

مطالعه عددی جذب انرژی یک سازه لانه زنبوری آلومینیومی پر شده با فوم مدرج و غیر مدرج در بارگذاری درون صفحه‌ای

علی‌رضا ملایی^۱، سید علی گله داری^{۲*}

۱ و ۲ - گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

خلاصه

در این پژوهش تأثیر چیدمان هسته سازه لانه زنبوری پر شده با فوم پلی اورتان در دو حالت مدرج و غیر مدرج، بر استحکام فروریزی و جذب انرژی هسته لانه زنبوری در بارگذاری صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار مکانیکی پلاستیک هسته‌های لانه زنبوری با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. سه سازه لانه زنبوری آلومینیومی از آلیاژ ۵۰۵۲ AL به صورت خالی و پر شده با فوم غیر مدرج و مدرج تحت بارگذاری فشاری تک جهتی در شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی سرعت پایین قرار گرفتند. انتخاب هسته‌های لانه زنبوری به گونه‌ای لحاظ شده که بتوان تأثیر چگالی نسبی سلول‌های لانه زنبوری را بر خواص استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی مورد بررسی قرار داد. بر اساس نتایج اجزاء محدود، به کارگیری فوم در هسته لانه زنبوری می‌تواند استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی را افزایش دهد. همچنین سازه پر شده با فوم مدرج با نرخ کاهشی سختی از محل اعمال بار، نسبت به سازه پر شده با فوم غیر مدرج کارایی مناسب‌تر دارد.

کلمات کلیدی: لانه زنبوری، بارگذاری درون صفحه‌ای، جذب انرژی، فوم مدرج

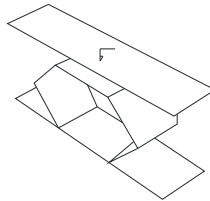
۱. مقدمه

امروزه ساختارهای چیدمانی و مواد متنوع به منظور استفاده به عنوان هسته سازه‌های لانه زنبوری مطرح شده‌اند. پر کاربردترین این ساختارها، لانه زنبوری شش وجهی آلومینیومی با هسته از انواع فوم‌های پلیمری هستند. فوم‌های پلیمری از جمله ارزان‌ترین مواد مورد استفاده در تولید هسته هستند که از لحاظ اقتصادی نقش موثری در تولید مقرون به صرفه پنل ساندویچی دارد.

پر کردن هسته لانه زنبوری با انواع فوم می‌تواند به عنوان روشی موثر در مقاوم‌سازی پنل در برابر پدیده بازشدگی صفحات مورد استفاده قرار گیرد. اعمال این روش منجر به به کارگیری همزمان خواص لانه زنبوری و فوم در هسته پنل شده و کارایی آن را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد. در پنل‌های ساندویچی که هدف در آنها جذب ضربه است، وقتی ضربه‌ای به سازه وارد شود از طرفی که ضربه وارد می‌شود تا طرفی که بدن انسان است باید سختی کاهش یابد یعنی سازه نرم‌تر شود. به عبارت دیگر هر چه به طرف بدن نزدیکتر می‌شویم ضخامت سازه کمتر می‌شود.

به طور کلی، پر کردن هسته لانه زنبوری با فوم در سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری صفحه‌ای (شکل ۱)، قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به سازه بدون استفاده از فوم 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 ضربه ای باشد، اهمیت مدت زمان انتقال نیرو، افزایش می یابد. زیرا هرچه بار ضربه ای در مدت زمان بیشتری انتقال یابد، آسیب کمتری به بدن انسان یا قطعه وارد می آید. اگر بارگذاری بر روی سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه ای انجام پذیرد، مدت زمان انتقال نیرو در مقایسه با بارگذاری خارج از صفحه افزایش می یابد [۱].



شکل ۱- بارگذاری درون صفحه ای

از جمله کاربردهای سازه لانه زنبوری تحت بارگذاری درون صفحه ای می توان به ضربه گیر در گودال آسانسور جهت کاهش بار ضربه ای ناشی از سقوط و صندلی نوزاد در خودرو به منظور کاهش آسیب به بافت نرم بدن نوزاد در هنگام تصادف و قطعات جاذب انرژی در هواپیما که در مقابل برخورد پرنده گان و یا سایر اجسام نصب می شوند اشاره نمود.

