

انتخاب بهینه شکل و مصالح پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار در برابر بارهای انفجاری

سهیل سبزواری^۱، فرزاد شهابیان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

همواره بررسی رفتار سازه‌های مختلف در برابر اثرات بارهای ناشی از انفجار یکی از عوامل مهم مورد بررسی می‌باشد. پانل‌های ساندویچی دارای کاربردهای وسیعی در انواع حوزه‌های مهندسی و ساخت برخی سازه‌های صنعتی و نظامی هستند. این پانل‌ها از دو ورق و یک سازه میانی به عنوان هسته پانل تشکیل شده‌اند. هسته پانل در کاهش تغییرشکل و افزایش توانایی استهلاک انرژی سازه نقش به سزایی دارد. در این پژوهش، به بررسی تاثیر شکل هسته موجدار پانل و نوع مصالح پانل پرداخته شده است. از این رو، رفتار پانل‌های ساندویچی از جنس آلومینیم و فولاد در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند تحلیل، چهار نوع ورق موجدار مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و بیضوی برای هسته پانل‌ها در نظر گرفته شده است. بیشترین تغییرشکل در پانل‌ها، متعلق به هسته مثلثی است. پانل با هسته دوزنقه‌ای کمترین تغییرشکل را دارد. پانل‌هایی که تماما از جنس آلومینیم می‌باشند نسبت به نمونه‌های دیگر، انرژی بیشتری مستهلک کرده‌اند. پانل‌هایی که فقط ورق‌های آن‌ها از جنس آلومینیم است و پانل‌هایی که فقط هسته آن‌ها از جنس آلومینیم می‌باشد، به ترتیب در مرتبه بعدی استهلاک انرژی قرار می‌گیرند. در بررسی تاثیر توام نوع مصالح و شکل هسته پانل، پانل با ورق‌های رویی و پستی فولادی و هسته آلومینیمی با شکل مثلثی مطلوب‌ترین عملکرد را دارد.

کلمات کلیدی: انفجار، پانل ساندویچی، هسته موجدار، استهلاک انرژی، تغییر شکل پیشینه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.126299.1531	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2018.126299.1531	۱۳۹۷/۰۶/۳۰	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۵/۱۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۸	۱۳۹۷/۰۱/۲۹
				*نویسنده مسئول:		فرزاد شهابیان
				پست الکترونیکی:		shahabf@um.ac.ir

Optimum Selection of Corrugated Sandwich Panels Shape and Materials Subjected to Blast Loading

Soheil Sabzevari¹, Farzad Shahabian^{2*}

1- PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT

The behavior of different structures subjected to blast loads is always an important factor to study. Sandwich panels have a wide range of applications in different fields of engineering and the construction of some industrial and military structures. These panels are made of two sheets and an intermediate core. The core has a significant role in reducing the deflection and enhancing energy absorb of structure. In this article, the effect of the shape of the corrugated panel and the type of panel materials is investigated. Hence, the reaction of aluminum and steel sandwich panels subjected to blast loads has been investigated. In the process of analysis, four kinds of profiles, which are: rectangular, trapezoidal, triangular and elliptical, are considered as panel cores. the most deflection was for rectangular profiles and the least deflection was for triangular ones. Those panels which are completely made of aluminum or the panels with steel cores can sustain more strain energy by their back sheets. all the panels that are completely made of aluminum have more damped energy than others. Those panels which have only aluminum sheets or aluminum cores are placed next to whole aluminum panels in order to damped energy level. In the study of the joint effect of the type of materials and the shape of the core panel, the panel with the upper and back of the steel and aluminum core with the triangular shape has the most desirable.

ARTICLE INFO

Received: 18/04/2018

Revised: 09/07/2018

Accepted: 07/08/2018

Keywords:

Blast Loading

Sandwich Panel

Corrugated Core

Damped Energy

Maximum Deflection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.126299.1531

*Corresponding author: Farzad Shahabian.

Email address: shahabf@um.ac.ir

۱- مقدمه

پانل‌های ساندویچی به دلیل مزیت‌های زیاد از جمله چگالی پایین، قابلیت جذب انرژی بالا و تغییرشکل کم به طور گسترده در بسیاری از سازه‌های هوا-فضا، دریایی و سیستم‌های حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گذشته از ورق‌های فلزی معمولی در این گونه سازه‌ها استفاده می‌شد. این ورق‌ها دارای ظرفیت تغییرشکل و جذب انرژی کمی بودند و به راحتی در برابر بارهای انفجاری که شدت زیادی دارند، تغییرشکل قابل توجهی را از خود نشان می‌دادند. در بررسی رفتار سازه‌های ساخته شده از ورق، تغییرشکل خارج صفحه آن اهمیت زیادی دارد [۱، ۲]. محققان به دنبال پژوهش در این زمینه، استفاده از پانل‌های ساندویچی را مورد مطالعه قرار دادند. این پانل‌ها از یک ورق رویی، یک ورق پشت و یک سازه میانی تشکیل شده‌اند. پژوهش‌ها بر روی رفتار پانل‌ها، به نوع مصالح و هندسه هسته پانل معطوف شده است. هرچه میزان کاهش تغییر شکل پانل کمتر و میزان انرژی جذب شده در حین انفجار بیش‌تر باشد، عملکرد پانل بهتر می‌باشد.

پانل‌های ساندویچی، سازه‌هایی هستند که توانایی استهلاک انرژی در تغییرشکل‌های بزرگ و مومسان را در اثر بارهای انفجاری دارند. در این زمینه، در دهه‌های اخیر، بسیاری از محققان بر روی رفتار مکانیکی-دینامیکی این پانل‌ها، متمرکز شده‌اند. تعدادی از آن‌ها برای اولین بار، یک مدل صلب-مومسان را برای تحلیل مقاومت انفجار در تیرهای ساندویچی، ارائه دادند. رفتار استاتیکی و دینامیکی پانل‌ها با خصوصیات مختلف توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفته است.

