



بررسی تجربی رفتار بالستیکی ساندویچ پنل با هسته موجدار

رهام ماهر^۱، سید محمدرضا خلیلی^{۲*}، رضا اسلامی فارسانی^۳

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی 1999143344، smrkhali2017@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۳-۳۱ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۳-۲۱

چکیده: سازه‌های ساندویچی بخاطر داشتن وزن کم نسبت به مقاومت بالا و همچنین قدرت جذب انرژی بالا، در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوایی، دریایی، بسته بندی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش به مطالعه تجربی تأثیر شکل هسته بر رفتار ساندویچ پنل‌های هسته موجدار در مقابل ضربه سرعت بالا پرداخته شده است. جهت انجام آزمایش‌ها از تفنگ گازی و پرتابه استوانه‌ای با سر کروی استفاده شده است. هسته‌ی ساندویچ پنل‌ها از جنس آلومینیوم با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر و دو سطح مقطع دوزنقه‌ای و مثلثی ساخته شده‌اند. پوسته‌ها از جنس کامپوزیت با پارچه ساده الیاف شیشه، در ۴ لایه که بصورت دستی و در دمای اتاق لایه بندی شده‌اند در نظر گرفته شده است. حد بالستیک و انرژی جذب شده، به عنوان پارامترهای مهم در بررسی عملکرد سازه‌های ساندویچ پنل در مقابل ضربه سرعت بالا مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به منظور استخراج خواص مکانیکی پوسته کامپوزیتی و هسته آلومینیومی، آزمون کشش بر روی نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی و آلومینیومی انجام گرفته است. نتایج آزمون ضربه سرعت بالا بر روی نمونه‌ها با شکل هسته متفاوت نشان می‌دهند که جذب انرژی برای ساندویچ پنل با هسته مثلثی موجدار و هسته دوزنقه‌ای موجدار به ترتیب ۱۳۷/۶ ژول و ۱۱۷/۲ ژول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضربه سرعت بالا، ساندویچ پنل، هسته موجدار

۱. مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های پیشرفته به طور گسترده‌ای در سازه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختارهای ساندویچی با هسته موجدار نمونه‌ای از کامپوزیت‌های پیشرفته می‌باشند. ساختارهای ساندویچی عموماً از سه بخش ساخته می‌شوند؛ بخش هسته میانی و پوسته‌های بالایی و پایینی. سازه‌های ساندویچی به دلیل داشتن وزن کم نسبت به مقاومت بالا، موجب بهبود

¹ Corrugated

² Face-sheet

خواص سازه و جذب بیشتر انرژی توسط سازه می‌شوند [۵-۱]. ساندویچ‌پنل‌ها در بسیاری از سازه‌های دریایی، شهری، خودروها و به خصوص در سامانه‌های هوافضایی کاربرد دارند [۶].

سازه‌های ساندویچی از مواد مختلف و در هندسه‌های متفاوت ساخته می‌شوند، که این امر منجر به طراحی‌های منحصر بفرد و متناسب با کاربرد این سازه‌ها می‌گردد. یک سازه ساندویچی اغلب دارای یک هسته ضعیف و پوسته‌های قوی که در بالا و پایین هسته قرار گرفته‌اند می‌باشد. پوسته‌ها اغلب تعیین‌کننده میزان مقاومت ساندویچ پنل به بارهای کششی درون صفحه‌ای هستند.

برای هسته ساندویچ پنل اغلب از ماده با چگالی کم استفاده می‌شود. هسته چندین نقش را در سازه ساندویچی ایفا می‌کند: ۱. هسته باید به اندازه کافی در مقابل بارهای عمودی وارد بر ساندویچ پنل مقاوم باشد، ۲. باید دارای مقاومت کافی در برابر بارهای برشی ناشی از لغزش^۴ پوسته‌ها نسبت به هم باشد، ۳. همچنین از اصلی‌ترین نقش‌های هسته در سازه‌های ساندویچی جذب انرژی و مقاومت در برابر کماتش‌های موضعی^۵ می‌باشد [۷].