سادوفسکی^۱ و همکاران [۲] با استفاده از مدل سازی عددی و تکنیک یکپارچه سازی سه لایه ای مشخصه های الاستیک هسته لانه زنبوری خالی و پر شده با فوم را به دست آوردند. هدف آن ها از به کارگیری تکنیک یکپارچه سازی کاهش محاسبات انجام شده و تسریع حل مدل عددی بود. آن ها، از فوم پی وی سی به عنوان فاز پرکننده لانه زنبوری در مدل اجزاء محدود استفاده کردند و پارامترهایی چون بار بحرانی کمانش و توزیع تنش را مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که پر کردن لانه زنبوری با فوم تاثیر قابل توجهی در مقدار بار بحرانی کمانش ندارد. آکتای^۲ و همکارانش [۳] بر روی مقاطع جدار نازک و فوم پلی استایرن تحقیق کردند و نشان دادند که مقاطع پر شده از فوم در جذب انرژی رفتار بهتری از خود نشان می دهند. هانس^۳ و همکارانش [۴] اثر چگالی فوم را در جذب انرژی مقاطع جدار نازک پر شده از فوم آلومینیومی بررسی کردند. بر اساس نتایج تجربی و فرمولهای طراحی آنان ماکزیمم و متوسط نیرو وابسته به فاصله ضربه بود. شوجوان^۴ و همکارانش [۵] با بررسی مقاطع جدار نازک با ضخامت های متفاوت و چگالی های مختلف فوم نشان دادند که افزایش ضخامت تاثیر قابل توجهی در جذب انرژی دارد. آکای^۵ و هانا^۶ [۶] رفتار لانه زنبوری و ساندویچ پانل پر شده با فوم را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که وقتی این سازه ها تحت بارهای ضربه ای سرعت پایین قرار گیرند، ترک در هسته در صفحات رشد می نماید.

^۱ Sadowski
^۲ Aktay
^۳ Hanssen
^۴ Shujuan
^۵ Akay
^۶ Hanna

سوورو^۱ و دورک^۲ [۷] رفتار سازه ساندویچی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت متوسط را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در پژوهش خود صفحات پلیت را از کربن - وینیل استر و هسته فوم را از پی وی سی H۱۰۰ و فوم پلی‌اورتان انعطاف پذیر را بین صفحات پلیت و هسته قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که بیشترین انرژی جنبشی را هسته جذب می‌نماید و فوم لایه داخلی اثر قابل توجهی بر جذب انرژی ندارد، در حالی که در دیگر تحقیقات قبلی، نشان داده بود که این لایه داخلی، اثر بیشتری در جذب انرژی دارد.

علوی‌نیا و صادقی [۸] مطالعات آزمایشگاهی را برای بررسی پاسخ مکانیکی لانه‌زنبوری خالی و پر شده با فوم را تحت بارگذاری فشاری خارج صفحه‌ای را به انجام رساندند. آنها از فوم‌های پلی‌اورتان صلب به‌عنوان فاز پرکننده لانه‌زنبوری در آزمایش‌ها بهره بردند و پارامترهایی همچون مقدار انرژی جذب شده، مقدار انرژی جذب شده ویژه و استحکام فروریزی را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش سرعت بارگذاری از شبه استاتیکی به دینامیکی باعث افزایش سطح تنش در نمودار تنش-کرنش سازه لانه‌زنبوری در دو حالت خالی و پر شده با فوم می‌گردد اما رغبت پانل‌های خالی برای افزایش مذکور در مقایسه با پانل‌های پر شده با فوم خیلی بیشتر است. ملاطفی و مظفری [۹] رفتار صفحه ای لانه‌زنبوری پر شده با فوم تحت شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی را با استفاده از روش عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که به‌کارگیری فوم در هسته لانه‌زنبوری می‌تواند استحکام فروریزی را تا ۲۴ برابر و همچنین ظرفیت جذب انرژی را تا ۱۱ برابر افزایش دهد. لانه زنبوری‌ها اغلب در جهت برون صفحه‌ای به عنوان جاذب ضربه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در جهت درون صفحه ای به عنوان جاذب مزیت‌هایی نسبت به حالت برون صفحه‌ای دارد. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به سطح پایین نیروی انتقال یافته اشاره نمود. همانگونه که مشاهده شد، تاکنون در مورد سازه پر شده با فوم مدرج تحقیقی انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش، سازه لانه زنبوری پر شده با فوم پلی‌اورتان به صورت مدرج هندسی مورد مطالعه قرار گرفته است.

