم بهترین جذب انرژی را در محدوده مورد بررسی دارد.

کلید واژه‌ها

جذب انرژی، تحلیل آزمایشگاهی، خرپای نیم‌کروی، فروپاشی شبه‌استاتیکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

* نویسنده مسئول: peyman.daneshi9700@gmail.com

۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه سازه‌های سبک با قابلیت جذب انرژی بالا به یکی از محورهای اصلی تحقیقات در حوزه‌های مهندسی مکانیک، هوافضا و ایمنی سازه‌ها تبدیل شده است. این سازه‌ها به‌ویژه در کاربردهایی نظیر سیستم‌های حفاظت در برابر ضربه، اجزای جاذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه‌های مقاوم در برابر بارهای انفجاری، نقش مهمی ایفا می‌کنند. در این میان، ساختارهای سلولی به‌ویژه سازه‌های لانه‌زنبوری، به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و رفتار مکانیکی قابل کنترل، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱،۲].

ساختارهای لانه‌زنبوری با برخورداری از هندسه منظم و تکرارشونده، امکان توزیع یکنواخت تنش و جذب مؤثر انرژی را فراهم می‌سازند. این سازه‌ها تحت بارگذاری فشاری، به‌ویژه در شرایط شبه‌استاتیکی، رفتار فروریزش پیشرونده از خود نشان می‌دهند که منجر به جذب انرژی قابل توجهی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که پارامترهایی نظیر هندسه سلول، چگالی نسبی، ضخامت دیواره‌ها و خواص مکانیکی ماده، تأثیر بسزایی بر عملکرد جذب انرژی این ساختارها دارند [۳،۴].

بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار جذب انرژی شبه‌استاتیکی خرپای نیم‌کروی با هسته متخلخل در هندسه‌های لانه زنبوری و مثلثی

پیمان دانشی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

عباس نیک نژاد

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

خدیجه یوسفی

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

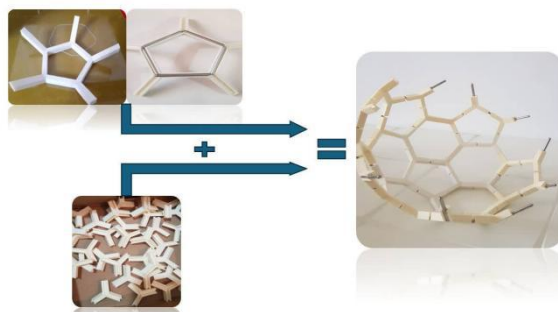
چکیده

در این مقاله رفتار جذب انرژی خرپای نیم‌کروی با هندسه هسته متخلخل در دو حالت لانه زنبوری و مثلثی، به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود. بدین منظور با اتصال مفتول‌های فلزی با طول و قطر مشخص خرپای نیم‌کروی با هندسه لانه زنبوری ساخته می‌شود. برای افزایش دقت و کیفیت نمونه تولیدی آزمایشگاهی، یک شابلون پلیمری با استفاده از پرینتر سه بعدی ساخته شده، و درون دستگاه تست یونیورسال بین دو صفحه صلب قرار میگیرد. با شروع تست، صفحه صلب متحرک با سرعت ثابت ۵ میلی متر بر دقیقه به آرامی به سمت صفحه صلب ساکن حرکت می‌کند. در این فرایند که به صورت شبه‌استاتیکی صورت می‌پذیرد، پدیده فروریزش و تغییر شکل پلاستیک در خرپا رخ خواهد داد. تحلیل المان محدود همین فرایند با ۴ طول مختلف مفتول، ۴ قطر مختلف مفتول، ۳ جنس مختلف و نیز ۲ هندسه متفاوت توسط نرم افزار اباکوس انجام می‌شود. نتایج تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد سازه با هندسه سلولی مثلثی با طول قطر

2 بخش آزمایشگاهی

2-1 انتخاب هندسه ساختار

امروزه با توجه حوادث رانندگی و تلفات جانی بسیار و نیز توسعه صنایع مختلف حمل و نقل هوایی، زمینی و دریایی، استفاده از جاذب‌های انرژی جنبشی، با هدف حفظ جان سرنشینان، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش با الگوبرداری از سازه‌های لانه‌زنبوری و با توجه به کاربرد هندسه‌ی نیم‌کروی، طرح سازه‌ی فلزی نیم‌کروی با هندسه لانه‌زنبوری، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آزمایشات تجربی و طراحی انجام شده توسط محققین این پژوهش بر روی سازه جاذب انرژی لانه‌زنبوری نیم‌کروی، استفاده از این نوع جاذب انرژی در مدل‌های مختلف انواع کلاه ایمنی مورد استفاده توسط دوچرخه‌سواران، موتورسواران و کارگران کارخانجات صنعتی پیشنهاد می‌شود. در این پژوهش، با الگو گرفتن از سازه‌های لانه‌زنبوری و با توجه به کاربرد هندسه‌ی نیم‌کروی در قطعات مختلف نظیر مخازن کروی، سازه‌های زیرزمینی و کلاه ایمنی، طرح سازه‌ی فلزی نیم‌کروی با هندسه لانه‌زنبوری، پیشنهاد و مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. در شکل (۱)، شماتیک ساختار پیشنهادی ارائه شده است.



