



اثر هسته ی موج دار بر ضربه ی سرعت پایین روی پنل های ساندویچی با رویه های هوشمند و هسته فومی لایه چینی شده (LAYER-WISE GRADED FOAM)

فرنام حیدری پبدنی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

(Email: farnam.hey@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۰۵-۱۸ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۰۵-۱۰

چکیده: در بحث ضربه روی سازه های کامپوزیتی، افزایش سفتی رویه های سازه یکی از مهمترین راهکار های افزایش مقاومت سازه کامپوزیتی در برابر ضربه می باشد. در این تحقیق به بررسی اثر هسته ی موج دار بر ضربه ی سرعت پایین روی پنل های ساندویچی با رویه های هوشمند و فومی لایه چینی شده پرداخته شد. در این تحقیق از هسته های فومی با چگالی متفاوت لایه چینی شده و آلومینیوم های موج دار و رویه های کربن/اپوکسی تقویت شده با سیم های آلیاژ حافظه دار (SMA) در سازه ساندویچی مورد تحقیق استفاده شده است. سازه های ساندویچی با پیکره بندی های متفاوت تحت ضربه کم سرعت قرار گرفتند و نتایج نشان داد اضافه نمودن هسته موج دار به افزایش مقاومت به ضربه سازه و افزایش نیرو تماسی ضربه منجر شده است.

واژه های کلیدی: آلیاژ حافظه دار، ساندویچ پانل، هسته موجدار، هسته فومی لایه چینی شده

۱. مقدمه

به دلیل عدم تقویت سازه های ساندویچی کامپوزیتی در راستای ضخامت، این سازه ها مقاومت کمی در برابر بارگذاری ضربه ای دارند. آسیب های ناشی از ضربه یکی از مهم ترین مشکلاتی است که سازه های کامپوزیتی با آن روبرو هستند [۱]. حال برای رفع این مشکل از تقویت کننده هایی چون آلیاژ های حافظه دار استفاده می شود که با خاصیت شبه ارتجاعی، امکان افزایش سفتی و مقاومت به ضربه را در سازه های کامپوزیتی افزایش می دهند. خاصیت شبه ارتجاعی آلیاژ های حافظه دار امکان تحمل کرنش شکست بالا و کرنش قابل بازیابی را ایجاد می سازد. این توانایی فشار بالا از الیاف SMA در درجه اول ناشی از یک تحول فاز مارتنزیتی ناشی از تنش است که باعث ایجاد منطقه فلات در منحنی تنش-کرنش می شود. این خاصیت باعث می شود که آلیاژ حافظه دار انرژی کرنشی بسیار بیشتری نسبت به سایر الیاف را قبل از شکست آنها جذب کند. در طی سالیان اخیر بررسی های خوبی در خصوص کاربرد آلیاژ های حافظه دار در بحث ضربه کم سرعت روی سازه های ساندویچی انجام شده است. در سال ۲۰۱۳ مؤ و همکارانش به بررسی اثر آلیاژ های حافظه دار در بهبود خواص ضربه در سازه های هوانوردی پرداخته اند. در این مقاله به صورت تجربی و عددی پاسخ یک صفحه کامپوزیتی ترموپلاستیک هوشمند را که تحت ضربه کم سرعت قرار گرفته است. نتایج نشان داد استفاده از آلیاژ های حافظه دار، افزایش مقاومت به آسیب کامپوزیت ها را افزایش داده و انرژی جذب شده قبل از شکست سطح بالاتری داشته است [۱]. در تحقیق دیگر خلیلی و همکارانش [۲] به بررسی پاسخ ضربه کم سرعت بر روی سازه های کامپوزیتی ترکیبی دیواره نازک فعال با سیم تعبیه شده SMA پرداخته اند. این مقاله به آنالیز پاسخ ضربه کم سرعت بر سازه های دیواره نازک پرداخته و برای این تحلیل از مدل دو درجه آزادی جهت بیان واکنش های بین