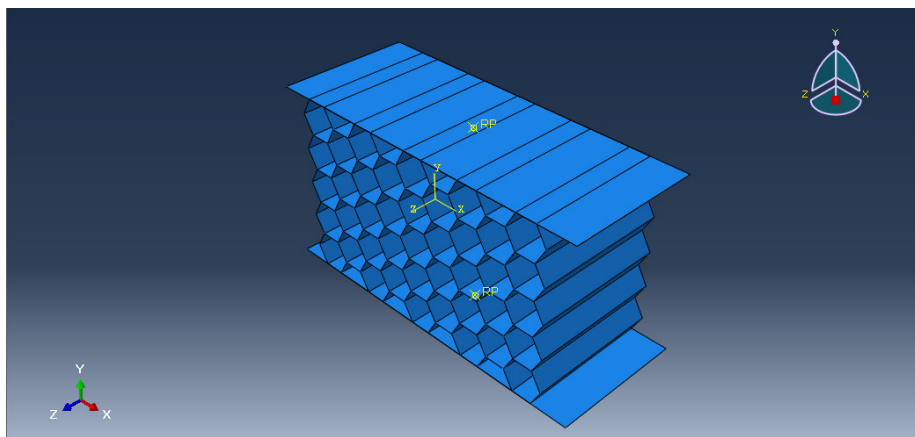
۲. مدل اجزاء محدود

۲-۱. مدل‌سازی سازه لانه‌زنبوری

به منظور بررسی جذب انرژی سازه لانه‌زنبوری، یک مدل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس ایجاد شد. لانه‌زنبوری شامل ۵ سلول در جهت X و ۵ سلول در جهت Y به صورت یکپارچه است (شکل ۲).

^۱ Suvorov

^۲ Dvorak



شکل ۲- مدل سازه لانه زنبوری در نرم افزار آباکوس^۱ تحت بارگذاری درون صفحه‌ای

برخورد دینامیکی از طریق صفحه صلبی که در بالای پنل قرار دارد اعمال می‌شود. لانه زنبوری از سمت دیگر به صفحه صلب تکیه‌گاه متصل شده است. سرعت برخورد به نقطه مرجع صفحه صلب متحرک اعمال شده و سایر درجات آزادی آن مقید شده است. تمامی درجات آزادی صفحه صلب تکیه‌گاه نیز مقید شده است. طول لبه سلول و ضخامت دیواره به ترتیب برابر با ۲ mm و ۰.۰۰۰۳ mm در نظر گرفته شد. ضخامت دیواره‌های مشترک برابر با ضخامت دیواره‌های غیرمشترک در نظر گرفته شد. مشخصات مکانیکی آلومینیوم نیز به صورت الاستیک-پلاستیک طبق جدول ۱ اعمال شد.

جدول ۱ - مشخصات سازه لانه زنبوری از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

ضریب پواسون	چگالی (kg/m ^۳)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)
۰/۳	۲۷۰۰	۱۳۰	۶۸۰۰۰

به منظور شبکه‌بندی سازه لانه زنبوری از المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای S۴R و برای صفحات صلب بالایی و پایینی از المان دو خطی چهار گره‌ای R۳D۴ استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها در نرم افزار آباکوس می‌توان از المان S۴R استفاده نمود. در این المان کرنش برشی در راستای ضخامت ثابت فرض می‌گردد. با توجه به اینکه سازه دارای هندسه منظم بوده و از ورق نازک ساخته شده، از المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی اجسام صلب در نرم افزار آباکوس می‌توان از المان R۳D۴ استفاده نمود. به دلیل هندسه منظم صفحه صلب از المان ۴ گره‌ای استفاده شده است. مدل شبکه‌بندی شده شامل ۷۵۰ المان S۴R، ۱۳۰ المان R۳D۴ و ۸۲۸ گره می‌باشد.

به منظور تماس بین صفحه بالایی و سازه از اتصال صفحه به صفحه جنبشی و برای تماس صفحه صلب پایینی به سازه از اتصال پنالتی بدون اصطکاک استفاده شده است.

^۱ Abaqus

برای اعمال شرایط مرزی بر روی صفحه بالایی حرکت تنها در راستای Y (راستای برخورد) آزاد گذاشته شده است. در حالی که تمام درجات آزادی صفحه پایینی بسته شده است. صفحه صلب بالایی به جرم 0.1 کیلوگرم با سرعت‌های مختلف به سازه برخورد نموده است.