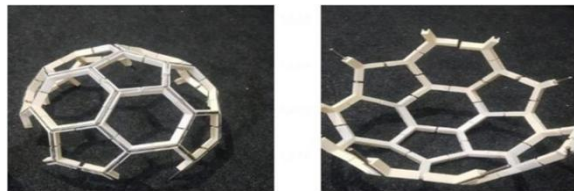
شکل (۱) شماتیک ساختار پیشنهادی

در کنار ساختارهای سلولی پیوسته، خرپاهای فضایی به‌عنوان دسته‌ای از سازه‌های مهندسی‌شده سبک، به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خرپاهای فلزی به دلیل قابلیت طراحی هندسی متنوع، سهولت ساخت و رفتار مکانیکی قابل پیش‌بینی، گزینه‌ای مناسب برای توسعه جاذب‌های انرژی محسوب می‌شوند. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که استفاده از آرایش‌های سه‌بعدی، به‌ویژه ساختارهای خمیده و نیم‌کروی، می‌تواند منجر به بهبود عملکرد جذب انرژی و افزایش پایداری سازه در برابر کماتش شود [۳].

مطالعات تجربی و عددی انجام‌شده بر روی سازه‌های خرپایی و لانه‌زنبوری نشان می‌دهند که مکانیزم‌های تغییر شکل نظیر کماتش اعضا، تشکیل مفاصل پلاستیک و شکست موضعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در فرآیند جذب انرژی دارند. همچنین، استفاده از روش اجزای محدود به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، امکان پیش‌بینی رفتار غیرخطی این سازه‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را فراهم کرده است [۵،۶].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، بررسی رفتار سازه‌های ترکیبی مانند خرپای نیم‌کروی با هندسه لانه‌زنبوری همچنان نیازمند تحقیقات بیشتری است. این نوع ساختارها با ترکیب مزایای سازه‌های خرپایی و سلولی، پتانسیل بالایی در کاربردهای جذب انرژی دارند. از این‌رو، در پژوهش حاضر، رفتار فروریزش و لهیدگی جانبی نمونه‌های خرپای نیم‌کروی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی، به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تأثیر پارامترهای هندسی بر ظرفیت جذب انرژی آن‌ها به‌طور جامع ارزیابی شود.

از یک مفتول نورد شده بصورت دایره برای اتصال لبه‌های نیم‌کره استفاده شده است. وزن سازه نیم‌کروی، ۲۹۰ گرم و قطر ساختار کروی تولید شده، ۳۲۰ میلی‌متر است.



شکل (۲) نمونه نیم‌کروی فلزی با هندسه لانه‌زنبوری درون شابلون پلیمری

2-4 نحوه‌ی انجام تست

بعد از ساخت نمونه آزمایشگاهی و پرداخت کردن نقطه‌جوش ایجاد شده در محل هر اتصال، سازه نیم‌کروی مطابق شکل (۳) بین دو فک ثابت و متحرک دستگاه تست یونیورسال قرار داده شد. مدل دستگاه، دستگاه تست کشش و فشار یونیورسال (DMG) می‌باشد.

با آغاز تست، فک متحرک با سرعت ثابت ۵ mm/min شروع به حرکت می‌کند و به فک ثابت نزدیک می‌شود. در نتیجه، نمونه قرار گرفته بین دو فک دستگاه، تحت نیروی فشار جانبی در امتداد قائم (شکل ۳) قرار می‌گیرد و در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در مفتول‌های تشکیل‌دهنده نمونه آزمایشگاهی، فرآیند فروریزش و لهیدگی جانبی در نمونه در شرایط شبه‌استاتیکی رخ می‌دهد. نمودار نیرو بر حسب جابجایی، به عنوان خروجی آزمایش، تهیه و ترسیم می‌شود. با عنایت به اینکه مفتول‌ها و نقطه‌جوش‌های ایجاد شده، از جنس ماده نرم هست، در حین لهیدگی جانبی، شکستگی در مفتول‌ها و اتصالات رخ نمی‌دهد. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش، ۳ نمونه یکسان

2-2 روش ساخت

برای ساخت این نوع سازه، به طراحی و تولید یک شابلون نیاز است تا بتوان مفتول‌ها را، یکی پس از دیگری، درون این شابلون قرار داد تا هندسه‌ی نیم‌کروی منسجم سلولی تشکیل شود.

بعد از طراحی شابلون مورد نیاز، با استفاده از پرینت سه‌بعدی، شابلون پلیمری تولید گردید. سپس، مفتول‌ها از جنس استیل ۳۰۴ با قطر و طول از پیش تعیین‌شده، بریده شد و به ترتیب، درون شابلون نیم‌کروی پلیمری قرار داده شد و با انجام فرآیند جوشکاری، انتهای مفتول‌های مجاور به یکدیگر متصل شد تا نمونه‌های نیم‌کروی تولید شوند.