ضربه زننده و هدف استفاده شده است. نتایج نشان داده است که برخی از پارامترهای مهم هندسی و فیزیکی مانند کسر حجمی SMA، جهت گیری الیاف متوسط کامپوزیت، جرم ضربه، سرعت ضربه و نسبت طول به ضخامت صفحه (نسبت یک ساعت) از عوامل مهم مؤثر در طراحی این دست سازه ها بوده است. سال ۲۰۰۷ در تحقیقی دیگر خلیلی و همکارانش [۳] تأثیر روش افزایش سفتی هوشمند بر واکنش ضربه سرعت پایین بر روی سازه های هوشمند پرداختند. در این مقاله به افزایش سفتی سازه به روش هوشمند (SSP^۱) پرداخته شده است. مشاهده شد که با استفاده از SSP می توان ویژگی های مکانیکی سازه را بسیار بهبود بخشید. در مقاله ای دیگر در سال ۲۰۰۹ تأثیر آلیاژ حافظه شکل بر رفتار آسیب در برابر ضربه و خصوصیات پسماند لمینت های شیشه/ اپوکسی تحت دمای پایین توسط کانگ و کیم [۴] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد پاسخ ضربه لمینیت مورد بررسی تحت تأثیر دما و آلیاژ های حافظه دار قرار داشته و به دلیل تردی مواد تشکیل دهنده، میزان انرژی آستانه مقاومت در اثر دما تحت تأثیر قرار گرفته است. رغووان و همکارانش [۵] نیز در تحقیقی به خواص میرایی، کششی و ضربه کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با آلیاژ های حافظه دار (SMA) شبه الاستیک پرداختند. از پژوهش های صورت گرفته دیگر، شکوه فر و همکارانش [۶] به تحلیل و بهینه سازی صفحات کامپوزیت ترکیبی هوشمند در معرض تأثیر سرعت کم با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) پرداختند. در این مقاله به مطالعه و توسعه یک مدل دقیق برای خیز صفحه کامپوزیتی هوشمند پرداخته شده است. نتایج نشان داد که کسر حجمی عامل مهمتری در بهینه سازی و روند طراحی سازه ها بوده است. در سال ۲۰۱۳ خلیلی و آردالی [۷] به مطالعه پاسخ ضربه کم سرعت پانل چند لایه ضربردی متقارن دو انحنایی با سیم های SMA تعبیه شده پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که شعاع انحنا در پاسخ ضربه پانل ها اهمیت داشته و کاربرد سیم های حافظه دار در پنل های تخت بیشتر جهت کاهش تغییر شکل و خیز نمود پیدا کرده است. خلیلی و سعیدی [۸] نیز به بررسی پاسخ دینامیکی تیر چند لایه کامپوزیتی تقویت شده با سیم های SMA تحت ضربه چند جرم پرداختند. نتایج بدست آمده از پژوهش آن ها نشان دادند که سیم های آلیاژی حافظه دار تعبیه شده در تیر کامپوزیتی چند لایه باعث ایجاد انحراف کمتری در مقایسه با تیرهای فاقد سیم آلیاژ حافظه دار، شده است. در سال های اخیر پژوهشگرانی به تحقیقات در این حوزه اقدام کرده اند. لی و همکارانش [۹] در مقاله ای به بررسی پاسخ ضربه کم سرعت ساندویچی پنل هایی با هسته فومی و رویه ترکیبی کامپوزیت- آلیاژ حافظه دار پرداختند. هشت نوع از پنل ساندویچی با هسته فومی و رویه ترکیبی کامپوزیت- آلیاژ حافظه دار تحت تست ضربه ۳۵ ژول قرار گرفتند. نتایج نشان می دهد که مقاومت به ضربه در پانل ساندویچ هیبریدی SMA افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۹ گویدا و همکارانش [۱۰] در تحقیقی به تحلیل دینامیک ضربه کامپوزیت های ترکیبی هوشمند با آلیاژ های حافظه دار پرداختند. در این کار صورت گرفته، تحلیل رفتار کامپوزیت ترکیبی آلیاژ حافظه شکل برای کاربردهای هوایی با استفاده از یافته های حاصل از تجزیه و تحلیل عددی و آزمایش های تجربی بیان شده است. مهمترین نتیجه این تحقیق، بهبود واکنش ضربه کامپوزیت و جذب انرژی به لطف اثر فوق الاستیک بوده است. در تحقیقات دیگری که در سال های اخیر صورت گرفت است می توان به مقاله وو و همکارانش [۱۱] اشاره کرد. در این مقاله در خصوص رفتار ضربه سرعت پایین و تحت فشار قرار دادن پس از ضربه، ساندویچ پنل با هسته فومی با ورق های ترکیبی از SMA مطرح شده است. پینتو و همکارانش [۱۲] نیز در سال ۲۰۱۹ پاسخ مکانیکی کامپوزیت ترکیبی مبتنی بر آلیاژ حافظه شکل در معرض ضربه های سرعت پایین را بررسی نمودند. هم چنین در تحقیقی شرعیات و حسینی [۱۳] مقاله ای با موضوع نظریه کلی- محلی و مدل انرژی برای صفحه های ساندویچ با هسته های نرم و سیم های SMA ناهمسانگرد توزیع شده تحت بارهای ضربه ای ارائه نمودند. برای اولین نامتقارنی تنش- کرنش و ناهمسانگردی سیم های SMA در تحلیل واکنش ضربه گنجانیده شده است. در این تحقیق از هسته اکزتیک برای ساندویچ پنل استفاده شده است. هسته اکزتیک و سیم های حافظه دار باعث افزایش سفتی و نیروی تماس و در نتیجه کاهش خیز سازه ساندویچی مورد مطالعه شده اند.