۲-۲. مدل سازی هسته لانه زنبوری پر شده با فوم غیر مدرج

به منظور بررسی تاثیر پر کردن هسته لانه زنبوری بر رفتار صفحه‌ای سازه، فوم پلی اورتان صلب سبک وزن به عنوان فاز پرکننده در نظر گرفته شد. مشخصات مکانیکی فوم پلی اورتان در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی فوم پلی اورتان با چگالی پایین

ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	پلاستیسیته		مدول الاستیک (MPa)
		k	v_p	
۰	۱۶	۱	۰	۵.۵

که در آن پارامتر k نسبت تنش مایز اولیه به فشار هیدرواستاتیک اولیه و v_p ضریب پواسون پلاستیک است. برای تعیین ماهیت تماسی میان فوم و هسته لانه زنبوری فرض چسبندگی کامل لحاظ شد و قید وابستگی تماسی^۱ اعمال شد. برای ایجاد شبکه بندی فومها، از المان خطی ۶ گره ای C3D8R استفاده شده است.

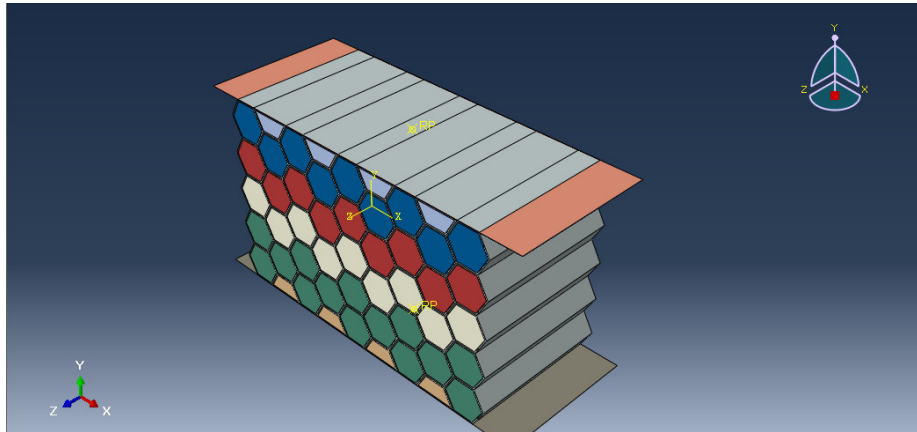
۲-۳. مدل سازی هسته لانه زنبوری پر شده با فوم مدرج

تفاوت این روش با روش قبلی (بخش ۲-۲) در چگالی فومها و نحوه چیدمان فومها است. بدین منظور از ۴ چگالی متفاوت فوم پلی اورتان استفاده گردید. چگالی فومها به ترتیب سختی از بالا به پایین یعنی از سمت وارد شدن ضربه به سمت بدن انسان از سخت تر به نرم تر کاهش یافت. از فوم با چگالی‌های ۶۵، ۵۲، ۲۹، ۱۶ استفاده گردید. نحوه چیدمان در جدول ۳ و شکل ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳- نحوه مدرج شدن سازه لانه زنبوری پر شده با فوم با چگالی‌های مختلف

چگالی (kg/m^3)	شماره ردیف از پایین
۱۶	ردیف نیمه پایین ۱ و ردیف‌های ۲ و ۳ و ۴
۲۹	۵ و ۶
۵۲	۷ و ۸
۶۵	ردیف‌های ۹ و ۱۰ و ردیف نیمه بالایی ۱۱

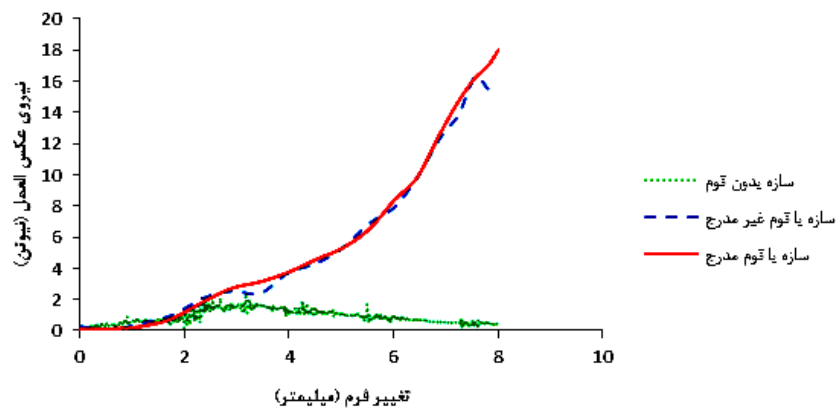
^۱ Tie Constraint



شکل ۳- مدل سازه لانه زنبوری پر شده با فوم مدرج در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری درون صفحه‌ای

