



مطالعه عددی و تجربی میزان جذب انرژی سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی

مهديه شفيح پور، سيد يوسف احمدی بروغنی*

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۷/۰۵

کلمات کلیدی:

لانه‌زنبوری هدفمند

سفتی منفی

فراجهش

جذب انرژی

خلاصه: سازه‌های لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی به دلیل داشتن دو ویژگی هدفمند بودن و سفتی منفی می‌توانند دارای کاربرد فراوان به عنوان جاذب انرژی باشند. در این پژوهش تاثیر هدفمند نمودن سازه‌های لانه‌زنبوری با سفتی منفی در افزایش میزان جذب انرژی بررسی شده است. در این لانه‌زنبوری‌ها هدفمند نمودن سازه با تغییر تدریجی در ضخامت تیرهای خمیده در هر لایه انجام شده است. سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی نوعی جاذب انرژی است که با تغییر از یک مود کمانش به مود دیگر و رفتار فراجهش مانند در سلول‌ها، باعث جذب انرژی می‌شود. در این تحقیق ابتدا آزمایش تراکم شبه‌استاتیکی بر روی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت انجام شده است. پس از آن، مدل اجزاء محدود سازه، تحت تراکم شبه‌استاتیکی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با مقایسه نتایج تجربی و عددی، انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده می‌شود. سپس لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و عملکرد جذب انرژی در آن با لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در واحد جرم برای لانه‌زنبوری هدفمند ۱/۵۷ برابر افزایش یافته است.

۱- مقدمه

سازه‌های مکانیکی اغلب اوقات با ارتعاشات و بارهای ضربه مواجه می‌شوند. بارهای ضربه‌ای و ارتعاشات معمولاً به دلیل ایجاد تنش بالا یا خستگی باعث شکست سازه‌های مکانیکی می‌شوند. یک چالش مهم برای جلوگیری از آسیب به این سازه‌ها و یا حفاظت از کاربر سازه‌ها، کاهش و یا حذف این نیروها می‌باشد. یک پیشنهاد خوب برای کاهش و یا حذف ارتعاشات یا نیروهای ضربه، استفاده از سازه‌های لانه‌زنبوری شش‌ضلعی است، زیرا دارای سه ویژگی مهم سبک بودن، استحکام بالا و جذب انرژی بالا هستند. اما آن‌ها یک عیب اساسی دارند و آن این است که جذب انرژی در آن‌ها به صورت مکرر امکان‌پذیر نیست. توانایی جذب انرژی در لانه‌زنبوری‌های شش‌ضلعی وابسته به تغییر شکل پلاستیک آن‌هاست. بنابراین این نوع لانه‌زنبوری‌ها برای جذب انرژی به صورت مکرر مناسب نیستند. برای جذب انرژی به صورت برگشت‌پذیر، لانه‌زنبوری‌ها با سفتی منفی طراحی و ساخته شده‌اند. این نوع لانه‌زنبوری‌ها با چیدن اجزاء با سفتی

منفی به صورت ستونی و سطری در کنار یکدیگر ایجاد می‌شوند [۱ و ۲]. از سال ۲۰۱۰ محققان زیادی بر روی ساخت اجزاء با سفتی منفی مطالعه نموده‌اند. فالچر و همکاران [۳] به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار یک تیر کمانش شده، دارای خاصیت سفتی منفی، را به عنوان جاذب ارتعاشات و ضربه مورد بررسی قرار دادند. سامانه مورد بررسی شامل فنرهایی با سفتی مثبت بود که به طور موازی با حرکت عرضی تیر کمانش شده قرار داشت. فالچر و همکاران، بارگذاری جابجایی کنترل را به این سامانه اعمال کردند. نتایج آزمایشگاهی رفتار سفتی منفی را برای تیر کمانش شده نشان داد. همچنین با تغییر میزان فشردگی محوری تیرها، رفتار سفتی منفی بیشتری در سامانه تیر مشاهده شد. پس از آن، سامانه جاذب ضربه، تحت یک موج مربعی با استفاده از یک ضربه الکتروپویستاتیکی قرار گرفت. به وضوح مشاهده شد که شتاب بیشینه توسط این سامانه جاذب ضربه کاهش یافت. این مشاهدات نشان داد که یک تیر کمانش شده به عنوان یک جزء با سفتی منفی وسیله‌ای مفید برای جذب نیروهای ضربه می‌باشد. اما ساخت تیر از قبل کمانش شده، برای ایجاد رفتار سفتی منفی، به دلیل وجود تنش‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: syahmadi@birjand.ac.ir



پس ماند در آن، مشکل است.

یکی از مشکلات استفاده از تیرهای کمانش شده به عنوان اجزاء با سفتی منفی، نیاز به کمانش جزء تیر، بعد از ساخت سازه است. کیو و همکاران [۵ و ۴] امکان استفاده از تیرهای خمیده پیش ساخته با شکل کسینوسی را به طور تحلیلی، برای ایجاد رفتار سفتی منفی مورد بررسی قرار داد. در تحقیق ارائه شده توسط وی، معادلات تحلیلی برای توصیف یک تیر خمیده پیش ساخته استخراج شد. همچنین کیو نشان داد که ثابت هندسی Q (که حاصل تقسیم مقدار h حداکثر ارتفاع تیر خمیده، بر t ضخامت تیر است) برای یک تیر خمیده، یک مقدار بحرانی برای ایجاد سفتی منفی است، که با تغییر این ثابت هندسی می توان مقدار سفتی منفی را تغییر داد. کیو سپس ثابت کرد که برای بالا بردن امکان ایجاد رفتار سفتی منفی برای تیرهای خمیده، لازم است تا مود چرخش یا مود دوم کمانش در تیر محدود شود. او همچنین اثبات کرد که با استفاده از یک تیر مضاعف که در مرکز نیز کاملاً مقید شده است، می توان مود دوم کمانش را برای رسیدن به مود سوم کمانش حذف نمود. ساختار تیر مضاعف، تیر را مجبور می کند که از یک موقعیت پایدار به موقعیت دیگر تغییر کند^۱.

در سال ۲۰۱۴ کلات [۶] تحقیقات انجام شده توسط کیو را گسترش داد. او بر روی ثابت Q تحقیق نمود. همچنین تیرهای خمیده را به روش ساخت افزایشی^۲ و از ماده نایلون ۱۱ ساخت. ساخت افزایشی فرآیندی است که قطعات بوسیله افزایش لایه به لایه مواد ایجاد می شوند. این روش برای تولید قطعات پیچیده که ساخت آن ها به وسیله روش های تولید متداول دیگر مشکل و یا غیرممکن است، استفاده می شود. کلات این تیرهای خمیده را در شرایط مرزی مختلف آزاد و ثابت آزمایش کرد. آزمایشات نشان داد که در بارگذاری جابجایی شبه استاتیکی، شرایط مرزی ثابت، برای نشان دادن رفتار سفتی منفی لازم است. تا این قسمت از تحقیقات انجام شده، مفهوم اجزاء با سفتی منفی به عنوان یک سازه منفرد برای عایق ضربه استفاده شده بود، اما به عنوان شکلی از لانه زنبوری ساخته نشده بود. تحقیقات در زمینه جاذب انرژی با سفتی منفی با کارهای کورا و همکاران [۱ و ۲] ادامه یافت. آن ها لانه زنبوری هایی به شکل تیرهای خمیده ساختند و این سازه های لانه زنبوری را با چیدن اجزاء با سفتی منفی به صورت سطری و ستونی در کنار هم تولید کردند. پس از آن عملکرد این لانه زنبوری ها در جذب انرژی را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیقات مشاهده شد که لانه زنبوری ها با سفتی منفی علاوه بر داشتن ویژگی های لانه زنبوری های

معمولی به عنوان جاذب های انرژی، توانایی جذب انرژی را به صورت کاملاً برگشت پذیر دارند.