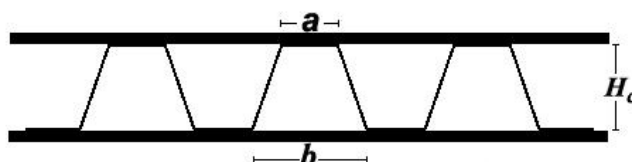
فلک [۳] و کو [۴] رفتار تیرهای پانلی را به صورت تحلیلی با استفاده از رفتار کشسان-مومسان کامل، تحت اثر اندرکنش سیال و سازه، بررسی نمودند. جان این تیرها به صورت پانلی و با استفاده از مصالح فلزی مسلح شده بود. هوچینسون [۵] و ژو [۶، ۷] ابتدا رفتار ورق‌های معمولی فولادی را مورد بررسی قرار داده و سپس رفتار پانل‌های فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. رفتار پانل‌های فولادی به مراتب در کاهش تغییرشکل‌ها و افزایش جذب انرژی از ورق‌های معمولی بیش‌تر بود. نوریک و همکاران [۸] با استفاده از آزمایش به بررسی رفتار پانل‌های فولادی با هسته‌ی مشبک پرداختند. آن‌ها مودهای خرابی ورق رویی، ورق پشتی و سازه میانی را مورد بررسی قرار دادند. ابراهیمی و وزیری [۹] رابطه‌هایی تجربی به منظور پیش‌بینی مقدار تغییرشکل و حالت خرابی ورق‌های معمولی و پانل‌های مستطیلی، در برابر بارهای ضربه‌ای، ارائه نمودند. در بررسی رفتار سازه‌های صفحه‌گونه استفاده از سیستم یک درجه آزادی معادل غیرخطی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. با استفاده از این سیستم یک درجه آزادی، مقدار تغییرشکل و مودهای خرابی صفحه‌ها را پیش‌بینی می‌نمایند. لی و همکاران [۱۰] یک پانل ساندویچی مربع شکل با هسته لانه زنبوری شش گوشه آلومینیمی را در معرض بارهای انفجاری قرار دادند. در این آزمایش، ارتفاع و طول‌های متفاوتی از سلول‌ها در هسته لانه زنبوری در نظر گرفته شد. بارگذاری ضربه بر روی پانل‌ها با استفاده از تاریخچه جابجایی آونگ بالستیک محاسبه شد. یازیکی و همکاران [۱۱]، به بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی موجدار با هسته فومی در اثر انفجار پرداختند. مطالعه آن‌ها هم به طور تجربی با استفاده از لوله شوک و عکس برداری با سرعت بالا و هم‌چنین به طور عددی از طریق روش اجزای محدود (FEM) انجام گردید. شن و همکاران [۱۲] به صورت آزمایشگاهی به بررسی پوسته‌های مرکب با ورق‌های فلزی تحت اثر بار انفجاری پرداختند. ورق‌های رویی و پشتی پوسته از آلومینیم و هسته آن از جنس فوم آلومینیم انتخاب شده بود. جینگ و همکاران [۱۳] به صورت عددی به بررسی رفتار پوسته‌های مرکب فلزی تحت اثر بار انفجاری پرداختند.

در این پژوهش تاثیر شکل و نوع مصالح پانل‌های کنگره‌ای در برابر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS [۱۴] انجام شد و از مدل غیرخطی جانسون-کوک برای مصالح استفاده گردید. عوامل متغیر در تحلیل مدل‌های مورد بررسی، شکل هسته پانل‌ها و نوع مصالح ورق‌های رویی، پشت و هسته پانل می‌باشند.

۲- صحت‌سنجی و مدل‌سازی

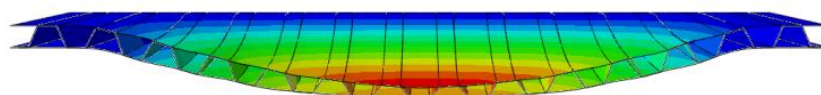
در این پژوهش از نرم‌افزار ABAQUS به منظور مطالعه عددی استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل، یک نمونه از پانل‌های آزمایش شده در مرجع [۱۵] مدل‌سازی گردیده است. پانل آزمایش شده، دارای ابعاد 300×300 میلی‌متر است. هسته این پانل دارای ارتفاع (H_c) برابر ۸ میلی‌متر، عرض بالای کنگره (a) ۷ میلی‌متر و عرض پایین (b) ۱۴ میلی‌متر می‌باشد. جنس این پانل

از آلومینیم Al-1200H18 است که ضریب الاستیسیته آن ۷۰ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۱۴۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳۳ و چگالی ۲۷۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. مدل تنش- کرنش مصالح، جانسون- کوک انتخاب شده است. مقدار ماده منفجره ۱۵ گرم در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری ورق رویی پانل بوده است. مشخصات هندسی این پانل در شکل ۱ نشان داده شده است. ضخامت ورق‌های رویی و پشت به انفجار پانل، ۰/۸ میلی‌متر و ضخامت هسته پانل برابر ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در صحت‌سنجی تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار مدل شده است. در تحلیل عددی اباکوس، از جزء S4R برای مدل‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. در هر صفحه تعداد ۹۹۴۹ جزء ایجاد شده، که در کل پانل تعداد ۳۶۶۴۸ جزء استفاده شده است. در کل پانل ۳۷۳۵۰ گره وجود دارد. به منظور تحلیل انفجاری پانل مورد بررسی، در مسائل ضربه و انفجار از معادله‌های تنش- کرنش جانسون- کوک که با دما، نرخ کرنش و سخت‌شوندگی مرتبط هستند، استفاده شده است.

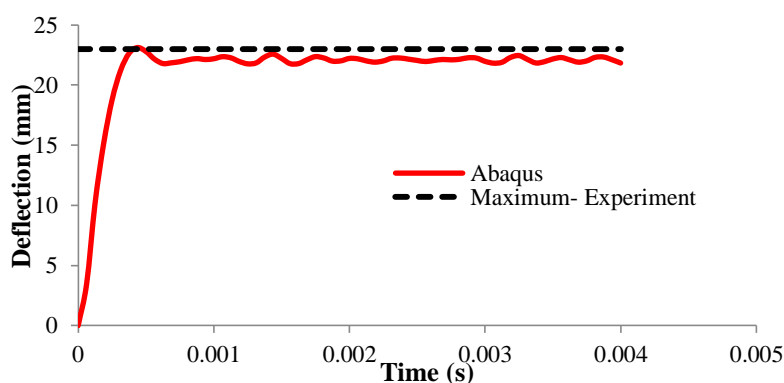


شکل ۱: شکل هندسی پانل کنگره‌ای مورد استفاده برای صحت‌سنجی و پارامترهای هندسی آن [۱۵].

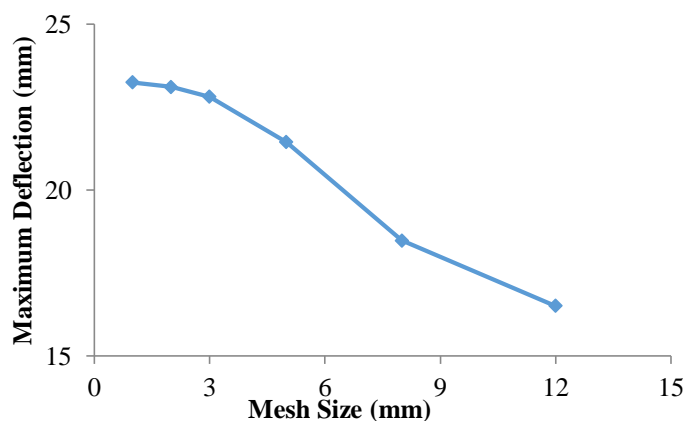
در شکل ۲ تغییر شکل پانل مدل شده بعد از فرآیند تحلیل، مشاهده می‌گردد. در شکل ۳ نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه تغییر شکل مرکز ورق پشتی پانل در آزمایش و تحلیل عددی تقریباً یکسان است. مقدار پاسخ به ابعاد شبکه‌بندی وابسته است. نتایج تحلیل نشان داد که ابعاد شبکه 3mm×3mm مناسب می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۲: تغییر شکل پانل بعد از فرآیند تحلیل.