2-3 جنس مفتول‌ها

مفتول استیل ۳۰۴ یا فولاد ضدزنگ ۳۰۴، از دسته فولادهای آلایژی است. این نوع از فولاد، به دلیل چقرمگی بالا و خاصیت ضدزنگ‌زدگی آن، براساس آزمایش کشش ساده استاندارد انجام شده بر روی آن، یک ماده نرم و شکل‌پذیر محسوب می‌شود که یک خاصیت مکانیکی ضروری برای انتخاب یک جاذب انرژی است.

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی نیم‌کروی، از مفتول‌هایی با قطر ۴ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر استفاده گردید. شکل (۲)، یک نمونه نیم‌کروی با هندسه لانه‌زنبوری را درون شابلون پلیمری، بعد از جوشکاری مفتول‌ها به هم نشان می‌دهد. جوش به کار گرفته شده، از جنس استیل است. از فرآیند جوش آرگون-استیل برای اتصال انتهای مفتول‌های مجاور به هم استفاده شده است.

نوع مش بندی با توجه به نوع سازه برای پوشش دهی سطح و نقطه دار از طبقه بندی هرم با شکل قاعده مثلث بهره برداری شده است (تتراگونال)

شکل (۴)، نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود متناظر آن را بعد از انجام تست لهیدگی جانبی و شکل (۵) نمودار نیرو- جابجایی این دو نمونه را نشان می‌دهد. مطابق بسیار خوب الگوهای تغییر شکل پلاستیک دو نمونه آزمایشگاهی و عددی در شکل (۴) و مطابقت قابل قبول نمودارهای نیرو- جابجایی آنها تا آغاز رفتار صلب‌گونه، صحت و دقت مناسب تحلیل المان محدود انجام شده را نشان می‌دهد.

در ادامه، برای بررسی اثر قطر مفتول، طول مفتول و بررسی اثر جنس مفتول‌های، نمونه‌های نیم‌کروی متنوع و متعددی با قطرهای مفتول ۲، ۳، ۴ و ۵ میلیمتر، با طول‌های مفتول ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ میلیمتر و از سه جنس فولاد ضدزنگ St 304، آلیاژ برنج 260 و آلیاژ آلومینیوم AA336.0 طراحی و تولید گردید و هر یک از این نمونه‌ها، تحت تست لهیدگی جانبی در شرایط شبه‌استاتیکی قرار گرفتند.

لازم به ذکر است، از این نوع آلیاژ آلومینیوم به دلیل استحکام و چقرمگی بالا، بیشتر در قطعات خودرو استفاده می‌شود. آلیاژ برنج استفاده شده نیز ترکیب شکل‌پذیری و استحکام بسیار بالا را داراست. جنس به کار رفته در مدل قالب پلاستیکی از نوع pla و توسط فرایند پرینت ۳ بعدی طراحی و ساخته شده است.

مطابق مشخصات تشریح شده، تولید و تست گردید که مطابقت نتایج آنها با یکدیگر، صحت و دقت آزمایش انجام شده را نشان داد.

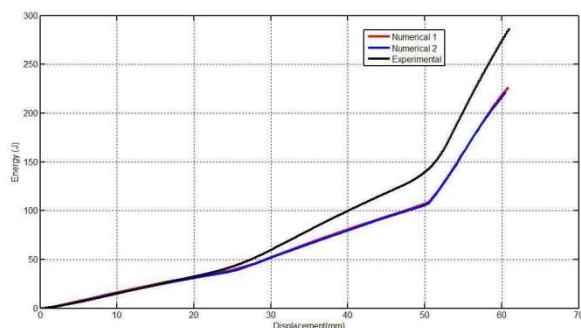


شکل (۳) نمونه نیم‌کروی فلزی لانه‌زنبوری در حین تست لهیدگی جانبی

3 تحلیل عددی

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار جذب انرژی نمونه‌های نیم‌کروی، به تعداد زیادی نمونه مختلف نیاز است. برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها، از تحلیل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. بدین منظور، پس از ایجاد مدل هندسی در نرم‌افزار آباکوس، برای دستیابی به پاسخ با دقت بالا، از المان تراهدرال برای المان‌بندی مدل هندسی ایجاد شده، استفاده گردید. دو صفحه صلب به عنوان مدلی از فک‌های ثابت و متحرک دستگاه، ایجاد گردید و ضریب اصطکاک بین نمونه آزمایشگاهی و دو صفحه صلب، ۰/۳ در نظر گرفته شد. نوع تحلیل نیز، دینامیک ایمپلیسیت انتخاب گردید. مدل سازی از حلگر دینامیک ایمپلیسیت استفاده می‌شود، نوع فرآیند کوازی استاتیک یا شبه استاتیک می‌باشد. شرایط تکیه گاهی به صورت صفحات صلب یا دیسکریٹ ریجید جهت تطابق شرایط با آزمایش آزمایشی تعبیه شده، زمان فرآیند لهیدگی ۱۰۰ سال در نظر گرفته شده است.

عملا تغییر پلاستیک در آن رخ نخواهد داد. عامل اصلی جذب انرژی تغییر شکل پلاستیک سازه می باشد.