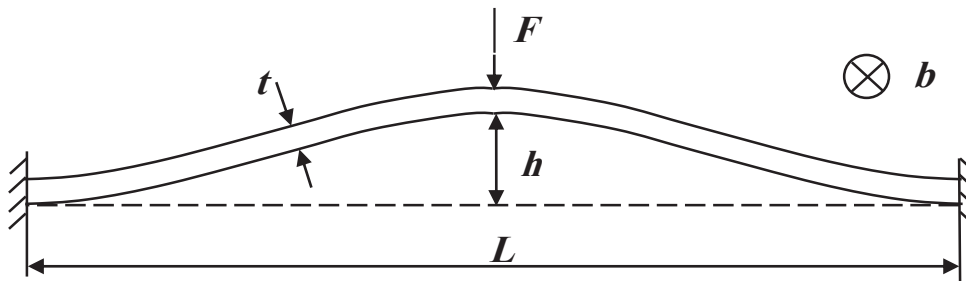
از سوی دیگر بر روی سازه های لانه زنبوری هدفمند نیز تحقیقاتی انجام شده است. جاذب های انرژی لانه زنبوری هدفمند، نوعی جاذب می باشند که اندازه سلول، شکل، ضخامت دیواره ی سلولی و یا خواص ماده به صورت هدفمند، با هدف تغییر در چگالی نسبی و یا سایر خواص تغییر می کنند. در محیط پیرامون، انواع جاذب های ضربه طبیعی هدفمند را می توان مشاهده کرد. یکی از جاذب های ضربه ی طبیعی هدفمند، پوست موز است. در ساختار پوست موز، وظیفه پوست، حفاظت از میوه در برابر بارهای ضربه می باشد. این ساختار به صورت سازه های لانه زنبوری است که خواص آن ها به صورت هدفمند از لایه ای به لایه دیگر تغییر می کند. در تحقیق انجام شده توسط دکیانگ و همکاران [۷] یک مدل اجزاء محدود جهت بررسی رفتار جاذب انرژی لانه زنبوری هدفمند تحت بار ضربه ای ارائه شده است. سانگ و همکاران [۸] رفتار فشردگی دینامیکی سازه سه بعدی با چیدمان ورونی^۳ و از جنس فوم را به روش تجربی بررسی نمودند. همچنین شبیه سازی عددی با روش اجزاء محدود انجام شده است و میزان انرژی کرنشی در این شبیه سازی اندازه گیری شده است. بعلاوه اثر شکل سلول ها بر مودهای تغییر شکل بررسی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده میزان جذب انرژی با افزایش نامنظمی سلول ها افزایش می یابد. چنگ و همکاران [۹ و ۱۰] یک مدل اجزاء محدود بر پایه شکل هندسی واقعی کلاه ایمنی موتور سیکلت را شبیه سازی نمودند و کد ال اس داینرا برای شبیه سازی پاسخ های دینامیکی در سرعت های ضربه متفاوت به کار گرفته شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در سرعت های پایین (کمتر از ۸/۳ متر بر ثانیه)، سفتی پوسته و چگالی خطی باید نسبتاً پایین باشد تا نیروی تماسی به سر کاهش یابد و در عوض در سرعت بالا مانند ۱۱/۱ متر بر ثانیه، یک پوسته سفت تر و چگالی بالاتر باید برای حفاظت در مقابل ضربات استفاده شود. اژدری و همکاران [۱۱ و ۱۲] رفتار تخریب دینامیکی و میزان جذب انرژی جاذب انرژی لانه زنبوری منظم و نامنظم و هدفمند را بررسی و با استفاده از روش اجزاء محدود، مودهای مختلف تغییر شکل و میزان جذب انرژی را در اینگونه جاذب ها تحلیل نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که کاهش در چگالی نسبی در جهت ضربه، در مراحل اولیه خرد شدن، باعث افزایش جذب انرژی لانه زنبوری می شود. همچنین در این تحقیقات مشخص شد که در سرعت های بالای خرابی، گرادیان چگالی اثر قابل ملاحظه ای در جذب انرژی لانه زنبوری دارد. ونگ و همکاران [۱۳]

1 Snap Through
2 Additive Manufacturing

بارگذاری شبه‌استاتیکی و بار انفجاری باعث برتری استحکام سازه و افزایش جذب انرژی می‌شود. جین و همکاران [۱۹] یک سازه فشرده با هسته‌ای شامل سلول‌های لانه‌زنبوری هدفمند را پیشنهاد نمودند و پاسخ دینامیکی و مقاومت انفجاری این سازه‌ها تحت این بارگذاری‌ها به صورت عددی با نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سازه‌های لانه‌زنبوری با دیواره‌های ضخیم‌تر دارای جذب انرژی مخصوص (انرژی جذب شده در طول خرابی تقسیم بر جرم ماده خراب شده) بیشتر تحت بار فشاری هستند. در تحقیقی که توسط تاو و همکاران [۲۰] انجام شده است، یک لانه‌زنبوری هدفمند داخل صفحه‌ای پیشنهاد شده است و رفتار دینامیکی‌اش تحت تراکم خارج صفحه‌ای با شبیه‌سازی عددی و تحلیل تئوری بررسی شده است. گرادیان ضخامت داخل صفحه‌ای با تغییر در ضخامت دیواره‌های سلولی لانه‌زنبوری انجام می‌پذیرد. در این تحقیق، در لانه‌زنبوری‌های هدفمند، اگر ضخیم‌ترین بخش در ناحیه برخورد ضربه باشد، گرادیان مثبت است و اگر نازک‌ترین بخش در این ناحیه قرار گیرد، گرادیان ضخامت منفی است. نتایج عددی تحقیق تاو و همکاران [۲۰] نشان می‌دهد که استحکام خرابی و ظرفیت جذب انرژی لانه‌زنبوری با گرادیان ضخامت مثبت در مقایسه با لانه‌زنبوری بدون گرادیان افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق مشخص شد که لانه‌زنبوری هدفمند داخل صفحه‌ای میزان جذب انرژی مخصوص را تقریباً تا ۷۰ درصد نسبت به لانه‌زنبوری منظم معمولی بهبود می‌بخشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه سازه‌های لانه‌زنبوری با سفتی منفی با ویژگی مهم برگشت‌پذیر بودن و لانه‌زنبوری‌های هدفمند با ویژگی افزایش میزان جذب انرژی و افزایش مدت زمان انتقال ضربه در آن‌ها و با تاکید بر این مساله که لانه‌زنبوری‌های هدفمندی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند، برگشت‌پذیر نیستند و نمی‌توان از آن‌ها در جذب ضربات مکرر استفاده کرد، در این تحقیق برای اولین بار لانه‌زنبوری‌های هدفمند با سفتی منفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این نوع جاذب‌های انرژی، هم ویژگی منحصر به فرد برگشت‌پذیری به دلیل سفتی منفی و هم افزایش میزان انرژی به دلیل هدفمند بودن وجود دارد. در این مقاله در ابتدا به بررسی تجربی و عددی میزان جذب انرژی در سازه‌های لانه‌زنبوری با سفتی منفی با ضخامت ثابت پرداخته شده است. آزمایش‌های تراکم شبه‌استاتیکی بر روی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی انجام شده است و پس از آن سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری مشابه با آزمایش تجربی، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. با توجه به انطباق مناسب