همانطور که مشاهده شد در خصوص استفاده از سیم های حافظه دار در سازه های کامپوزیتی تحقیقاتی صورت گرفته است. اما تا به حال تحقیقی در خصوص متغیر بودن خواص هسته و تقویت کننده های جدیدی چون هسته های موج دار در کنار افزایش سفتی رویه های کامپوزیتی بوسیله سیم های SMA صحبت نشده است. از این رو تصمیم بر آن شد تا در خصوص این موضوع تحقیقات مورد نظر صورت گیرد و در خصوص نیروی تماسی و انرژی درونی سازه بحث شود.

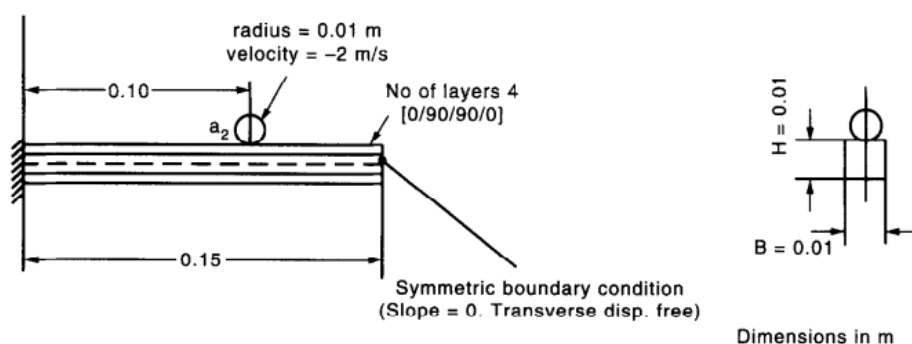
¹ smart stiffening procedure

۲- تحلیل المان محدود

تحلیل سازه های مورد نظر توسط نرم افزار المان محدود ANSYS صورت گرفته است. مش های سازه با توجه به نوع آنالیز Explicit/linear در نظر گرفته شدند.

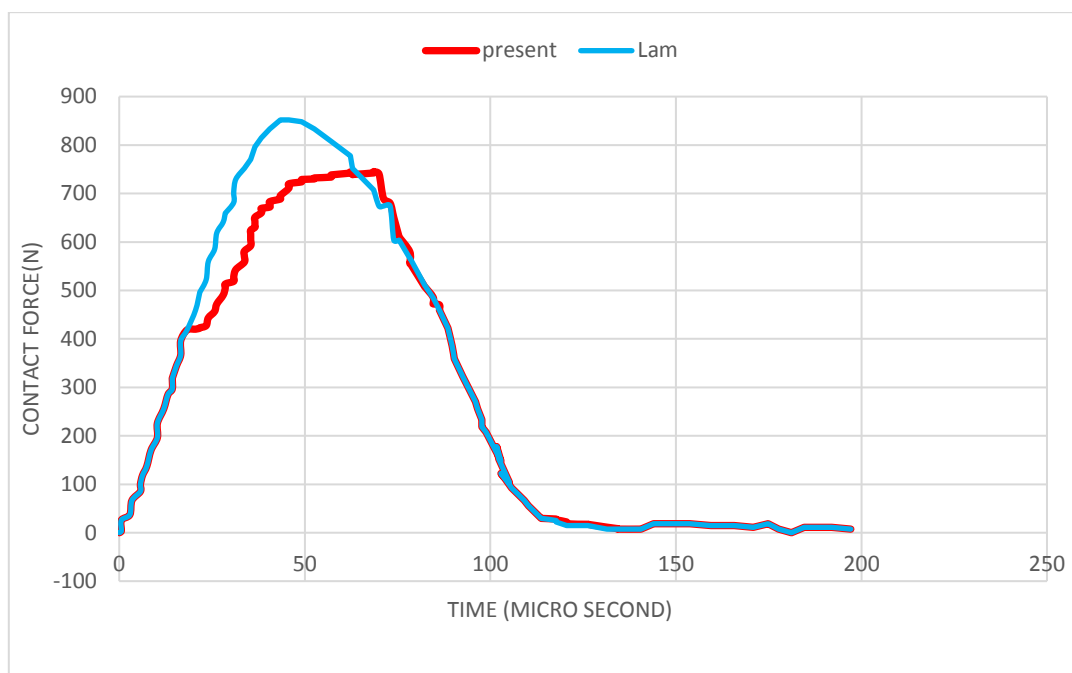
صحت سنجی مدلسازی و تحلیل:

در این بخش جهت صحت سنجی مدلسازی و تحلیل نیازمند مقایسه بین نتایج مدلسازی و آنالیز ما و مقاله لام و ساتیامورثی [۱۴] انجام شده است. یک سیستم متشکل از تیر چند لایه و جرم ضربه زننده کروی همانند مقاله لام و همکارش در نظر گرفته شد. خواص مواد (کربن / اپوکسی AS413501) در نظر گرفته شده عبارتند از: $E_1 = 144.80 \text{ GPa}$, $E_2 = 9.65 \text{ GPa}$, $G_{12} = G_{13} = 4.14 \text{ GPa}$, $G_{23} = 3.45 \text{ GPa}$, $\rho = 1389.23 \text{ kg/m}^3$ و $\nu_{12} = 0.3$. در مقاله مورد بررسی دو سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سیستم ۲ که در شکل ۱ قابل مشاهده است، جهت صحت سنجی انتخاب شده است. در این تحلیل طبق مقاله مورد بررسی جرم ضربه زننده کروی به شعاع ۱ سانتی متر و جنس فولاد با سرعت 2 m/s در نظر گرفته شد [۱۴].



شکل ۱: نمایی از سیستم ۲ که صحت سنجی بر طبق آن صورت گرفته است [۱۴]

نتایج بدست آمده از تحلیل توسط ANSYS با نتایج مقاله مورد بررسی مقایسه شد و همپوشانی خوبی مشاهده شد. قیاس نتایج بدست آمده از تحلیل ما و نتایج لام و همکارش در شکل ۲ قابل مشاهده است. این قیاس بر روی نیروی تماسی بین جرم ضربه زننده و تیر چند لایه صورت گرفته است.



شکل ۲: نمودار های نیرو تماسی تحقیق حاضر و تحقیق لام و ساتیامورثی [۱۴]

مدلسازی و تحلیل تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر همانطور که پیش تر بیان شد، به وسیله نرم افزار ANSYS به تحلیل پاسخ ضربه بر روی پنل های ساندویچی مورد تحقیق پرداخته شد. پنل های مربعی شکل از رویه های با جنس کربن/اپوکسی با ابعاد 96×96 mm تشکیل شده است. هسته پنل های ساندویچی متشکل از ۳ نوع فوم با ضخامت هریک $4/283$ mm با مشخصات جدول ۱ در نظر گرفته شد. هم چنین در این تحلیل برخی از هسته پنل های ساندویچی علاوه بر فوم از هسته موج دار آلومینیومی تشکیل شده است. خواص مربوط به رویه های کربن/اپوکسی، سیم های حافظه دار، هسته موجدار آلومینیومی به ترتیب در جدول ۲ تا ۴ آمده است. هم چنین رویه های پنل ساندویچی به صورت $[0/90/0]_s$ با ضخامت هرلایه کربن/اپوکسی mm ۱ در نظر گرفته شده است. ضخامت هر سیم نیتینول $0/5$ mm و راستای قرارگیری آن ها در راستای الیاف در نظر گرفته شده است. در این تحلیل راستای X راستای عرضی الیاف و راستای Y راستای اصلی الیاف در نظر گرفته شده است. فوم ها به ترتیب $C70.50/C70.90/C70.120$ به عنوان هسته در نظر گرفته شدند.

جدول ۱: خواص مکانیکی فوم ها [۱۵]

افزایش طول برشی در شکست (%)	مدول برشی (MPa)	استحکام برشی (MPa)	مدول کششی در صفحه (MPa)	استحکام کششی در صفحه (MPa)	مدول فشاری (MPa)	استحکام فشاری (MPa)	چگالی (kg/m^3)	فوم
۱۶	۲۲	۰/۸۵	۴۵	۱/۳	۶۹	۰/۹۰	۶۰	C70.50
۲۳	۴۰	۱/۷	۸۴	۷/۲	۱۳۰	۲	۱۰۰	C70.90
۳۰	۷۵	۳/۵	۱۷۵	۶	۲۸۰	۵/۲	۲۰۰	C70.120

