جلد 7، شماره 1، بهار 99، ص‌ص 683- 693

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیـــت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچی چند منظوره با هسته z-پین با استفاده از شبیه‌سازی عددی دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون

علیرضا طلوعی[1]، احسان اعتمادی[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، سبزوار

*سبزوار، صندوق پستی 9617976487، etemadi@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 1397/12/13

پذیرش: 1398/02/22

کلید واژگان:

نرخ کرنش

سازه ساندویچی چند منظوره

z -پین، ضربه

روش المان محدود

چکیده

استفاده از z-پین‌ها علیرغم وزن کم و اندازه‌ی کوچک، به منظور کاهش معایب کامپوزیت‌ها و سازه‌های ساندویچی، افزایش مقاومت و استحکام آنها و همچنین جلوگیری از رشد ترک، گسترش فراوانی پیدا کرده است. در این مقاله با استفاده از روش المان‌محدود، رفتار سازه‌های ساندویچی چند منظوره با هسته z-پین در نرخ کرنش‌های متوسط (بین 164 تا 327 بر ثانیه)، تحت آزمایش میله فشاری هاپکینسون مورد بررسی قرار گرفته شده‌است. اثرات نرخ کرنش و رفتار مکانیکی سازه ساندویچی چند منظوره تحت بارگذاری دینامیکی بررسی و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است که توافق خوبی بین نتایج وجود دارد. همچنین به بررسی پارامترهای موثر در جهت افزایش مقاومت مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های z -پین، مانند پرداخته شده است. این پارامترها شامل زاویه قرار گیری z-پین‌ها نسبت به افق، جنس ماده تشکیل‌دهنده و بررسی تغییر قطر z-پین‌ها می‌باشد. به طور خلاصه نتایج نشان می‌دهد که این سه پارامتر تاثیر بسزایی در افزایش تنش جریان و افزایش مقاومت نهایی سازه خواهند داشت. در انتها به مقایسه خواص مکانیکی سازه ساندویچی با هسته z-پین و هسته لانه‌زنبوری شبیه سازی شده پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تحت شرایط وزنی و حجمی یکسان هسته، میزان مقاومت فشاری نهایی هسته ساخته شده از z-پین از هسته لانه زنبوری کمتر ولی انعطاف پذیری آن بیشتر می‌باشد.

Mechanical properties of multifunctional composite structures with z-pin core using numerical simulation of Hopkinson pressure bar test device

Alireza Toluei[1], Ehsan Etemadi[1,*]

1-Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
*P.O.B. 9617976487, Sabzevar, Iran, etemadi@hsu.ac.ir

Keywords

Strain rate
Multi-functional sandwich panel
Z-pin
Impact
Finite element method

Abstract

The z-pins in spite of their small sizes and small weights, but they have been expanded to reduce the disadvantages of composites and sandwich panels, increase their resistances and strengths, and prevent crack growth. In this paper, using a finite element method, the behavior of multi-functional sandwich panels with z-pin cores in average strain rates (between 164-327 1/s) under Split Hopkinson pressure bar (SHPB) test was investigated. The effects of strain rate and mechanical behavior of multifunctional sandwich panel subjected to dynamic loading were investigated and the results compared with the published experimental tests. Good agreements were found between them. Also, effective parameters such as embedding angle of z-pins, their materials and their diameters were investigated. In conclusion, the results showed that the foresaid parameters had effective roles in increasing flow stress and ultimate strength of multifunctional sandwich panels. Furthermore, the mechanical properties of sandwich panel with z-pin and honeycomb were compared. The results showed that in the same weight and Volume core condition, the ultimate strength and flexibility of z-pins were respectfully smaller and larger than honeycomb cores.

.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Toluei, A. Etemadi, E., "Mechanical properties of multifunctional composite structures with z-pin core using numerical simulation of Hopkinson pressure bar test device", In Persian, Journal of Science and TechNology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 683-693, 2020.