با تحلیل اجزاء محدود، فلزات با ساختار سلولی را تحت بار ضربه‌ای مورد بررسی قرار دادند. همچنین مکانیزم جذب انرژی و تغییر شکل جاذب انرژی هدفمند مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که گرادیان چگالی مثبت-به‌طوری که چگالی بیشتر در سمت اعمال ضربه باشد- یک انتخاب خوب برای حفاظت سازه اصلی می‌باشد، زیرا می‌تواند انرژی زیادی را جذب کند. در مطالعه‌ی انجام شده توسط گله‌داری و همکاران [۱۴] سازه لانه‌زنبوری هدفمند به عنوان جاذب انرژی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش تجربی سقوط وزنه با سرعت پایین بر روی جاذب انرژی لانه‌زنبوری هدفمند انجام شد. نتایج مطالعه نشان داد که هدفمند بودن جاذب انرژی، باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربه‌ای به جسم محافظت‌شونده می‌شود. همچنین مدل‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس بر روی سازه لانه‌زنبوری هدفمند و سازه لانه‌زنبوری با ضخامت ثابت انجام شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با وجود جذب انرژی مناسب و برابر با سازه‌ی لانه‌زنبوری با ضخامت ثابت، حداکثر نیروی وارد شده به سازه محافظت‌شونده توسط لانه‌زنبوری‌ها در مراحل اولیه بارگذاری کاهش یافته است. به عبارت دیگر انتقال نیرو به صورت تدریجی و با تاخیر زمانی اتفاق افتاده است و بنابراین خسارت کمتری به سازه محافظت‌شونده وارد شده است. در جاذب انرژی لانه‌زنبوری هدفمند باید از محل اعمال بار به سمت دیگر سازه، سفتی لانه‌زنبوری تغییر کند. این مساله به این دلیل است که در بارگذاری با سرعت کم، هر ردیف باید به‌صورت مجزا تغییر شکل داده و بعد از قفل‌شدگی کامل ردیف بعدی شروع به تغییر شکل نماید. با این نوع تغییر شکل، انتقال نیرو به سازه محافظت‌شونده به‌صورت تدریجی بوده و موج ضربه‌ای با تاخیر زمانی به جسم محافظت‌شونده انتقال می‌یابد [۱۴]. تقی‌پور و دامغانی [۱۵ و ۱۶] به بررسی تجربی و عددی رفتار تیرهای ساندویچی با هسته مشبک، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی عرضی پرداختند و اثر تغییر پارمترهای هندسی و اندازه سلول صفحات مشبک در هسته را بر میزان جذب انرژی بررسی نمودند. در ادامه با طراحی ساختارهای هندسی بهینه بر روی هسته‌های مشبک تیرهای ساندویچی، ظرفیت جذب انرژی را توسط این جاذب‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دادند [۱۷]. یو و همکاران [۱۸] با تغییر ضخامت دیواره و اندازه سلول در هر لایه از سازه لانه‌زنبوری، یک لانه‌زنبوری مربعی هدفمند تعریف نمودند و دریافتند که عملکرد آن تحت فشار یکنواخت خارج صفحه‌ای در مقایسه با لانه‌زنبوری بدون گرادیان ضخامت، بهبود بخشیده شده است. آن‌ها اثر گرادیان ضخامت داخل صفحه‌ای را با شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی نمودند. نتایج نشان داد که هسته هدفمند با تغییر ضخامت لایه به لایه، برای هر دو شرایط



شکل ۱: طرحواره‌ی یک تیر خمیده در سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی [۱]

[Fig. 1. The schematic of a curved beam in the honeycomb structure [1]

Table 1. The dimensions of each curved beam in the negative stiffness honeycomb structure [1, 2]

جدول ۱: ابعاد هر تیر خمیده در سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی [۱ و ۲]

ابعاد	اندازه بر حسب میلی‌متر
طول، L	۵۰/۸
ضخامت، t	۱/۲۷
حداکثر ارتفاع اولیه تیر خمیده، h	۵/۰۸
عرض خارج از صفحه، b	۱۲/۷

بین نتایج تجربی و عددی، شبیه‌سازی عددی مورد تایید قرار گرفته است. در ادامه، سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی تحت بارگذاری تراکم شبه‌استاتیکی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. هدفمند نمودن سازه با تغییر تدریجی در ضخامت تیرهای خمیده سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مهم جهت بررسی میزان جذب انرژی در لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی با لانه‌زنبوری دارای سفتی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است و اثر هدفمند نمودن سازه در میزان افزایش جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمایش تجربی بر روی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

مدل اولیه لانه‌زنبوری با سفتی منفی که در این تحقیق استفاده شده است، بر پایه مدل ارائه شده در تحقیقات کورا و همکاران [۱ و ۲] می‌باشد. در این مدل تیرهای خمیده با شکل کسینوسی بر پایه طرح اولیه کیو [۴ و ۵] به صورت چیدمان سطری و ستونی کنار یکدیگر به صورت منظم قرار گرفته‌اند. شکل هر جزء سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در شکل ۱ و ابعاد آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای یک تیر با طول L ، ضخامت t ، عرض خارج از صفحه b و ارتفاع حداکثر اولیه تیر خمیده h ، مطابق شکل ۱، تابع شکل تیر خمیده مطابق رابطه کسینوسی (رابطه (۱)) است [۴ و ۵].

$$\bar{w}(x) = \frac{h}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، x موقعیت عرضی هر نقطه روی تیر از یک انتها و $\bar{w}(x)$ فاصله‌ی عمودی یک نقطه روی تیر از خط افقی است که متصل کننده دو

انتهای تیر می‌باشد [۴ و ۵]. در سازه لانه‌زنبوری، تیرها به صورت مضاعف قرار گرفته‌اند تا کماتش از مود اول به سوم اتفاق بیفتد و در مرکز تیر رفتار ضد تقارن (شیب غیر صفر) ایجاد نشود. همچنین یک تیر افقی در وسط تیرهای کماتش شده قرار گرفته است تا با جلوگیری از حرکت دو انتهای تیر، رفتار سفتی منفی تیر را حفظ نماید. برای انجام آزمایش تجربی، لانه‌زنبوری با سفتی منفی با ضخامت ثابت از جنس نایلون ۱۱ با چگالی ۱۰۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت پوواسون ۰/۳۳ و مدول یانگ ۱۵۸۲ مگاپاسکال و با استفاده از پرینتر سه‌بعدی و روش متریکال جت^۱ با دستگاه جی ۲۷۵۰ در آزمایشگاه ساخت چند مقیاسه^۲ در دانشگاه واترلو کانادا و مطابق با ابعاد جدول ۱ ساخته شده است. روش متریکال جت یک تکنیک از روش‌های ساخت افزایشی است که با استفاده از نازل‌های پیزوالکتریک، قطرات پلیمری به صورت انتخابی بر روی