جدول ۲: خواص مکانیکی رویه های پنل های ساندویچی [۱۶]

مدول طولی (GPa)	مدول عرضی و خارج از صفحه (GPa)	مدول برشی (GPa)	$G_{12}=G_{13}$	مدول برشی (GPa)	G_{23}	ضریب ضرایب	پوآسون $\nu_{12}=\nu_{13}$	پوآسون ν_{23}	چگالی kg/m^3	استحکام فشاری طولی (MPa)	استحکام کششی طولی (MPa)	استحکام فشاری عرضی (MPa)	استحکام کششی عرضی (MPa)	استحکام برشی (MPa)
۱۲۳	۸/۴	۴	۳	۰/۳۲	۰/۳	۱۵۶۰	۸۰۰	۲۱۰۰	۱۲۰	۲۵	۴۰			

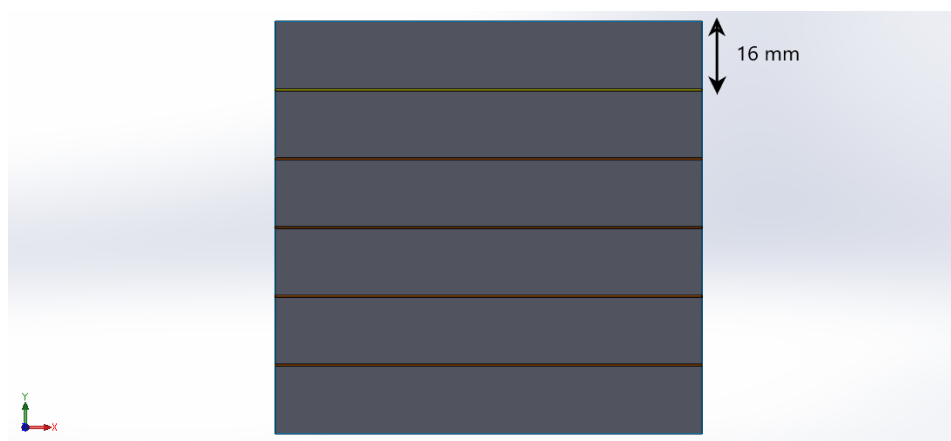
جدول ۳: خواص مکانیکی سیم حافظه دار [۹]

کرنش قابل بازیابی	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش حد بالایی منحنی تنش کرنش	تنش حد پایینی منحنی تنش کرنش	چگالی (kg/m^3)
۰/۰۷۹	۰/۳۳	۶۰/۶	۵۳۰/۸	۱۷۰/۸	۶۴۵۰

جدول ۴: خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم (2A12-T4) مورد استفاده جهت هسته موجدار [۱۶]

چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پوآسون	تنش تسلیم (MPa)	گرنش شکست
۲۷۰۰	۷۰	۰/۳	۴۶۴	۰/۱۵

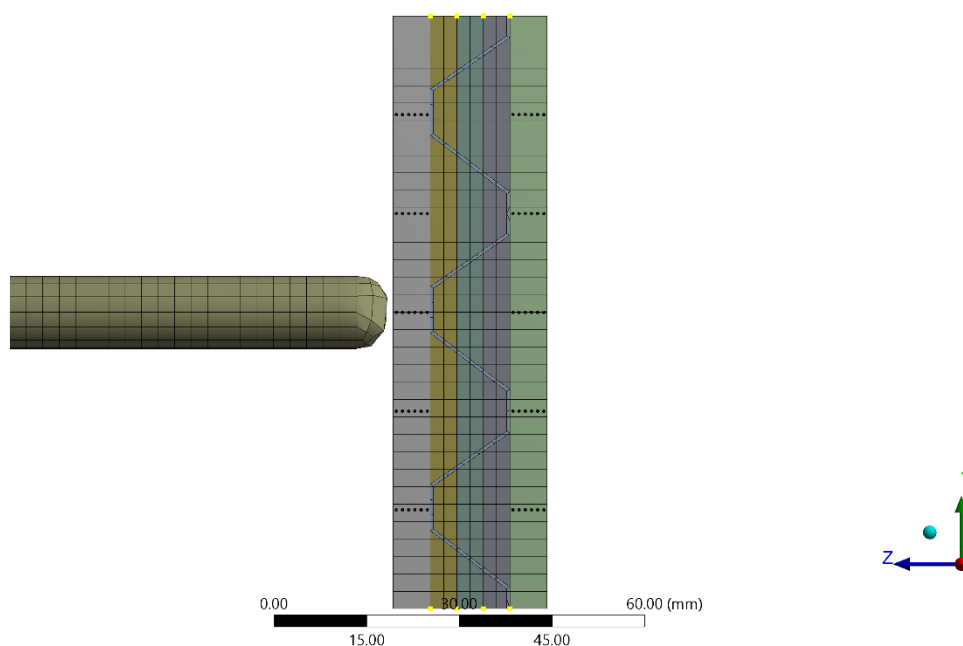
در این تحقیق از یک ضربه زننده استوانه ای با دماغه کروی به قطر ۱۲ mm از جنس فولاد با خواص جدول ۵ استفاده شده است. این ضربه زننده با سرعت $۵/۷۰ \text{ m/s}$ و با جرم $۴/۹۲۶ \text{ kg}$ به سمت هدف روانه شده است. پس از مدل سازی و تحلیل نمودارهای نیرو تماسی و انرژی بر حسب زمان استخراج گردیده است. ۵ سیم حافظه دار در میانه هر لایه گذاشته شده است. هم چنین فاصله اولین سیم در هر لایه از نزدیک ترین لبه رویه ۱۶ mm در نظر گرفته شد. ۴ سیم دیگر به همین منوال با فاصله ۱۶ mm از یکدیگر قرار گرفتند. شکل ۳ نمایی از قرار گیری سیم ها در مدل نشان داده شده است. هم چنین در شکل ۳ نمایی از سازه و ضربه زننده در محیط نرم افزار ANSYS نمایش داده شده است. در شکل ۴ نیز ابعاد مربوط به هسته موجدار قابل مشاهده است.



