نشریه مهندسی مکانیک ایران، دوره ۲۶، شماره ۱، شماره پیاپی۷۴، بهار ۱۴۰۳، صفحه ۸۷-۶۰
انجمن مهندسان مکانیک ایران
مقاله علمی پژوهشی
DOI: https://doi.org/10.30506/ijmep.2023.1978409.1908

بررسی اثرات پیکره بندی هندسی هسته های موج دار روی بار ضربه ای و جذب انرژی در ساندویچ پنل ها با رویه های کامپوزیتی

افشین کومه[۱]
کارشناسی ارشد

سعید فعلی[۲]
استاد

در این مقاله ضربه سرعت پایین روی ساندویچ پنل ها با رویه های کامپوزیتی و هسته موج دار آلومینیومی مدلسازی شده و میزان جذب انرژی، نیروی تماسی، تغییر شکل محل برخورد و ابعاد ناحیه آسیب محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شده است. ساندویچ پنل ها دارای رویه های کامپوزیت از الیاف کربن و شیشه و هسته های موج دار آلومینیومی به شکل های مربعی، ذوزنقه ای، قوسی، سینوسی و مثلثی می باشند. نتایج نشان می دهد هسته های موج دار ذوزنقه ای و مربعی بیشترین جذب انرژی و مساحت ناحیه آسیب و هسته های قوسی و سینوسی بیشترین تغییر مکان محل برخورد را دارند.

واژه‌های راهنما: ساندویچ پنل، هسته موجدار، بار ضربه ای سرعت پایین، جذب انرژی، شبیه سازی عددی

۱- مقدمه

از ورق‌های آلومینیوم موج‌دار برای ساخت سقف سوله، شیروانی، کرکره‌ی مغازه‌ها، کرکره پارکینگ منازل، انواع سقف کاذب، آلاچیق و سوله و حصارسازی استفاده می‌شود. ویژگی مهم آن‌ها شیارهای موجی شکل روی سطح ورق می‌باشد که خاصیت ضد لغزش دارد. همچنین ورق آلومینیوم موج‌دار را می‌توان برای تزیینات نمای خارجی و سازه‌ای ساختمان استفاده کرد. در این مقاله شبیه‌سازی از اثرات بار ضربه‌ای سرعت پایین روی ساندویچ پنل های با هسته مختلف موجی شکل آلومینیومی پرداخته شده و میزان آسیب و جذب انرژی ناشی از برخورد محاسبه و مقایسه شده است.

رحمانی و حسینی [۱] در سال۱۳۹۴ پژوهشی را درباره رفتار خمشی نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی و هسته‌ای ترکیبی از اسفنج PVC و کامپوزیت موج‌دار انجام

[۱] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
Afshinkomeh452@gmail.com
[۲] نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران Felisaeid@razi.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

دادند. نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به نمونه‌ها استخراج شده است. شبیه‌سازی عددی برای تعیین بیشترین تغییر شکل در نمونه‌ها مطابق با میزان نیروی اعمالی با نرم افزار آباکوس انجام شده است. در این پژوهش برای افزایش صحت نتایج عددی، آزمون کشش برای بدست آوردن خواص مکانیکی رویه های کامپوزیتی و کامپوزیت موج‌دار داخل هسته انجام گردیده است.

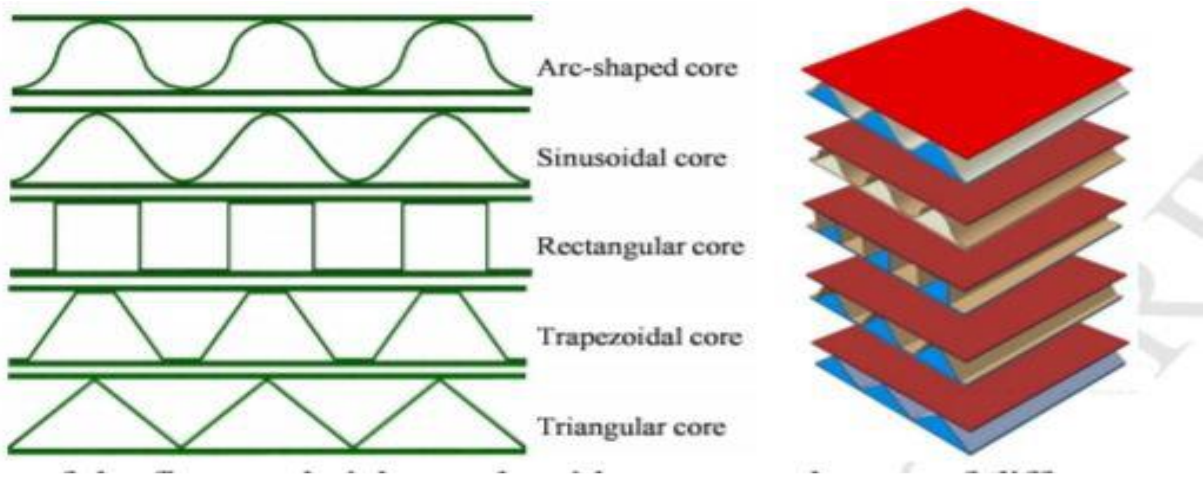
جین لیو و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۶ اثرات شکل ضربه زننده در ضربه سرعت پایین روی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های موج‌دار هیبریدی انجام دادند. در این پژوهش که به روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار آباکوس انجام شده، سه نمونه ساندویچ پنل با رویه های کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و هسته موج دار آلیاژ آلومینیوم تحت ضربه زننده‌های مخروطی، نیم کره و تخت قرار داده شد. این مطالعات نشان داد که آسیب در هسته، آسیب ماتریس، لایه لایه شدن رویه‌ها و همچنین کمانش هسته، به شکل ضربه زننده، انرژی ضربه و محل ضربه بستگی دارد.

حیدری پبدنی [۳] در سال ۱۳۹۵پژوهشی را درباره اثر هسته‌ی موج‌دار بر ضربه سرعت پایین روی ساندویچ پنل‌ها انجام داد. در این پژوهش که به روش المان محدود و با نرم افزار انسیس انجام شده از هسته‌های فومی با چگالی متفاوت لایه چینی شده و آلومینیوم های موج‌دار و رویه های کربن اپوکسی تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظه دار (SMA) در سازه ساندویچی مورد تحقیق استفاده شد. سازه‌های ساندویچی با پیکره بندی‌های متفاوت تحت ضربه کم سرعت قرار گرفتند و نتایج نشان داد اضافه نمودن هسته موج‌دار به افزایش مقاومت به ضربه سازه و افزایش نیروی تماسی ضربه منجر شده است.

فروغی نیا و ستوده [۴] در سال ۱۳۹۵ بصورت تجربی میزان جذب انرژی پنل ساندویچی کامپوزیتی با هسته موج‌دار سینوسی و پرشده با فوم را بررسی نمودند. رفتار مکانیکی و جذب انرژی پنل ساندویچی با هسته موج‌دار کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. پروفیل هسته موج‌دار به شکل سینوسی و رفتار پنل های ساندویچی در دو حالت با هسته فوم و بدون فوم مقایسه شده و جذب انرژی ساندویچ پنل فوم دار و بدون فوم مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تزریق فوم به سلول‌های خالی بین هسته موج‌دار و رویه‌ها خواص مکانیکی و جذب انرژی پنل ساندویچی را تحت بارگذاری فشاری افزایش داده در حالی که وزن پنل ساندویچی تغییر زیادی نکرده است.

یورونگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۸ اثرات پیکره‌بندی های هندسی هسته‌های موج‌دار روی بارگذاری ضربه موضعی و عملکرد ساندویچ پنل‌ها را بررسی نمودند. در این تحقیق که به روش‌های شبیه‌سازی عددی و با نرم‌افزار آباکوس و آزمایشگاهی انجام شد پنج نمونه ساندویچ پنل با شماتیک هسته‌های متفاوت و با اندازه، وزن و ماده یکسان طراحی شد. سپس ساندویچ پنل‌ها تحت انرژی‌های بالا قرار داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که در انرژی‌های ضربه کم هسته تاثیر قابل توجهی بر میزان جذب انرژی در ساندویچ پنل‌ها دارد. همچنین پیکره‌بندی هندسی هسته ها تاثیری بر قابلیت جذب انرژی تحت ضربه با انرژی های بالا ندارد.

جین شوی یانگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۰ میزان جذب انرژی در ساندویچ پنل‌های موج‌دار محوری و دایره‌ای الیاف کربن با چگالی متفاوت را بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که انرژی‌های جذب شده ساندویچ پنل‌ها با دانسیته رابطه مستقیم دارد و با افزایش آن میزان انرژی جذب شده افزایش پیدا کرده است.



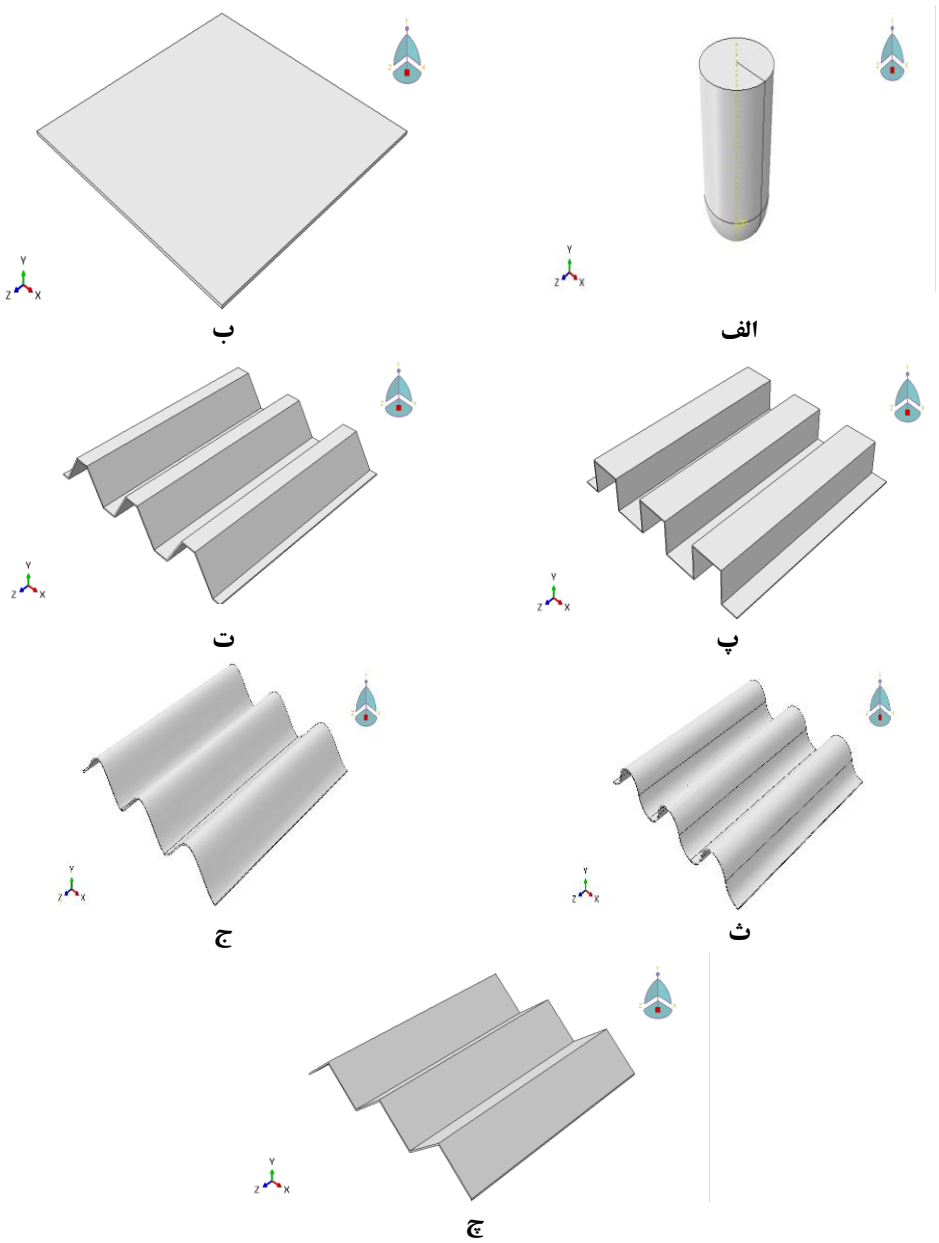
شکل ۱– هندسی انواع هسته های موجدار آلومینیومی ساندویچ پنل

توکلی طریی و جمال امیدی [۷] در سال ۱۳۹۹ پژوهشی درباره بررسی جذب انرژی رویه‌ها الاستومری و هسته‌های موجدار کامپوزیتی در ساندویچ پنل‌ها تحت ضربه سرعت پایین انجام دادند. برای این منظور ساختار ساندویچی جدیدی مشتمل بر هسته‌های کامپوزیتی با هندسه‌های موجی شکل ذوزنقه‌ای و کمانی پوشانده شده با رویه‌های الاستومری پیشنهاد شد و پس از مدل‌سازی عملکرد ضربه‌پذیری آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی عملکرد ضربه پذیری ساختار پیشنهادی، افزایش چشمگیری را در میزان جذب انرژی رویه های ساندویچی الاستومر-کامپوزیت در مقایسه با ساختار ساندویچی کامپوزیت-فلز نشان داد. این موضوع بیانگر نقش موثر رویه های الاستومر و هسته‌های موجی شکل کامپوزیتی در جذب انرژی حداکثری ساختار پیشنهادی است.

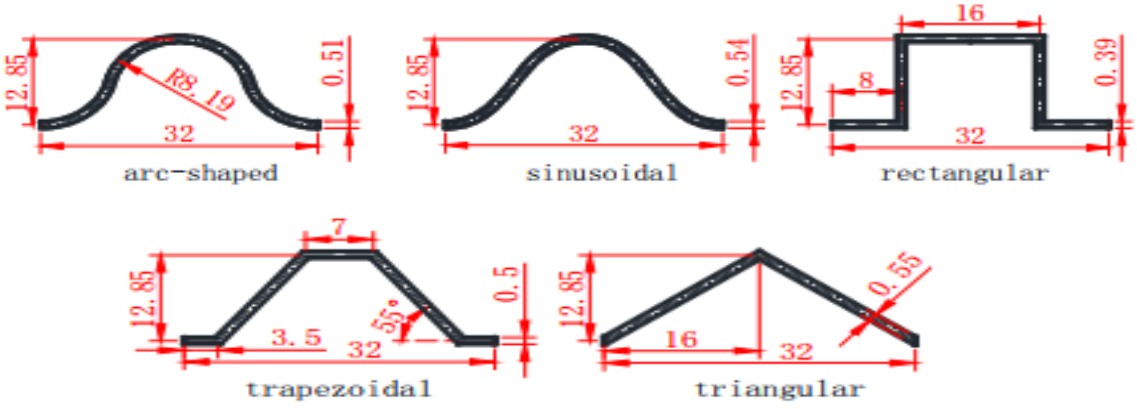
در این مقاله شبیه‌سازی عددی از ضربه سرعت پایین روی ساندویچ پنل‌های با رویه‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته موجدار آلومینیومی با شکل‌های مربعی، ذوزنقه ای، قوسی شکل سینوسی و هسته مثلثی مطابق شکل (۱) مدلسازی گردیده و میزان جذب انرژی، جابجایی و تغییر شکل محل برخورد، ابعاد ناحیه دچار عیب شده و نیروی تماسی در شرایط بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است. استفاده از رویه‌های کامپوزیتی در ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های موجی شکل، بکاربری هسته‌های موجدار مختلف با شماتیک‌های هندسی مربعی، ذوزنقه ای، قوسی، سینوسی و مثلثی، مقایسه مقادیر نیروی تماسی، جذب انرژی و تغییر مکان محل برخورد و تعیین و مقایسه ابعاد ناحیه دچار آسیب برای ساندویچ پنل‌ها با هسته‌های مختلف از نوآوری‌های مطرح در این مقاله است.

۲- مراحل شبیه سازی

در مرحله اول مطابق شکل (۲) طراحی قطعات مربوط به ضربه زننده، هسته و رویه‌ها انجام شده است. رویه‌ها به طول و عرض ۹۶ میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. هسته‌های ساندویچ پنل مطابق شکل (۱) با طرح‌های مختلف مربعی، ذوزنقه ای، قوسی، سینوسی و مثلثی شامل سه موج که طول هر موج آن‌ها ۳۲ میلی‌متر می‌باشد شبیه‌سازی شده است. همچنین ضربه زننده کروی با قطر ۱۲ و ارتفاع ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد و شکل هندسی هسته موجدار مطابق شکل (۳) است.



شکل ۲- الف- ضربه زننده ، **ب**- رویه ها، **ج**- هسته موجدار با مقطع مربعی **پ**- هسته موجدار با مقطع ذوزنقه‌ای **ث**- هسته موجدار قوسی **ج**- هسته موجدار سینوسی **چ**- هسته موجدار مثلثی



شکل۳- ابعاد هر مقطع موجی شکل هسته‌های ساندویچ پنل

در ادامه خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی و آلومینیومی ساندویچ پنل مطابق جداول (۱) تا (۳) در نرم‌افزار وارد می‌شود. رویه‌های کامپوزیتی با ضخامت هر لایه ۰/۲۵ میلی‌متر و با آرایش $_{۲}$(۰/۹۰) می‌باشد.