1-مقدمه

کاربرد کامپوزیت‌ها و سازه‌های‌ساندویچی در ساختارهای تجاری، دریایی و هوافضا رو به افزایش می‌باشد، زیرا دارای مزایایی چون سبک بودن، استحکام، خمش بالا و مقرون صرفه می‌باشند. در حال حاضر هسته‌های فوم[1]، لانه زنبوری و مواد با خواص تابعی به طور گسترده در کامپوزیت‌های ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کاربردهای ساختاری، اجزای مختلف باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند در گسترده وسیعی از دما و نرخ کرنش عملکرد صحیحی داشته باشند. در کامپوزیت‌ها، ویژگی‌های ساختاری مانند سبکی وزن، سفتی و قدرت بالا در نظر گرفته می‌شود [1-2].

منظور از کامپوزیت چندمنظوره به توسعه موادی گفته می‌شود که برای برنامه های کاربردی مهندسی بهینه شده اند. به عنوان مثال، ماده ای که به عنوان یک پشتیبانی ساختاری عمل می کند، همچنین می تواند به عنوان یک سنسور حرارتی در همان زمان عمل کند. بنابراین کامپوزیت چند منظوره یک ماده کامپوزیت است که قادر به انجام دو یا چند فعالیت همزمان یا به صورت متوالی است. حالت چند منظوره در کامپوزیت به طور عمدی و هدفمند توسط مهندسی میکروسکوپ مواد مولد و کامپوزیت به طور کلی در سطوح میکرو و نانو بررسی می شود [2].

کامپوزیت‌های چند منظوره از ساختارهای مختلفی شامل z-پین‌ها، کره-های توخالی و مواد خود ترمیم کننده تشکیل شده است. z-پین‌ها علیرغم وزن کم و اندازه‌ی کوچک، به منظور کاهش معایب کامپوزیت‌ها، افزایش مقاومت و استحکام آنها و همچنین جلوگیری از رشد ترک، گسترش فراوانی پیدا کرده است.

عملکرد z-پین‌ها به عنوان یک عامل حساس و مهار کننده ضربه و دارای قدرت اتصال و چسبندگی بالا به زمینه می‌باشد. استفاده از zپین در کامپوزیت‌ها موجب بهبود مقاومت در برابر ضربه و افزایش مقاومت، خواص هدایتی، ایجاد خاصیت حسگرهای حرارتی در کامپوزیت‌های چند منظوره می‌گردد. فرآیند قرار دادن zپین توسط بوسی و همکاران [1] در سال 1998 ثبت شده است.

همانطور که در شکل 1 مشخص می‌باشد، فرآیند z-پین گذاری می‌توان با تنظیم مواد پین، اندازه پین، تراکم پین و زاویه پین، zپین را سفارشی کرد. دو پارامتر اول توسط فرآیند تولید zپین کنترل می‌شود.دو پارامتر بعدی براساس نحوه قرار گیری zپین در قالب پیش طراحی شده، تعیین می‌شوند. همچنین چگالی را می‌توان با تغییر فاصله بین پین‌ها تنظیم نمود. در شکل a-1، zپین‌ها به حالت عمودی جایگذاری شده‌است و در شکل b-1، zپین‌ها با زاویه r نسبت به افق جایگذاری شده‌اند.

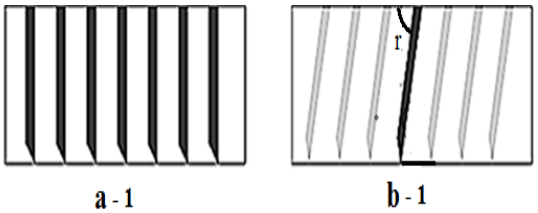

Fig. 1 Angle of pins [2]

شکل 1 زاویه قرار گرفتن پین‌ها [2]

قطر پین‌های مورد استفاده به طور کلی بین 0.15 میلی متر الی 0.5 میلی متر است[3- 5] . گفته می‌شود که قطر پین‌ها تا 1 میلی‌متر هم قابل افزایش و مورد تایید است [6].

بیشتر محققان به تغییرات خواص مکانیکی که zپین‌ها در کامپوزیت ایجاد می‌کنند، توجه دارند و آنها را بررسی می‌کنند.