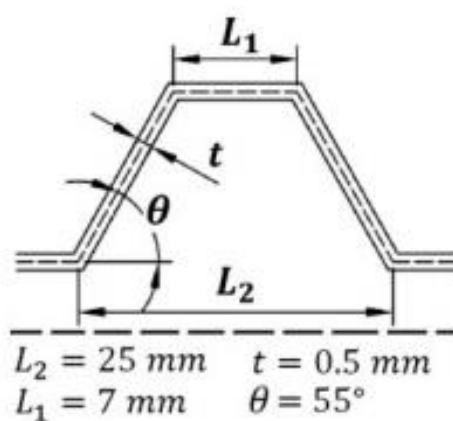
شکل ۳: نمایی از قرار گیری ۵ سیم حافظه دار در یک لایه

جدول ۵: خواص فولاد مورد استفاده در ضربه زننده

چگالی (kg/m^3)	ضریب پوآسون	مدول یانگ (GPa)
۷۸۰۰	۰/۳	۲۱۰



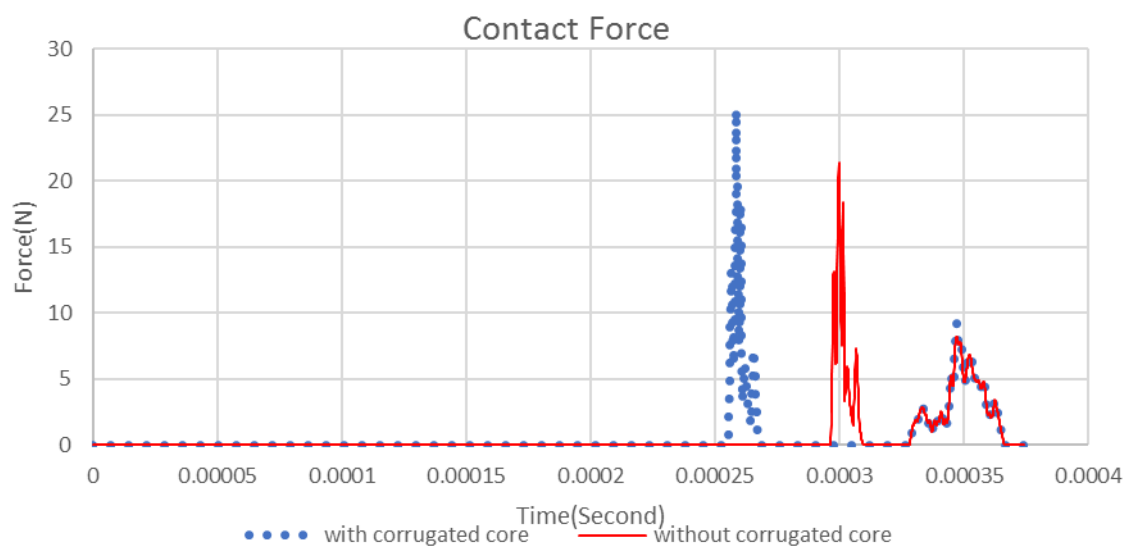
شکل ۴: الف) نمایی از یک نمونه ضربه زننده و سازه مدلسازی شده