جدول ۱- خواص ماده کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن [۵]

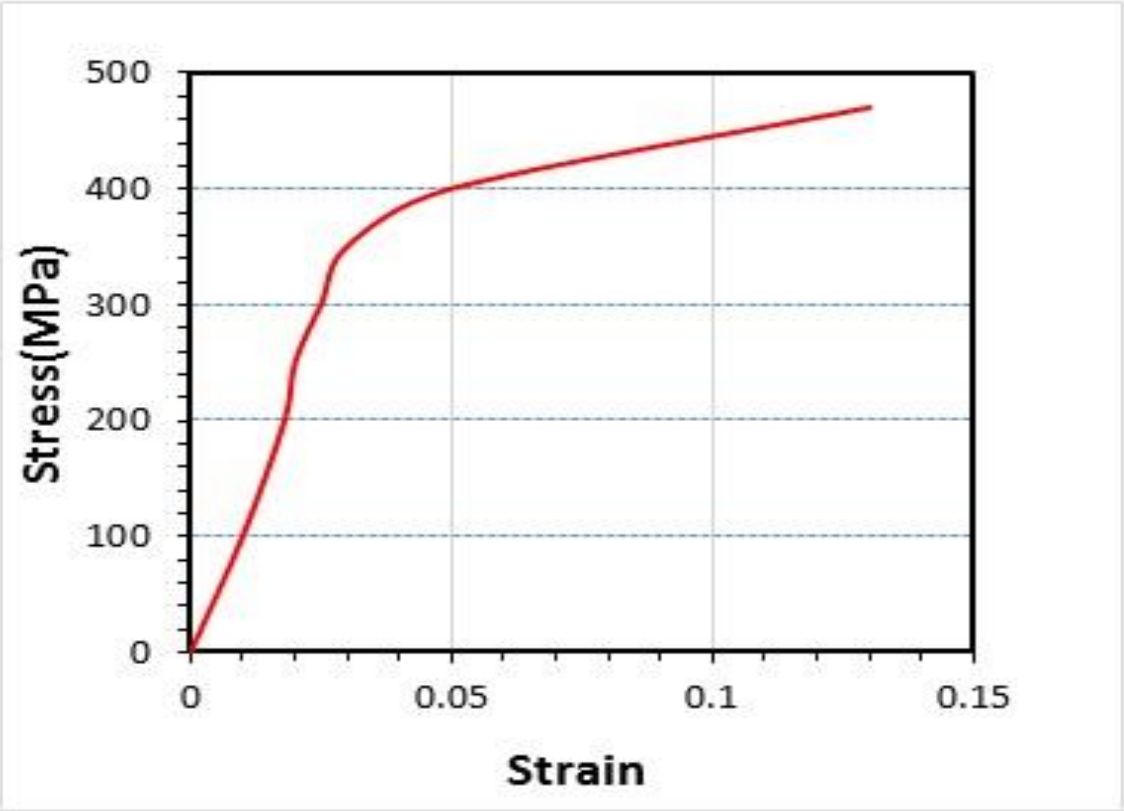
Symbol	Property	Value
E_{11}	Longitudinal stiffness	123 GPa
E_{22}	Transverse stiffness	8.4 GPa
E_{33}	Out-of-plane stiffness	8.4 GPa
ν_{12}, ν_{13}	Poissons ratio	0.32
ν_{23}	Poissons ratio	0.3
G_{12}, G_{13}	Shear modulus	4 GPa
G_{23}	Shear modulus	3 GPa
x_T	Longitudinal tensile strength	2100 MPa
x_C	Longitudinal compressive strength	800 MPa
Y_T	Transvers tensile strength	25 MPa
Y_C	Transvers compressive strength	120 MPa
Z_T	Out-of-plane tensile strength	50 MPa
S_{12}, S_{13}, S_{23}	Shear strength	40 MPa
ρ	Density	$1560^{kg}/_{m^3}$

جدول ۲- خواص ماده کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه [۸]

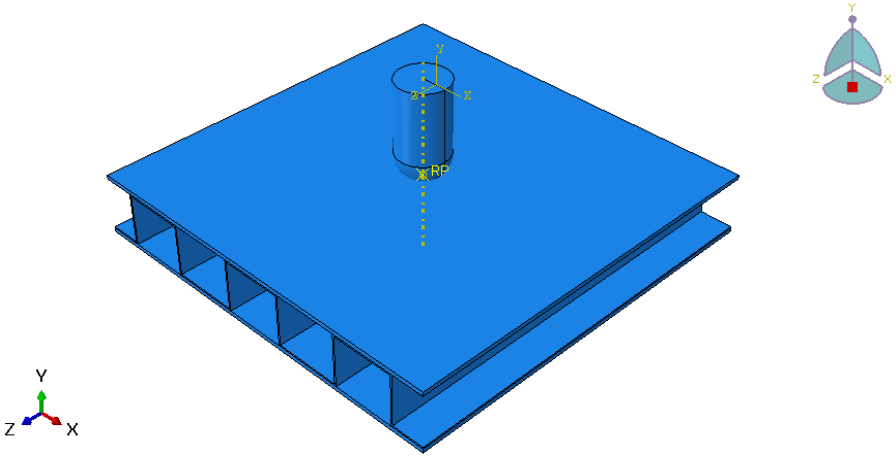
Property	Value
Longitudinal stiffness	120 GPa
Transverse stiffness	5.4 GPa
Out-of plane stiffness	5.4 GPa
Poisson’s ratio	0.3
Shear modulus	3.895 GPa
Shear strength	30 MPa
Tensile modulus	20.7GPa
Tensile strength	419MPa
Density	$1460^{kg}/_{m^3}$

جدول۳- خواص مکانیکی آلومینیویم مورد استفاده در هسته های ساندویچ پنل [۵]

Symbol	Property	Value
ρ	Density	2700 kg/m^3
E	Young's modulus	70 GPa
ν	Poisson's ratio	0.3
$\sigma_{0.2}$	Yield strength	285 MPa
σ_b	Tensile strength	460 MPa



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش ماده آلومینیوم [۵]

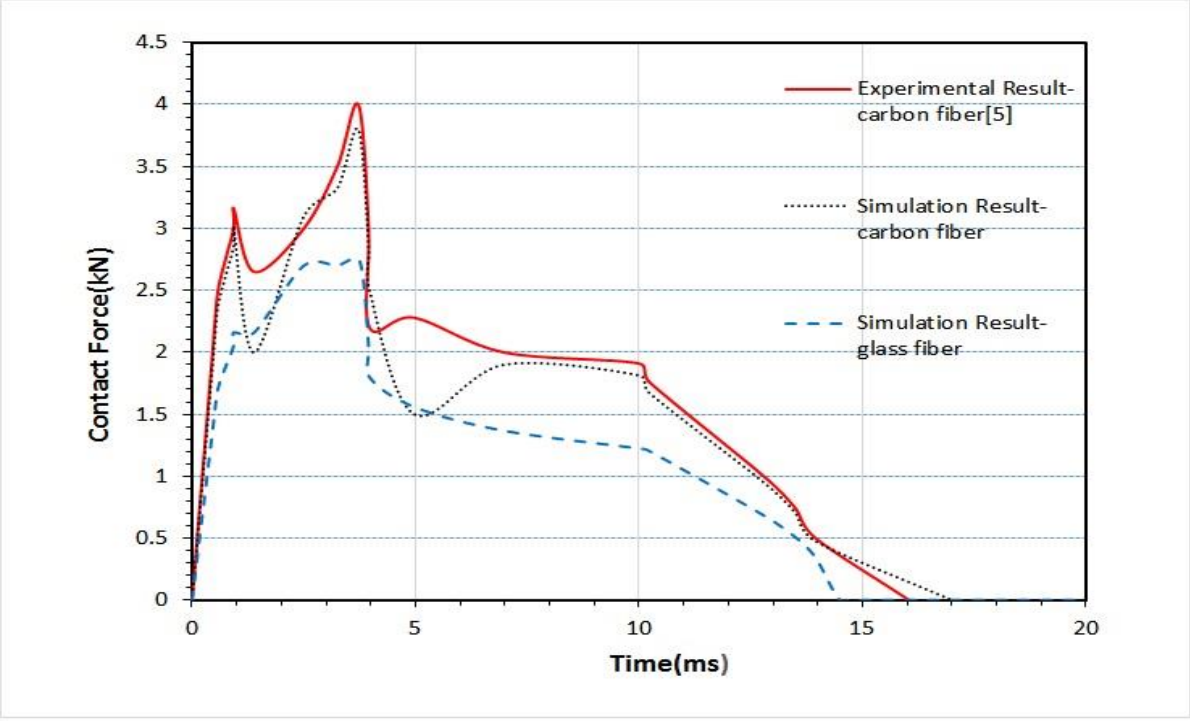


شکل ۵- ساندویچ پنل مونتاژ شده

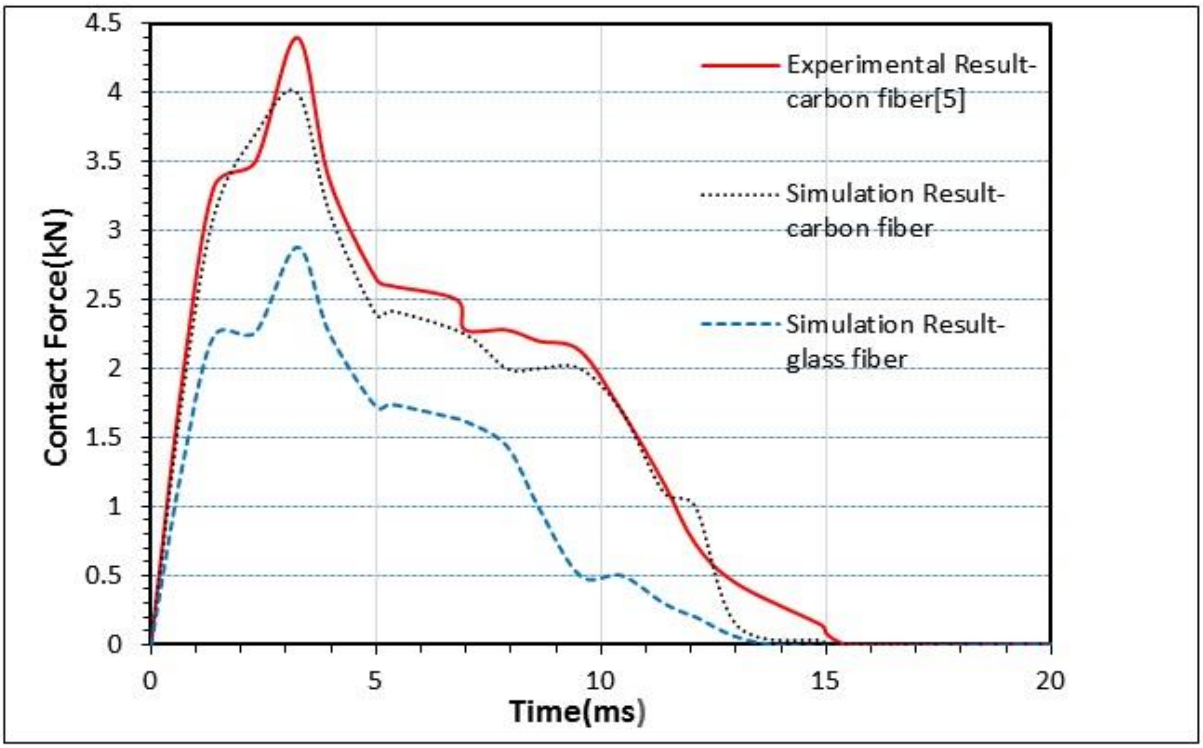
منحنی تنش- کرنش آلومینیوم مورد استفاده در ساندویچ پنل مطابق شکل (۴) می‌باشد.
بعد از ساخت اجزای مدل مطابق شکل (۵)، اجزای مدل مونتاژ شده است.
مراحل زمانی حل مسئله از نوع Dynamic Explicit در نظر گرفته شده است، در قسمت Interaction تعریف تماس‌های بین ضربه زننده و اجزای ساندویچ پنل انجام شده است. همچنین از روش و دستور Tie برای اتصال بین قطعات پوسته و هسته استفاده شده است. شرایط مرزی مسئله بصورت گیردار بوده و ضربه زننده فقط در راستای محور طولی تغییر مکان دار دو سرعت اولیه آن 1.733 m/s در نظر گرفته شده است.
ابعاد و سایز مش بندی با روش سعی و خطا و برای همگرا شدن نتایج ۱/۲ م م برای اجزای مجموعه در نظر گرفته است. نوع المان‌های ضربه زننده به بصورت Quad-dominated از نوع R3D4 است. المان‌ها رویه‌ها نیز بصورت Hex و نوع C3R8R و المان‌های هسته از نوع C3R8R می‌باشد.

۳-مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و تجربی

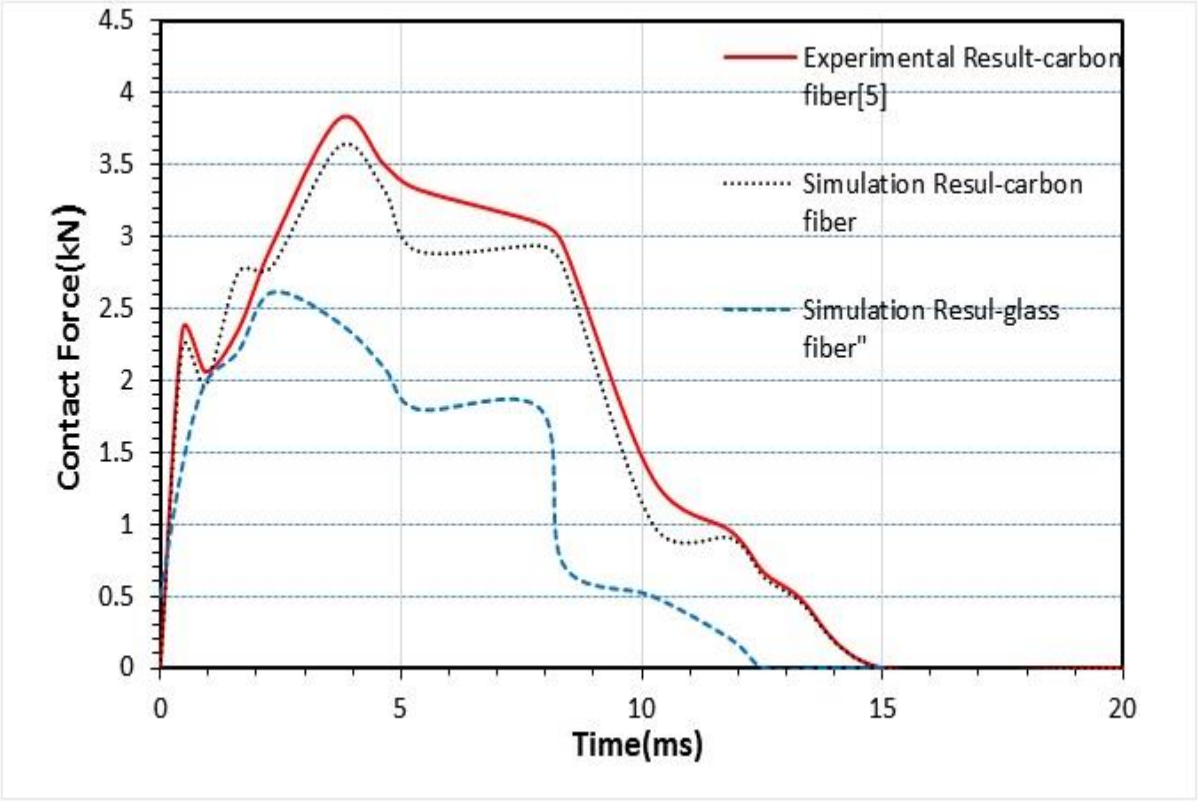
در شکل (۶) منحنی تغییرات نیروی تماسی بر حسب زمان و مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی عددی در ساندویچ پنل های با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌های موجدار مختلف آورده داده شده است. پیش بینی مقادیر حداکثر نیروی تماسی و زمان تماس برای رویه های کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن برای هر پنج نمونه هسته آلومینیومی با شکل‌های مربعی، ذوزنقه ای، مثلثی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد و اختلاف نتایج حدود پنج درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که حداکثر نیروی تماسی در ساندویچ پنل با رویه الیاف شیشه کمتر از حالتی است که رویه‌ها از الیاف کربن ساخته شده باشند.