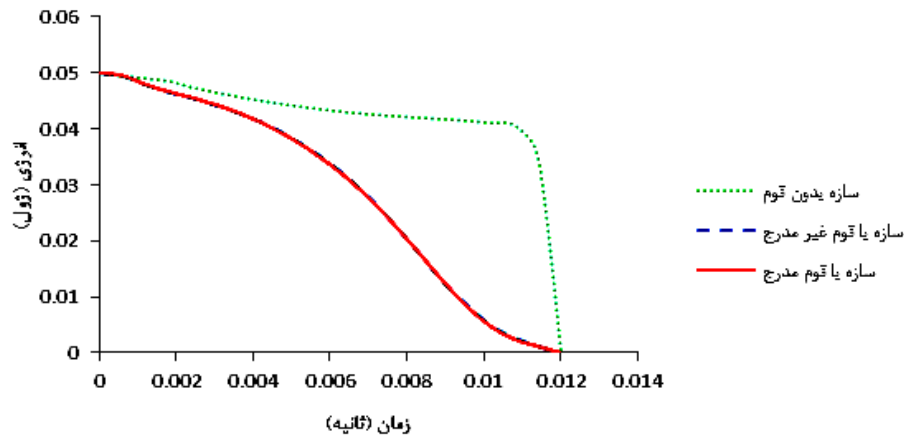
۳. تجزیه و تحلیل نتایج مدل سازی

تحلیل‌ها با استفاده از حلگر صریح^۱ به انجام رسید. و نتایج به صورت نمودار آورده شده است. که در ذیل به تجزیه و تحلیل نمودارها پرداخته می‌شود. سرعت برخورد در ابتدا $V=1 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شده است. از جمله پارامترهای مهم در جاذب های انرژی، میزان نیروی عکس العمل سازه، میزان و زمان جذب انرژی می باشد. برای یک جاذب مطلوبست که بیشترین انرژی را در طولانی‌ترین مدت با حداقل نیروی عکس العمل جذب نماید. انرژی جنبشی وارد شده به سازه به انرژی داخلی تبدیل می گردد. به مجموع انرژی کرنشی و انرژی پلاستیک تغییر فرم، انرژی داخلی گفته می‌شود. نمودار نیرو - تغییر مکان سازه و انرژی جنبشی- زمان برای سه مدل (مدل ۱ سازه بدون فوم، مدل ۲ سازه با فوم غیر مدرج و مدل ۳ سازه با فوم مدرج) به ترتیب در شکل های ۴ و ۵ ارائه شده است. در نمودار شکل ۴ نیرو، نیروی عکس العمل وارد به صفحه پایینی و تغییر مکان مربوط به جابجایی صفحه بالایی می‌باشد.



شکل ۴- نمودار نیرو- تغییر مکان در سرعت برخورد $V=1 \text{ m/s}$

^۱ Dynamic Explicit



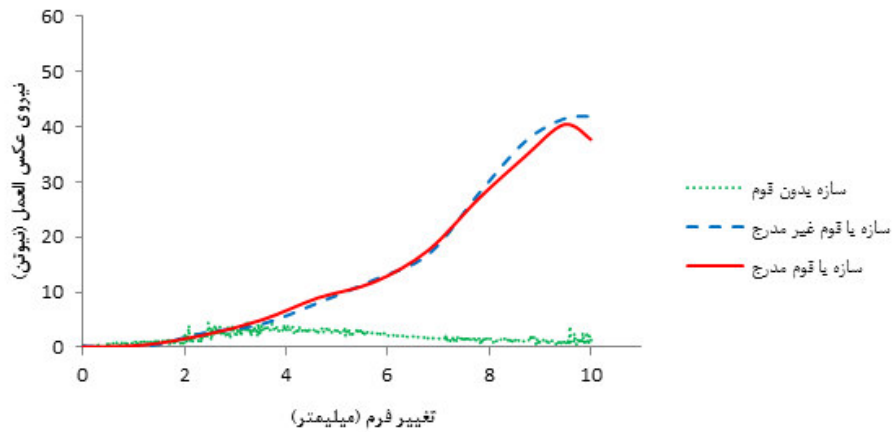
شکل ۵- نمودار انرژی جنبشی- زمان در سرعت برخورد $V=1 \text{ m/s}$