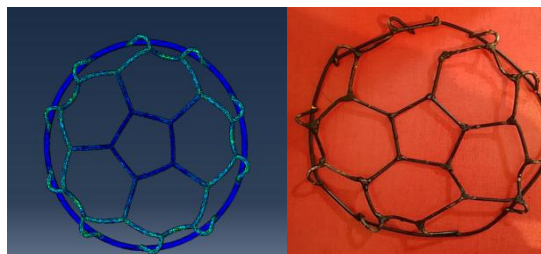
نمودار (۶)

نمودار فوق (۶) رو جهت همگرایی مش بندی (نظر ۱۲) در دو حالت عددی که کاملا روی هم افتادن اضافه کنید. و در توضیحات بنویسد که درجه دانه بندی یا در نمیکال ۱ روی ۹ و در نمودار نمیکال ۲ روی ۵/۸ و به طبع میزان المان کوچک تر میشود. ولی کاملا مطابق هست پس نیازی نیست کمتر از ۹ باشه دانه بندی

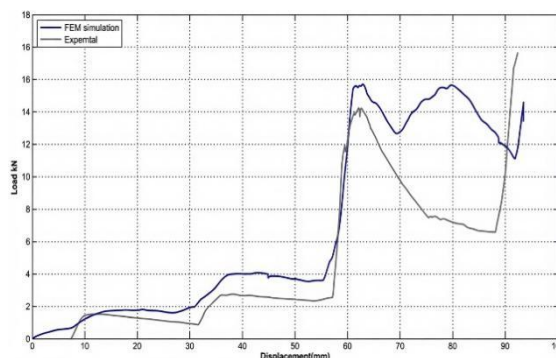
4 تعیین خصوصیات نمونه بهینه

4-1 بررسی اثر طول مفتول

برای بررسی اثر طول مفتول، ۴ نمونه متنوع با طولهای مختلف مفتول (۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ میلیمتر) و قطر یکسان مفتول ۴ میلیمتر تولید گردید و رفتار جذب انرژی آنها تحت فرآیند لهیدگی جانبی بررسی گردید. شکل (۷)، نمودار جذب انرژی واحد جرم بر حسب جابجایی را برای این ۴ نمونه مختلف با یکدیگر مقایسه می کند. این شکل نشان می دهد، در محدوده مورد بررسی، هر چه طول مفتولها کمتر شود، جذب انرژی مخصوص (نسبت جذب انرژی به جرم نمونه) بیشتر می شود. قابل ذکر است، طول مفتولها باید به گونه ای انتخاب شود که قابلیت جذب



شکل (۴) تغییر شکل سازه نیم کروی لانه زنبوری بعد از انجام آزمایش (نمونه های آزمایشگاهی و عددی متناظر)

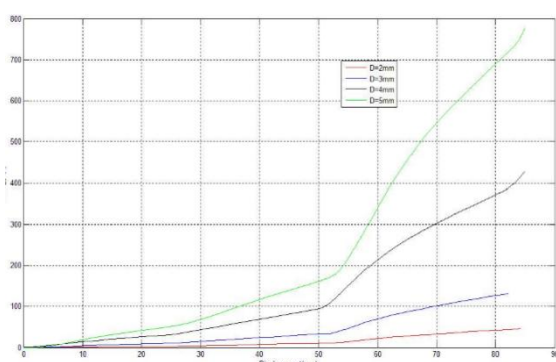


نمودار (۵) نمودارهای نیرو- جابجایی ساختار نیم کروی لانه زنبوری با قطر مفتول ۴ میلیمتر و طول مفتول ۵۰ میلیمتر از دو تحلیل عددی و تجربی.

معیار انتخاب جابه جایی، جابه جایی جانبی در راستای محور عمود میباشد، برای این منظور یک رفرنس پوینت فرضی در هد سازه که دقیقا وسط یک هسته لانه زنبوری می باشد در نظر میگیریم و به میزان ۸۵ درصد طول نقطه مورد نظر تا نقطه زیرین خود سازه که به تکیه گاه متصل هست جابه جایی در نظر میگیریم... لازم ب ذکر است نیازی نیست جابه جایی ما بیش از ۸۵ درصد باشد چون سازه بعد از این مقدار به حالت کوازی ریجید نزدیک میشود که شبه صلب بود و

جذب انرژی واحد جرم بر حسب جابجایی را برای این ۴ نمونه مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کند. نمودارهای عددی رسم شده در این شکل نشان می‌دهد، در محدوده مورد بررسی، هر چه قطر مفتول‌ها بزرگتر انتخاب شود، جذب انرژی مخصوص بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است، یکی از کاربردهای این سازه، استفاده در کلاه ایمنی است. لذا، در انتخاب قطر مفتول‌ها سعی گردید، جنبه صنعتی و کاربردی سازه مد نظر قرار گیرد.

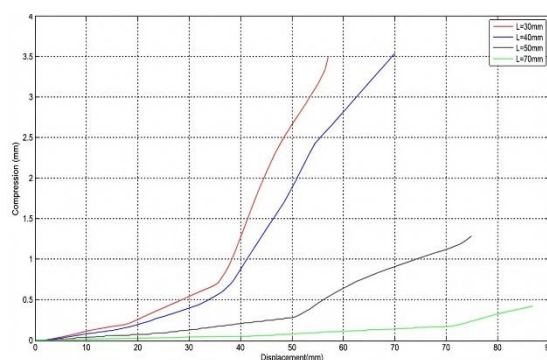
شکل (۹) نیز، الگوی تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های با قطرهای مختلف مفتول و طول یکسان مفتول را نشان می‌دهد.