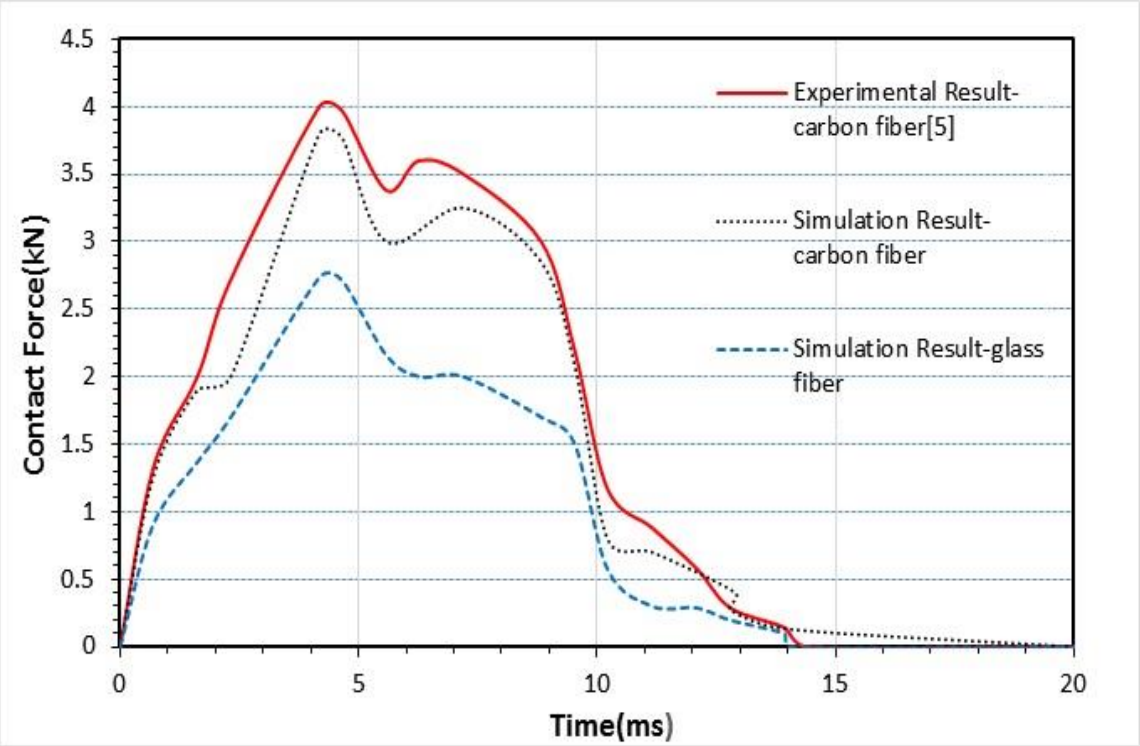
الف- هسته آلومینیومی موج‌دار ذوزنقه‌ای



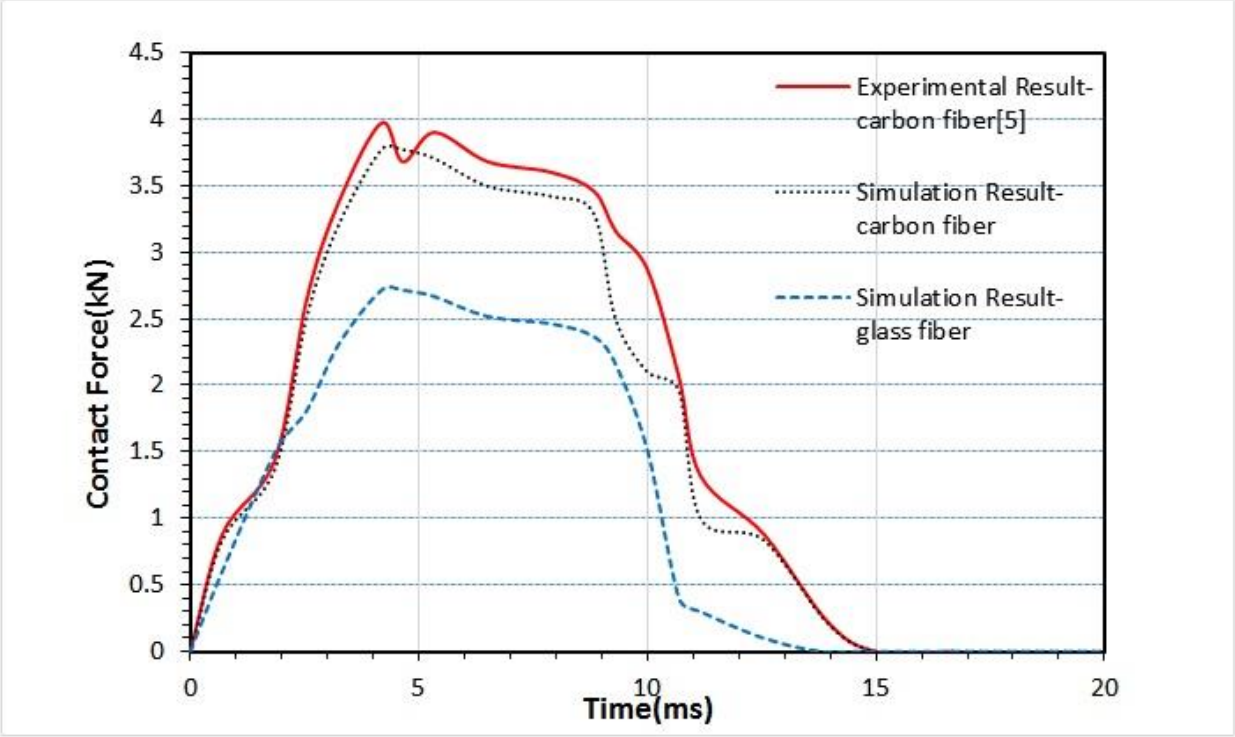
ب- هسته آلومینیومی موج‌دار مربعی



ج- هسته آلومینیومی موج‌دار مثلثی



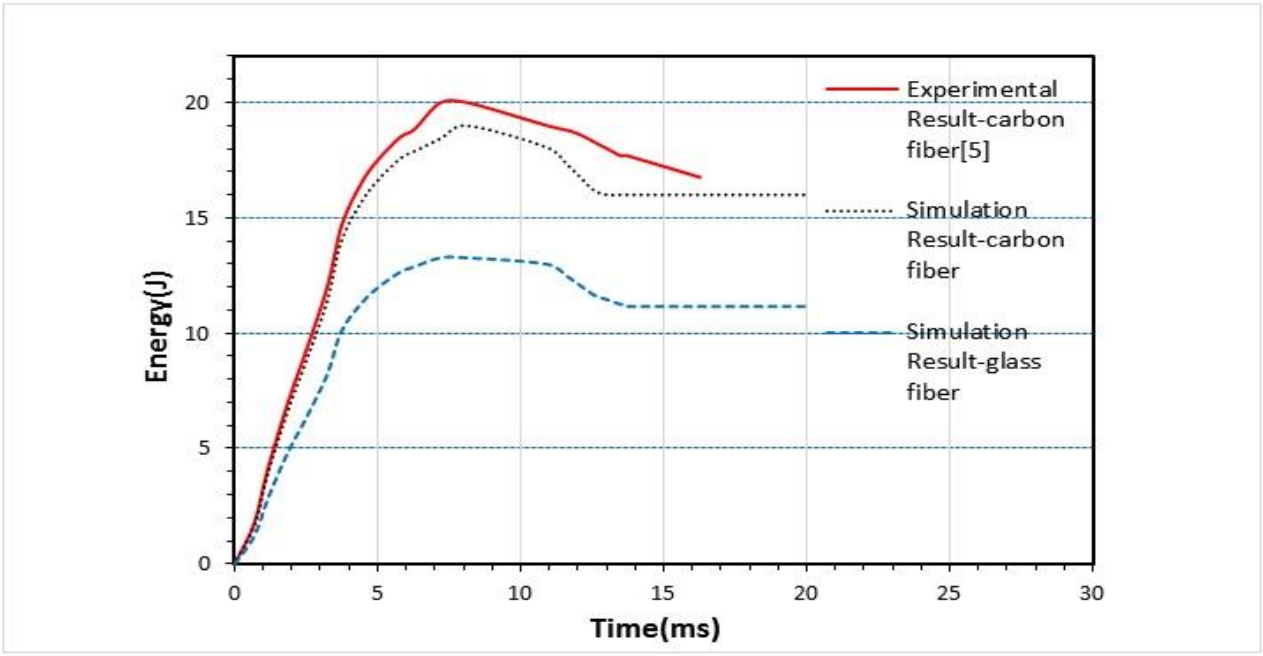
د- هسته آلومینیومی موج‌دار سینوسی



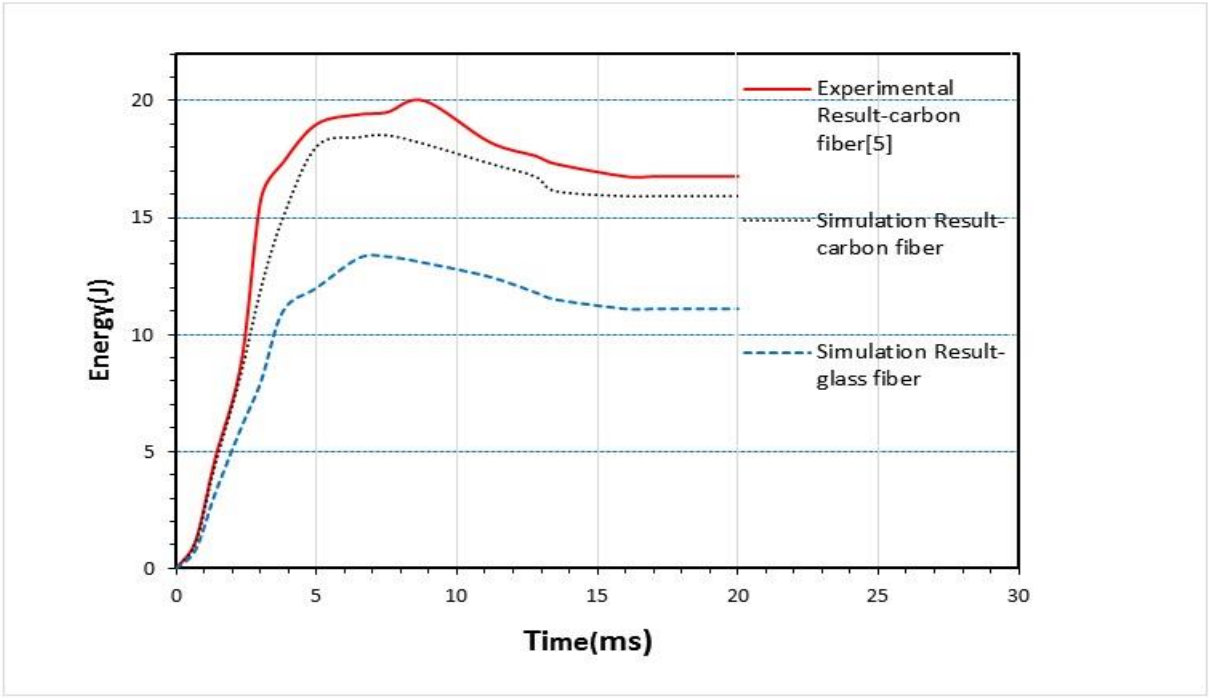
ه- هسته آلومینیومی موج‌دار قوسی شکل

شکل ۶- منحنی تغییرات نیروی تماسی بر حسب زمان و مقایسه ی نتایج تجربی و شبیه سازی عددی در ساندویچ پنل‌های با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌ی مختلف

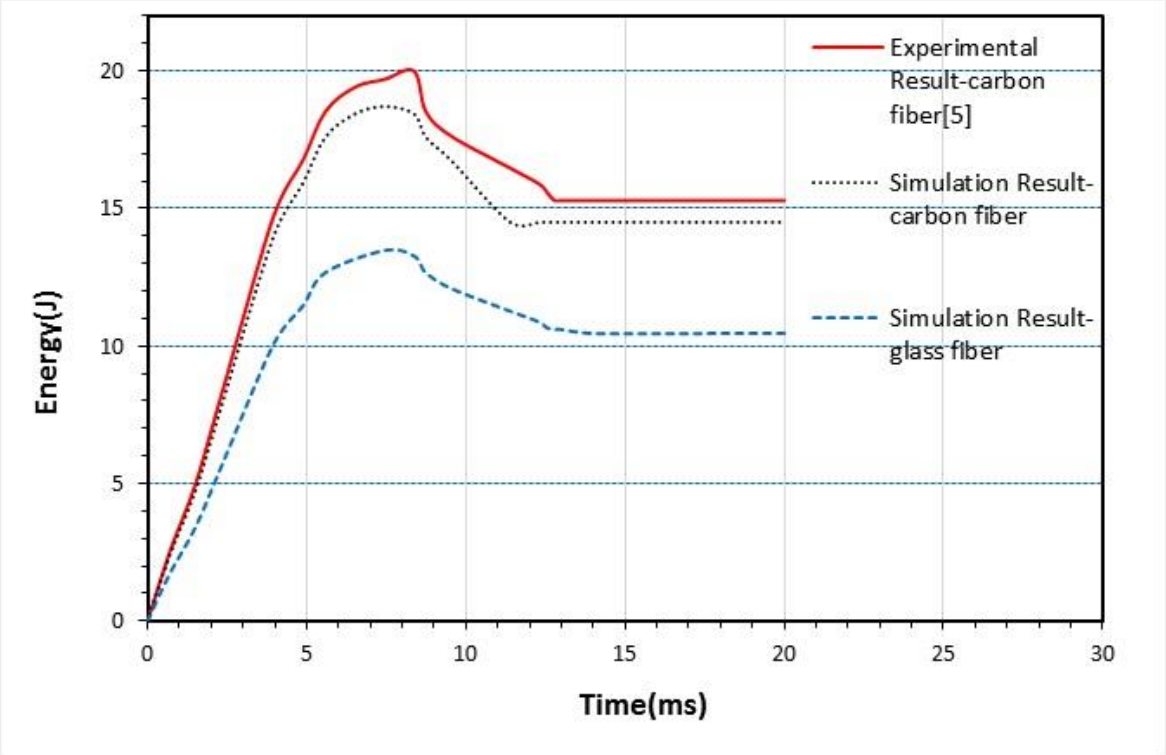
در شکل (۷) منحنی انرژی-زمان محاسبه شده با روش شبیه سازی عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی در ساندویچ پنل های با رویه های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته های موج‌دار مختلف نشان داده شده است. میزان انرژی جذب شده ساندویچ پنل محاسبه شده با روش شبیه سازی عددی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی داشته و میزان جذب انرژی ساندویچ پنل با رویه های کامپوزیتی با الیاف کربن بیشتر از ساندویچ پنل با رویه های الیاف شیشه است.