شکل ۳: مقایسه نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار و آزمایش.



شکل ۴: حساسیت تغییر شکل مدل صحت سنجی به ابعاد شبکه بندی.

۳- معرفی مدل های مورد بررسی

مدل های مورد بررسی، از لحاظ شکل هسته و نوع مصالح ورق های رویی، پشت و هسته پانل ها با یکدیگر اختلاف دارند. برای بررسی اثر نوع مصالح بر رفتار پانل های ساندویچی کنگره ای، از دو نوع مصالح آلومینیم (AL) و فولاد (ST) در مدل سازی نمونه ها استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول ۱ آورده شده است.

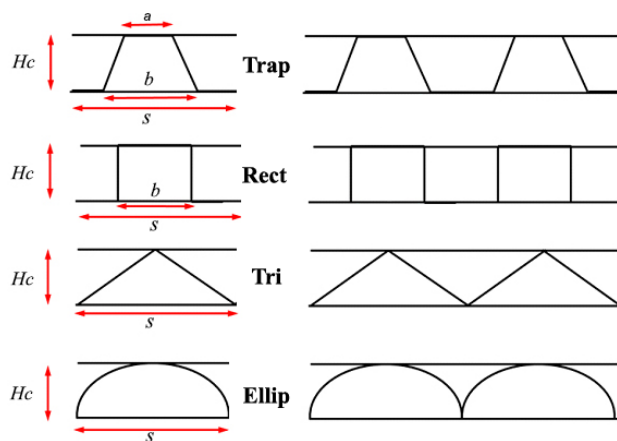
جدول ۱: پارامترهای مربوط به مصالح فولاد و آلومینیم [۱۶، ۱۷].

	Yield Stress		Strain Hardening		Strain Rate		Temperature Softening		
	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)	T_r (K)	T_m (K)	m	
Al-1200H18	110	150	0.36	0.014	1×10 ⁻³	293	918	1.0	
Weldox 460 E Steel	490	383	0.45	0.0114	1×10 ⁻³	293	1800	0.94	

مشخصات هندسی نمونه های مورد بررسی در این مقاله در جدول ۲ و شکل ۵ آورده شده است. برای کلیه نمونه ها ارتفاع هسته پانل (Hc) برابر ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. مقدار ضخامت ورق های رویی و پشتی نیز یکسان و برابر ۰/۸ میلی متر می باشد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، حجم مصالح به کار رفته در هسته پانل ها برابر در نظر گرفته شده است. از این رو مقدار ضخامت هسته با توجه به این نکته، اصلاح شده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی نمونه‌های مورد بررسی.

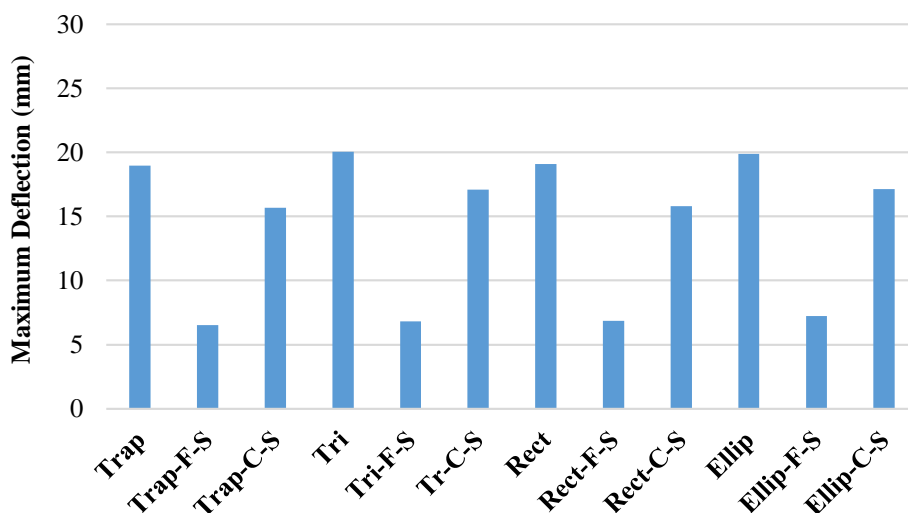
نمونه	a (mm)	b (mm)	s (mm)	H_c (mm)	ضخامت هسته (tc)	مصالح ورق رویی و پشت	مصالح هسته
Rect	-	۱۰/۵	۲۱	۸	۰/۲۰	AL	AL
Rect-F-S	-	۱۰/۵	۲۱	۸	۰/۲۰	ST	AL
Rect-C-S	-	۱۰/۵	۲۱	۸	۰/۲۰	AL	ST
Ellip	-	-	۲۱	۸	۰/۲۴	AL	AL
Ellip-F-S	-	-	۲۱	۸	۰/۲۴	ST	AL
Ellip-C-S	-	-	۲۱	۸	۰/۲۴	AL	ST
Trap	۷	۱۴	۲۱	۸	۰/۱۷	AL	AL
Trap-F-S	۷	۱۴	۲۱	۸	۰/۱۷	ST	AL
Trap-C-S	۷	۱۴	۲۱	۸	۰/۱۷	AL	ST
Tri	-	-	۲۱	۸	۰/۲۶	AL	AL
Tri-F-S	-	-	۲۱	۸	۰/۲۶	ST	AL
Tri-C-S	-	-	۲۱	۸	۰/۲۶	AL	ST



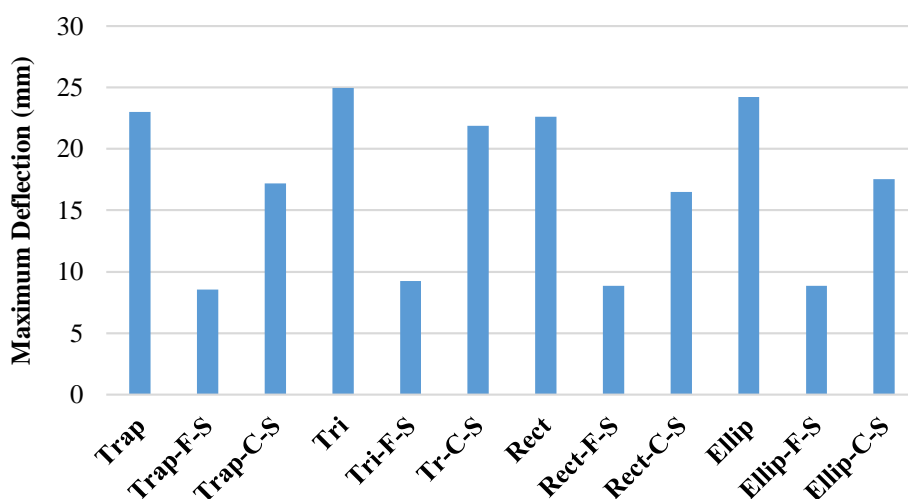
شکل ۵: مدل‌های مورد بررسی در تحلیل.