1 Material Jetting

2 J750

3 Multi-Scale Manufacturing

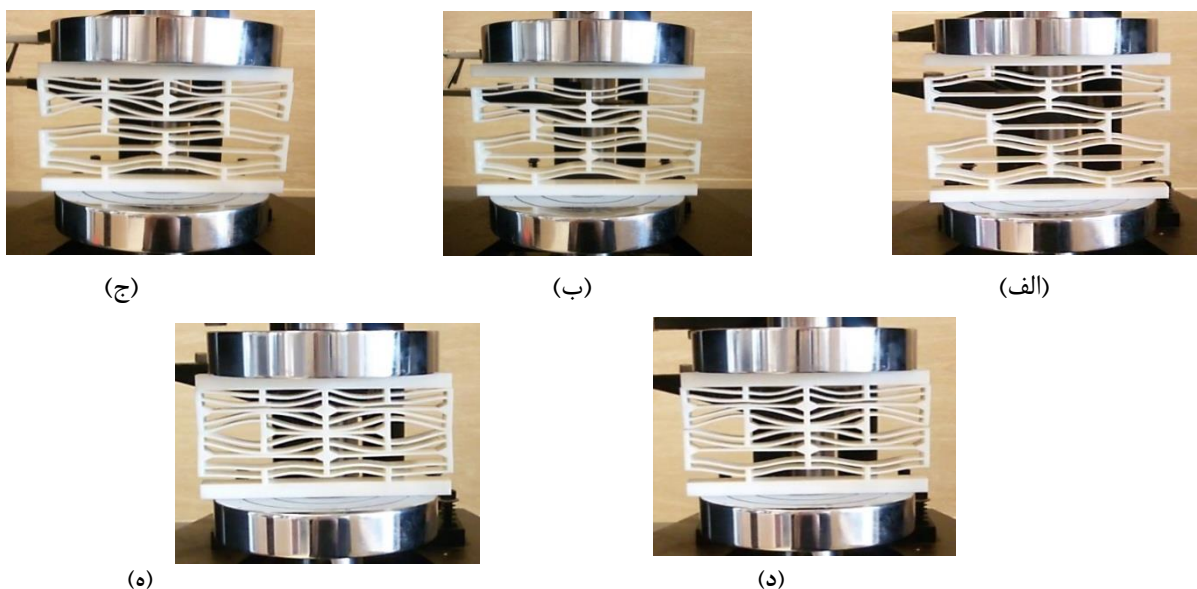


شکل ۲: دستگاه آزمایش برای بارگذاری شبه‌استاتیکی بر روی نمونه لانه‌زنبوری با سفتی منفی

Fig. 2. Schematic test setup for quasi-static displacement loading of negative stiffness honeycomb

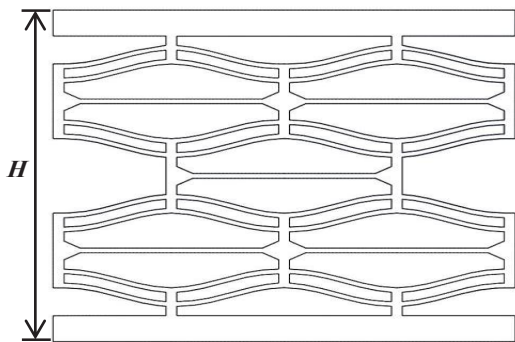
بستر چاپ به صورت لایه به لایه قرار می‌گیرند و سپس با اشعه فرابنفش مستحکم می‌شوند. ماهیت این روش به گونه‌ای است که می‌توان از چند ماده مختلف در پرینت یک جسم واحد استفاده کرد. به طور کلی مزیت استفاده از روش‌های پرینت سه‌بعدی در ساخت قطعه، سرعت بالای ساخت، هزینه نسبتاً پایین ساخت و عدم نیاز به پرداخت نهایی بر روی سطح قطعه می‌باشد [۲۱]. آزمایش تراکم شبه‌استاتیکی بر روی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در آزمایشگاه گروه دندان‌پزشکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. ماشین آزمایش سنتام^۱ با لودسل ۵۰ کیلوگرم است و بارگذاری با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. لانه‌زنبوری تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی معادل جابجایی ۳۳ میلی‌متر قرار گرفته است. سازه لانه‌زنبوری بین لودسل و پایه دستگاه ثابت نگه داشته شده است. شکل ۲ دستگاه آزمایش و سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت را نشان می‌دهد.

مراحل مختلف بارگذاری شبه‌استاتیکی و نحوه تراکم سازه لانه‌زنبوری در آزمایش تجربی در شکل ۳ ارائه شده است. طی آزمایش مشاهده می‌شود که هر ردیف به صورت مستقل از یکدیگر کمانش می‌کند و حداکثر نیرو در نمودار نیرو-جابجایی لانه‌زنبوری با سفتی منفی، درست قبل از کمانش



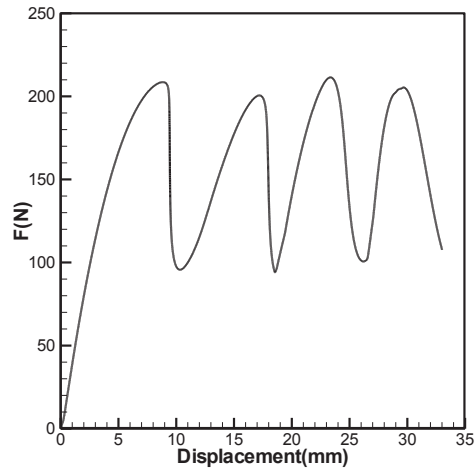
شکل ۳: مراحل مختلف تراکم سازه‌ی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت: (الف) قبل از بارگذاری (ب) در جابجایی $y = 8/34 \text{ mm}$ (ج) در جابجایی $y = 17/19 \text{ mm}$ (د) $y = 23/34 \text{ mm}$ (ه) در جابجایی $y = 29/68 \text{ mm}$

Fig. 3. A negative stiffness honeycomb with constant thickness in various stages of quasi-static compression at different displacement: (a) before displacement (b) $y = 8.34 \text{ mm}$ (c) $y = 17.19 \text{ mm}$ (d) $y = 23.34 \text{ mm}$ (e) $y = 29.68 \text{ mm}$



شکل ۵: بعد ارتفاع سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

H) Fig. 5. The height dimension of negative stiffness honeycomb with constant thickness



شکل ۴: نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری شبه‌استاتیکی، استخراج شده از آزمایش تجربی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

Fig. 4. Quasi-static force-displacement diagram for experimentally tested negative stiffness honeycomb with constant thickness

Table 2. Honeycomb height before and after compression test

جدول ۲: ارتفاع سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت قبل و بعد از بارگذاری

ارتفاع سازه قبل از تراکم (mm)	ارتفاع سازه بعد از تراکم (mm)
۸۹/۹	۸۹/۷

ردیف بعدی اتفاق می‌افتد.

نمودار نیرو-جابجایی برای بارگذاری تراکم شبه‌استاتیکی، با کنترل جابجایی از دستگاه آزمایش استخراج شده است. شکل ۴ نمودار نیرو برحسب جابجایی را برای سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت را نشان می‌دهد.

با اندازه‌گیری ابعاد سازه لانه زنبوری قبل و بعد از اعمال بار، مشاهده می‌شود که سازه پس از برداشتن بار به شکل اولیه خود باز می‌گردد. شکل ۵ بعد ارتفاع سازه لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و جدول ۲ مقدار ارتفاع سازه را قبل و بعد از بارگذاری نشان می‌دهد.

۳- مدل‌سازی عددی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

شبیه‌سازی جذب انرژی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در محیط نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ انجام شده است. این شبیه‌سازی یک مدل غیرخطی هندسی است. غیرخطی بودن مدل به دلیل تماس بین ردیف‌های مختلف سازه در حین تراکم و همچنین تغییر شکل‌های بزرگ در سازه لانه‌زنبوری به دلیل پدیده فراجاهش در هر تیر خمیده می‌باشد. به منظور مش‌بندی سازه لانه زنبوری یک مدل اجزاء محدود سه‌بعدی با المان $C3D20H$ استفاده شده است. تعداد المان کل، ۷۳۷۴ المان است. مش‌بندی در نرم‌افزار آباکوس برای سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در

شکل ۶ نشان داده شده است.