شکل (۸) نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب جابجایی نمونه‌های با قطرهای مختلف مفتول و طول یکسان مفتول

انرژی داشته باشد، زیرا کوتاه شدن بیش از حد طول مفتول‌ها، سازه را به یک جسم جامد شبه‌صلب نزدیک می‌کند و عملاً پدیده خمش و لولای پلاستیک که عامل اصلی جذب انرژی است، در ساختار رخ نمی‌دهد. در سازه‌های جاذب انرژی علاوه بر جذب انرژی کلی ما گاهی وزن سازه برای نوع کاربردی که دارد اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. به طور مثال استفاده از فولاد درسته انرژی زیادی رو صرف تغییر شکل خودش می‌کند ولی وزن سازه مارو بالا می‌بره و از طرفی این نوع فولاد ب نرخ کرنش وابسته هست در صورتی که در سازه‌ای مانند هواپیما که اولویت وزن سازه مطرح هست از فلز آلومینیم استفاده میشه که اتفاقاً ب نرخ کرنش هم وابسته و همچنین سبک می‌باشد و در بین فلزهای مورد تحقیق در این پژوهش انرژی جذب مخصوص بیش‌تری دارد...

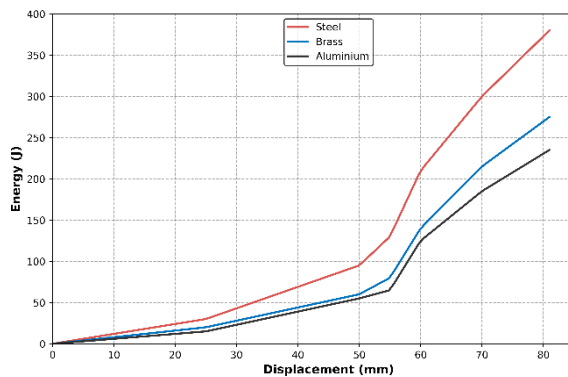
انرژی جذب مخصوص از تقسیم جذب انرژی کلی بر وزن سازه بدست می‌آید



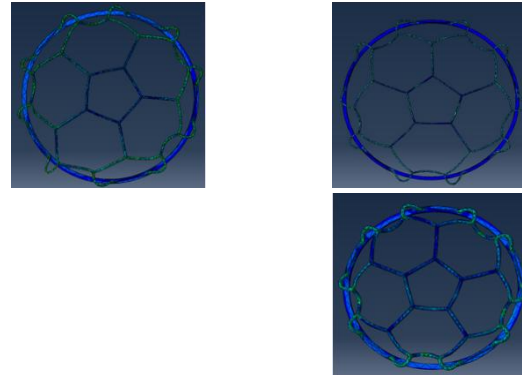
شکل (۷) نمودار جذب انرژی واحد جرم بر حسب جابجایی برای نمونه‌های با طول‌های مفتول متفاوت و قطر مفتول یکسان

2-4 بررسی اثر قطر مفتول

برای بررسی اثر قطر مفتول، ۴ نمونه متنوع با قطرهای مفتول مختلف (۲، ۳، ۴ و ۵ میلیمتر) و طول یکسان مفتول ۵۰ میلیمتر تولید گردید و رفتار جذب انرژی آنها تحت فرآیند لهیدگی جانبی بررسی گردید. شکل (۸)، نمودار



شکل (۱۰) نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب جابجایی برای نمونه‌هایی با مشخصات هندسی یکسان و از ۳ آلیاژ مختلف



شکل (۹) الگوی تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های با قطرهای مختلف مفتول ۳، ۵ و ۵۰ میلیمتر و طول یکسان مفتول ۵۰ میلیمتر

3-4 بررسی اثر جنس مفتول

برای بررسی اثر جنس مفتول، نمونه‌های با قطر یکسان مفتول ۴ میلیمتر و طول یکسان مفتول ۵۰ میلیمتر را از سه جنس مختلف، آلومینیوم AA336.0، برنج ۲۶۰ و استیل ۳۰۴، بصورت عددی تحلیل گردیدند. شکل (۱۰)، نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب جابجایی را برای این ۳ نمونه مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کند. نمودارهای عددی رسم شده در این شکل نشان می‌دهد، در محدوده مورد بررسی، سازه آلومینیومی در یک جابجایی مشخص، بیشترین جذب انرژی مخصوص را به خود اختصاص می‌دهد.