۳- تفسیر نتایج

بیشینه تغییر شکل پانل‌ها پس از فرآیند تحلیل، در شکل ۶ و ۷ برای ورق‌های رویی و پشتی پانل نشان داده شده است.



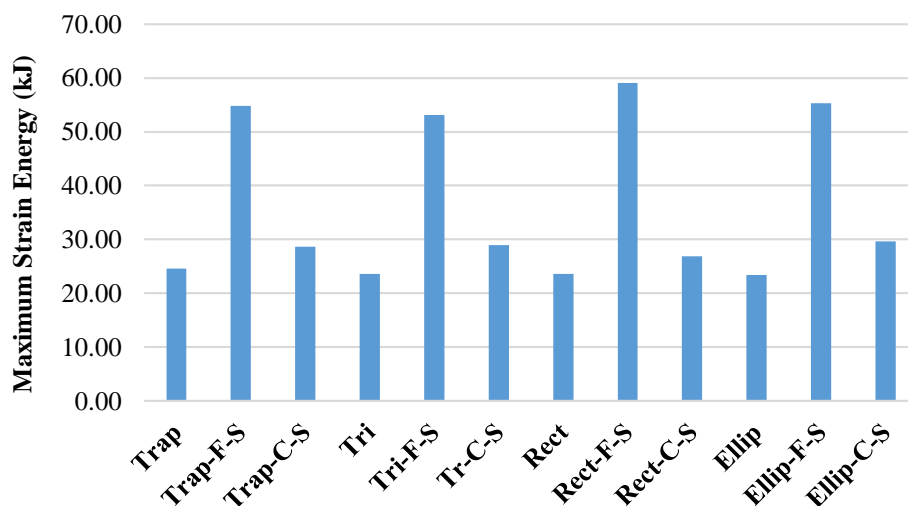
شکل ۶: بیشینه تغییر شکل ورق پشتی پانل‌های با مصالح مختلف.



شکل ۷: بیشینه تغییر شکل ورق رویی پانل‌های با مصالح مختلف.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در پانل‌هایی که جنس ورق‌های آن از فولاد می‌باشد دارای کمترین تغییر شکل و پانل‌هایی که تمام مصالح آن‌ها از آلومینیم است دارای بیش‌ترین تغییر شکل می‌باشند. پانل‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است دارای تغییر شکلی بین این دو حالت می‌باشند. در حالت مصالح یکسان، پروفیل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای کمترین تغییر شکل را دارند. با تغییر مصالح ورق‌های رویی و پشتی از آلومینیم به فولاد، مقدار تغییر شکل حدود ۶۰٪ و با تغییر مصالح هسته از آلومینیم به فولاد، مقدار تغییر شکل حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد.

در ادامه، مقدار انرژی ذخیره و مستهلک شده در پانل و جزءهای آن بررسی می‌شود. در واقع این انرژی‌ها نشان‌دهنده مقدار سطح زیر منحنی تنش- کرنش در منطقه کشسان و مومسان پانل است. در شکل ۸ مقدار بیشینه انرژی کرنشی کشسان برای کل پانل و تمام نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۸: مقدار بیشینه انرژی کرنشی کشسان ذخیره شده در کل پانل برای تمام نمونه‌ها.

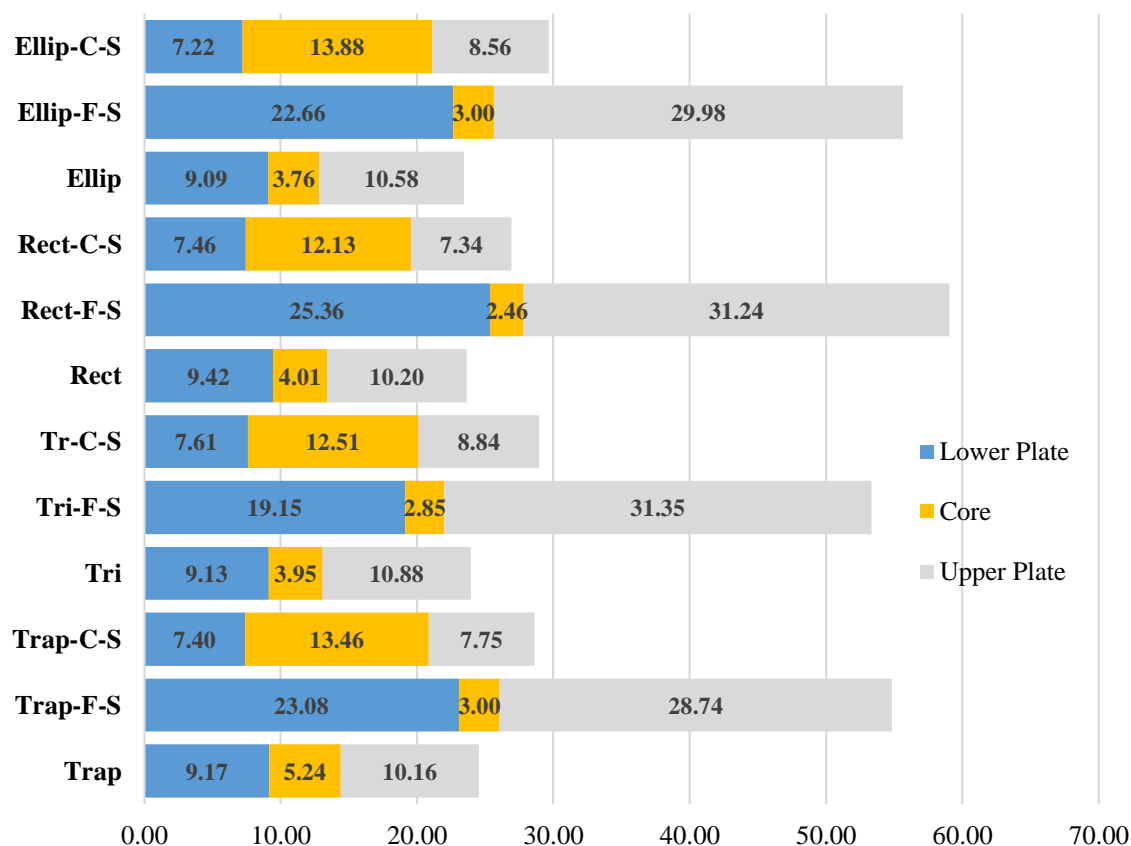
جدول ۳: مقدار بیشینه انرژی کرنشی کشسان برای پانل، ورق پستی، هسته و ورق رویی.