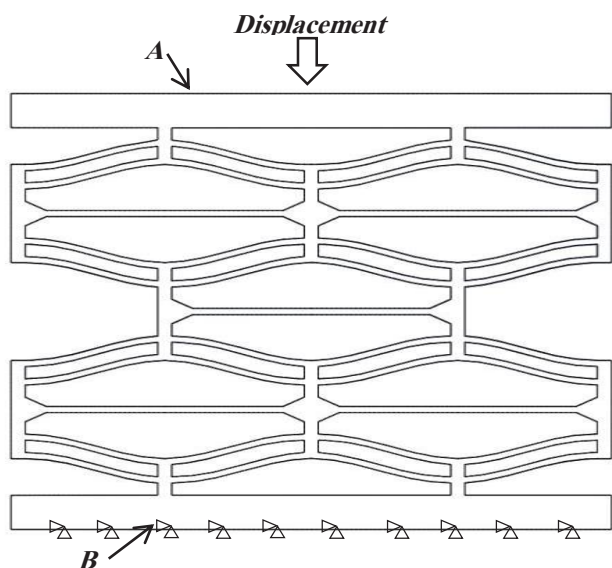
به منظور اعمال شرایط مرزی، بارگذاری با کنترل جابجایی، تحت بار شبه‌استاتیکی به میزان ۳۳ میلی‌متر بر روی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و بر روی صفحه بالایی A در سازه، اعمال می‌شود، در حالی که تمام درجات آزادی صفحه پایینی B مقید شده است. شکل ۷ طرحواره بارگذاری و شرایط مرزی این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در هنگام تماس ردیف‌های مختلف تیرهای خمیده بر اثر تراکم شبه‌استاتیکی، شرایط تماس رفتار مماسی^۱ و بدون اصطکاک^۲ در نظر گرفته شده است.

مرحله نهایی تراکم شبه‌استاتیکی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت که از آزمایش تجربی و حل عددی به‌دست آمده است، در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شکل تراکم به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی کاملاً مشابه با آزمایش تجربی است.

نمودار نیرو بر حسب جابجایی به‌دست آمده از این شبیه‌سازی و مقایسه

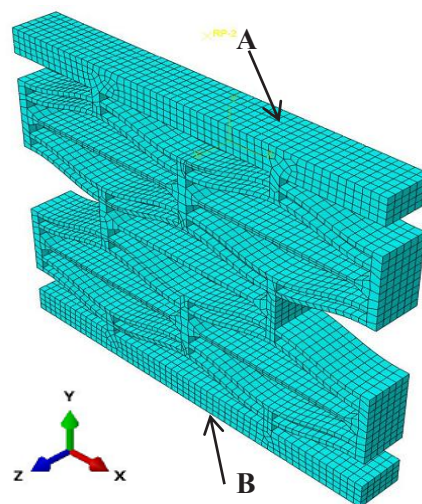
1 Tangential Behavior

2 Frictionless



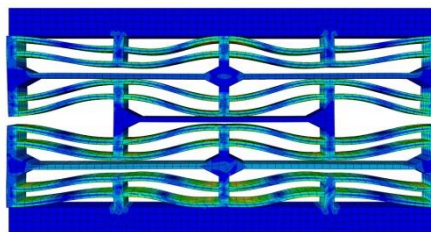
شکل ۷: شرایط مرزی و نحوه بارگذاری برای تحلیل اجزاء محدود یک نمونه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

Fig. 7. Geometry, boundary conditions and loading for FE analysis of a negative stiffness honeycomb with constant thickness



شکل ۶: مش بندی سازه‌ی لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در نرم افزار آباکوس

Fig. 6. Discretization of negative stiffness honeycomb with constant thickness in Abaqus software

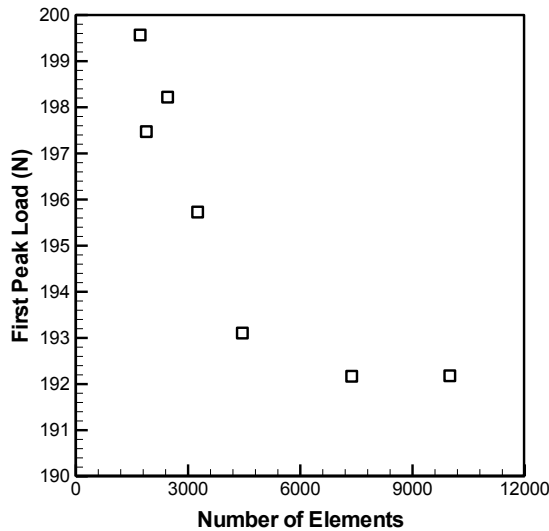


شکل ۸: مقایسه مرحله نهایی تراکم سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت به‌دست آمده از آزمایش تجربی و حل عددی

Fig. 8. Comparison between final step of deformation of experimental and numerical simulation for the negative stiffness honeycomb with constant thickness

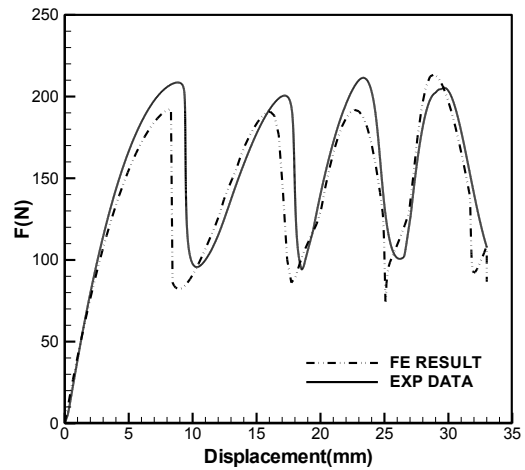
از مدل‌سازی ندارد. با توجه به نتیجه به‌دست آمده از شکل ۱۰، نمودار نیرو-جابجایی برای سه اندازه مش ۲/۷، ۲ و ۱/۸ میلی‌متر که به ترتیب دارای ۴۴۵۰، ۷۳۷۴ و ۹۹۹۶ المان می‌باشند، در شکل ۱۱ ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۱ واضح است که برای بارگذاری برابر ۳۳ میلی‌متر، نمودار نیرو-جابجایی برای سه اندازه مش ارائه شده، تقریباً مشابه است. با توجه به این مطلب که، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی میزان جذب انرژی توسط جاذب لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد، میزان جذب انرژی توسط لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت از دو حل تجربی و عددی در

آن با نمودار استخراج شده از آزمایش تجربی در شکل ۹ نشان داده شده است. مطالعه بر روی حساسیت به مش برای تشخیص اندازه مناسب مش‌بندی انجام شده است. شکل ۱۰ اثرات اندازه مش‌بندی و در نتیجه تعداد المان‌ها را بر روی مقدار نیروی بیشینه اولیه در نمودار نیرو بر حسب جابجایی نشان می‌دهد. منظور از نیروی بیشینه اولیه، مقدار نیرو در نمودار نیرو-جابجایی است که برای اولین بار به میزان حداکثر خود می‌رسد. از روی شکل ۱۰ واضح است که از تعداد المان تقریباً ۴۲۰۰، کاهش اندازه مش‌بندی و افزایش تعداد المان در مدل‌سازی اجزاء محدود، تاثیری بر روی بهبود نتایج خروجی



شکل ۱۰: اثر تعداد المان‌ها در مدل‌سازی اجزاء محدود بر روی نیروی بیشینه اولیه در نمودار نیرو-جابجایی در لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

Fig. 10. The effect of the number of elements on the peak load in FE model of the negative stiffness honeycomb with constant thickness



شکل ۹: نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای بارگذاری شبه‌استاتیکی سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در تحلیل اجزاء محدود و مقایسه آن با نمودار استخراج شده از آزمایش تجربی

Fig. 9. Comparison between experimental test and FE model of quasi-static force-displacement diagram of the negative stiffness honeycomb with constant thickness

Table 3. Comparison of the amount of energy absorbed by constant thickness negative stiffness honeycomb derived from experimental and FE results