ودیا و همکاران در سال 2000 با توجه به کاربرد رو به افزایش و استفاده از کامپوزیت‌های چندمنظوره در صنایع هوا و فضا، دریایی و تجاری و همچنین خواص ایده‌آل و قابل توجه این نوع از کامپوزیت‌ها به بررسی هسته ساختارهای ساندویچی پرداختند. آنها هسته‌های تشکیل شده از zپین در فوم و لانه زنبوری پر شده با فوم را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها همچنین به تاثیر آثار ضربه‌هایی با سرعت‌های پایین بر روی کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته‌های zپین و لانه زنبوری پرداختند [7]. ودیا و همکاران در سال 2001 اثر ضخامت در کامپوزیت‌های چند منظور با هسته‌های zپین و لانه زنبوری را مورد ارزیابی و در این بررسی میزان جریان عبوری از لایه‌های کامپوزیت را بررسی نمودند [8].

هوسار و همکاران در سال 2007 ورقه های کامپوزیتی چند منظوره که دارای هسته فوم و با استفاده از فرایند قالب گیری تزریقی رزین با کمک خلاء در چند مرحله ساخته شده بودند را، مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. آنها دو صفحه‌ی بالا و پایین هسته را از شیشه، پارچه های کربنی بافته شده، شیشه/کربن، کربن و کربن/شیشه که دولایه‌ی کربن و شیشه دیگر بالا و پایین این صفحه را پوشانده بودند، استفاده نمودند. سپس با استفاده از میله فشاری هاپکینسون، تحت بارگذاری قرار دادند. آنها تمام نمونه‌ها را از لحاظ تنش، کرنش و شکست مورد مقایسه قرار دادند [9].

موریتز در سال 2007 به بررسی لایه های کامپوزیتی پلیمری تقویت شده در جهت ضخامت از طریق zپین پرداخت. او تحقیقات خود را در زمینه‌ی نحوه‌ی ساخت، ریزساختار، مقاومت در برابر آسیب، استحکام و خواص مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با zپین انجام داد. مزایای تقویت کامپوزیت ها با zپین ها می‌توان مواردی چون ارتقاء مقاومت کششی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر آسیب پس از ضربه نام برد. همچنین در حالت بهبود یافته قدرت شکست اتصالات متحرک و تحمل ناشی از zپین‌گذاری نیز بررسی شده است. موریتز همچنین مزایا و معایب z ها را با در نظر گرفتن مواد تشکیل‌دهنده آنها بررسی نمود [10].

خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌ها به خواص مکانیکی و فیزیکی اجزای تشکیل دهنده آنها بستگی دارد. مواردی چون شکل و اندازه ذرات، چسبندگی بین فضای ذرات، تنش پسماند و تخلخل موجود در زمینه تشکل دهنده کامپوزیت را نام برد. تا آن زمان کامپوزیت‌های ذرات به طور دقیق مورد مطالعه قرار نگرفته بودند. جنیفر جوردن و همکاران سال 2008 بررسی نمودند که آیا ویژگی های ریز ساختاری بالا می تواند تاثیر عمیقی بر پاسخ استاتیکی و دینامیکی کامپوزیت های چند فاز پلیمر-فلز-سرامیکی داشته باشد یا خیر. آنها مدلی برای نمایش رفتارهای الاستیک و پلاستیک این مواد ارائه دادند و نتایج خودشان را با داده های آزمایشگاهی بدست آمده از تکنیک های بارگیری نیمه استاتیک مقایسه نمودند. آنها خواص مکانیکی مورد نظر خودشان را با استفاده از یک میله فشاری هاپکینسون مشخص نمودند [11].

با توجه به ساختار مواد کامپوزیت چند منظوره که دارای مزایایی چون استحکام بالا و وزن کم می‌باشند، ودیا و همکاران سال 2008 بر روی کامپوزیت‌هایی با ساختار متفاوت تحقیق نمودند. آنها با توجه به معایب

[1] Foam

ساختارهای قدیمی این نوع از کامپوزیت ها، چیدمان جدیدی را در نظر گرفتند. چیدمان مورد نظر ودیا و همکارانش استفاده از چند لایه کامپوزیت ساندویچی بر روی هم بود، که در هسته این ساختار از zپین هایی منحنی شکل استفاده نمودند که در لایه‌ی بالای و پایینی به صورت دقیق قرار گرفته بود. آنها آزمایش‌های ضربه خودشان را با سرعت‌های پایین انجام دادند. کامپوزیت‌ها را از محلی که آسیب اولیه به آنها وارد می‌شود و همچنین حداکثر نیرویی که می توانند به کامپوزیت اعمال کنند، بررسی نمودند [12].