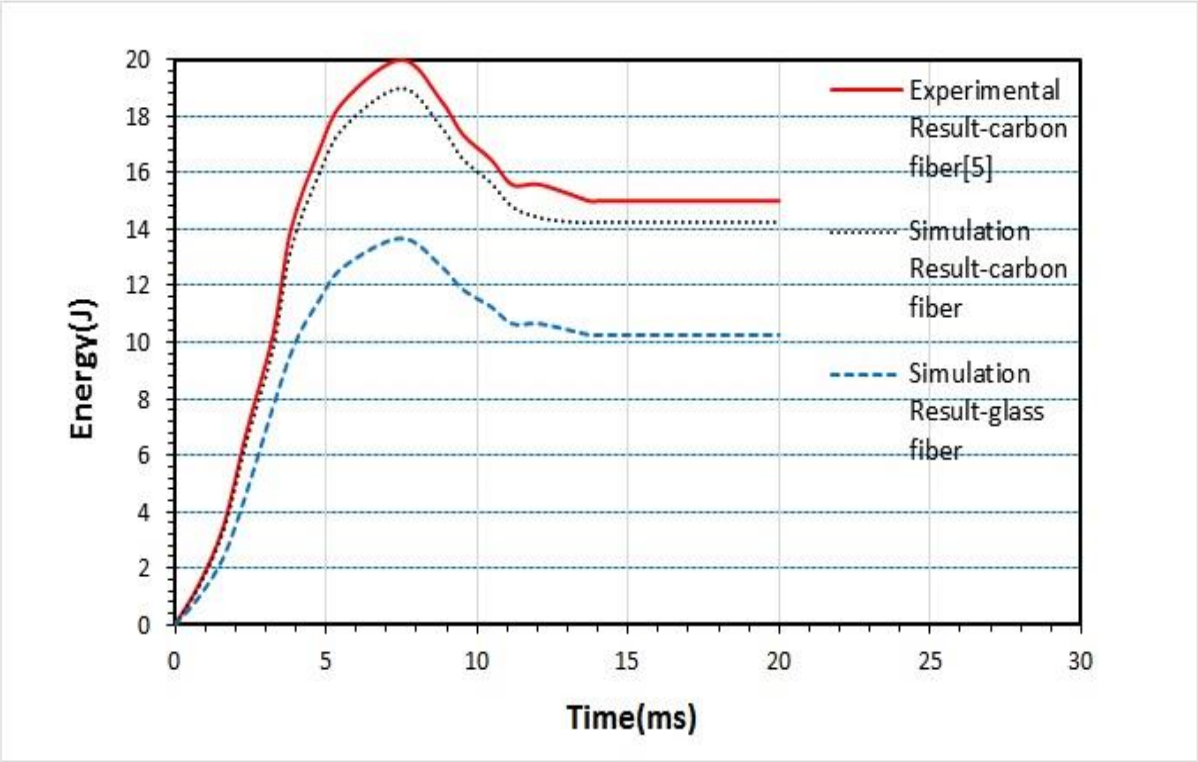
الف- هسته آلومینیومی موج‌دار ذوزنقه‌ای



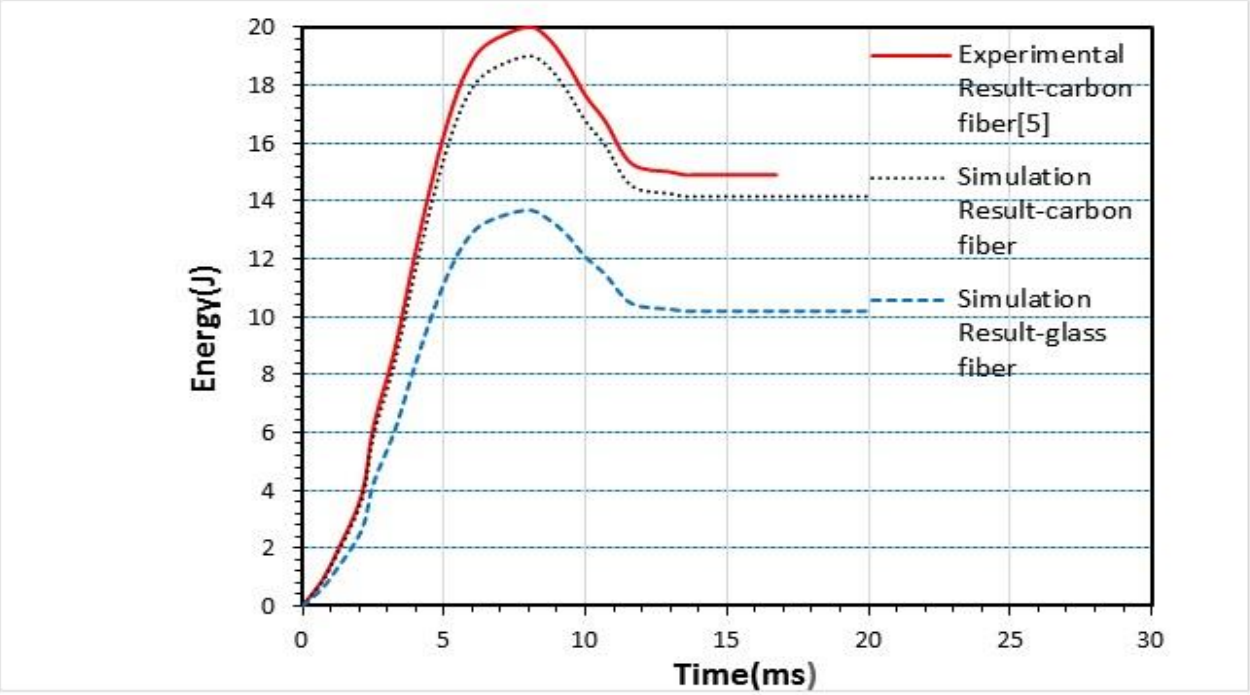
ب- هسته آلومینیومی موج‌دار مربعی



ج- هسته آلومینیومی موجدار مثلثی

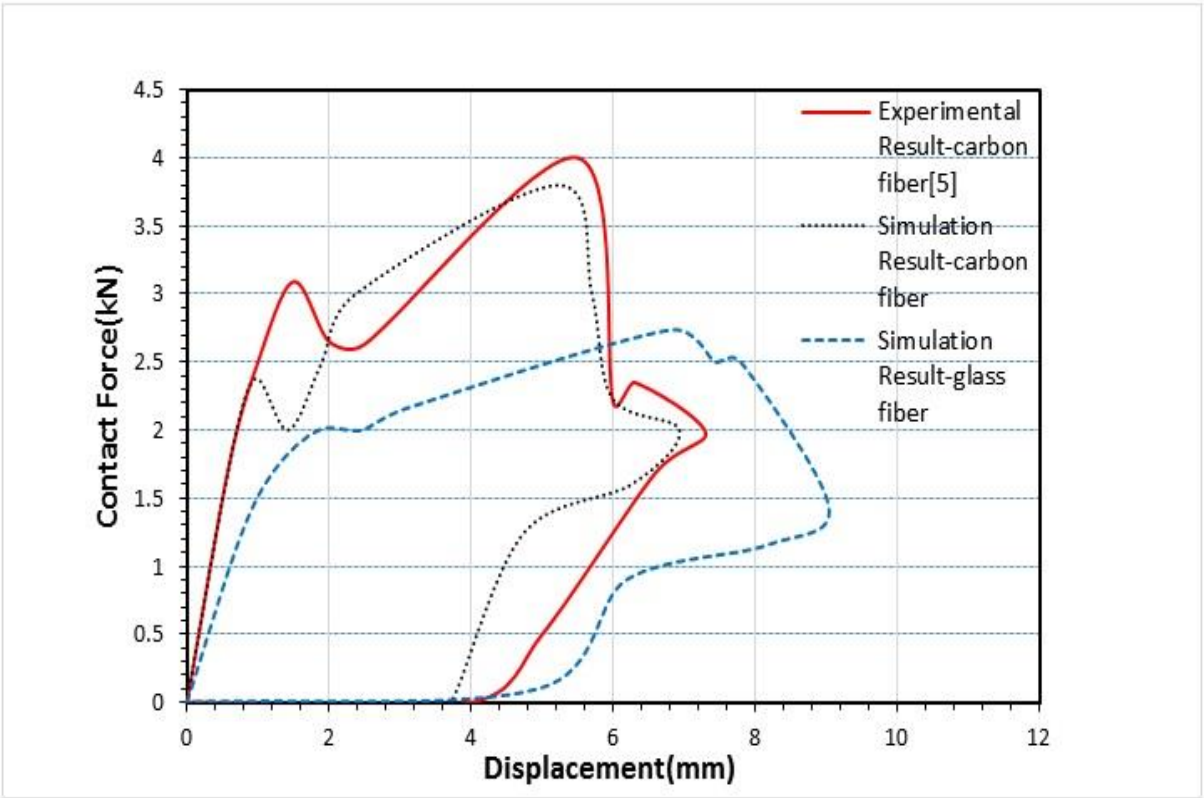


د- هسته آلومینیومی موجدار سینوسی

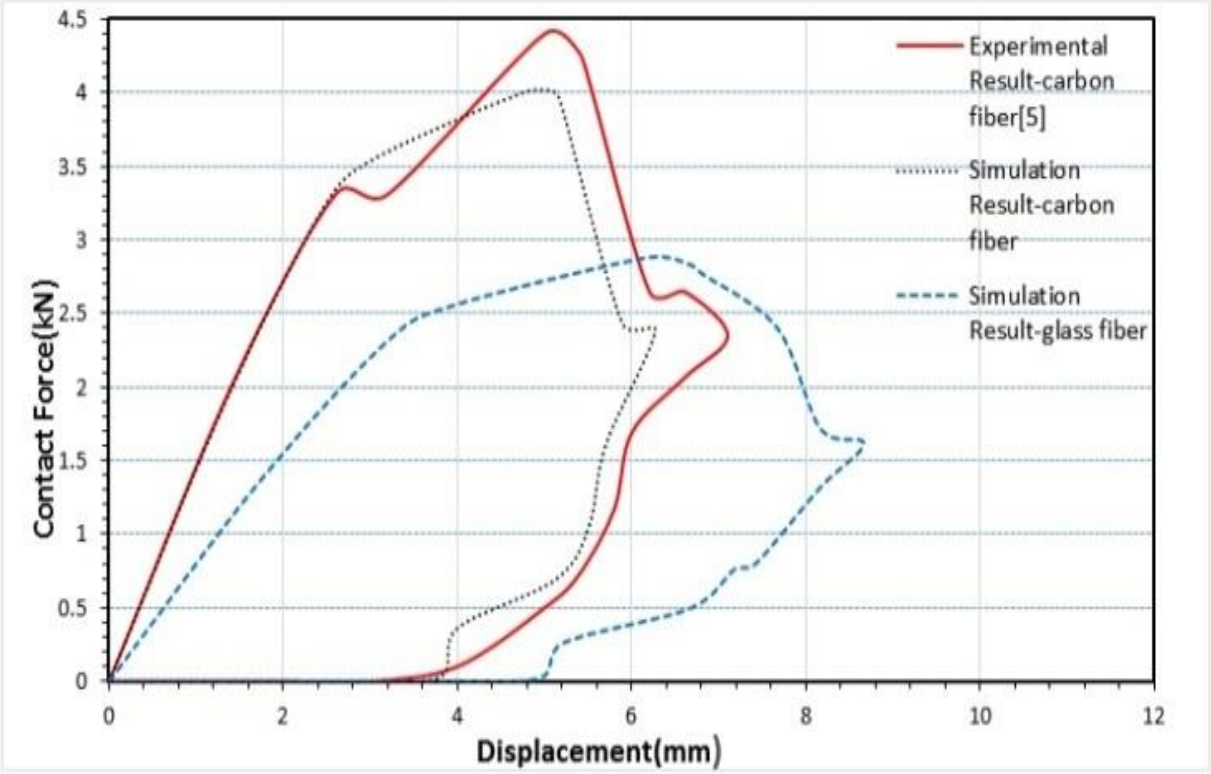


ه- هسته آلومینیومی موج‌دار قوسی

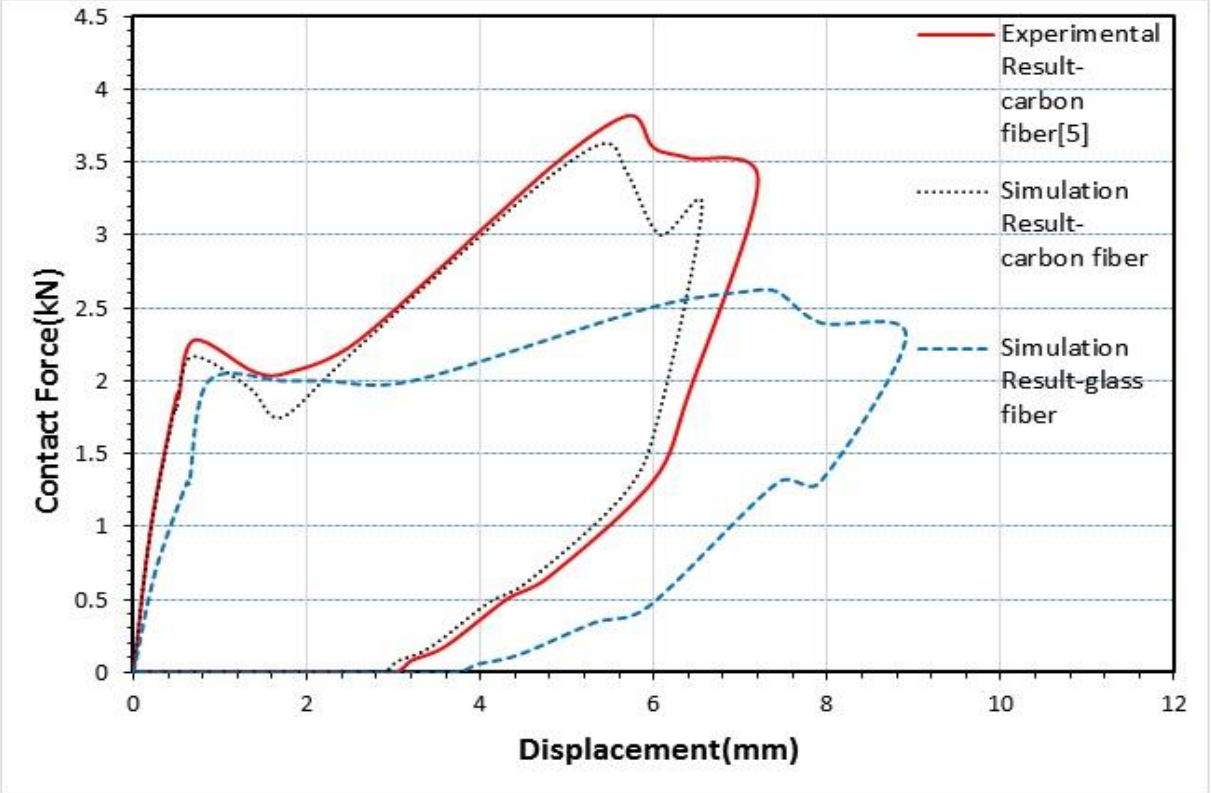
شکل ۷- منحنی انرژی- زمان و مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه سازی عددی در ساندویچ پنل‌های با رویه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌ی با شکل‌های مختلف



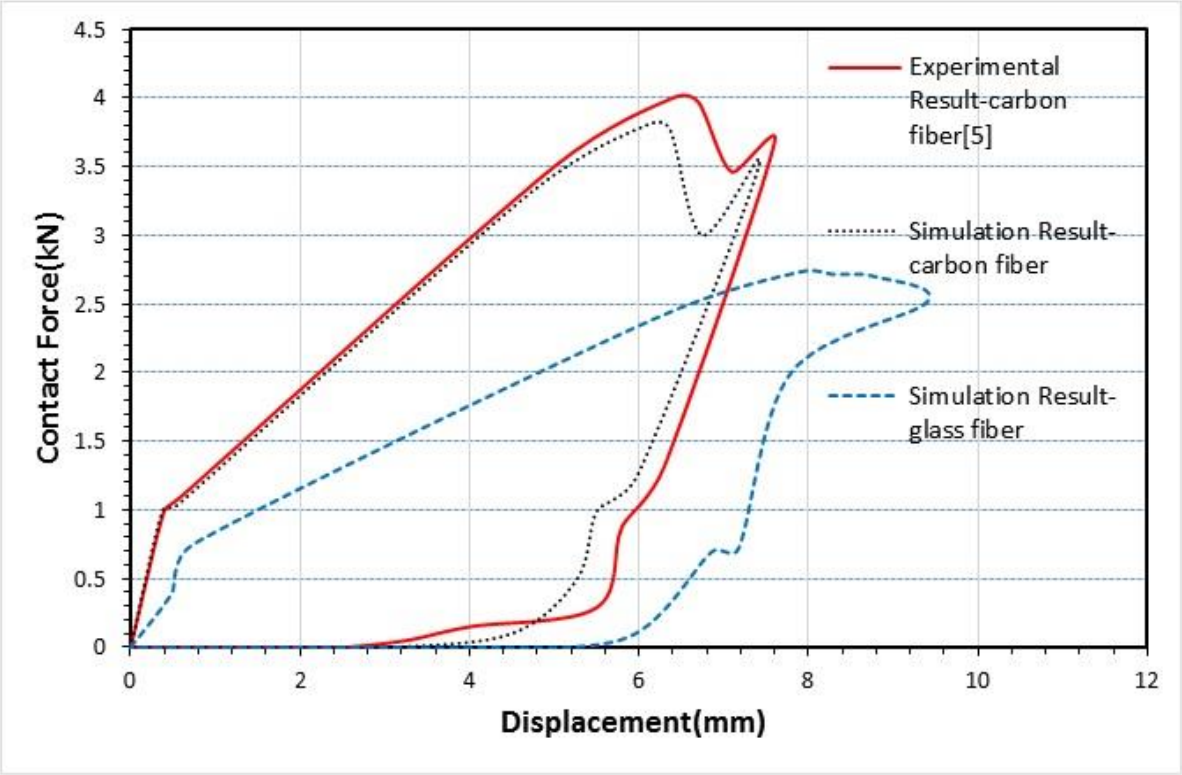
الف- هسته آلومینیومی موج‌دار ذوزنقه ای شکل