جدول ۳: مقایسه بین مقدار انرژی جذب شده استخراج شده از نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش تجربی و مدل‌سازی اجزاء محدود برای لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

نتایج تجربی	نتایج حل اجزاء محدود	مقدار انرژی جذب شده (N.m)
۵/۱۹۰۳	۴/۶۲۰۵	

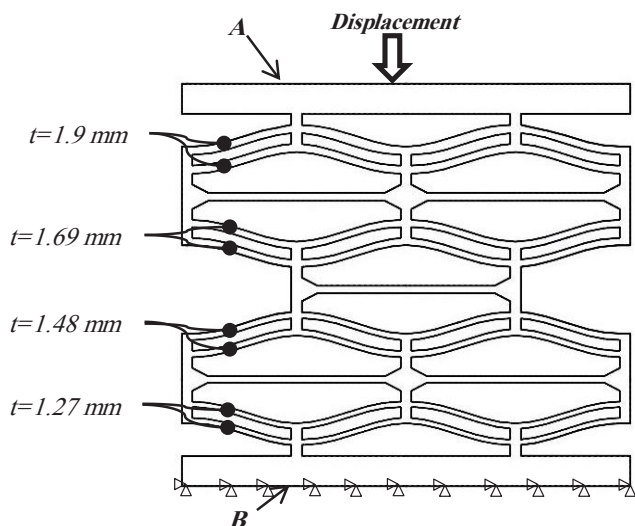
سازه‌های لانه‌زنبوری این است که با تغییر پارامترهای هندسی سازه از قبیل ارتفاع، ضخامت، اندازه سلول و زاویه داخلی آن می‌توان به خواص مکانیکی متفاوتی دست پیدا نمود. همچنین هدفمند نمودن سازه لانه‌زنبوری با تغییر دادن ضخامت آن، باعث کاهش نرخ اعمال بار ضربه‌ای به جسم محافظت‌شونده می‌شود و در مدت زمان بیشتری نیرو انتقال می‌یابد. در واقع هر چه بار ضربه‌ای در مدت زمان بیشتری انتقال یابد، آسیب کمتری به سازه اصلی وارد خواهد شد [۱۴]. در ادامه این تحقیق برای اولین بار از لانه‌زنبوری‌های هدفمند با سفتی منفی برای جذب انرژی برگشت‌پذیر استفاده شده است. هدفمند نمودن با تغییر در ضخامت هر لایه از تیرهای

نرم‌افزار متلب محاسبه و در جدول ۳ ارائه گردیده است.

با توجه به مقایسه نتایج تجربی و عددی ارائه شده در جدول ۳، نتایج عددی انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد، به طوری که خطای نسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، در میزان جذب انرژی توسط لانه‌زنبوری با سفتی منفی با ضخامت ثابت، برابر ۱۰/۹۸ درصد می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت، شبیه‌سازی عددی مورد تایید قرار می‌گیرد.

۴- شبیه‌سازی عددی لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی

با توجه به تحقیقات انجام شده تاکنون، یکی از مهمترین مزایای



شکل ۱۲: هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری برای تحلیل اجزاء محدود یک نمونه لانه‌زنبوری با سفتی منفی هدفمند

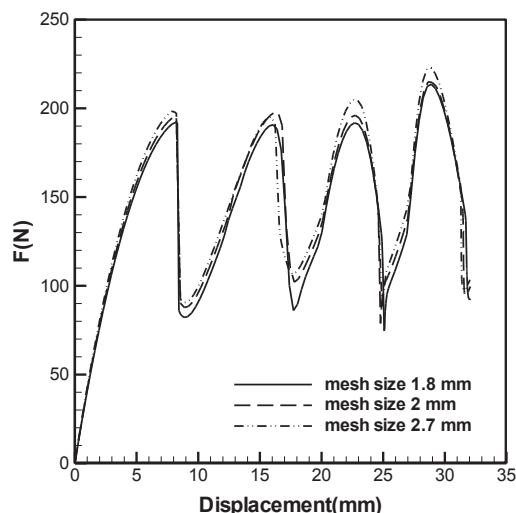
Fig. 12. Geometry, boundary conditions and loading of FE analysis of a functionally graded negative stiffness honeycomb

خمیده از مود اول کمانش به مود سوم و محدود نمودن مود دوم است- باید ابعاد تیرها را طوری انتخاب کرد که مقدار Q از عدد $2/31$ بیشتر باشد. با توجه به این دو نکته ضخامت‌ها به طور یکنواخت از $1/27$ تا $1/9$ میلی‌متر افزایش یافته است.

برای سازه با ضخامت ثابت لایه‌ها، تمام ردیف‌ها دارای ضخامت ثابت $1/27$ میلی‌متر می‌باشد. هر دو مدل از جنس نایلون ۱۱ با چگالی 1040 کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت پیواسون $0/33$ و مدول یانگ 1582 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بارگذاری شبه‌استاتیکی برابر 33 میلی‌متر تحت شرایط کنترل جابجایی بر صفحه بالایی A در سازه وارد می‌شود، در حالی که صفحه پایینی B در سازه کاملاً مقید شده است. تراکم شبه‌استاتیکی سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی در مراحل مختلف بارگذاری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پدیده فراجهدش از لایه با ضخامت کمتر آغاز می‌شود و به ترتیب ضخامت لایه‌ها، تراکم سازه لانه‌زنبوری اتفاق می‌افتد.

نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی برای سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی و سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت در شکل ۱۴ ارائه شده است.

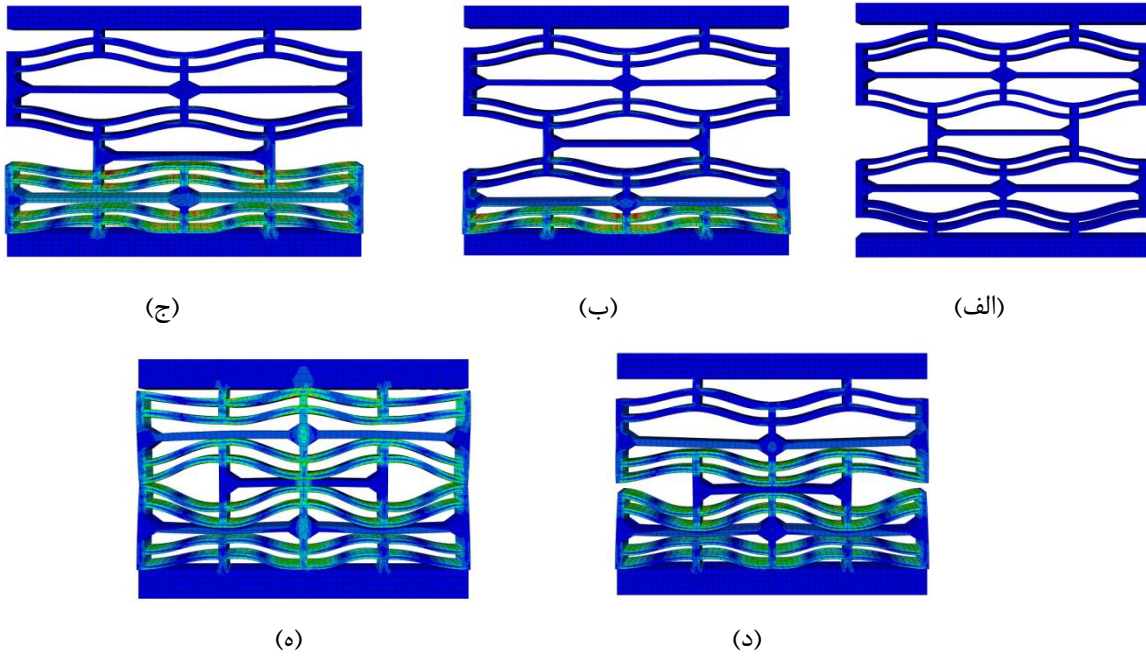
همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با تغییر ضخامت سازه