کامپوزیت با هسته پیزوالکتریک یک گروه جدید از مواد توسعه یافته جدید هستند که به تازگی استفاده می‌شوند. پیزوالکتریک ها با توجه به خصوصیات خاصی که دارند می‌توانند در کامپوزیت‌ها علاوه بر افزایش استحکام و مقاومت، خاصیت خود حساسی و فعال بودن را داشته باشند. لین و همکاران سال 2009 با استفاده از پیزوالکتریک‌ها به عنوان تقویت کننده، در کنار افزایش خاصیت کششی و مقاومت کامپوزیت، توانستند خاصیت‌های حساسیت و فعال بودن رو به کامپوزیت اضافه کنند. آنها تقویت کننده‌های مورد نظر خودشان را با استفاده از میکروسکوپ‌های اتمی ساختند. همچنین از نتایج آزمایش‌های خودشان دریافتند که با استفاده از پیزوالکتریک در کامپوزیت‌ها می‌توان خاصیت الکترومکانیکی که خیلی زیادی را بدست آورد [13].

سال 2009 لانگ و همکاران با استفاده از zپین‌ها به صورت آزمایشات آزمایشگاهی و تغییر زاویه قرار گیری پین در کامپوزیت‌های چندمنظوره نتایج مورد نظر خودشان را بدست آوردند، و به بررسی آنها پرداختند [14].

بویتراگو و همکاران سال 2010 طی آزمایشات عددی به بررسی آثار ضربه تحت تاثیر سرعت بالا در کامپوزیت‌های چند منظوره پرداختند. کامپوزیت مورد نظر آنها با پوسته کربن- اپوکسی و هسته لانه زنبوری از جنس آلومینیوم ساخته شده بود. در این آزمایش میزان نفوذ و مقدار تخریب تحت ضربه بالستیک در سرعت مجاز بررسی گردید [15].

لیسیس و همکاران سال 2010 آزمایشات آزمایشگاهی خود را بر روی کامپوزیت‌های چند منظوره با هسته لانه زنبوری در دوحالت شبه استاتیک و دینامیک انجام دادند. آنها با مقایسه نتایج بدست آمده از این دو روش دریافتند که ساختار لانه زنبوری تحت بارگذاری شبه استاتیک و دینامیکی به چه میزانی می‌تواند خاصیت جذب انرژی و مقاومت در برابر بارگذاری را داشته باشد [16].

لیم و همکاران در سال 2011 از بارگذاری دینامیکی با استفاده از میله هاپکینسون برای آزمایشات مورد نظرشان استفاده نمودند. آنها در بررسی‌های مورد نظرشان از نوع خاص و جدید کامپوزیت‌ها استفاده کردند. لیم و همکارانش از نانولوله‌های کربنی برای تقویت زمینه کامپوزیت استفاده کرده بودند، که در نتایج بدست آمده به توانایی شبکه رسانا و حساس نانولوله‌های کربنی پی بردند [3].

چانگ و همکاران سال 2011 از نسل جدید کامپوزیت‌های چند تابعی منشکل ار فلز و سرامیک رونمایی کردند. هدف از انجام این کار ارزیابی عملکرد کرنش بالای کامپوزیت‌های فلزی- سرامیکی می‌باشد. آنها آزمون میله فشاری هاپکینسون را برای محاسبه نتنش جریان رخ کرنش بالا در این کامپوزیت‌های چندتابعی انتخاب نمودند [17].

هاردناک و همکاران سال 2012 بر روی نوع دیگری کامپوزیت‌های چند منظوره جهت استفاده در صنعت هوافضا آزمایش انجام دادند. آنها از مونوفورفولوژی های معدنی و ذرات توخالی، دو نوع مختلف مواد پایه سلولی درجه بندی شده به عنوان هسته کامپوزیت‌های ساندویچی استفاده نمودند. با استفاده از این مواد آزمایشات خودشان در دو حالت آزمایشگاهی و عددی انجام دادند و نتایج مورد نظر خودشان را با هم مقایسه نمودند [4].