با توجه به اینکه سازه‌های ساندویچی هسته موج‌دار با رویه‌های کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، کاربرد گسترده‌ای دارند، شناخت خواص بالستیکی این سازه‌ها هم‌چون خواص ایستایی آن‌ها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری و برخورد‌های ناخواسته، امری لازم و ضروری است.

ساندویچ پنل‌های با هسته موج‌دار، اغلب دارای خواص ناهمسانگرد^۶ می‌باشند. این سازه‌ها دارای مقاومت و انعطاف‌پذیری بالا در راستای موج و خلاف جهت موج‌ها می‌باشند. در میان انواع ساندویچ پنل‌ها، سازه با هسته موج‌دار مورد مناسبی برای استفاده در صنایع حمل و نقل است. این سازه‌ها دارای شکل هسته متفاوتی از جمله دایره‌ای، مثلثی و دوزنقه‌ای هستند [۸].

امروزه به دلیل کاربرد فراوان ساندویچ پنل‌ها در صنایع مختلف، دستیابی به سازه‌ای با قدرت جذب انرژی بالاتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، محققان بسیاری به بررسی پاسخ مکانیکی و بالستیکی سازه‌های ساندویچ پنل پرداختند.

چانگ و همکاران [۹] با استفاده از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول به بررسی رفتار خمشی یک ساندویچ پنل با هسته موج‌دار تحت شرایط مرزی متفاوت پرداختند. ماگنوک و همکاران [۱۰] با محاسبه ممان دوم اینرسی برای هسته ساندویچ پنل با سطح مقطع سینوسی، استحکام خمشی و رفتار کمانشی و خمشی سازه را بدون در نظرگیری تغییر شکل برشی بررسی کردند. چن و کیم [۱۱] با ارائه یک مدل معادل صفحه‌ای برای ساندویچ پنل با هسته موج‌دار دوزنقه‌ای و سینوسی، با استفاده از روش انرژی معادل و نظریه صفحه‌ای کلاسیک که تغییر شکل برشی را در نظر نمی‌گیرد، به محاسبه خواص موثر و ماتریس سختی کششی و ماتریس سختی خمشی پرداختند. همچنین برای تایید مدل تحلیلی ارائه شده، یک مدل المان محدود واقعی نیز تحلیل کردند. تیان و همکاران [۱۲] به بررسی تجربی پنل فشرده‌سازی با شکل هسته‌های موج‌دار متفاوت از جمله مثلثی پرداختند. هو و همکاران [۱۳] به بررسی اثرات شکل هندسی و پارامترهای ابعادی اصلی، بر رفتار ساندویچ پنل‌های هسته موج‌دار و بهبود

³ in plane

⁴ Sliding

⁵ local Buckling

⁶ anisotropic

هسته‌های ساندویچ پنل با شکل هسته دوزنقه‌ای و خرابی بر اساس استانداردهای تصادم پرداختند. یحیا و همکاران [۱۴] تاثیر شکل هسته ساندویچ پنل را بر تغییر شکل آن در اثر اصابت پرتابه فوم آلومینیوم با سرعت‌های مختلف مطالعه کردند. آنها ۵ مدل مختلف لانه زنبوری با هسته آلومینیومی و پوسته‌های آلومینیومی را بررسی کردند. نوریک و همکاران [۱۵] تاثیر ارتفاع هسته، ضخامت رویه و برهم‌کنش اجزای پنل را بر مودهای تخریب آن بررسی کردند و نمونه با بیشترین میزان در جذب انرژی را معرفی کردند. موهود مت رجب و همکاران [۱۶-۲۰] به بررسی رفتار مکانیکی سازه ساندویچی با هسته‌های موجدار دوزنقه‌ای و مثلثی در یک زاویه مشخص از جنس آلومینیوم و کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر کربن تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین به صورت تجربی و عددی پرداخته‌اند، آن‌ها دریافته‌اند که خاصیت مقاومت فشاری در کامپوزیت‌های مختلف در مقایسه با لانه زنبوری و فوم‌های معمولی بیشتر بوده و هسته‌های موجدار از جنس پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن خواص مشابه‌ای با لانه زنبوری آلومینیومی دارد. خلیلی و همکاران [۲۱] به بررسی المان محدود ضربه سرعت پایین بر روی سازه‌های کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها در آن مطالعه طیف وسیعی از نمونه‌ها با ضخامت‌های متفاوت و پرتابه‌های با جرم و سرعت مختلف را مورد بررسی قرار دادند. همچنین به بررسی سازه‌های کامپوزیتی مختلف از جمله صفحات کامپوزیتی، ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی خمیده، پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی نازک و ضخیم، تحت بارهای شبه استاتیک و استاتیک پرداختند. کلیچ اصلان و همکاران [۲۲-۲۴] به بررسی ساندویچ پنل هسته دوزنقه‌ای چندلایه آلومینیومی تحت پاسخ ضربه محلی با هندسه ضربه زننده کرومی، مخروطی و سر تخت پرداخته‌اند، بر اساس بررسی صورت گرفته مشاهده شده که استفاده از هسته چندلایه، تنش کم‌مانشی را کاهش و کرنش را افزایش داده است. وادلی و همکاران [۲۵] تغییر شکل و شکست پنل‌های ساندویچی با هسته موجدار مثلثی، تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند.