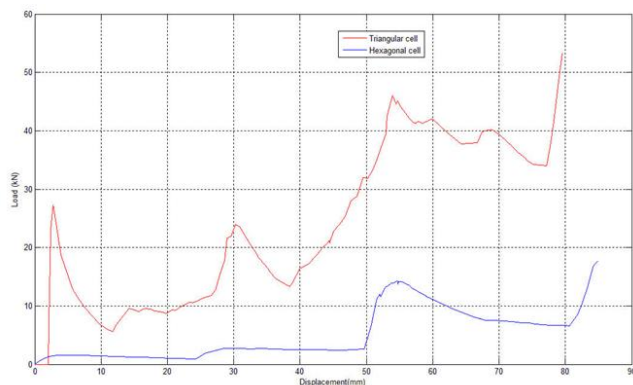
4-4 بررسی اثر تغییر هندسه هسته لانه‌زنبوری

برای بررسی این اثر، دو هندسه مختلف برای سلول‌های سازه مشبک لانه‌زنبوری نیم‌کروی، شامل سلول‌های ۶ گوش و سلول‌های مثلثی، انتخاب و تحلیل می‌شود که هندسه مثلثی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بدین منظور، دو سازه با هندسه مثلثی و ۶ گوش از نظر میزان نیروی لهدگی با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا اثر این شاخص هندسی بررسی شود.

شکل (۱۲) ابعاد هسته سازه لانه‌زنبوری از نوع مثلثی، ایجاد شده درون یک سلول ۶ گوش

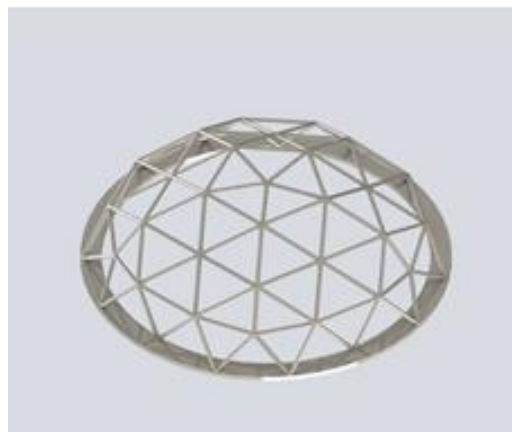
در شکل (۱۲) ابعاد سازه لانه‌زنبوری نیم‌کروی با سلول‌های مثلثی نمایش داده شده است که با رسم قطرهای یک سلول ۶ گوش ایجاد شده است. هندسه مثلثی در مباحث خرپاها، یکی از هندسه‌های مستحکم و قابل توجه می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که انتخابی مناسب برای شکل هندسی سلول‌های سازه جاذب انرژی معرفی شده، باشد.

برای مقایسه دو سازه نیم‌کروی لانه‌زنبوری یکی با هسته ۶ گوش و دیگری با هسته مثلثی، دو سازه در نرم‌افزار آباکوس با شرایط بارگذاری یکسان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و نتایج این دو شبیه‌سازی عددی به صورت نمودار نیرو-جابجایی در شکل (۱۳) گزارش شده است.



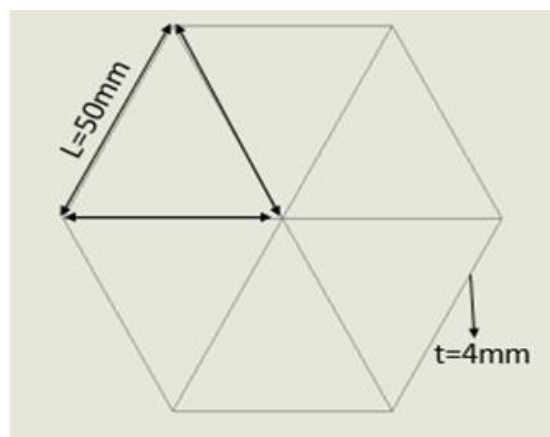
شکل (۱۳) نمودار نیرو-جابجایی برای دو سازه نیم‌کروی لانه‌زنبوری با هسته مثلثی و ۶ گوش.

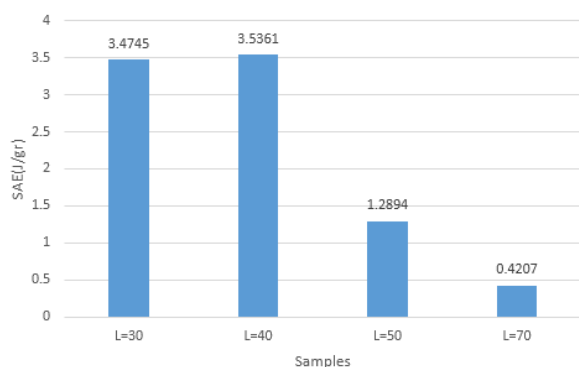
با توجه به نمودار شکل (۱۳) می‌توان دریافت که هندسه مثلثی نسبت به هندسه ۶ گوش در یک شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری یکسان، ماکزیمم نیروی بسیار بیشتری را تحمل می‌کند در شکل (۱۴) شماتیک تغییر شکل پلاستیک سازه نیم‌کروی با هسته مثلثی نمایش داده شده است.