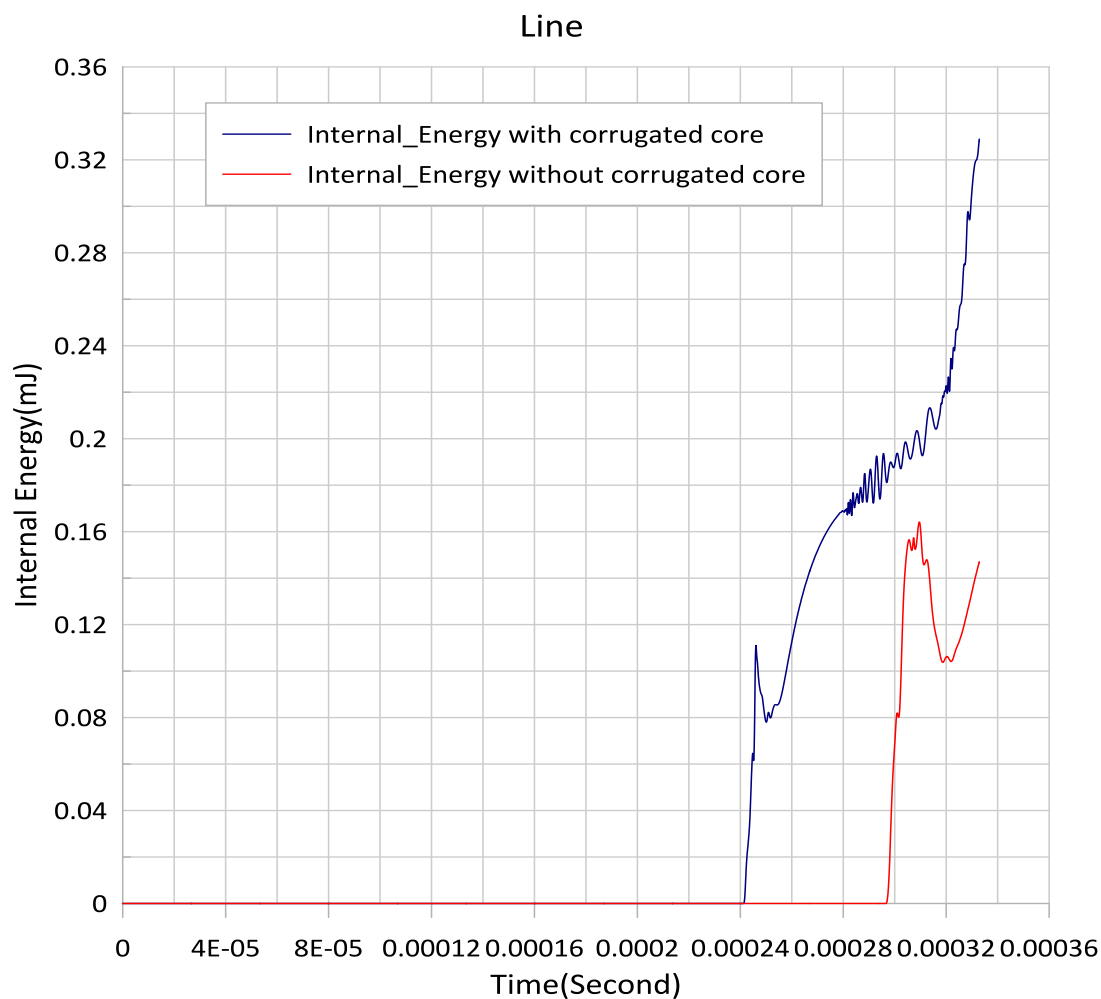
شکل ۵: ابعاد یک بخش از هسته موجدار [۱۶]

۵- نتایج

در این بخش به بررسی نیروی تماسی و انرژی درونی سازه می پردازیم: در شکل ۶ و ۷ می توان نتایج مربوط به نیروی تماسی و انرژی درونی سازه را مشاهده نمود. نتایج نشان داده است که نیروی تماسی بین ضربه زننده و سازه در حالتی که از هسته تقویت کننده موج دار به همراه سه نوع فوم بیان شده استفاده می گردد از حالتی که تنها از سه نوع فوم مد نظر استفاده می گردد، بیشتر است.