با توجه به نمودار شکل ۴ تغییرات نیرو بر حسب تغییر مکان برای مدل‌های ۲ و ۳ تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشند که به صورت یکنواخت افزایش یافته است و مدل ۳ یکنواخت‌تر است، اما برای مدل ۱ نیروی عکس‌العمل خیلی کمتر از دو مدل دیگر بوده ولی دارای تنش غیر یکنواخت است. لازم به ذکر است که پایین بودن نیروی عکس‌العمل از جمله خواص مطلوب برای جاذب می‌باشد. با توجه به این خاصیت مدل ۱ کارایی مناسبتری نسبت به مدل‌های ۲ و ۳ دارد. اما در مورد انتقال یکنواخت ضربه و عدم ایجاد شوک مدل ۳ از همه بهتر می‌باشد.

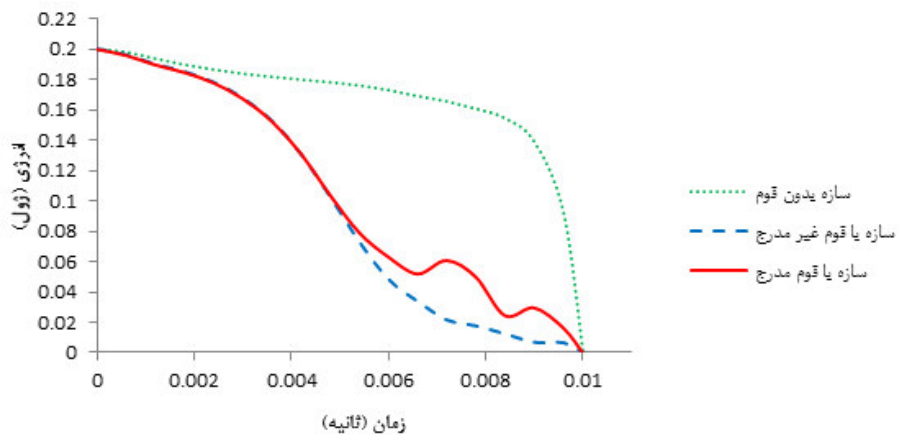
با توجه به شکل ۵ نرخ جذب انرژی توسط سازه مدل ۳ و ۲ تقریباً شبیه یکدیگر است. جذب انرژی برای این دو مدل با شیب ملایم‌تری نسبت به سازه مدل ۱ انجام شده است. همچنین نسبت به مدل ۱، انرژی جنبشی را در مدت زمان کمتری جذب نموده‌اند و سطح انرژی جنبشی پایینتری دارند. بنابراین از لحاظ سطح انرژی جنبشی، جاذب مدل ۱ نسبت به دو مدل دیگر ضعیف‌تر است. طولانی بودن بازه زمانی جذب انرژی از جمله پارامترهای مثبت برای جاذبها می‌باشد بنابراین اگر برای طراحی جاذب تنها مقدار جذب انرژی مد نظر باشد، جاذب‌های مدل ۲ و ۳ نسبت به مدل ۱ کاربردی‌تر است.

با در نظر گرفتن اینکه انرژی جنبشی وارد شده به هر سه مدل در ابتدا یکسان بوده است مشاهده می‌شود که پر نمودن سازه با فوم باعث کاهش انرژی جنبشی وارد شده به سازه شده ولی نیروی عکس‌العمل را افزایش می‌دهد که این افزایش بطور یکنواخت می‌باشد.

جهت بررسی اثر سرعت‌های پایین، ابتدا با دو برابر نمودن سرعت $V=2 \text{ m/s}$ نمودار نیرو تغییر مکان، شکل ۶ و نمودار انرژی جنبشی زمان، شکل ۷ حاصل گردید.