شکل (۱۱) سازه نیم‌کروی با هندسه لانه‌زنبوری از نوع هسته مثلثی

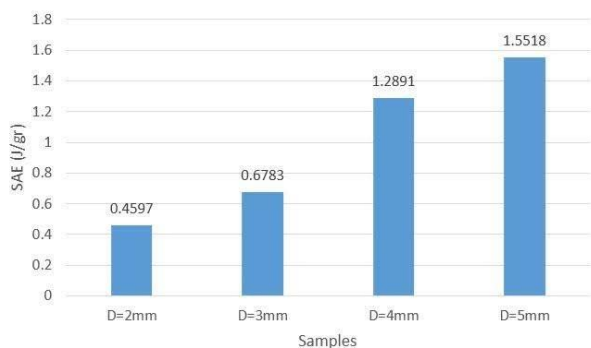
برای تحلیل عددی سازه نیم‌کروی لانه‌زنبوری با هسته مثلثی، طول مفتول برابر با ۵۰ میلی‌متر و قطر مفتول برابر با ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای سازه نیم‌کروی لانه‌زنبوری با هندسه ۶ گوش نیز طول مفتول، ۵۰ میلی‌متر و قطر مفتول ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، جنس مفتول در دو سازه یکسان و هر دو از جنس فولاد ضد زنگ ۳۰۴ هستند.



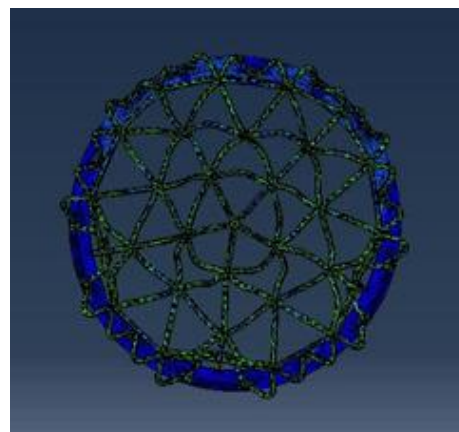


شکل (۱۵) نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص بر حسب طول مفتول برای ۴ نمونه مختلف

نتایج ارائه شده طی بررسی اثر قطر مفتول با تکیه بر شکل (۱۶) که نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص بر حسب قطر مفتول در ۴ نوع نمونه مختلف است، نشان می‌دهد، براساس شاخص بالاترین نسبت جذب انرژی به جرم سازه، در محدوده مورد بررسی، بهترین پیشنهاد برای طول مفتول، ۵ میلیمتر است. به عبارت دیگر هر چه قطر مفتول افزایش یابد، جذب انرژی و جذب انرژی مخصوص آن نیز افزایش می‌یابد و جاذب انرژی بهتری حاصل می‌شود.



شکل (۱۶) نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص بر حسب قطر مفتول برای ۴ نمونه مختلف



شکل (۱۴) شماتیک تغییر شکل پلاستیک سازه نیم‌کروی

لانه‌زنبوری با هسته مثلثی.

با توجه به بررسی‌های انجام شده پیرامون سازه نیم‌کروی لانه‌زنبوری با هسته مثلثی می‌توان دریافت، این سازه نسبت به سازه با هندسه ۶ گوش، ظرفیت تحمل بار بیشتری تا $3/33$ برابر را دارد. بنابراین برای بهینه‌سازی و انتخاب بهترین حالت ممکن از سازه نیم‌کروی با هسته مثلثی، مانند قبل، چند فاکتور تاثیرگذار بر این سازه از جمله طول مفتول، قطر مفتول و جنس مفتول مجدداً مورد تجزیه و تحلیل عددی قرار می‌گیرد

۵- نتایج و بحث

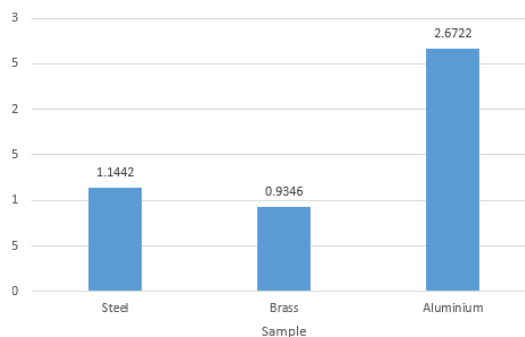
نتایج ارائه شده طی بررسی اثر طول مفتول با تکیه بر شکل (۱۵) که نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص بر حسب طول مفتول در ۴ نوع نمونه مختلف است، نشان می‌دهد، براساس شاخص بالاترین نسبت جذب انرژی به جرم سازه، در محدوده مورد بررسی، بهترین پیشنهاد برای طول مفتول، ۴۰ میلیمتر است. شایان ذکر است، با انتخاب طول‌های متفاوت برای مفتول، ابعاد کلی سازه (قطر سازه کروی) نیز تغییر می‌کند.

ترکیب، ضمن حفظ سبکی سازه، امکان وقوع مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی (خمش و لولای پلاستیک) را فراهم کرده و به‌عنوان طرح پیشنهادی برای کاربرد در جاذب‌های انرژی سبک معرفی می‌شود.