شکل ۱۱: اثر اندازه مش‌بندی در مدل‌سازی اجزاء محدود بر روی نمودار نیرو-جابجایی در لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت

Fig. 11. The effect of mesh size on the force-displacement diagram in FE model of the negative stiffness honeycomb with constant thickness

خمیده موجود در سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی انجام شده است و در هر لایه از سمت اعمال بار ضخامت لایه‌ها کاهش یافته است. به منظور بررسی اهمیت هدفمند نمودن سازه لانه‌زنبوری در جذب انرژی و اثر تغییر سفتی سازه از یک لایه به لایه دیگر، میزان جذب انرژی توسط لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی با سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مقایسه شده است. این مقایسه در محیط نرم‌افزاری آباکوس شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی عددی، سازه هدفمند مطابق شکل ۱۲ دارای ضخامت‌های به ترتیب $1/27$ ، $1/48$ ، $1/69$ و $1/9$ میلی‌متر است و بارگذاری از سمت ضخامت بیشتر سازه لانه‌زنبوری اعمال شده است. در انتخاب ضخامت‌های سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی دو نکته در نظر گرفته شده است. اول این که علاوه بر اهمیت میزان افزایش جذب انرژی در سازه‌های جاذب انرژی، وزن این سازه‌ها نیز حائز اهمیت است، و باید انرژی مخصوص (نسبت جذب انرژی به جرم سازه) در آن‌ها تا حد امکان بالا باشد. از سوی دیگر با توجه به تحقیقات موجود در مراجع [۴ و ۵]، ثابت هندسی Q یک پارامتر اساسی در تیرهای سازنده لانه‌زنبوری با سفتی منفی است و وضعیت دو پایایی^۱ و میزان سفتی منفی را تعیین می‌کند و برای داشتن خاصیت سفتی منفی و برگشت‌پذیری- که حاصل کمانش تیر



شکل ۱۳: مراحل مختلف تراکم سازه لانه زنبوری هدفمند با سفتی منفی: (الف) قبل از بارگذاری (ب) در جابجایی $y = 30/0.8$ mm (ج) در جابجایی $y = 6/27$ mm (د) $y = 22/73$ mm (ه) در جابجایی $y = 30/0.8$ mm

Fig. 13. Functionally graded negative stiffness honeycomb in various stages of quasi-static compression (a) before displacement (b) $y=6.27$ mm (c) $y=13.28$ mm (d) $y=22.73$ mm (e) $y=30.08$ mm

Table 4. Comparison between the amount of energy absorbed in FE model of constant thickness negative stiffness honeycomb and functionally graded negative stiffness honeycomb

جدول ۴: مقایسه بین لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانه زنبوری هدفمند با سفتی منفی در جذب انرژی

η	SEA (J/kg)	E_a (J)	m (kg)	F_{mean} (N)	F_{Peak} (N)	نوع سازه
۰/۷۲۸	۱۰۲/۶۵	۴/۶۲۰۵	۰/۰۴۵۰۱	۱۴۰/۰۱۵	۱۹۲/۱۹۶	لانه زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت
۱/۰۵۴	۱۶۱/۲۵	۷/۸۴۳۴	۰/۰۴۸۶۴	۲۲۷	۲۲۴/۸۰۱	لانه زنبوری با سفتی منفی هدفمند

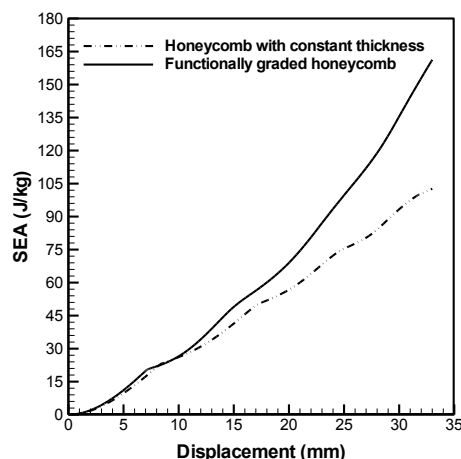
شده در واحد جرم سازه^۱ SEA و ضریب شکل η استفاده نمود. این پارامترها در طراحی جاذب‌های انرژی بسیار مهم هستند و وزن سازه به عنوان عامل محدودکننده می‌باشد. این پارامترها به صورت روابط (۲) تا (۵) محاسبه می‌شوند [۱۵ و ۱۶].

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (2)$$

لانه زنبوری با سفتی منفی و هدفمند نمودن آن، مقدار حداکثر نیرو در هر لایه با افزایش ضخامت لایه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود نشان می‌دهد، در بارگذاری شبه‌استاتیکی، ابتدا لایه با ضخامت کمتر کماتش می‌یابد و پس از کماتش کامل آن لایه، لایه با ضخامت بیشتر از آن کماتش خواهد یافت و این کماتش به ترتیب از نازک‌ترین لایه تا ضخیم‌ترین لایه ادامه می‌یابد.

برای سنجیدن خواص جاذب انرژی می‌توان از پارامترهای نیروی بیشینه اولیه F_{Peak} ، نیروی میانگین F_{mean} ، ظرفیت جذب انرژی E_a ، انرژی جذب

1 Specific Energy Absorption (SEA)



شکل ۱۵: مقایسه بین نمودار ظرفیت جذب انرژی در واحد جرم حاصل از حل اجزاء محدود برای لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی

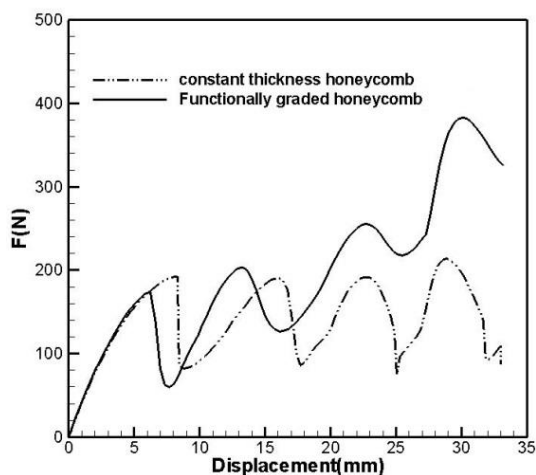
Fig. 15. Comparison between specific energy absorbed for FE model of constant thickness negative stiffness honeycomb and functionally graded negative stiffness honeycomb

لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی، به دست آمده از حل اجزاء محدود، در شکل ۱۵ ارائه شده است.

واضح است که ظرفیت جذب انرژی در واحد جرم در سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی در مقایسه با لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت افزایش یافته است. با توجه به جدول ۴، برای جابجایی کل معادل ۳۳ میلی‌متر، این میزان افزایش نسبی برابر ۵۷ درصد است که نشان از کارایی بهتر لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی می‌باشد. همچنین با توجه به این مطلب که اگر ضریب شکل η افزایش یابد، نیروی بیشینه به نیروی متوسط نزدیک می‌شود و حالتی ایده‌آل برای جاذب‌های انرژی محسوب می‌شود و باعث بالا رفتن بازده در میزان جذب انرژی می‌گردد [۱۲]، مقدار ضریب شکل η برای دو سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی و لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت با یکدیگر مقایسه شده است. مقدار ضریب شکل در لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی به مراتب بیشتر از ضریب شکل در لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت است که خود این امر افزایش بازده در میزان جذب انرژی را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان جذب انرژی در لانه‌زنبوری با سفتی منفی هدفمند با لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت با یکدیگر مقایسه شده



شکل ۱۴: مقایسه بین نمودار نیرو-جابجایی حاصل از حل اجزاء محدود برای لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی

Fig. 14. Comparison between quasi-static force-displacement diagram for FE model of negative stiffness honeycomb with constant thickness and functionally graded negative stiffness honeycomb

$$F_{mean} = \frac{E_a}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{F_{mean}}{F_{Peak}} \quad (5)$$

مقادیر η ، E_a ، F_{mean} ، F_{Peak} و SEA برای دو سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی محاسبه و در جدول ۴ با یکدیگر مقایسه شده است.