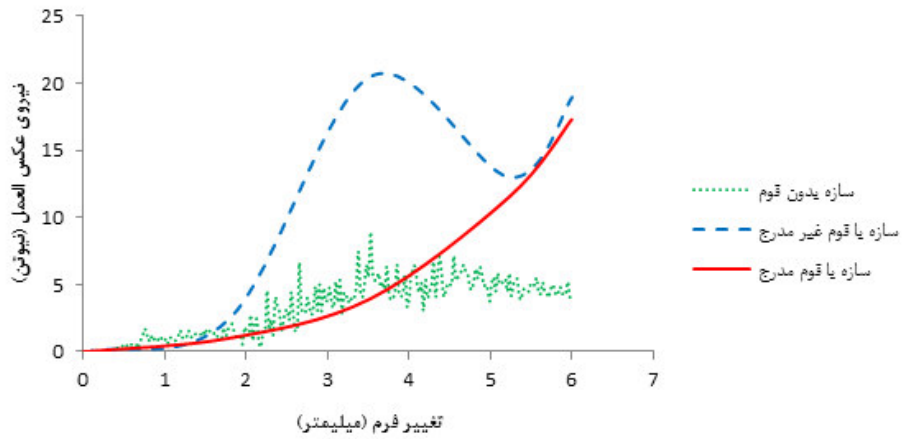
شکل ۶- نمودار نیرو- تغییر مکان در سرعت برخورد $V=2 \text{ m/s}$



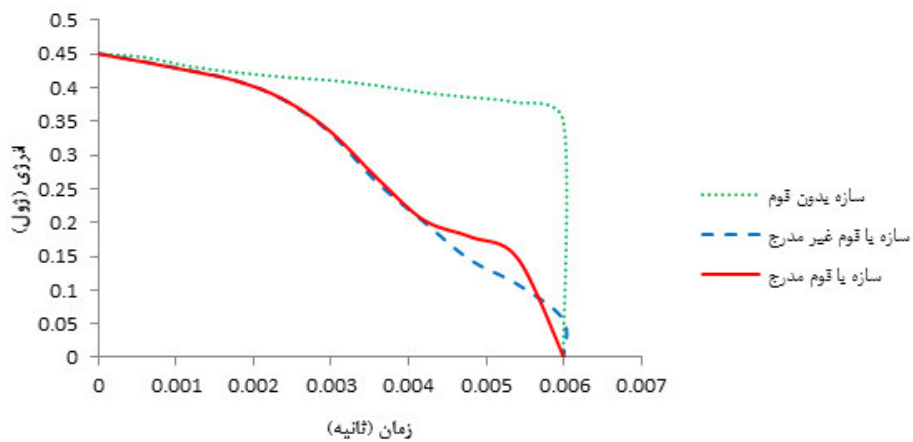
شکل ۷- نمودار انرژی جنبشی- زمان در سرعت برخورد $V=2 \text{ m/s}$

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود با ۲ برابر شدن سرعت، یکنواخت بودن نیروی عکس العمل مدل ۳ نسبت به مدل ۲ مشهودتر می باشد و مدل ۲ انرژی جنبشی را به صورت یکنواخت جذب نموده است. تفاوت مدل ۲ و ۳ با مدل ۱ شبیه برخورد با سرعت 1 m/s می باشد.

سپس با سه برابر نمودن سرعت $V=3 \text{ m/s}$ نمودار نیرو تغییر مکان، شکل ۸ و نمودار انرژی جنبشی زمان، شکل ۹ حاصل می گردد.

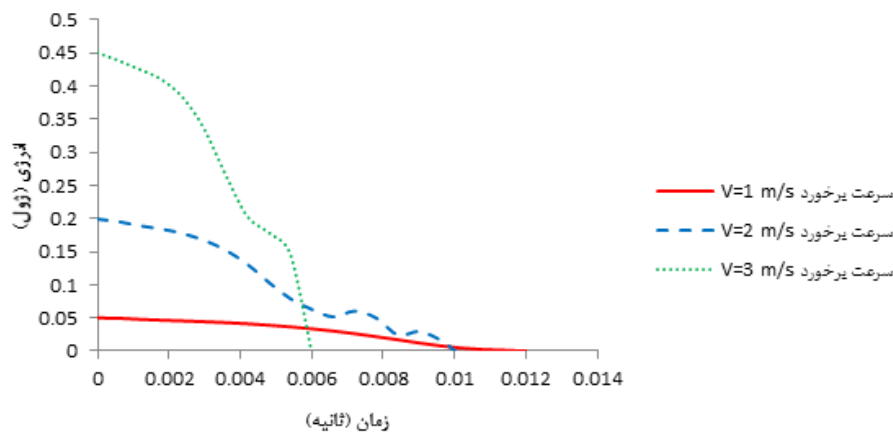


شکل ۸- نمودار نیرو- تغییر مکان در سرعت برخورد $V=3 \text{ m/s}$



شکل ۹- نمودار انرژی جنبشی- زمان در سرعت برخورد $V=3 \text{ m/s}$

با توجه به شکل‌های ۸، با افزایش سرعت، مدل ۳ رفتار بهتری نسبت به مدل ۲ از خود نشان می‌دهد و نیروی عکس‌العمل یکنواخت با سطح پایینتری دارد و طبق شکل ۹، انرژی جنبشی را نیز زودتر جذب نموده است. در شکل ۱۰ انرژی جنبشی مدل سازه پر شده با فوم مدرج در سرعت‌های برخورد ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۰- نمودار انرژی جنبشی- زمان برای سازه پر شده با فوم مدرج در سرعت های برخورد مختلف