نمونه	کل پانل ساندویچی	ورق پستی	سهم از کل پانل (%)	هسته	سهم از کل پانل (%)	ورق رویی	سهم از کل پانل (%)
Trap	۲۴/۵۶	۹/۱۷	۳۷/۳۴	۵/۲۳	۲۱/۳۲	۱۰/۷۰	۴۱/۳۵
Trap-F-S	۵۴/۸۲	۲۳/۰۸	۴۲/۱۰	۳/۰۰	۵/۴۸	۲۸/۷۴	۵۲/۴۲
Trap-C-S	۲۸/۶۲	۷/۴۰	۲۵/۸۷	۱۳/۴۷	۴۷/۰۴	۷/۷۵	۲۷/۰۹
Tri	۲۳/۵۷	۹/۱۲	۳۸/۷۵	۳/۹۵	۱۶/۷۶	۱۰/۸۸	۴۶/۱۵
Tri-F-S	۵۳/۱۰	۱۹/۱۵	۳۶/۰۷	۲/۸۵	۵/۳۷	۳۱/۳۵	۵۹/۰۵
Tri-C-S	۲۸/۹۵	۷/۶۰	۲۶/۲۷	۱۲/۵۰	۴۳/۱۹	۸/۸۴	۳۰/۵۴
Rect	۲۳/۶۳	۹/۴۲	۳۹/۸۸	۴/۰۰	۱۶/۹۷	۱۰/۱۹	۴۳/۱۵
Rect-F-S	۵۹/۰۵	۲۵/۳۶	۴۲/۹۴	۲/۴۵	۴/۱۶	۳۱/۲۳	۵۲/۹۰
Rect-C-S	۲۶/۹۲	۷/۴۵	۲۷/۶۹	۱۲/۱۲	۴۵/۰۴	۷/۳۴	۲۷/۲۷
Ellip	۲۳/۴۳	۹/۰۸	۳۸/۷۸	۳/۷۶	۱۶/۰۵	۱۰/۵۹	۴۵/۱۷
Ellip-F-S	۵۵/۲۸	۲۲/۶۶	۴۰/۹۹	۳/۰۰	۵/۴۳	۲۹/۹۷	۵۴/۲۲
Ellip-C-S	۲۹/۶۷	۷/۲۲	۲۴/۳۵	۱۳/۸۷	۴۶/۷۸	۸/۵۶	۲۸/۸۶

همان‌طور که دیده می‌شود، در پانل‌هایی که کلیه جزء‌های آن‌ها از آلومینیم است، انرژی کرنشی کشسان کمتری ذخیره و مستهلک می‌گردد. در نمونه‌هایی که ورق رویی و پستی از فولاد است، انرژی ذخیره شده خیلی بیش‌تر از پانل‌های دیگر می‌باشد و این تفاوت زیاد است. در نمونه‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است، انرژی ذخیره شده در آن‌ها کمی بیشتر از پانل‌های تمام آلومینیمی می‌باشد. در جدول ۳ مقدار انرژی کرنشی کشسان بیشینه برای پانل، ورق پستی، هسته و ورق رویی آورده شده است.

در لحظه‌های ابتدایی که انرژی موج به پانل برخورد می‌کند، انرژی کرنشی کشسان به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. بعد از آن مقدار انرژی کاهش می‌یابد و در مقدار ثابتی نوسان می‌کند. در پانل‌هایی که کلیه جزء‌های آن‌ها از آلومینیم است، انرژی کرنشی کشسان ورق رویی و پستی از هسته بیش‌تر است و انرژی بیش‌تری در آن‌ها ذخیره می‌گردد. در نمونه‌هایی که ورق رویی و پستی از فولاد است، انرژی ذخیره شده در ورق‌های رویی و پستی خیلی بیش‌تر از هسته می‌باشد و این تفاوت زیاد است. در نمونه‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است، انرژی ذخیره شده در هسته بیش‌تر از ورق‌های رویی و پستی می‌باشد.

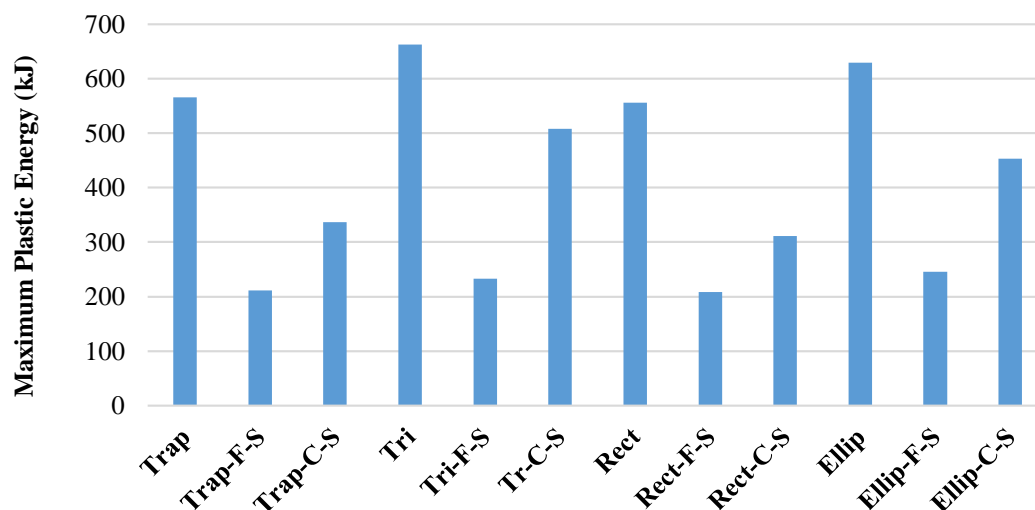
در شکل ۹ مقدار بیشینه انرژی کرنشی کشسان برای جزءهای پانل به صورت مجزا نشان داده می‌شود.



شکل ۹: مقدار بیشینه انرژی کرنشی کشسان ذخیره شده در جزءهای پانل برای تمام نمونه‌ها.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، در پانل‌هایی که ورق‌های رویی و پشتی آن‌ها از فولاد است، مقدار انرژی بیشتری در این ورق‌ها نسبت به هسته وجود دارد، یعنی ورق‌های رویی و پشتی دارای کرنش‌های مومسان کمتر بوده و در نتیجه رفتار کشسان بیشتری دارند. در پانل‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است، کرنش‌های کشسان هسته بیش‌تر از سایر جزءها می‌باشد، یعنی هسته دچار تغییرشکل‌های مومسان کمتری شده است.

در شکل ۱۰ مقدار بیشینه انرژی کرنشی مومسان برای تمام نمونه‌ها آورده شده است.