در تحقیقات صورت گرفته پیشین، نتایج مدل‌های تحلیلی و یا عددی با مدل تجربی مقایسه شده است. درحالی که بررسی دقیقی بر روی نتایج تجربی از جمله تاثیر شکل هسته موجدار بر مکانیزم تخریب، سطح تخریب لایه‌های کامپوزیتی و میزان جذب انرژی در سازه‌های ساندویچی صورت پذیرفته است.

در مقاله حاضر رفتار ساندویچ پنل‌های با پوسته کامپوزیتی و هسته موجدار آلومینیومی با دو نوع شکل هسته دوزنقه‌ای و مثلثی تحت ضربه سرعت بالا بصورت تجربی بررسی شده است. اثر تغییر شکل هندسی هسته بر میزان جذب انرژی و هم‌چنین مکانیزم شکست و سطح تخریب پوسته‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. تحلیل آزمایشگاهی

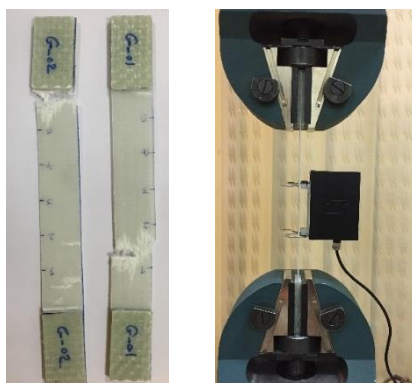
۲-۱ مواد

در این پژوهش، برای ساخت پوسته کامپوزیتی ساندویچ پنل، از پارچه شیشه^۷ و رزین اپوکسی Epon 828 ساخت شرکت کاملیاف^۸ ترکیه به همراه ۱۰٪ هاردنر استفاده شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی پوسته‌های کامپوزیتی، مطابق شکل

^۷ Glass Woven

^۸ Camelyaf

۱، سه نمونه بر مبنای استاندارد ASTM D3039 [۲۶] ساخته شد و آزمایش کشش بر روی آنها انجام شد که نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. آزمایش کشش نمونه کامپوزیتی

جدول ۱. خواص مکانیکی کامپوزیت

پارامتر	مقدار
دانسیته	2000 (kg/m^3)
مدول الاستیسیته در جهت ۱،	20000 (MPa)
E_{11}	
مدول الاستیسیته در جهت ۲،	10000 (MPa)
E_{22}	
مدول برشی G_{12}	5000 (MPa)
استحکام نهایی S_{ut}	360 (MPa)

برای ساخت هسته آلومینیومی، از آلومینیوم با ضخامت ۰/۳ میلی متر استفاده شده است. به منظور دستیابی به خواص آلومینیوم، مطابق شکل ۲ نمونه هایی طبق استاندارد ASTM B557 [۲۷] آماده شده و آزمایش کشش گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش کشش آلومینیوم در جدول ۲ آورده شده است.