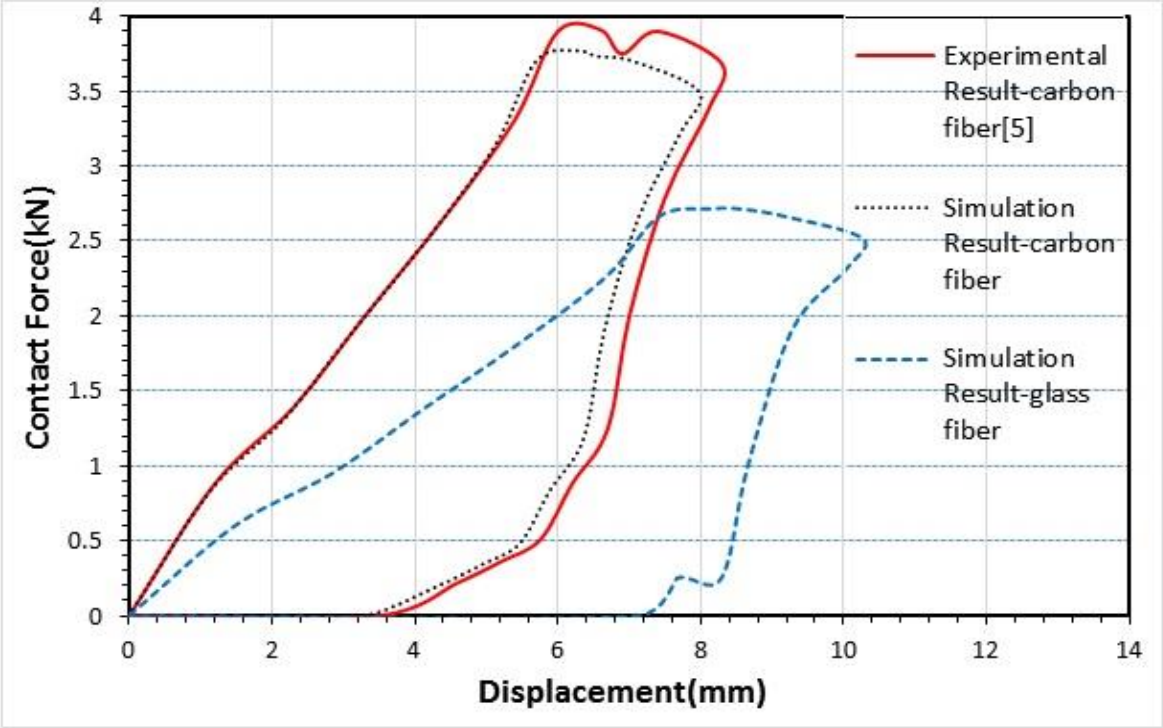
ب- هسته آلومینیومی موجدار مربعی شکل



ج- هسته آلومینیومی موجدار مثلثی شکل

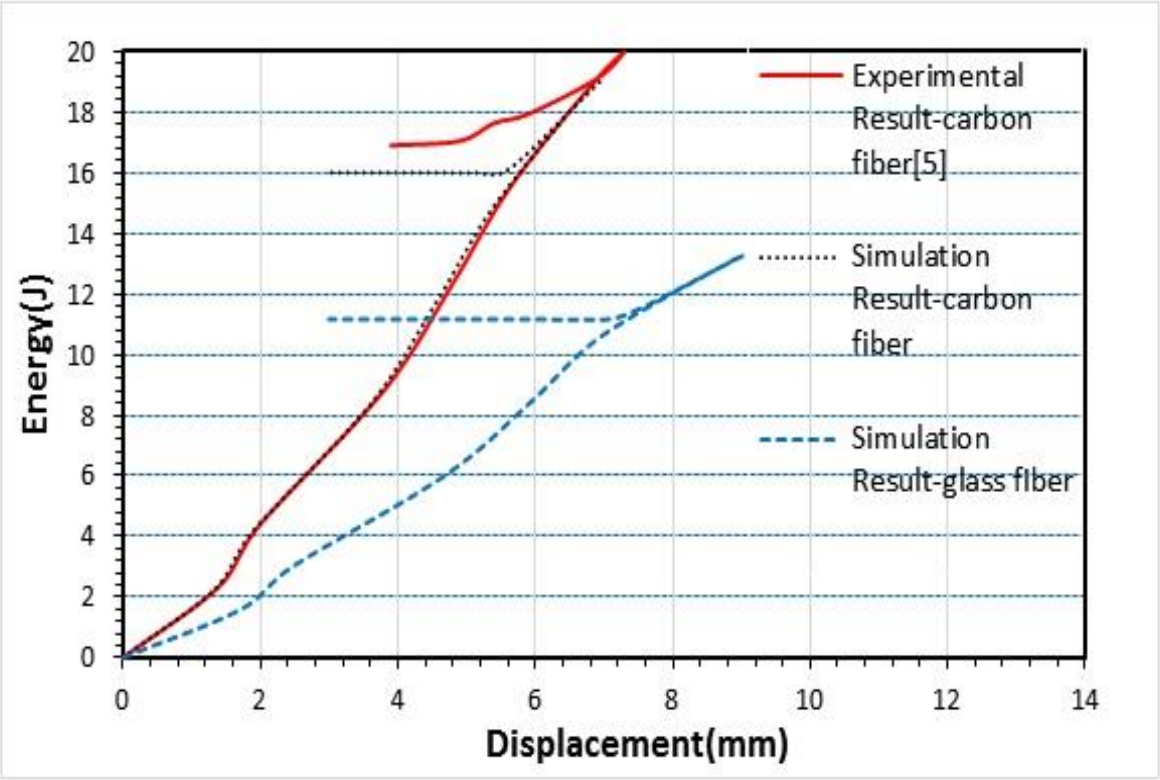


د- هسته آلومینیومی موج‌دار سینوسی شکل

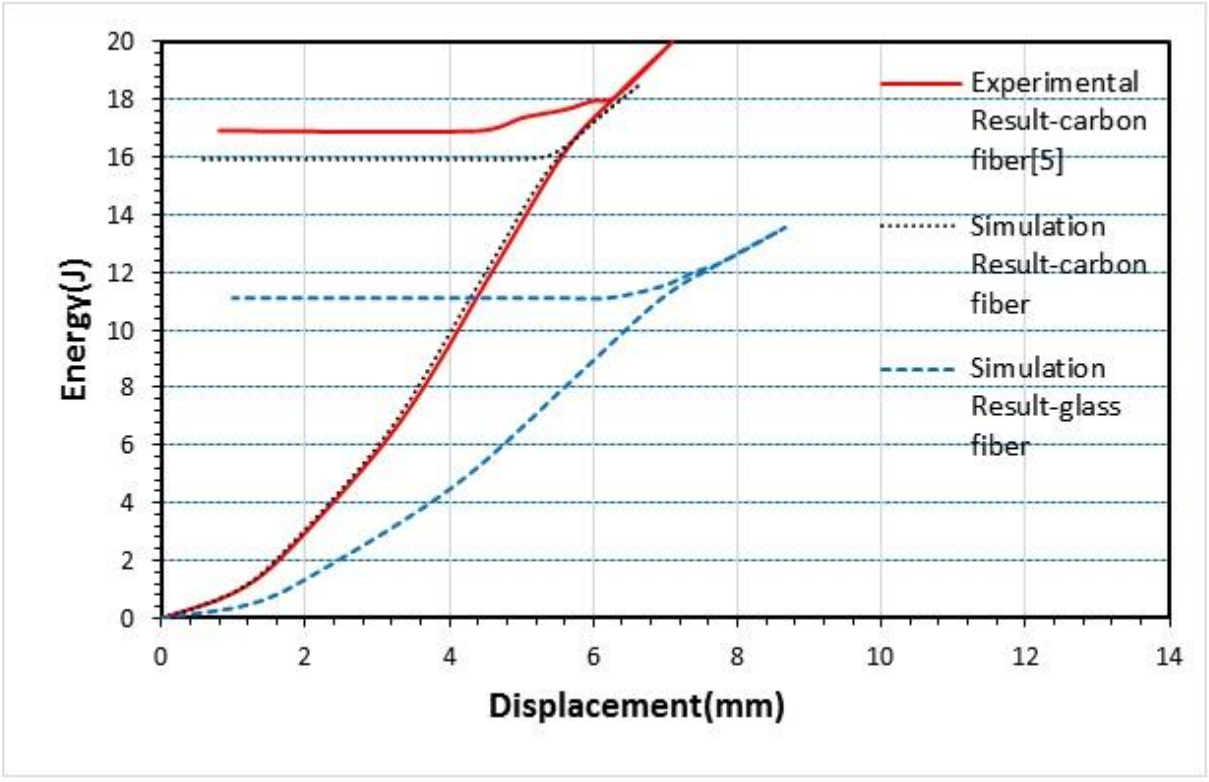


ه- هسته آلومینیومی موج‌دار قوسی شکل

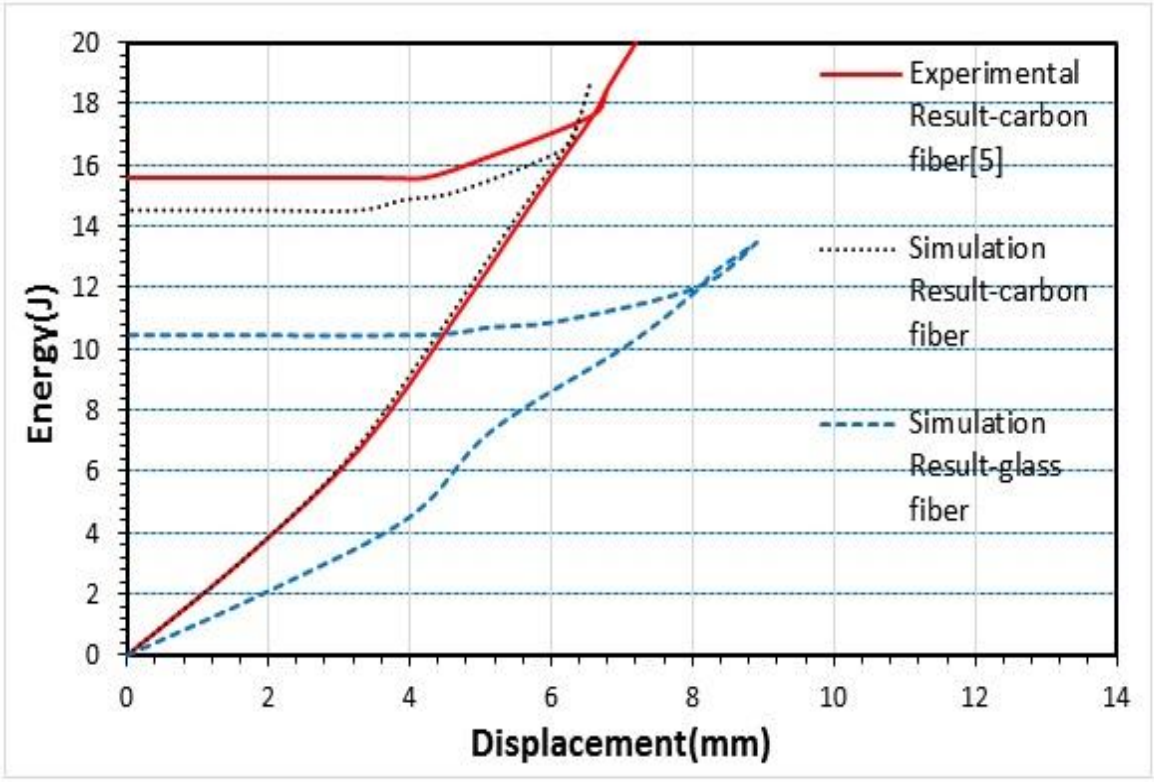
شکل ۸- مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه سازی نیرو-جابجایی در ساندویچ پنل‌های با رویه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌ی آلومینیومی با شکل‌های مختلف



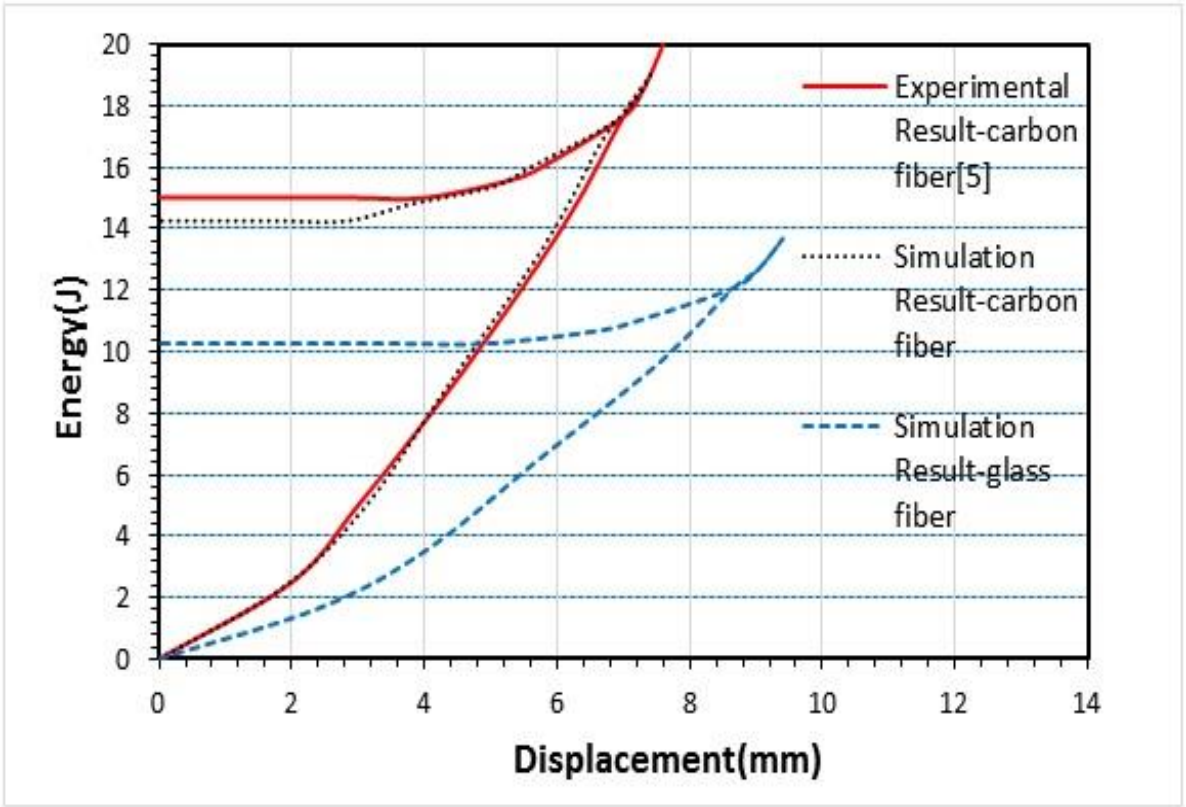
الف- هسته آلومینیومی موج‌دار ذوزنقه‌ای شکل



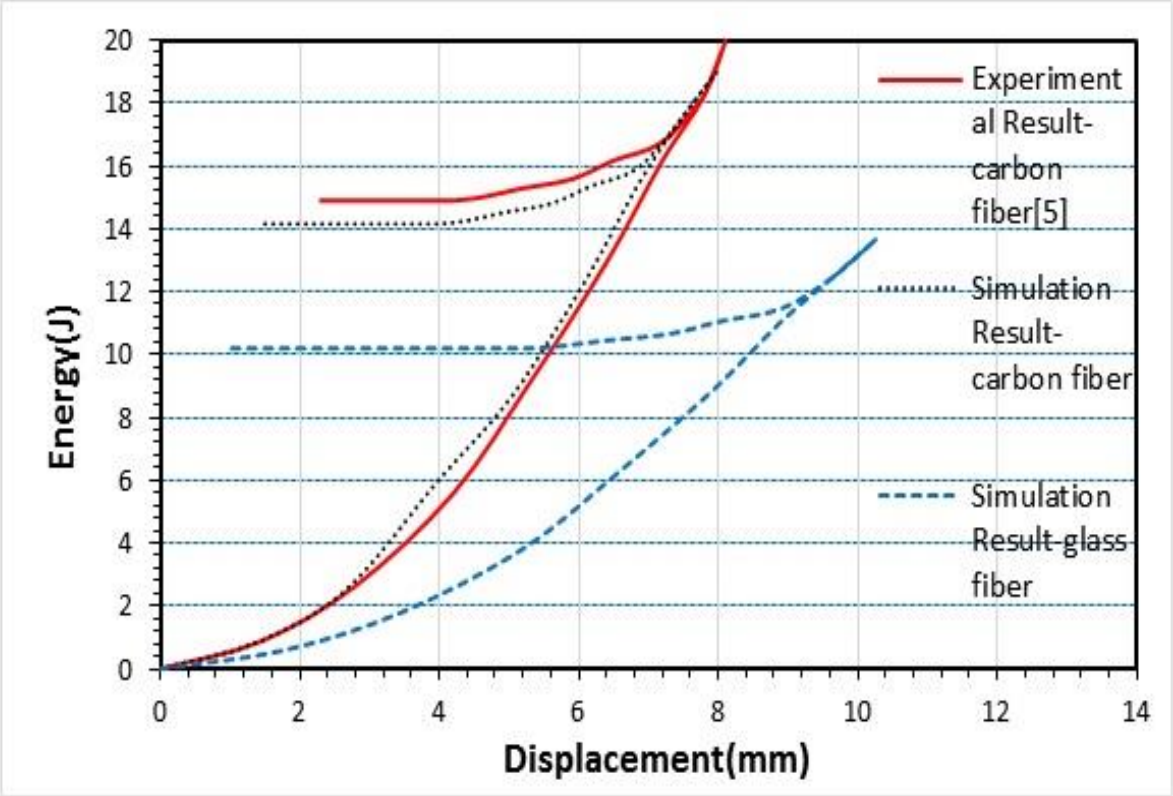
ب- هسته آلومینیومی موج‌دار مربعی شکل



ج- هسته آلومینیومی موجدار مثلثی شکل



د- هسته آلومینیومی موجدار سینوسی شکل



ه- هسته آلومینیومی موجدار قوسی شکل

شکل ۹- مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه سازی انرژی-جابجایی در ساندویچ پنل‌های با رویه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌ی آلومینیومی موجدار

در شکل (۸) مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی نمودار نیرو-جابجایی در ساندویچ پنل‌های با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌های موجدار به شکل‌های هندسی ذوزنقه‌ای، مربعی، مثلثی، سینوسی و قوسی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که دقت و اختلاف نتایج تجربی و شبیه سازی تقریبا پنج درصد می‌باشد.