شکل ۱۰: مقدار بیشینه انرژی کرنش مومسان ذخیره شده در کل پانل برای تمام نمونه‌ها.

همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، مقدار انرژی کرنشی مومسان در پانل‌هایی که تماماً از آلومینیم ساخته شده‌اند، از سایر نمونه‌ها بیش‌تر است. در عوض در پانل‌هایی که ورق‌های رویی و پشتی آن‌ها از فولاد است، انرژی کرنشی مومسان کمتری ایجاد شده است. همچنین در نمونه‌هایی که تنها هسته آن‌ها از فولاد است، رفتار انرژی آن‌ها بهبود یافته است ولی کمتر از پانل با اجزای ساخته شده از آلومینیم است.

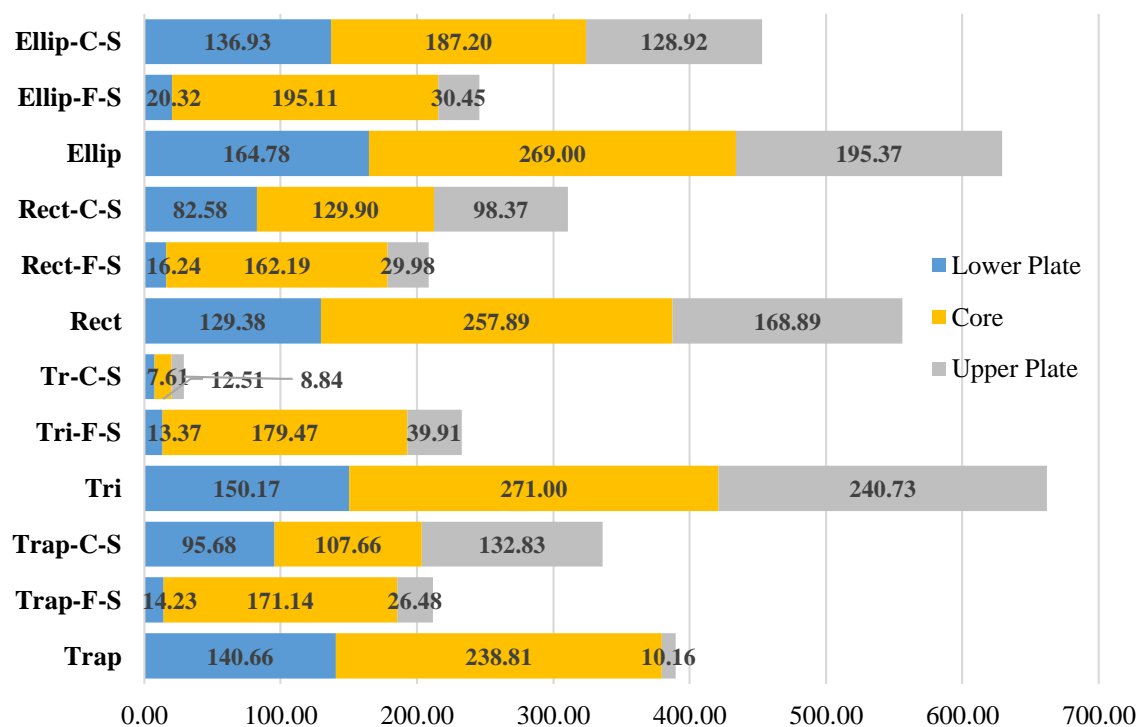
در کلیه نمونه‌ها با وارد شدن بار انفجاری، مقدار انرژی کرنشی مومسان افزایش یافته و در مقدار ثابتی قرار می‌گیرد. در پانل‌های ساندویچی، هسته با کرنش مومسان و چروکیدگی، انرژی ناشی از بارهای انفجاری را مستهلک می‌نماید و انرژی کمتری به ورق پشتی پانل می‌رسد.

در جدول ۴ مقدار انرژی کرنشی مومسان بیشینه برای پانل، ورق پشتی، هسته و ورق رویی آورده شده است.

جدول ۴: بیشینه انرژی کرنشی مومسان برای پانل، ورق پشتی، هسته و ورق رویی.

نمونه	کل پانل ساندویچی	ورق پشتی	سهم از کل پانل (%)	هسته	سهم از کل پانل (%)	ورق رویی	سهم از کل پانل (%)
Trap	۵۶۵/۱۷	۱۴۰/۶۶	۲۴/۸۹	۲۳۸/۸۱	۴۲/۲۵	۱۰/۱۶	۱/۸
Trap-F-S	۲۱۱/۸۵	۱۴/۲۳	۶/۷۲	۱۷۱/۱۴	۸۰/۷۸	۲۶/۴۸	۱۲/۵۰
Trap-C-S	۳۳۶/۱۸	۹۵/۶۸	۲۸/۴۶	۱۰۷/۶۶	۳۲/۰۳	۱۳۲/۸۳	۳۹/۵۱
Tri	۶۶۱/۹۰	۱۵۰/۱۷	۲۲/۶۹	۲۷۱/۰۰	۴۰/۹۴	۲۴۰/۷۳	۳۶/۳۷
Tri-F-S	۲۳۲/۷۴	۱۳/۳۷	۵/۷۵	۱۷۹/۴۷	۷۷/۱۱	۳۹/۹۱	۱۷/۱۵
Tri-C-S	۵۰۷/۹۰	۷/۶۱	۱/۵۰	۱۲/۵۱	۲/۴۶	۸/۸۴	۱/۷۴
Rect	۵۵۶/۱۶	۱۲۹/۳۸	۲۳/۲۶	۲۵۷/۸۹	۴۶/۳۷	۱۶۸/۸۹	۳۰/۳۷
Rect-F-S	۲۰۸/۴۱	۱۶/۲۴	۷/۷۹	۱۶۲/۱۹	۷۷/۸۲	۲۹/۹۸	۱۴/۳۸
Rect-C-S	۳۱۰/۸۵	۸۲/۵۸	۲۶/۵۷	۱۲۹/۹۰	۴۱/۷۹	۹۸/۳۷	۳۱/۶۵
Ellip	۶۲۹/۱۴	۱۶۴/۷۸	۲۶/۱۹	۲۶۹/۰۰	۴۲/۷۶	۱۹۵/۳۷	۳۱/۰۵
Ellip-F-S	۲۴۵/۸۸	۲۰/۳۲	۸/۲۷	۱۹۵/۱۱	۷۹/۳۵	۳۰/۴۵	۱۲/۳۸
Ellip-C-S	۴۵۳/۰۵	۱۳۶/۹۳	۳۰/۲۲	۱۸۷/۲۰	۴۱/۳۱	۱۲۸/۹۲	۲۸/۴۶

در شکل ۱۱ مقدار بیشینه انرژی کرنشی مومسان برای جزءهای پانل به صورت مجزا نشان داده می‌شود.



شکل ۱۱: مقدار بیشینه انرژی کرنش مومسان ذخیره شده در جزءهای پانل برای تمام نمونه‌ها.

همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، در نمونه‌هایی که از آلومینیم ساخته شده‌اند، بخش قابل توجهی از انرژی توسط هسته جذب و مستهلک می‌گردد. در نمونه‌هایی که ورق رویی و پشتی آن‌ها از فولاد است به دلیل مقاومت زیاد، دچار تغییرشکل‌های مومسان کمتری شده و در نتیجه انرژی کرنشی مومسان آن‌ها کمتر است.

در ادامه روند پژوهش، رفتار پانل‌ها با شکل‌ها و مصالح متفاوت، برای یافتن مطلوب‌ترین عملکرد در برابر بارهای انفجاری مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در روند تحلیل و بررسی پانل‌ها هرچه تغییرشکل ورق پشتی پانل کمتر باشد و از طرفی آن پانل بتواند انرژی کرنشی مومسان بیشتری را ذخیره و مستهلک نماید، از عملکرد مطلوب‌تری برخوردار است.

از این رو در جدول ۵ تغییرشکل بیشینه پانل‌های مورد بررسی به ترتیب افزایشی آورده شده است. همچنین بیشینه انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده در پانل‌ها به ترتیب کاهشی آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، نوع مصالح به کار رفته در پانل‌ها نقش بسزایی در کاهش تغییرشکل ورق پشتی و انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده پانل دارد به طوری که پانل‌های با ورق‌های رویی و پشتی فولادی کمترین تغییرشکل‌ها را دارند. از طرفی پانل‌های تمام آلومینیمی بیشترین انرژی را ذخیره و مستهلک می‌نمایند. همچنین مشاهده می‌گردد که در صورت مصالح یکسان شکل دوزنقه‌ای هسته موجدار پانل کمترین تغییرشکل را داراست.

بدین جهت برای پیشنهاد بهینه‌ترین پانل مدل شده، مطابق رابطه ۱ ضریبی معرفی شده است که از تقسیم بیشینه انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده برای کل پانل ساندویچی بر تغییرشکل بیشینه ورق پشت بدست می‌آید. با توجه به اینکه انتخاب مقطع بهینه با رویکرد کاهش تغییرشکل و افزایش انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده برای کل پانل ساندویچی است، هرچه این ضریب بیشتر باشد، پانل عملکرد مطلوب‌تری دارد.

جدول ۵: تغییر شکل بیشینه ورق پشت به ترتیب افزایشی و بیشینه انرژی کرنشی مومسان به ترتیب کاهشی برای پانل‌های مورد بررسی.

ردیف	نمونه	تغییر شکل بیشینه ورق پشت (mm)	نمونه	بیشینه انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده برای کل پانل ساندویچی (kJ)
۱	Trap-F-S	۶/۵۴	Tri	۶۶۱/۹۰
۲	Tri-F-S	۶/۸۱	Ellip	۶۲۹/۱۴
۳	Rect-F-S	۶/۸۵	Trap	۵۶۵/۱۷
۴	Ellip-F-S	۷/۲۳	Rect	۵۵۶/۱۶
۵	Trap-C-S	۱۵/۶۹	Tri-C-S	۵۰۷/۹۰
۶	Rect-C-S	۱۵/۸۱	Ellip-C-S	۴۵۳/۰۵
۷	Tri-C-S	۱۷/۰۹	Trap-C-S	۳۳۶/۱۸
۸	Ellip-C-S	۱۷/۱۱	Rect-C-S	۳۱۰/۸۵
۹	Trap	۱۸/۹۵	Ellip-F-S	۲۴۵/۸۸
۱۰	Rect	۱۹/۰۸	Tri-F-S	۲۳۲/۷۴
۱۱	Ellip	۱۹/۸۹	Trap-F-S	۲۱۱/۸۵
۱۲	Tri	۲۰/۰۶	Rect-F-S	۲۰۸/۴۱

$$\alpha = \frac{\text{بیشینه انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده برای کل پانل}}{\text{تغییر شکل بیشینه ورق پشت}} \quad (۱)$$

در جدول ۶ ضریب معرفی شده برای تمامی نمونه‌ها برای انتخاب بهترین پانل آورده شده است.

جدول ۶: محاسبه ضریب عملکرد برای تمامی نمونه‌ها.

نمونه	مشخصات نمونه	تغییر شکل بیشینه ورق پشت (mm)	بیشینه انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده برای کل پانل ساندویچی (kJ)	ضریب عملکرد α
Trap	تمام آلومینیومی	۱۸/۹۵	۵۶۵/۱۷	۲۹/۸۲۴۲
Rect	تمام آلومینیومی	۱۹/۰۸	۵۵۶/۱۶	۲۹/۱۴۸۸
Tri	تمام آلومینیومی	۲۰/۰۶	۶۶۱/۹۰	۳۲/۹۹۶۰
Ellip	تمام آلومینیومی	۱۹/۸۹	۶۲۹/۱۴	۳۱/۶۱۵۰
Trap-C-S	هسته فولادی	۱۵/۶۹	۳۳۶/۱۸	۲۱/۴۲۶۳
Rect-C-S	هسته فولادی	۱۵/۸۱	۳۱۰/۸۵	۱۹/۶۶۱۶
Tri-C-S	هسته فولادی	۱۷/۰۹	۵۰۷/۹۰	۲۹/۶۷۱۷
Ellip-C-S	هسته فولادی	۱۷/۱۱	۴۵۳/۰۵	۲۶/۴۷۸۶
Trap-F-S	ورق‌ها فولادی	۶/۵۴	۲۱۱/۸۵	۳۲/۳۹۲۹
Rect-F-S	ورق‌ها فولادی	۶/۸۵	۲۰۸/۴۱	۳۰/۴۲۴۸
Tri-F-S	ورق‌ها فولادی	۶/۸۱	۲۳۲/۷۴	۳۴/۱۷۶۲
Ellip-F-S	ورق‌ها فولادی	۷/۲۳	۲۴۵/۸۸	۳۴/۰۰۸۳

همانطور که مشاهده می‌گردد، پانلی که ورق‌های آن فولادی بوده و هسته موجدار آن به شکل مثلثی است (Tri-F-S)، ضریب عملکرد بیشتری داشته و در نتیجه بهینه‌تر از سایر پانل‌ها است. از طرفی پانل‌هایی که هسته آن‌ها فولادی بوده و ورق آلومینیومی دارند عملکرد مطلوبی در برابر بارهای انفجاری ندارند. به صورت کلی، برای انتخاب پانل مورد نظر می‌توان با بهره‌گیری از جدول‌های ۵ و ۶ پانل بهینه را برای برآورده کردن کم‌ترین تغییر شکل ورق پشتی یا بیشترین انرژی کرنشی مومسان ذخیره و مستهلک شده انتخاب نمود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته موجدار تحت اثر بارهای انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی اثر شکل مقطع هسته پانل، جنس مصالح هسته، ورق رویی و پشتی بررسی گردید. تغییر شکل‌های بیشینه ورق‌های رویی و پشتی و همچنین بیشینه انرژی کرنشی کشسان و مومسان ذخیره و مستهلک شده برای پانل و اجزای آن استخراج گردید. نتایج این پژوهش عبارتند از:

الف- پانل‌های با هسته بیضوی و مثلثی بیش‌ترین تغییر شکل و پانل‌های با هسته دوزنقه‌ای و مستطیلی کمترین تغییر شکل را دارند. با این حال، مقدار تغییر شکل مقطع دوزنقه‌ای در ورق پشتی کمتر از مقطع مستطیلی می‌باشد ولی در ورق رویی مقدار تغییر شکل مقطع مستطیلی کمتر از مقطع دوزنقه‌ای می‌باشد.