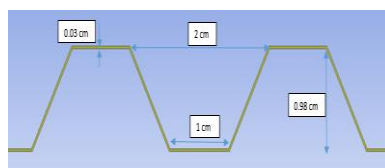
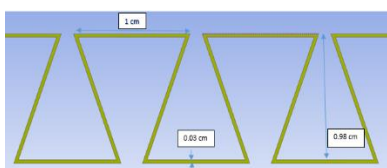
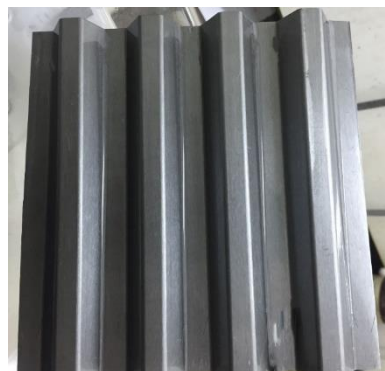


شکل ۲. آزمایش کشش نمونه آلومینیومی

جدول ۲. خواص مکانیکی آلومینیوم

پارامتر	مقدار
دانسیته	2770 (kg/m^3)
مدول الاستیسیته	64566 (MPa)
ضریب پواسون	0/33
استحکام نهایی S_{ut}	144 (MPa)

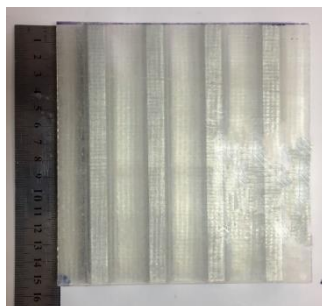
برای ساخت هسته‌های موجدار با شکل مقطع مثلثی و دوزنقه‌ای از دستگاه خم‌کن دستی استفاده شده است. هسته‌های دوزنقه‌ای و مثلثی ساخته شده و ابعاد آنها به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴. سطح مقطع هسته آلومینیومی مثلثی

شکل ۳. سطح مقطع هسته آلومینیومی دوزنقه‌ای

به منظور انجام آزمایش‌های بالستیک، نمونه‌های ساندویچ پنل با هسته‌های موج‌دار آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی بطور مجزا در ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع ساخته و تهیه شده‌اند و پس از آن با چسب اپوکسی (EPON828) و تحت فشار به یکدیگر چسبانده شده‌اند، شکل ۵.



شکل ۵. ابعاد هندسی نمونه

پس از ساخت نمونه‌ها و مشخص گردید، جرم نمونه با هسته دوزنقه‌ای $98,8$ گرم و جرم نمونه با هسته مثلثی برابر با $124,19$ گرم شده است.

۲-۲- آزمایش بالستیک

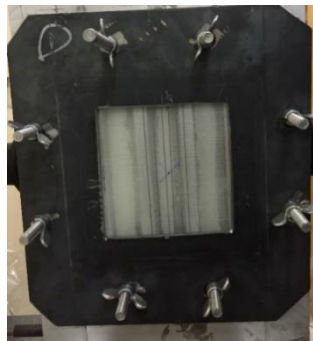
آزمایش بالستیک توسط دستگاه تفنگ گازی موجود در دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی انجام شده است (شکل ۶). تفنگ گازی مورد استفاده، سرعت مورد نظر را برای پرتابه را از یک مخزن تحت فشار فراهم می کند. نگهدارنده نمونه‌ها بصورتی عمل می کند که از هر وجه نمونه، ۵ سانتی متر را مقید نمی کند (شکل ۷). در این آزمایش از پرتابه استوانه‌ای از جنس فولاد، با سر کروی و با وزن ۲۷ گرم استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. سرعت اولیه پرتابه برابر ۱۱۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. تفنگ گازی



شکل ۸. ضربه زننده



شکل ۷. نگهدارنده در آزمایش بالستیک

۳- نتایج و بحث

جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش ضربه سرعت بالا توسط دستگاه تفنگ گازی که شامل سرعت باقی مانده پرتابه پس از عبور کامل از نمونه است را نشان می دهد. پس از به دست آوردن این مقادیر، می توان به محاسبه سرعت حد بالستیک (معادله ۱) و انرژی جذب شده (معادله ۲) توسط نمونه‌ها پرداخت.