برای مطالعه اثر تغییر ضخامت لایه‌ها و هدفمند نمودن سازه لانه‌زنبوری در افزایش میزان جذب انرژی، میزان جذب انرژی در واحد جرم، SEA، برای سازه لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی و سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور مساحت زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی، تا جابجایی ۳۳ میلی‌متر، نشان داده شده در شکل ۱۳، بر جرم سازه (حاصلضرب حجم سازه لانه‌زنبوری در چگالی ماده نایلون ۱۱) تقسیم شده است. همچنین نمودار تغییرات SEA نسبت به جابجایی نیز برای لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت و

منابع

- [1] D.M. Correa, C.C. Seepersad, M.R. Haberman, Mechanical design of negative stiffness honeycomb materials, Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 4(1) (2015) 10.
- [2] D. M. Correa, T. D. Klatt, S.A. Cortes, M. R. Haberman, D. Kovar, and C.C. Seepersad, Negative Stiffness Honeycombs for Recoverable Shock Isolation, Rapid Prototyping Journal, 21(2) (2015) 193-200.
- [3] B.A. Fulcher, D.W. Shahan, M.R. Haberman, C. Conner Seepersad, P.S. Wilson, Analytical and Experimental Investigation of Buckled Beams as Negative Stiffness Elements for Passive Vibration and Shock Isolation Systems, Journal of Vibration and Acoustics, 136(3) (2014) 031009-031012.
- [4] J. Qiu, An electrothermally-actuated bistable MEMS relay for power applications, Ph.D. thesis, MIT University, (2003).
- [5] J. Qiu, J.H. Lang, A.H. Slocum, A curved-beam bistable mechanism, Journal of Microelectromechanical Systems, 13(2) (2004) 137-146.
- [6] T.D. Klatt, Extreme energy absorption : the design, modeling, and testing of negative stiffness metamaterial inclusions, M.Sc. Thesis ,The University of Texas at Austin,(2014).
- [7] S. Deqiang, Z. Weihong, W. Yanbin, Mean out-of-plane dynamic plateau stresses of hexagonal honeycomb cores under impact loadings, Composite Structures, 92(11) (2010) 2609-2621.
- [8] Y. Song, Z. Wang, L. Zhao, J. Luo, Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model, Materials & Design, 31(9) (2010) 4281-4289.

است. در ابتدا لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت تحت بارگذاری جابجایی کنترل و بار شبه‌استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است و سپس این بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایش تجربی راستی‌آزمایی شده است. نتایج، انطباق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی را نشان می‌دهد، به طوری که مقایسه میزان جذب انرژی حاصل از حل عددی و تجربی درصد خطای نسبی ۱۰/۹۸ را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده قابل قبول بودن شبیه‌سازی عددی می‌باشد. پس از آن مدل‌سازی لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. میزان جذب انرژی در واحد جرم در آن با میزان جذب انرژی در لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت مقایسه شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در واحد جرم در بارگذاری شبه‌استاتیکی در لانه‌زنبوری هدفمند با سفتی منفی ۱/۵۷ برابر لانه‌زنبوری با سفتی منفی و ضخامت ثابت است. در واقع جذب انرژی در واحد جرم به میزان نسبی ۵۷ درصد افزایش یافته است. به طور خلاصه مشاهده می‌شود که هدفمند نمودن سازه لانه‌زنبوری با سفتی منفی، باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود که این مساله در کنار برگشت‌پذیر بودن این نوع سازه‌ها یک ویژگی منحصر به فرد برای جاذب‌های انرژی می‌باشد که می‌توان در جذب بالای انرژی و در بارگذاری‌های مکرر از آن بهره جست.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

b	عرض خارج از صفحه
E_a	ظرفیت جذب انرژی
F_{mean}	نیروی میانگین
F_{Peak}	نیروی بیشینه اولیه
h	حداکثر ارتفاع اولیه تیر خمیده
L	طول تیر
m	جرم جاذب انرژی
Q	ثابت هندسی
SEA	انرژی جذب شده در واحد جرم سازه
t	ضخامت تیر
$\bar{w}(x)$	فاصله عمودی یک نقطه روی تیر از خط افقی اتصال‌دهنده دو انتهای تیر
x	موقعیت عرضی هر نقطه روی تیر خمیده

علائم یونانی

η	ضریب شکل
--------	----------

- Modares Mechanical Engineering, 18(3) (2018) 126-134 (in Persian).
- [16] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Experimental and numerical study on energy absorption of lattice-core sandwich beam, *Steel and Composite Structures*, 27(2) (2018) 135-147.
- [17] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Topology Optimization Study in Energy Absorption of Lattice-core Sandwich Beams under Three-point Bending Test, *Modares Mechanical Engineering*, 18(4) (2018) 163-173 (in Persian).
- [18] B. Yu, B. Han, P.-B. Su, C.-Y. Ni, Q.-C. Zhang, T.J. Lu, Graded square honeycomb as sandwich core for enhanced mechanical performance, *Materials & Design*, 89(Supplement C) (2016) 642-652.
- [19] X. Jin, Z. Wang, J. Ning, G. Xiao, E. Liu, X. Shu, Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading, *Composites Part B: Engineering*, 106(Supplement C) (2016) 206-217.
- [20] Y. Tao, S. Duan, W. Wen, Y. Pei, D. Fang, Enhanced out-of-plane crushing strength and energy absorption of in-plane graded honeycombs, *Composites Part B: Engineering*, 118(Supplement C) (2017) 33-40.
- [21] E. Salcedo, D. Baek, A. Berndt, J. Eun Ryu, Simulation and validation of three dimension functionally graded materials by material jetting, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 351-359.
- [9] L.T. Chang, C.H. Chang, G.L. Chang, Fit Effect of Motorcycle Helmet &mdash ; A Finite Element Modeling, *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, 44(1) (2001) 185-192.
- [10] L.T. Chang, G.L. Chang, J.Z. Huang, S.C. Huang, D.S. Liu, C.H. Chang, Finite element analysis of the effect of motorcycle helmet materials against impact velocity, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26(6) (2003) 835-843.
- [11] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures, *International Journal of Solids and Structures*, 48(3) (2011) 506-516.
- [12] A. Ajdari, S. Babaei, A. Vaziri, Mechanical properties and energy absorption of heterogeneous and functionally graded cellular structures, *Procedia Engineering*, 10 (2011) 219-223.
- [13] X. Wang, Z. Zheng, J. Yu, Crashworthiness design of density-graded cellular metals, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 3(3) (2013) 031001.
- [14] S.A. Galehdari, M. Kadkhodayan, S. Hadidi-Moud, Low velocity impact and quasi-static in-plane loading on a graded honeycomb structure; experimental, analytical and numerical study, *Aerospace Science and Technology*, 47(Supplement C) (2015) 425-433.
- [15] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Experimental investigation of energy absorption in foam filled sandwich beams with expanded metal sheet as core under quasi-static bending,