ب- مقدار انرژی کرنشی مومسان برای نمونه‌های با مقطع مثلثی و بیضوی بیش‌تر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. همچنین نمونه‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی توانایی استهلاک انرژی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

ج- در بررسی تاثیر شکل مقطع هسته، دیده می‌شود که سهمی از انرژی که توسط هسته مستهلک می‌شود، از سایر اجزا بیش‌تر است. سهم انرژی مومسان ورق پشتی بین ۲۲٪-۲۶٪، سهم انرژی مومسان برای هسته بین ۴۰٪-۴۶٪ و سهم انرژی مومسان برای ورق رویی بین ۳۰٪-۳۶٪ می‌باشد. سهم انرژی توسط هسته بیش‌ترین مقدار می‌باشد که نشان می‌دهد، هسته پانل در مستهلک سازی انرژی نقش موثری دارد.

د- در بررسی تاثیر مصالح پانل، مشاهده می‌شود که در پانل‌هایی که ورق‌های آن‌ها از فولاد می‌باشد دارای کمترین تغییر شکل و پانل‌هایی که تمام مصالح آن‌ها از آلومینیوم است دارای بیش‌ترین تغییر شکل می‌باشند. پانل‌هایی که هسته آن‌ها از فولاد است دارای تغییر شکلی بین این دو حالت می‌باشند. در صورت وجود مصالح یکسان، پروفیل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای کمترین تغییر شکل را دارند. با تغییر مصالح

ورق‌های رویی و پشتی از آلومینیم به فولاد، مقدار تغییرشکل حدود ۶۰٪ و با تغییر مصالح هسته از آلومینیم به فولاد، مقدار تغییرشکل حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد.

ه- اگر جنس پانل تماماً از آلومینیم باشد، انرژی بیش‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها مستهلک می‌نماید. سپس پانل‌هایی که ورق‌های آن‌ها از جنس آلومینیم و پانل‌هایی که فقط هسته آن از جنس آلومینیم است در رده‌های دیگر قرار می‌گیرند.

و- در پانل‌های با ورق فولادی، شکل هندسی هسته چندان تاثیر گذار نیست و کلیه انرژی‌های مستهلک شده ماده تقریباً در یک محدوده می‌باشند.

ز- در بررسی تفکیک انرژی مستهلک شده توسط هر جز از پانل دیده شد که، ورق رویی و هسته بیش‌ترین بخش انرژی را مستهلک می‌نمایند.

ح- پانل مثلی با ورق‌های فولادی و هسته آلومینیمی برای برآورده کردن توام تغییرشکل کمتر و استهلاک انرژی بیشتر عملکرد مطلوب‌تری دارد. در صورتی که برای برآورده کردن فقط تغییرشکل کمتر، پانل دوزنقه‌ای با ورق‌های فولادی و هسته آلومینیمی بهترین عملکرد را دارد. برای برآورده کردن استهلاک انرژی بیشتر، پانل مثلی تمام آلومینیمی بهترین عملکرد را دارد.

مراجع

- [1] L. J. Gibson and M. F. Ashby, (1999). *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge university press.
- [2] G. Lu and T. X. Yu, (2003). *Energy absorption of structures and materials*. Elsevier.
- [3] N. A. Fleck and V. S. Deshpande, (2004). "The resistance of clamped sandwich beams to shock loading," *J. Appl. Mech.*, vol. 71, no. 3, pp. 386–401.
- [4] X. Qiu, V. S. Deshpande, and N. A. Fleck, (2004). "Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading," *Trans. Soc. Mech. Eng. J. Appl. Mech.*, vol. 71, no. 5, pp. 637–645.
- [5] J. W. Hutchinson and Z. Xue, (2005). "Metal sandwich plates optimized for pressure impulses," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 47, no. 4, pp. 545–569.
- [6] Z. Xue and J. W. Hutchinson, (2003). "Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 687–705.
- [7] Z. Xue and J. W. Hutchinson, (2004). "A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 30, no. 10, pp. 1283–1305.
- [8] G. N. Nurick, G. S. Langdon, Y. Chi, and N. Jacob, (2009). "Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast—Part 1: Experiments," *Compos. Struct.*, vol. 91, no. 4, pp. 433–441.
- [9] H. Ebrahimi and A. Vaziri, (2013). "Metallic sandwich panels subjected to multiple intense shocks," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 50, no. 7, pp. 1164–1176.
- [10] Li, X., Zhang, P., Wang, Z., Wu, G. and Zhao, L., (2014). "Dynamic Behavior of Aluminum Honeycomb Sandwich Panels under Air Blast: Experiment and Numerical Analysis", *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 1001–1008.
- [11] Yazici, M., Wright, J., Bertin, D. and Shukla, A., (2014). "Experimental and Numerical Study of Foam Filled Corrugated Core Steel Sandwich Structures Subjected to Blast Loading", *Composite Structures*, Vol. 110, pp. 98–109.
- [12] Shen, J., Lu, G., Wang, Z. and Zhao, L., (2010). "Experiments on Curved Sandwich Panels under Blast Loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 9, pp. 960–970.
- [13] Jing, L., Wang, Z. and Zhao, L., (2013). "Dynamic Response of Cylindrical Sandwich Shells with Metallic Foam Cores under Blast Loading: Numerical Simulations", *Composite Structures*, Vol. 99, pp. 213–223.
- [14] A. Version, "6.7, Abaqus/CAE and Abaqus/Explicit.(2009)." *Simulia World Headquarters, Provid.*
- [15] X. Li, Z. Wang, F. Zhu, G. Wu, and L. Zhao, (2014). "Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: Experiment and numerical simulation," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 65, pp. 79–88.
- [16] R. G. S. Sewel, T. R. Zulkoski, and G. F. Kinney, (1979). "Blast parameter characterization," *Nav. Weapons Cent. Tech. Rep. TP*, vol. 5920.
- [17] R. T. Allen, (1967). *Equation of state of rocks and minerals*. General Dynamics, General Atomic Division.