شکل ۶: نمودار نیروی تماسی



شکل ۷: نمودار انرژی در دو حالت

همانطور که مشاهده می شود هردو پنل مدلسازی شده رویه های هوشمند دارا هستند اما با اضافه کردن هسته موج دار می توان اثر این هوشمند سازی در راستای استحکام به ضربه را بهبود بخشید. هم چنین همانطور که مشاهده می شود این اتفاق نیز در انرژی درونی سازه رخ داده است. انرژی درونی سازه در حالتی که پنل دارای هسته موج دار می باشد نسبت به حالتی که هسته پنل تنها از فوم تشکیل شده است، در سطح بالاتری قرار گرفته که نشان دهنده افزایش قابلیت جذب انرژی بیشتر می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر اضافه نمودن هسته موج دار بر پاسخ ضربه سرعت پایین پنل های ساندویچی با رویه های هوشمند و هسته ی فومی لایه چینی شده با استفاده از نرم افزار ANSYS پرداخته شد. در این تحقیق نتایج زیر دست بدست آمد:

- ۱- افزایش سفتی سازه علاوه بر اثر بالابری سفتی و شبه ارتجاعی سیم های هوشمند در اثر اضافه نمودن هسته موج دار
- ۲- افزایش نیروی تماسی بین ضربه زننده و سازه در اثر اضافه نمودن هسته موج دار
- ۳- افزایش انرژی درونی سازه و در نتیجه جذب انرژی

۸- مراجع

- [1] Meo, M., et al., *Shape memory alloy hybrid composites for improved impact properties for aeronautical applications*. Composite Structures, 2013. **95**: p. 756-766.
- [2] Khalili, S., et al., *Low-velocity impact response of active thin-walled hybrid composite structures embedded with SMA wires*. Thin-walled structures, 2007. **45**(9): p. 799-808.
- [3] Khalili, S., A. Shokuhfar, and F.A. Ghasemi, *Effect of smart stiffening procedure on low-velocity impact response of smart structures*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. **190**(1-3): p. 142-152.
- [4] Kang, K.-W. and J.-K. Kim, *Effect of shape memory alloy on impact damage behavior and residual properties of glass/epoxy laminates under low temperature*. Composite Structures, 2009. **88**(3): p. 455-460.
- [5] Raghavan J., et al., *Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites*. Composites Part B: Engineering, 2010. **41**(3): p. 214-222.
- [6] Shokuhfar, A., et al., *Analysis and optimization of smart hybrid composite plates subjected to low-velocity impact using the response surface methodology (RSM)*. Thin-Walled Structures, 2008. **46**(11): p. 1204-1212.
- [7] Khalili, S. and A. Ardali, *Low-velocity impact response of doubly curved symmetric cross-ply laminated panel with embedded SMA wires*. Composite Structures, 2013. **105**: p. 216-226.
- [8] Khalili, S. and A. Saeedi, *Dynamic response of laminated composite beam reinforced with shape memory alloy wires subjected to low velocity impact of multiple masses*. Journal of Composite Materials, 2018. **52**(8): p. 1089-1101.
- [9] Li, H., et al., *The low velocity impact response of foam core sandwich panels with a shape memory alloy hybrid face-sheet*. Materials, 2018. **11**(11): p. 2076.

- [10] Guida, M., et al., *Analysis of the impact dynamics of shape memory alloy hybrid composites for advanced applications*. Materials, 2019. **12**(1): p. 153.
- [11] Wu, Y. and Y. Wan, *The low-velocity impact and compression after impact (CAI) behavior of foam core sandwich panels with shape memory alloy hybrid face-sheets*. Science and Engineering of Composite Materials, 2019. **26**(1): p. 517-530.
- [12] Pinto, F. and M. Meo, *Mechanical response of shape memory alloy-based hybrid composite subjected to low-velocity impacts*. Journal of Composite Materials, 2015 :۴۹(۲۲). p. 2713-2722.
- [13] Shariyat, M. and S. Hosseini, *Novel rule-based global-local theory and energy model for sandwich plates with compliant cores and unevenly-distributed anisotropic SMA wires under impulsive/impact loads*. Composite Structures, 2019 :۲۰۹ p. 727-738.
- [14] Lam, K. and T. Sathiyamoorthy, *Response of composite beam under low-velocity impact of multiple masses*. Composite structures, 1999. **44**(2-3): p. 205-220.
- [15] Baba, B.O., *Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads*. Composite Structures, 2017. **159**: p. 1-11.
- [16] Dolati, S., J. Rezaeepazhand, and M. Shariati, *Numerical simulation of hail impact response of hybrid corrugated core sandwich panels*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019. **38**(14): p.۶۴۳-۶۵۷ .