همانطور که در شکل ۱۰ دیده می شود با افزایش سرعت برخورد در سازه پر شده با فوم مدرج، سطح انرژی جنبشی، در مدت زمان کمتری کاهش می یابد. و هر چه سرعت بیشتر شود انرژی جنبشی سریعتر کاهش می یابد که نشان می دهد که استفاده از سازه پر شده با فوم مدرج در سرعت های بالاتر مفید می باشد.

۴. نتیجه گیری

تحقیق حاضر به بررسی تاثیر چیدمان فوم پلی اورتان در هسته لانه زنبوری می پردازد. پارامترهای اصلی مورد بحث در این پژوهش استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی در هسته لانه زنبوری است. نتایج نشان داد که در جهت درون صفحه ای با پر کردن هسته سازه با فوم خواص استحکام فروریزی و جذب انرژی جنبشی با نیروی وارد شده، بهبود می یابد. از طرف دیگر پر نمودن هسته سازه به صورت مدرج، به نحوی که سختی سازه از محل اعمال نیرو به سمت پایین باشد، باعث افزایش مدت زمان جذب انرژی و انتقال نیرو میگردد. همچنین با افزایش سرعت در محدوده سرعت های پایین، سازه پر شده با فوم مدرج نسبت به سازه پر شده با فوم غیر مدرج، نیروی عکس العمل را به صورت یکنواخت و با سطح پایینتر ایجاد می نماید. از این رو در شرایطی که نیروی عکس العمل یکنواخت و مدت زمان انتقال نیرو در مقابل مقدار انرژی جذب شده مهمتر باشد، سازه لانه زنبوری پر شده با فوم مدرج پیشنهاد می گردد.

۵. مراجع

۱. Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M., Hadidi-moud, S., "Analytical, experimental and numerical study of a graded honeycomb structure under in-plane impact load with low velocity", International Journal of Crashworthiness, ۲۰۱۵, Vol. ۲۰, No. ۴, ۳۸۷-۴۰۰.
۲. Vyacheslav, N., Sadowski, T., "Analysis of structural performance of sandwich plates with foam-filled aluminum hexagonal honeycomb core", Computational Materials Science, ۲۰۰۹, Vol. ۴۵, pp. ۶۵۸-۶۶۲.

۳. Aktay, L., Toksoy, AK., Guden, M., "Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis", *Materials and Design*, ۲۰۰۶, Vol. ۲۷, pp. ۵۵۶-۵۶۵.
۴. Hanssen, AG., Langseth, M., Hopperstad, OS., "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler", *International Journal of Impact Engineering*, ۲۰۰۰, Vol. ۲۴, pp. ۴۷۵-۵۰۷.
۵. Shujuan, H., Qing, L., Shuyao, L., Xujing, Y., Wei, L., "Crashworthiness design for foam filled thin-wall structures", *Materials and Design*, ۲۰۰۹, Vol. ۳۰, pp. ۲۰۲۴-۲۰۳۲.
۶. Akay, M., Hanna, R., "A comparison of honeycomb-core and foam-core carbonfiber/epoxy sandwich panels", *Composites*, ۱۹۹۰, Vol. ۲۱, No. ۴, pp. ۳۲۵-۳۳۱.
۷. Suvorov, AP., Dvorak, GJ., "Dynamic response of sandwich plates to medium velocity impact", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, ۲۰۰۵, Vol. ۷, No. ۵, pp. ۳۹۵-۴۱۲.
۸. Alavi Nia, A., Sadeghi, M.Z., "The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study", *Materials and Design*, ۲۰۱۰, Vol. ۳۱, pp. ۱۲۱۶-۱۲۳۰.
۹. Molatefi, H., Mozafari, H., "Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method", *Modares Mechanical Engineering*, ۲۰۱۵, Vol. ۱۴, No. ۱۵, pp. ۱۷۷-۱۸۵. (In Persian)