در شکل (۹) مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی عددی نمودار انرژی-جابجایی در ساندویچ پنل‌های با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته های موجدار با هندسه ذوزنقه‌ای، مربعی، مثلثی، سینوسی و قوسی بررسی شده است. این نمودارها میزان جذب انرژی در ساندویچ پنل با خیز آن را نشان می‌دهد. نتایج تجربی موجود و نتایج شبیه سازی فرآیند با نرم افزار آباکوس با اختلاف کمتر از پنج درصدی به هم نزدیک می‌باشد.

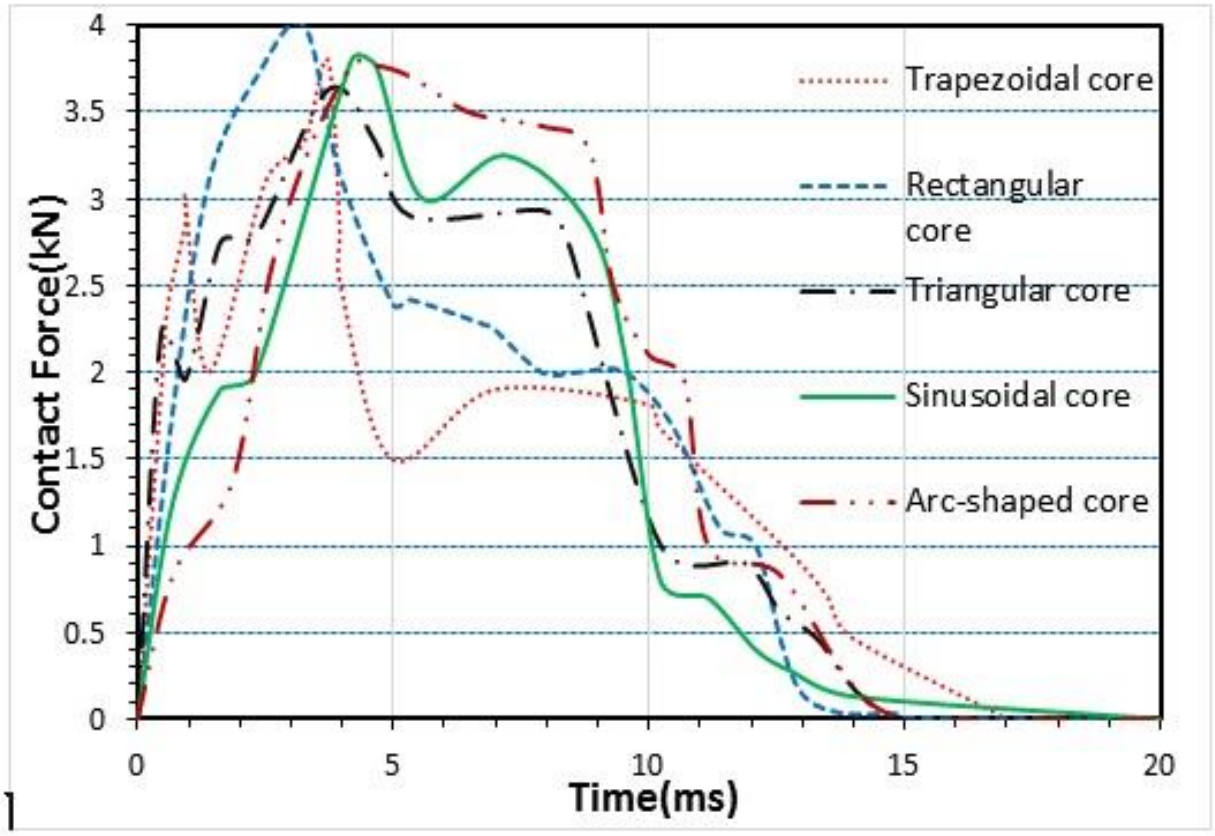
۴- بررسی اثرات شکل هندسی هسته

۴-۱- ساندویچ پنل‌های با رویه CFRP

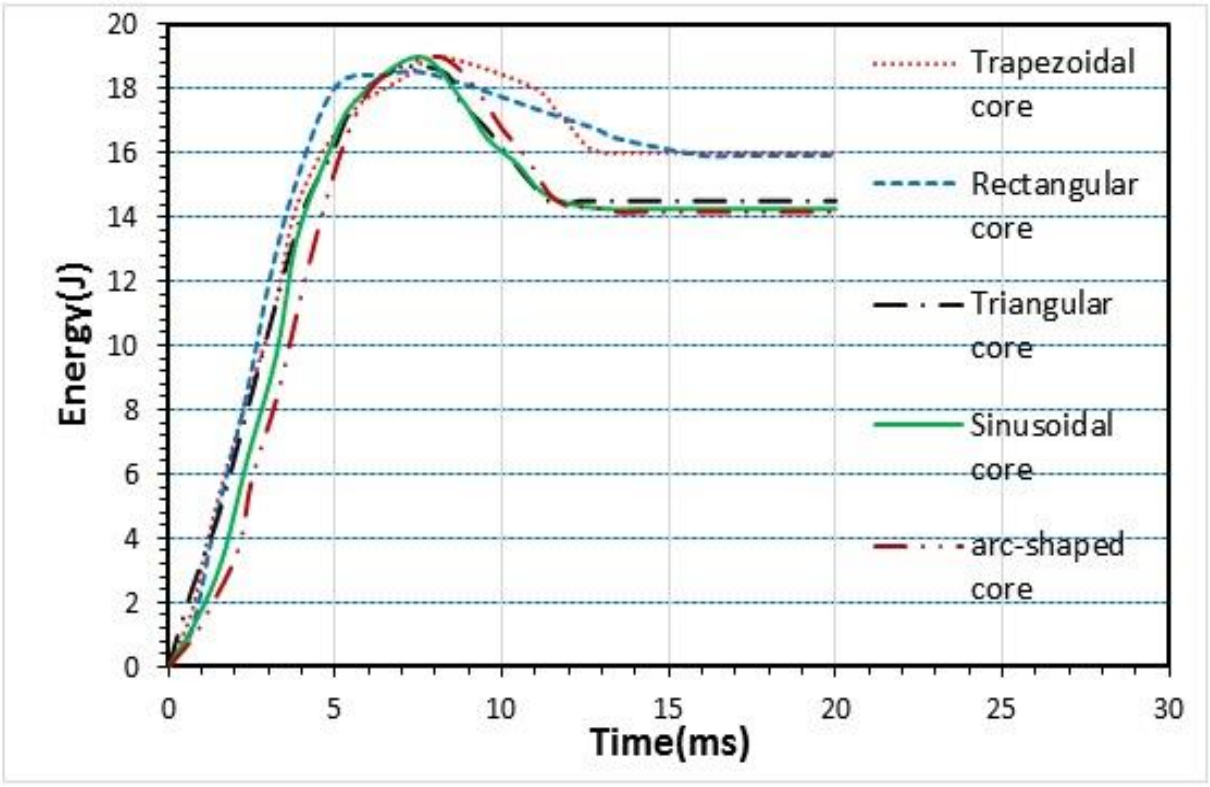
شکل (۱۰) منحنی نیروی تماسی- زمان، انرژی – زمان، نیروی تماسی بر حسب تغییر مکان محل برخورد و انرژی- تغییر حاصل از شبیه سازی بارگذاری ضربه سرعت پایین بر روی پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه های

کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته های مختلف را نشان می‌دهد، مشاهده می گردد که ساندویچ پنل با هسته موجدار مربعی بیشترین نیروی تماسی و ساندویچ پنل با هسته مثلثی کمترین نیروی تماسی را دارد. همچنین ساندویچ پنل با هسته موجدار مربعی کمترین زمان تماس و ساندویچ پنل با هسته موجدار سینوسی بیشترین زمان تماس را داشته است. علاوه بر آن مطابق نمودار انرژی- زمان نشان داده شده در شکل (۱۰)، ساندویچ پنل با هسته ذوزنقه ای و مربعی شکل بیشترین قابلیت جذب انرژی را دارند و مقاومت بیشتری در برابر بارگذاری ضربه ای سرعت پایین از خود نشان می‌دهند. همچنین ساندویچ پنل های با هسته قوسی و سینوسی کمترین میزان جذب انرژی را داشته و مقاومت کمتری در برابر بارگذاری ضربه ای سرعت پایین خواهد داشت. مطابق نمودار نیرو- جابجایی نشان داده شده ساندویچ پنل با هسته موجی شکل قوسی، بیشترین تغییر مکان در محل ضربه و ساندویچ پنل با هسته مثلثی شکل کمترین میزان تغییر مکان را خواهد داشت. همچنین ساندویچ پنل های با هسته ذوزنقه‌ای و مربعی بیشترین قابلیت جذب انرژی و ساندویچ پنل‌های با هسته قوسی و سینوسی بیشترین تغییر مکان محل برخورد را دارد.

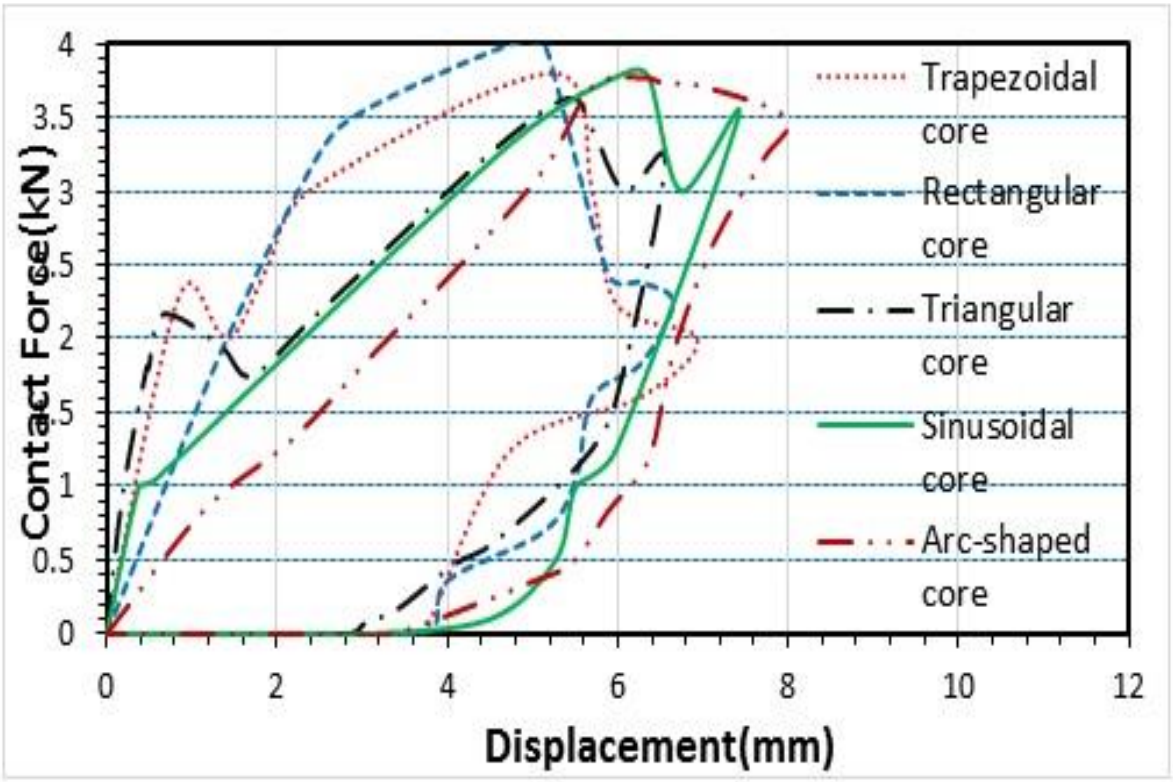
در شکل (۱۱) کانتور تغییر مکان محل برخورد در زمان ۲۰ میلی‌ثانیه بعد از برخورد را برای پنج نمونه ساندویچ پنل شبیه سازی شده با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته های آلومینیومی موجدار با هندسه های متفاوت آورده شده است. همانطور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است ناحیه قرمز رنگ بیشترین تاثیر را از بارگذاری ضربه ای سرعت پایین داشته و بیشترین آسیب ساندویچ پنل مربوط به این ناحیه می باشد.



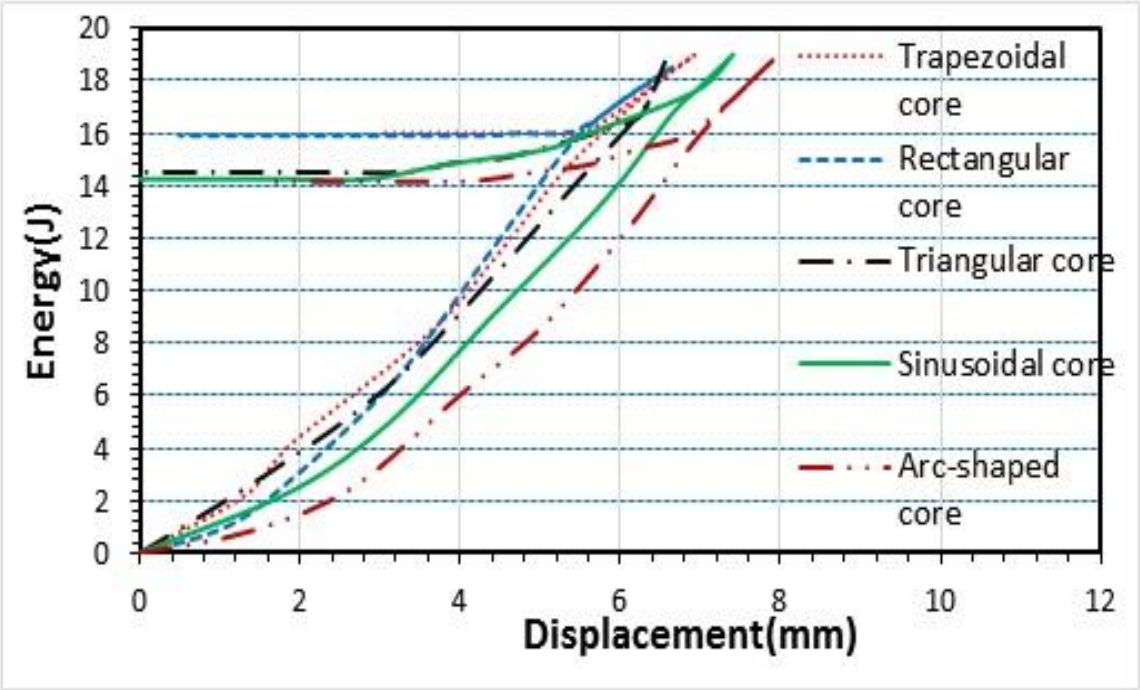
الف- نمودار نیرو-زمان



ب- نمودار انرژی-زمان

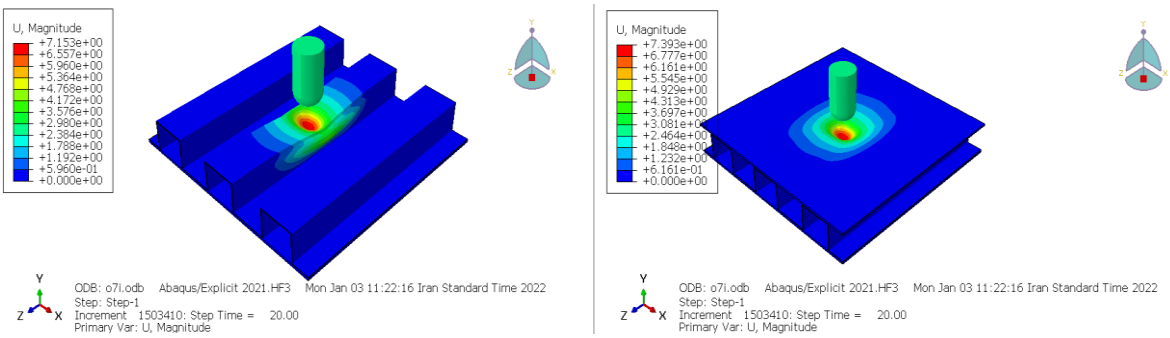


ج- نمودار نیرو-جابجایی

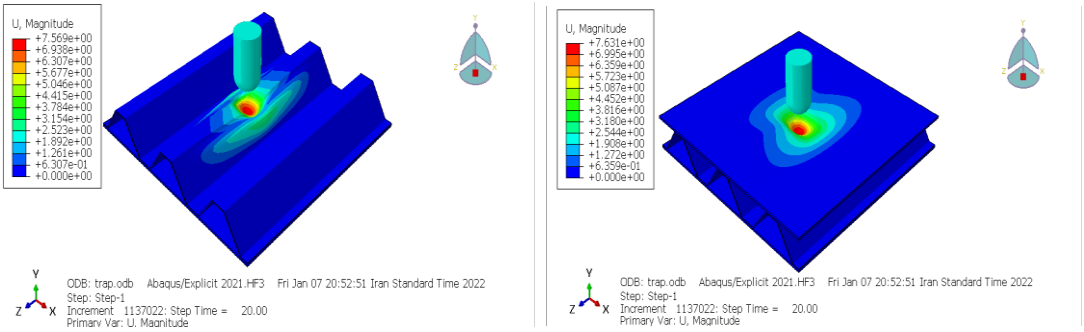


د- نمودار انرژی-جابجایی

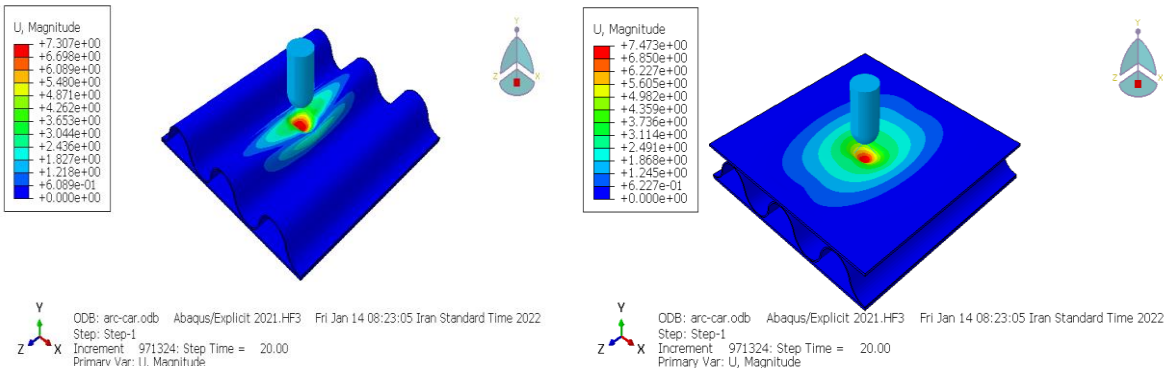
شکل ۱۰- منحنی نیروی تماسی، جابجایی ، انرژی – زمان پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته‌های آلومینیومی موج‌دار