⁹ fixture

¹ fix

جدول ۳. سرعت باقیمانده

نمونه	هسته	هسته مثلثی
	دوزنقه‌ای	
سرعت باقیمانده	74 m/s	63 m/s

$$V_b = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \text{ (m/s)} \quad \text{معادله ۱}$$

$$E = \frac{1}{2} m_p V_b^2 \text{ (J)} \quad \text{معادله ۲}$$

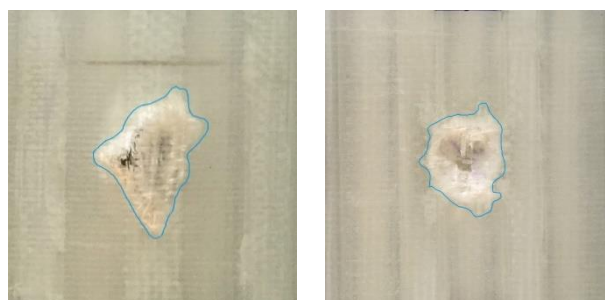
در معادله ۱، V_b و V_i و V_r به ترتیب سرعت حد، سرعت اولیه و سرعت باقی‌مانده هستند. در معادله ۲، E و m_p به ترتیب انرژی جذب شده و جرم ضربه زننده هستند [۲۸]. با استفاده از معادلات ۲ و ۳ مقدار سرعت حد ضربه زننده و انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. انرژی جذب شده و سرعت حد نمونه‌ها

انرژی جذب شده (J)	سرعت (m/s)	حد نمونه‌ها
117.2475	93.19335	هسته
		دوزنقه‌ای
137.592	100.9554	هسته مثلثی

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود انرژی جذب شده و هم‌چنین سرعت حد بالستیک با تغییر شکل هسته از دوزنقه‌ای به مثلثی افزایش می‌یابند.

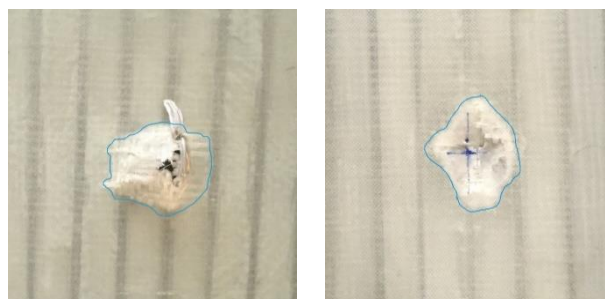
شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب سطح تخریب در صفحات جلویی و پشتی نمونه‌های دوزنقه‌ای و مثلثی را نمایش می‌دهند.



b

a

شکل ۹. سطح تخریب نمونه هسته دوزنقه ای (a) صفحه جلویی (b) صفحه پشتی



b

a

شکل ۱۰. سطح تخریب نمونه هسته مثلثی (a) صفحه جلویی (b) صفحه پشتی

با توجه به شکل ۹ و ۱۰، می توان به چگونگی شکست و ابعاد ناحیه شکست در نمونه ها پی برد. مشاهده گردید که سطح شکست در پوسته جلویی هر دو نمونه بصورت دایره ای است. گسترش تخریب در پوسته پشتی نمونه با هسته دوزنقه ای در راستای طولی آلومینیوم و در نمونه هسته مثلثی در راستای عرضی آلومینیوم است. همچنین از شکل ۹ و ۱۰ می توان مساحت ناحیه تخریب شده در قسمت جلویی و پشتی نمونه ها را بررسی کرد. با مقایسه سطح تخریب شده در پوسته جلویی و پشتی با سطح کل نمونه می توان نتیجه گرفت که جذب انرژی در پوسته پشتی نمونه ها بیشتر از پوسته جلویی آن ها است. این موضوع را می توان با مقایسه سطح آسیب دیده در قسمت جلویی و پشتی با سطح کل نمونه مشاهده کرد. هر چه منطقه آسیب دیده بزرگتر باشد، جذب انرژی بیشتر و از این رو مقاومت در برابر ضربه نیز بیشتر خواهد بود.