مقایسه‌ی پارامترهای مختلف نیز نشان داد که: (۱) کاهش طول مفتول از ۷۰ و ۵۰ میلی‌متر تا ۴۰ میلی‌متر، جذب انرژی مخصوص را افزایش می‌دهد، اما طول‌های خیلی کوتاه (مثلاً ۳۰ میلی‌متر) سازه را به حالت شبه‌صلب نزدیک کرده و از وقوع خمش و لولای پلاستیک جلوگیری می‌کنند؛ (۲) افزایش قطر مفتول از ۲ تا ۵ میلی‌متر منجر به بهبود قابل‌توجه جذب انرژی مخصوص و ظرفیت تحمل بار می‌شود و در محدوده‌ی بررسی‌شده، قطر ۵ میلی‌متر بیشترین جذب انرژی مخصوص را ارائه می‌دهد؛ (۳) از نظر جنس مفتول، آلومینیوم در مقایسه با برنج ۲۶۰ و استیل ۳۰۴، بالاترین جذب انرژی مخصوص را دارا است و برای کاربردهایی که وزن سازه اهمیت حیاتی دارد (مانند قطعات خودرو و هواپیما) گزینه‌ی بهینه‌تری است؛ و (۴) هندسه‌ی مثلی در مقایسه با هندسه‌ی ۶گوش، حداکثر نیروی لهیدگی را حدود ۳.۳۳ برابر افزایش می‌دهد و به‌عنوان بهترین انتخاب هندسی برای سلول‌های لانه‌زنبوری نیم‌کروی پیشنهاد می‌شود.

در نهایت، با توجه به نتایج حاصل، می‌توان سازه‌ی نیم‌کروی لانه‌زنبوری با مشخصات بهینه‌شده (آلومینیوم، طول ۴۰ میلی‌متر، قطر ۵ میلی‌متر، هندسه‌ی مثلی) را به‌عنوان یک راهکار مهندسی نوین در طراحی جاذب‌های انرژی سبک معرفی کرد که می‌تواند در کلاه‌های ایمنی دوچرخه‌سواران، موتورسواران و کارگران صنعتی و همچنین در قطعات خودرو و هواپیما کاربرد داشته باشد. پیشنهادهایی برای

نتایج ارائه شده طی بررسی اثر جنس مفتول با تکیه بر شکل (۱۷) که نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص بر حسب جنس مفتول در ۳ نوع نمونه مختلف است، نشان می‌دهد، براساس شاخص بالاترین نسبت جذب انرژی به جرم سازه، در محدوده مورد بررسی، بهترین پیشنهاد برای جنس مفتول، استفاده از مفتول‌های آلومینیومی است و جاذب انرژی آلومینیومی بهترین عملکرد جذب انرژی را دارد و سپس، جنس استیل در جایگاه دوم قرار دارد.



شکل (۱۷) نمودار میله‌ای جذب انرژی مخصوص برای ۳ نمونه با جنس مفتول متفاوت

۶- نتیجه گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، رفتار فروریزش و لهیدگی جانبی سازه‌های نیم‌کروی لانه‌زنبوری فلزی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی از نظر تجربی و عددی بررسی شد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، در محدوده‌ی پارامترهای مورد مطالعه، بهترین عملکرد جذب انرژی مخصوص (نسبت انرژی جذب‌شده به جرم سازه) برای سازه‌ای با مشخصات بهینه‌ی زیر حاصل شد: طول مفتول ۴۰ میلی‌متر، قطر مفتول ۵ میلی‌متر، جنس مفتول آلومینیوم (آلیاژ AA336.0) و هندسه‌ی سلول‌های لانه‌زنبوری مثلی. این

پژوهش‌های آینده شامل بررسی رفتار دینامیکی و ضربه‌ای این سازه‌ها، بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پارامترها (جذب انرژی، جرم و حداکثر نیروی انتقال‌شده)، توسعه به هندسه‌های ترکیبی و مدرج (graded) برای کنترل بهتر توزیع تنش، و اجرای آزمایش‌های واقعی روی نمونه‌های کلاه ایمنی و قطعات خودرو است که می‌تواند به تثبیت کاربرد این سازه‌ها در سیستم‌های ایمنی واقعی و کاهش تلفات جانی در حوادث رانندگی و سقوط کمک کند.

مراجع و منابع

1. Ashby, M.F.; Gibson, L.J. Cellular solids: structure and properties. *Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK* **1997**, 175-231.
2. Yin, H.; Zhang, W.; Zhu, L.; Meng, F.; Liu, J.; Wen, G. Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures* **2023**, *304*, 116397.
3. Jiang, W.; Yin, G.; Xie, L.; Yin, M. Multifunctional 3D lattice metamaterials for vibration mitigation and energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences* **2022**, *233*, 107678.
4. Bonney, C.; King, W.P.; Jasiuk, I. Evaluating Energy Absorption Performance of Filled Lattice Structures. *Advanced Engineering Materials* **2026**, e202502835.
5. Sharma, D.; Hiremath, S.S. Bio-inspired repeatable lattice structures for energy absorption: Experimental and finite element study. *Composite Structures* **2022**, *283*, 115102.
6. Ozdemir, Z.; Hernandez-Nava, E.; Tyas, A.; Warren, J.A.; Fay, S.D.; Goodall, R.; Todd, I.; Askes, H. Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments. *International Journal of Impact Engineering* **2016**, *89*, 49-61.