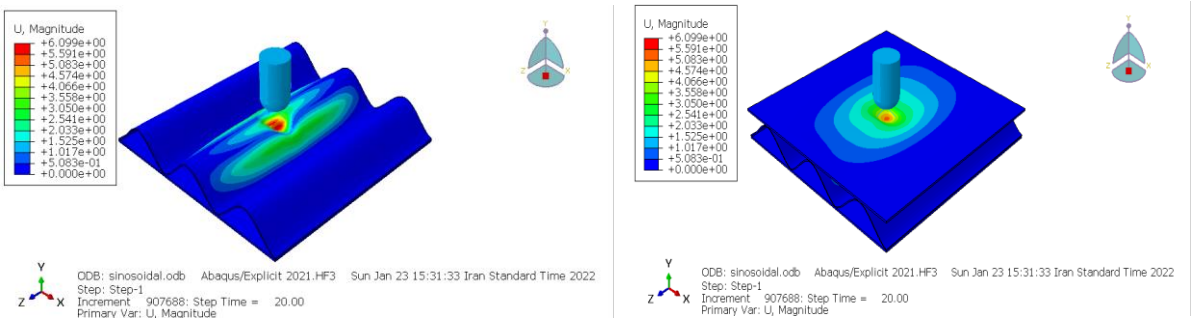
الف- هسته آلومینیومی موج‌دار مربعی



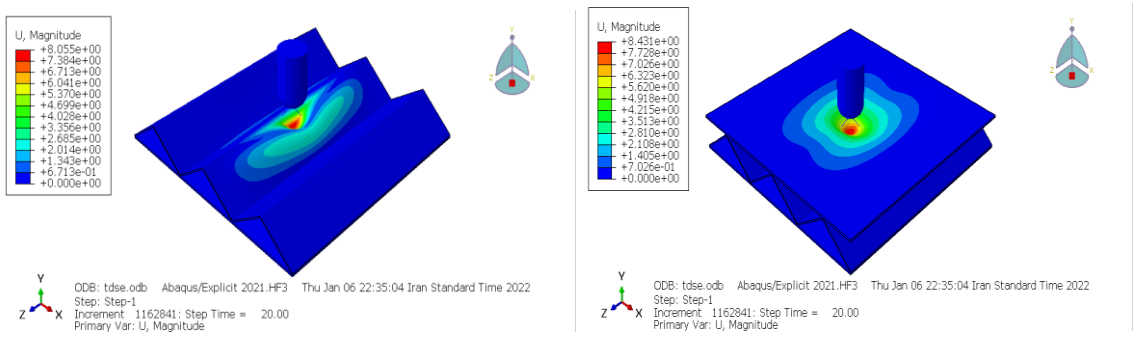
ب- هسته آلومینیومی موج‌دار ذوزنقه ای



ج- هسته آلومینیومی موجدار قوسی



د- هسته آلومینیومی موجدار سینوسی



ه- هسته آلومینیومی موجدار مثلثی

شکل ۱۱- کانتور تغییر مکان و وضعیت ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته‌های مختلف بعد از اصابت ضربه

در جدول (۴)، مساحت ناحیه آسیب در پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته‌های آلومینیومی موجدار از طریق شمارش المان‌های طولی و عرضی ناحیه تحت آسیب ساندویچ پنل به دست آورده شده است. باتوجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که ساندویچ پنل‌های با هسته موجدار ذوزنقه‌ای و مربعی که قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر ساندویچ پنل ها دارند دارای مساحت ناحیه آسیب بیشتری نیز می‌باشد. دلیل این امر این است که هسته این ساندویچ پنل ها قابلیت پخش نیروی وارد شده به قسمت بیشتری از ساندویچ پنل را دارد به همین دلیل سطح بیشتری در معرض نیروی وارد شده قرار می‌گیرد و جذب انرژی افزایش و مساحت ناحیه آسیب دیده نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴- مساحت ناحیه آسیب در پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته آلومینیومی موجدار

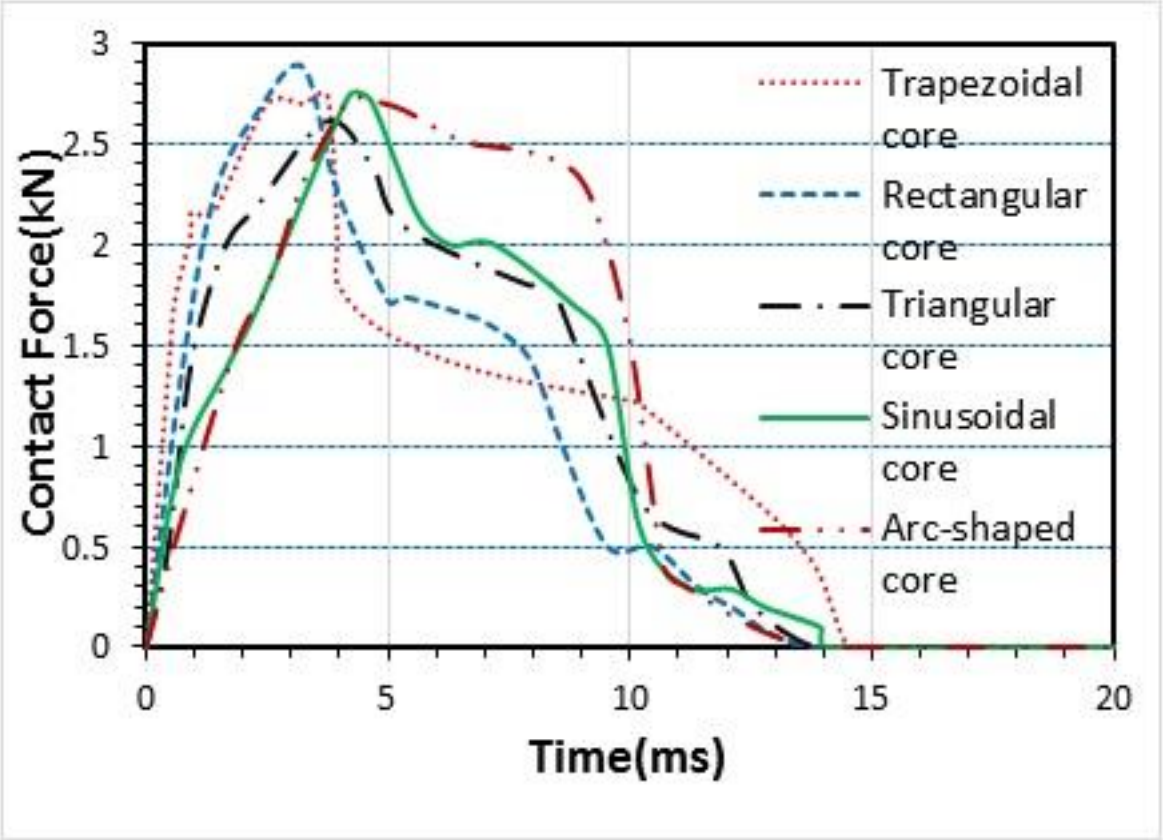
ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و هسته‌های آلومینیومی موج‌دار به شکل‌های زیر	مساحت ناحیه آسیب
مربعی	۴ درصد از مساحت کل
ذوزنقه ای	۳/۵ درصد از مساحت کل
قوسی	۳ درصد از مساحت کل
سینوسی	۱/۵ درصد از مساحت کل
مثلثی	۱/۹ درصد از مساحت کل

۴-۲- نتایج شبیه سازی ساندویچ پنل‌ها با رویهGFRP

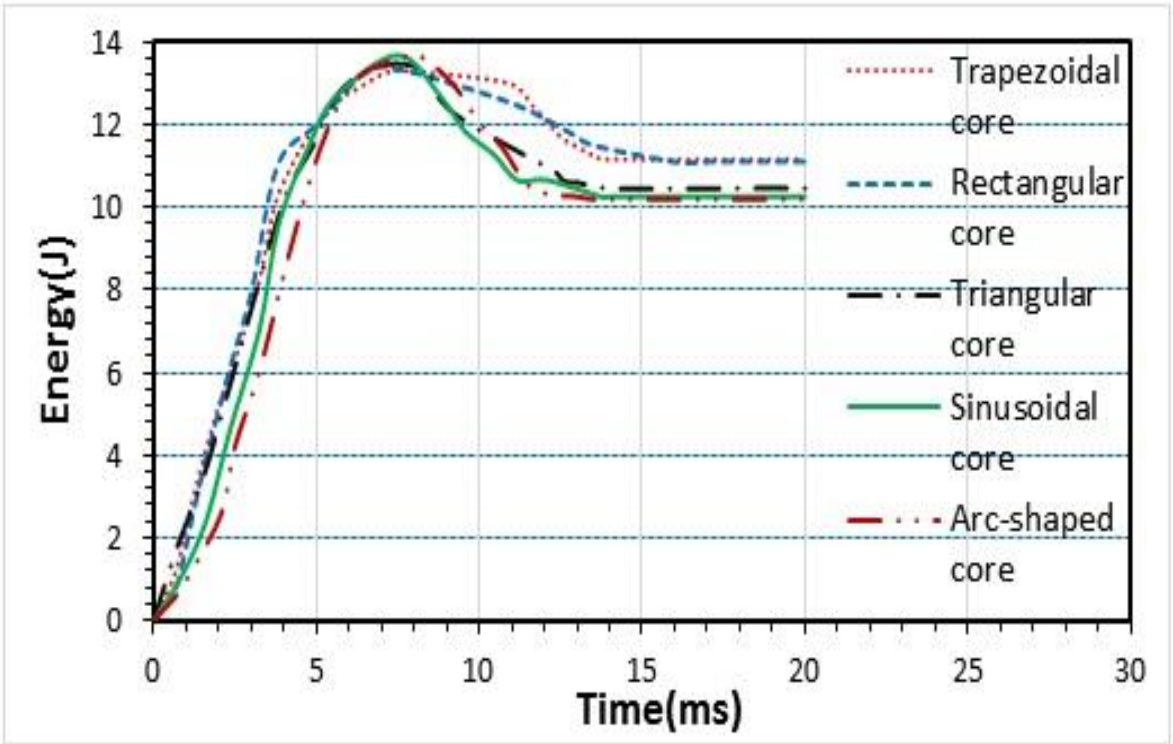
شکل (۱۲) نمودارهای نیروی تماسی- زمان، انرژی – زمان، نیروی تماسی - تغییر مکان و انرژی- تغییر مکان را برای پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه های یکسان ازجنس الیاف شیشه و هسته های آلومینیومی موج‌دار با شکل های هندسی مختلف را نشان می دهد. مشاهده می گردد که ساندویچ پنل با هسته مربعی نیروی تماسی بیشتری را نسبت به سایر ساندویچ پنل ها دارد. همچنین در ساندویچ پنل های با هسته قوسی و مربعی نیرو در زمان کمتر و در ساندویچ پنل ذوزنقه ای نیرو در زمان بیشتری به صفر رسیده است. مطابق منحنی انرژی- زمان نشان داده شده در شکل (۱۲) ساندویچ پنل با رویه‌های از جنس الیاف شیشه و هسته‌های آلومینیومی موج‌دار مربعی بیشترین جذب انرژی ناشی از برخورد را خواهد داشت. همچنین مطابق نمودار نیرو-جابجایی، ساندویچ پنل با هسته موج‌دار قوسی و سینوسی شکل بیشترین جابجایی را در بین پنج نمونه ساندویچ پنل دارا می باشد. علاوه بر آن مطابق نمودار انرژی-جابجایی، ساندویچ پنل با هسته موج‌دار ذوزنقه ای و مربعی بیشترین جذب انرژی و ساندویچ پنل با هسته قوسی و سینوسی بیشترین جابجایی را دارد.

در شکل (۱۳) پنج نمونه ساندویچ پنل شبیه سازی شده با نرم افزار آباکوس با رویه کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه و هسته‌های آلومینیومی موجی شکل مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است ناحیه قرمز رنگ بیشترین تاثیر را از بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین داشته و بیشترین آسیب ساندویچ پنل مربوط به این ناحیه می‌باشد.

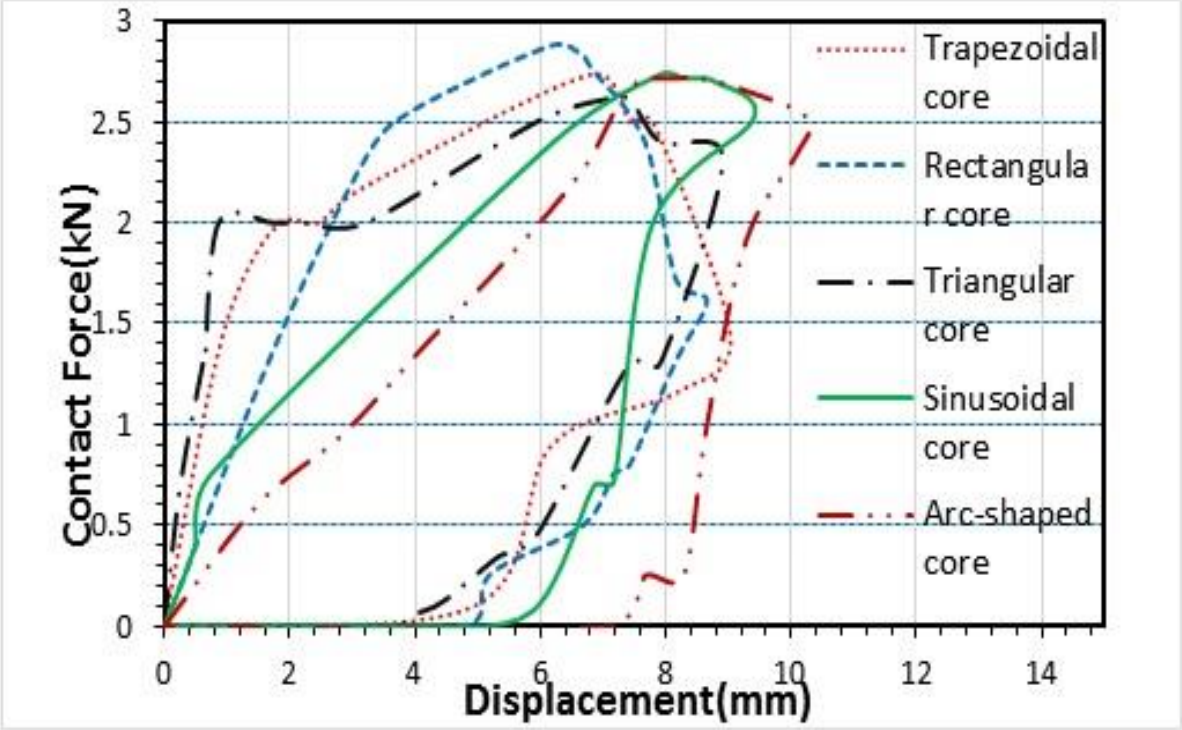
همانطور که در قسمت‌های قبل بیان شد ساندویچ پنل با هسته‌های ذوزنقه ای و مربعی به دلیل قابلیت پخش نیرو به قسمت‌های بیشتری از ساندویچ پنل دارای قابلیت جذب انرژی بیشتر ومساحت ناحیه آسیب بیشتری هستند. در جدول (۵) مساحت ناحیه آسیب در پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته آلومینیومی موج‌دار را نشان می دهد. هسته مربعی بیشترین مساحت ناحیه آسیب دیده و هسته سینوسی کمترین ناحیه آسیب را دارد.