مساحت سطح تخریب در هر پوسته ی کامپوزیتی در جدول ۵ آورده شده است. همان طور که در جدول مشاهده می گردد، جذب انرژی در پوسته ی جلویی نمونه هسته دوزنقه ای بیشتر از نمونه هسته مثلثی است. هم چنین جذب انرژی در پوسته پشتی نمونه هسته مثلثی بیشتر از نمونه هسته دوزنقه ای است.

جدول ۵. مقادیر مساحت سطح تخریب

نمونه	سطح تخریب شده در پوسته جلویی	سطح تخریب شده در پوسته پشتی
هسته دوزنقه‌ای	7.86 cm^2	8.53 cm^2
هسته مثلثی	6.5 cm^2	8.65 cm^2

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر شکل هسته بر میزان جذب انرژی توسط ساندویچ پنل با هسته موج‌دار آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی بررسی شد. هم‌چنین سرعت حد بالستیک به دست آمد. با مشاهده‌ی آزمایش‌های انجام شده روی سازه ساندویچی، مکانیزم‌های تخریب برای پوسته‌ها و هسته ساندویچ پنل بررسی گردید، به طوری که مکانیزم شکست در پوسته‌های کامپوزیتی جلویی بصورت شکست الیاف و ترک ماتریس، برای هسته موج‌دار به صورت پارگی به شکل گلبرگی و در پوسته کامپوزیتی پشتی بصورت شکست الیاف و ماتریس می‌باشد. شکل سطح تخریب در رویه پشتی نمونه با هسته دوزنقه‌ای، بصورت دایره‌ای و در رویه پشتی نمونه با هسته مثلثی بصورت بیضی است و رشد ترک در ماتریس و الیاف در راستای موج هسته آلومینیومی است.

همچنین با بررسی آزمایش‌های بالستیک نتایج زیر حاصل شد.

۱. تغییر شکل هسته ساندویچ پنل از دوزنقه‌ای به مثلثی باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود. جذب انرژی در نمونه با هسته دوزنقه‌ای برابر $117/2$ ژول و در نمونه با هسته مثلثی برابر با $137/6$ ژول است.
۲. تغییر شکل هسته ساندویچ پنل از دوزنقه‌ای به مثلثی باعث کاهش سرعت خروجی ضربه زننده می‌شود. سرعت خروجی ضربه زننده در نمونه با هسته دوزنقه‌ای برابر 74 متر بر ثانیه و در نمونه با هسته مثلثی برابر 63 متر بر ثانیه است.
۳. سرعت حد مورد نیاز برای عبور کامل ضربه زننده با تغییر شکل هسته ساندویچ پنل از هسته دوزنقه‌ای به هسته مثلثی افزایش می‌یابد.
- ۴.

مراجع

- [1] Li, Z., Chen, W. and Hao, H., "Numerical Study of Sandwich Panel with a New Bi-Directional Load-Self-Cancelling (Lsc) Core under Blast Loading", *Thin-Walled Structures*, Vol. 127, pp. 90-101, 2018.
- [2] Wang, Z., "Recent Advances in Novel Metallic Honeycomb Structure", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 166, pp. 731-741, 2019.
- [3] Heimbs, S., P. Middendorf, C. Hampf, F. Hähnel, and K. Wolf. "Aircraft sandwich structures with folded core under impact load", In *Proc. of the 8th International Conference on Sandwich Structures, ICSS8, Porto, Portugal. 2008.*
- [4] Jing, L. and Zhao, L., "Blast Resistance and Energy Absorption of Sandwich Panels with Layered Gradient Metallic Foam Cores", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 464-482, 2019.

- [5] Tipping, S., and B. Stojadinovic, "Innovative corrugated steel shear walls for multi-story residential buildings", In The 14th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 12-17. 2008.
- [6] Cleveland, M., "Acoustically Damped Composite Construction for the Forward Portion of a Rocket or Missile", Google Patents, No.10/668,147, 2005.
- [7] Mohiyuddin, C., Jayalakshmi, R. and Manjunath, H., "A Study on Behavior of Sandwich Panels under Impact Loads", SSRG International Journal of Civil Engineering, pp. 89-95, 2015.
- [8] Bartolozzi, G., Pierini, M., Orrenius, U. and Baldanzini, N., "An Equivalent Material Formulation for Sinusoidal Corrugated Cores of Structural Sandwich Panels", Composite Structures, Vol. 100, pp. 173-185, 2013.
- [9] Chang, Wan-Shu, et al. "Bending behavior of corrugated-core sandwich plates." Composite structures 70.1 (2005): 81-89.
- [10] Magnucki, Krzysztof, et al. "Strength and buckling of sandwich beams with corrugated core." Journal of theoretical and applied mechanics 51.1 (2013): 15-24.
- [11] Cheon, Young-Jo, and Hyun-Gyu Kim. "An equivalent plate model for corrugated-core sandwich panels." Journal of Mechanical Science and Technology 29.3 (2015): 1217-1223.
- [12] Y. S. Tian and T. J. Lu, "Optimal design of compression corrugated panels," Thin-Walled Structures, vol. 43, pp. 477-498, (2005).
- [13] S. Hou, S. Zhao, L. Ren, X. Han, and Q. Li, "Crashworthiness optimization of corrugated sandwich panels," Materials & Design, vol. 51, pp. 1071-1084, (2013).
- [14] Yahaya M.A., Ruan D., Lu G., Dargusch M.S., "Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact - An experimental study," Int. J. Impact Eng., Vol. 75, pp. 100-109, 2015.
- [15] Nurick G.N., Langdon G.S., Chi Y., Jacob N., "Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast - Part 1: Experiments," Compos. Struct., Vol. 91, No. 4, pp. 433-441, 2009.
- [16] Rejab M.R.M., Cantwell W.J., "The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels," Compos. Part B Eng., Vol. 47, pp. 267-277, 2013.
- [17] Rejab M. R. M., Bachtiar D., Siregar J. P., Paruka P., Fadzullah S. H. S. M., Zhang B., and Cantwell W. J., "The Mechanical Behavior of Foam-filled Corrugated Core Sandwich Panels in Lateral Compression," in American Society for Composites Thirty-First Technical Conference, 2016.
- [18] Mat Rejab M.R., Zaid N.Z.M., Siregar J.P., Bachtiar D., "Scaling Effects for Compression Loaded of Corrugated-Core Sandwich Panels," Adv. Mater. Res., Vol. 1133, pp. 241-245, 2016.
- [19] Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Jusoh A.F., Bachtiar D., Siregar J.P., Dian Z., "Fracture Behaviours in Compression-loaded Triangular Corrugated Core Sandwich Panels," Vol. 01041, 2016.
- [20] Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Jusoh A.F., Bachtiar D., Siregar J.P., "Effect of varying geometrical parameters of trapezoidal corrugatedcore sandwich structure," Vol. 01018, 2017.
- [21] Khalili SMR, Soroush M, Davar A, Rahmani O. Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite plates and cylindrical shells. ComposStruct 2011;93:1363-75.
- [22] Kiliçaslan C., Güden M., Odaci I.K., Taşdemirci A., "The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures," Mater. Des., Vol. 46, pp. 121-133, 2013.
- [23] Kiliçaslan C., Güden M., Odaci I.K., Taşdemirci A., "Experimental and numerical studies on the quasi-static and dynamic crushing responses of multi-layer trapezoidal aluminum corrugated sandwiches," Thin-Walled Struct., Vol. 78, pp. 70-78, 2014.
- [24] Kılıçaslan C., Odac I.K., Taşdemirci A., Güden M. "Experimental testing and full and homogenized numerical models of the low velocity and dynamic deformation of the trapezoidal aluminium corrugated core sandwich," Strain, Vol. 50, No. 3, pp. 236-249, 2014.
- [25] Wadley H.N.G., Borvik T., Olovsson L., "Deformation and fracture of impulsively loaded sandwich panels," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 61, No. 2, pp. 674-699, 2013.

- [26] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 15.03, D 3039, 2014.
- [27] Standard AS. B557-06, “Standard Test Methods for Tension Testing Wrought & Cast Aluminum-and Magnesium-Alloy Products”, Annual Book of ASTM Standards. 2010; 2.
- [28] Langdon, G., Chi, Y., Nurick, G. and Haupt, P., “Response of Glare© Panels to Blast Loading”, Engineering Structures, Vol. 31, No. 12, pp. 3116-3120, 2009.