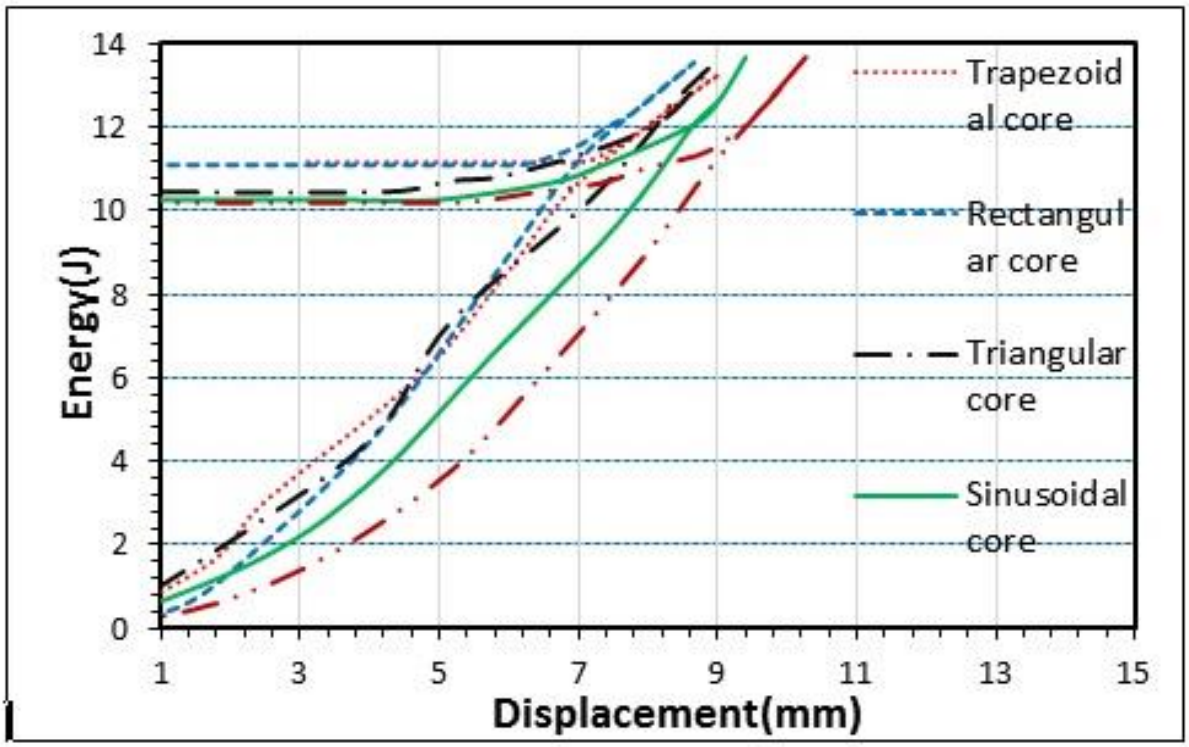
الف– نمودار نیرو –زمان



ب– نمودار انرژی-زمان

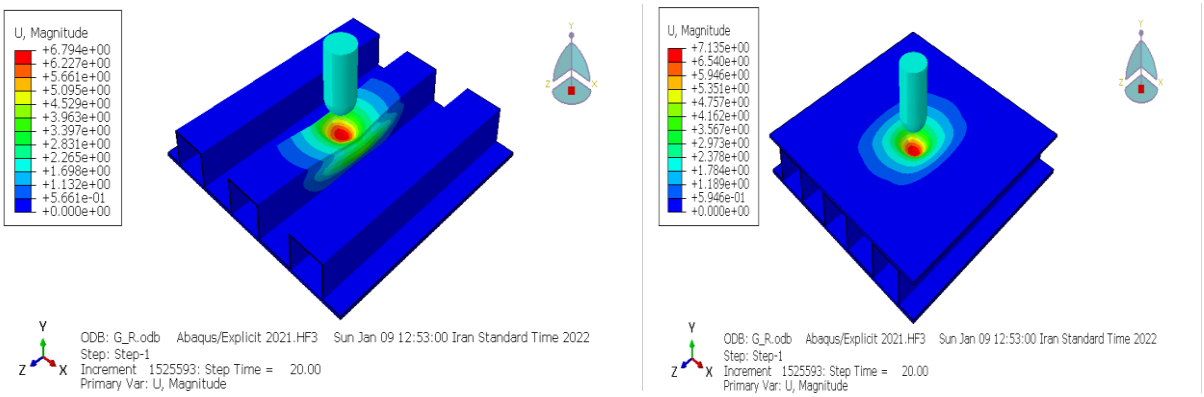


ج- نمودار نیرو-جابجایی

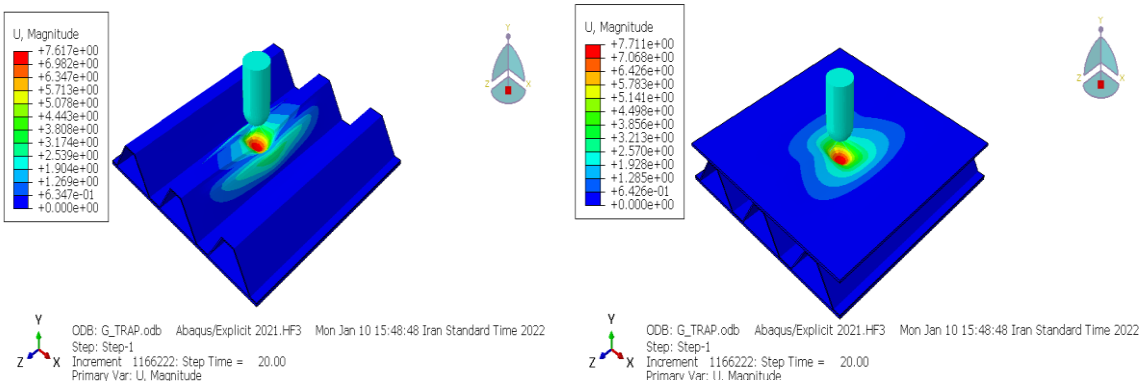


د- نمودار انرژی-جابجایی

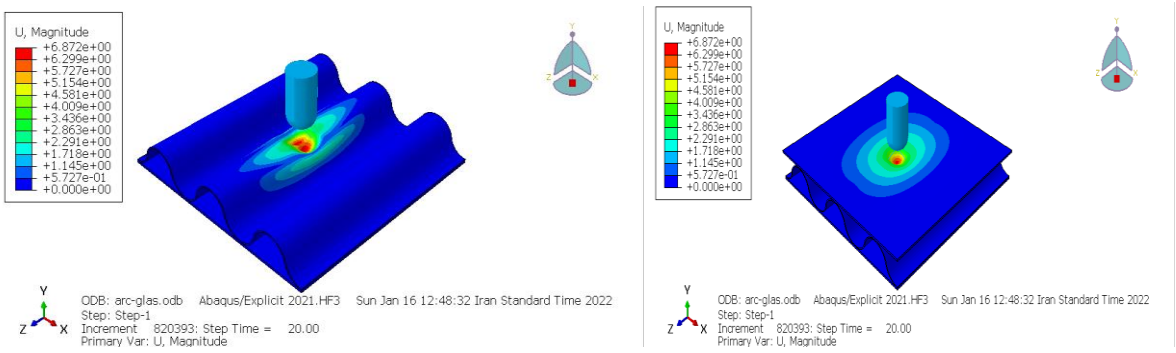
شکل ۱۲- منحنی های نیروی تماسی، تغییر مکان و انرژی- زمان پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته های مختلف



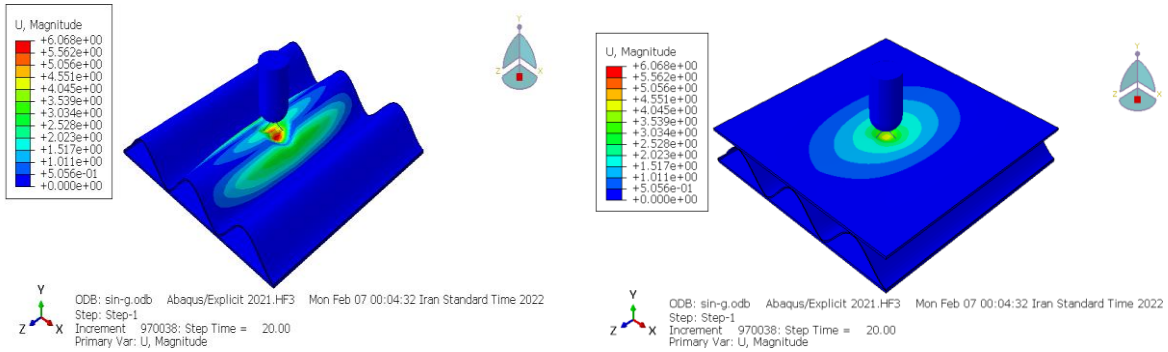
الف– هسته آلومینیومی موجدار مربعی



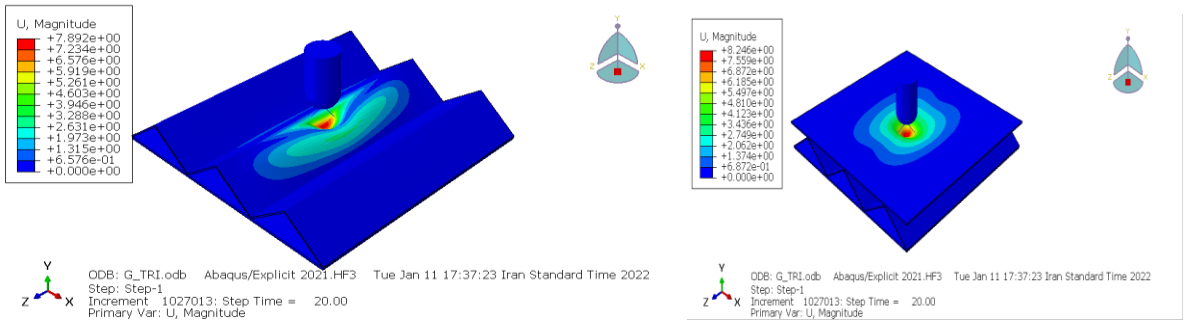
ب– هسته آلومینیومی موجدار ذوزنقه ای



ج– هسته آلومینیومی موجدار قوسی شکل



د– هسته آلومینیومی موجدار سینوسی



۵- هسته آلومینیومی موج‌دار مثلثی

شکل ۱۳- ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته‌های آلومینیومی مختلف شکل بعد از اصابت ضربه زننده

جدول ۵- مساحت ناحیه آسیب در پنج نمونه ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته آلومینیومی موجی شکل

ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و هسته آلومینیومی موجی شکل	مساحت ناحیه آسیب
مربعی	۴/۵ درصد از مساحت کل
ذوزنقه ای	۳/۷ درصد از مساحت کل
قوسی	۳/۵ درصد از مساحت کل
سینوسی	۱/۸ درصد از مساحت کل
مثلثی	۲/۲ درصد از مساحت کل

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند ضربه سرعت پایین روی ساندویچ پنل‌های با رویه‌های کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه و هسته‌های موجی شکل‌آلومینیومی مربعی، ذوزنقه‌ای، قوسی، سینوسی و مثلثی شکل بررسی شده است. این فرآیند به روش شبیه‌سازی اجزای‌محدود با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. با مقایسه صورت گرفته دقت نتایج در محاسبه نیروی تماسی، خیز محل برخورد ورق و انرژی جذب شده توسط آن همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. دستاوردهای علمی و کاربردی مقاله به شرح زیر می باشد:

- ساندویچ پنل با هسته‌های ذوزنقه ای و مربعی به دلیل اینکه قادر به پخش نیروی ضربه به قسمت‌های بیشتری از ساندویچ پنل هستند و سطح بیشتری را در معرض نیروی ضربه قرار می‌دهند قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به سایر ساندویچ پنل‌ها دارند.
- در ساندویچ پنل‌ها با هسته قوسی وسینوسی شکل نیرو روی سطح کمتری از ساندویچ پنل نسبت به بقیه نمونه ها پخش ده و لذا تغییر مکان محل برخورد بیشتری نسبت به سایر ساندویچ پنل‌ها دارند.
- ساندویچ پنل با هسته‌ی مربعی شکل نیروی تماسی بیشتری نسبت به سایر ساندویچ پنل‌ها دارد.
- مساحت ناحیه آسیب در ساندویچ پنل با هسته‌های ذوزنقه ای و مربعی بیشتر از سایر ساندویچ پنل‌ها می‌باشد. در این نوع ساندویچ پنل‌ها سطح تماس ساندویچ پنل با افزایش نیروی تماسی افزایش می یابد.

- ساندویچ پنل‌های با رویه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن به دلیل استحکام بالاتر قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه دارند.
- میزان تغییر مکان محل برخورد در ساندویچ پنل‌های با رویه کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه بیشتر از الیاف رویه با الیاف کربن است.
- به دلیل استحکام کمتر الیاف شیشه نسبت به الیاف کربن، مساحت ناحیه آسیب در ساندویچ پنل تقویت شده با رویه‌های از جنس الیاف شیشه بیشتر از رویه با الیاف کربن است.

مراجع

[1] R. R. Allah, R. G. Hossein, and H. Saeed, "Flexural Behavior of Sandwich Structures Consists of Corrogated Composite Core with Different Geometries," 2015, Vol. 28, No. 3, pp. 171-187, doi: https://doi.org/10.22063/JIPST.2015.1254.

[2] J. Liu, W. He, D. Xie, and B. Tao, "The Effect of Impactor Shape on the Low-velocity Impact Behavior of Hybrid Corrugated Core Sandwich Structures," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 111, pp. 315-331, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.060.

[3] F. Heydaripebdani, "Effect of Corrugated Core on Low-velocity Impact Response of Sandwich Panels with Layer-wise Graded foam Core and Smart Face Sheets," *Journal of Mechanical Research and Application*, Vol. 2, No. 1, pp. 59-68, 2020, [Online]. Available: http://sanad.iau.ir/fa/Article/1055786.

[4] M. a. Foroghinia, A.L., Sotodeh, "Experimental Investigation of Energy Absorption of Composite Sandwich Panel with Sinusoidal Corrugated Core and Filled with Foam," in *16th International Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 2016.

[5] Y. Rong, J. Liu, W. Luo, and W. He, "Effects of Geometric Configurations of Corrugated Cores on the Local Impact and Planar Compression of Sandwich Panels," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 152, pp. 324-335, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.130.

[6] J.-S. Yang *et al.*, "Low velocity Impact Behavior of Carbon Fibre Composite Curved Corrugated Sandwich Shells," *Composite Structures*, Vol. 238, p. 112027, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112027.

[7] H. a. O. J. Tavakoli T, "Investigating the Energy Absorption of Sandwich Shells with Elastomeric Tops and Composite Corrugated Cores under Low Velocity Impact," Presented at the Composite Application in Technology Conference, Faculty of Modern Sciences and Technologies, 2020.

[8] S. Khalili, S. Khalili, R. E. Farsani, and P. Mahajan, "Flexural Properties of Sandwich Composite Panels with Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy Facesheets Strengthened by SMA Wires," *Polymer Testing*, Vol. 89, p. 106641, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106641.

Effects of Geometric Configurations of Corrugated Cores on the Impact Loading and Energy Absorption of Sandwich Panels with Composite Face Sheets

Afshin Komeh
M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
afshinkomeh452@gmail.com

*Corresponding author: **Saeed Feli**
Professor, Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
felisaeid@razi.ac.ir

Abstract

In this paper, the low velocity impact response of sandwich panels with composites face sheets and aluminum based corrugated cores is modeled with numerical simulation, and the amount of energy absorption, contact force, deformation of the impact area and dimensions of the damage area are calculated and compared with experimental results. Sandwich panels with composite face sheets reinforced with carbon fibers and glass fibers and corrugated aluminum-based cores are in square, trapezoidal, arched, sinusoidal and triangular shapes. Through numerical simulations ten examples have been analyzed. Dimensions and weights of face sheets and cores of the samples are the same. The obtained results show that in the sandwich panel with trapezoidal and square corrugated cores, the contact force is applied to a larger area and the energy absorption and dimensions of the damage area are greater. Also, sandwich panels with arc and sinusoidal wave shape cores have the greatest displacement at the point location compared to other sandwich panels.

Keywords: Sandwich panel, Corrugated core, Low velocity impact, Energy absorption, Numerical simulation