موریتز و همکاران سال 2012 طی آزمایش آزمایشگاهی به بررسی کامپوزیت ساندویچی دارای هسته فوم تقویت شده با استفاده از zپین پرداختند. آنها آثار ضربه با سرعت پایین در کامپوزیت مورد نظر خودشان را بررسی نمودند. موریتز و همکاران در طی آزمایشات خودشان دریافتند که هنگام برخورد ضربه با کامپوزیت، zپین‌ها انرژی بالایی را به صورت مستقیم جذب می‌کنند، که این امر باعث کاهش آسیب به کامپوزیت می‌شود [5].

ژانگ و همکاران سال 2016 به بررسی خود حساسی کامپوزیت‌ها با استفاده از zپین‌ها پرداختند. در بررسی ژانگ و همکارانش از zپین‌هایی که به ورقه‌های رسانا و نارسانا متصل شده بودند، انتهای zپین‌ها به یک مدار اندازه گیری مقاومت از طریق الکترودها بر روی سطح ورقه‌ها متصل شده بود. که به عنوان خود ترمیم از پین آنها استفاده می‌شود. در این مقاله برای اولین بار استفاده از تقویت ضخامت برای تشخیص حساسیت در لایه‌های کامپوزیت خودحساسی مورد بررسی قرار گرفته است [18].

لازم به ذکر است که محققین داخلی نیز به بررسی اثرات ضربه بر روی سازه‌های کامپوزیتی در سرعت‌های پایین[19-20] و سرعت‌های بالا [21-22] و همچنین سازه‌های ساندویچی در سرعت‌های بالا [23-24] پرداخته-اند.

این تحقیق به تحلیل پارامترهای موثر در رفتار سازه‌های ساندویچی چند منظوره با هسته zپین تحت بارگذاری دینامیکی در دستگاه میله فشاری هاپکینسون با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار آباکوس پرداخته است. ابتدا نتایج با نتایج تجربی موجود [25] مقایسه شده و سپس پارامترهای موثر در افزایش استحکام سازه ساندویچی چند منظوره با هسته z-پین ارائه شده است. این پارامترها شامل تغییر زاویه z-پین، جنس پین، قطر پین می‌باشد. در انتها نیز، تحت شرایط وزنی یکسان، رفتار هسته z-پین با هسته لانه زنبوری مقایسه شده است.

2- شرح دستگاه آزمایش میله فشاری هاپکینسون

یک روش آزمایشگاهی که برای بدست آوردن معادلات بنیادی در نرخ کرنش های بالا کاربرد زیادی دارد، استفاده از آزمایش میله هاپکینسون می باشد. میله هاپکینسون به طور گسترده‌ای برای تولید نرخ کرنش‌های متوسط و بالا تحت بارگذاری کششی، فشاری و پیچشی استفاده می‌شود [26]. ترسیم منحنی های تنش-کرنش مواد تحت تغییر شکل هایی با نرخ کرنش بالای یک مشکل بوده و نیاز به تجهیزات خاصی دارد. روش های استانداردی که برای حالت های شبه استاتیکی مرسوم می باشند، در تست هایی با نرخ کرنش متوسط و بالا نمی توانند مورد استفاده قرار گیرند [27]. دستگاه تست هاپکینسون معمول ترین روش برای تعیین خواص مواد در نرخ کرنش های بالا است. توسط این دستگاه کرنش های بیشتر از ٪100 نیز می توان در نمونه ی آزمایش ایجاد کرد [28]. ولی به منظور کاهش عدم تطابق سطحی بین نمونه و میله های فشار این مواد تقریبا به ٪25 محدود می شود.

در اغلب آزمایشات انجام گرفته با دستگاه میله فشاری هاپکینسون، یک نمونه استوانه‌ای شکل کوتاه بین دو میله‌ی بلند ورودی و خروجی با رفتار الاستیکی قرار داده می شود. شکل2 شماتیکی از این دستگاه در شکل نمایش داده شده است.

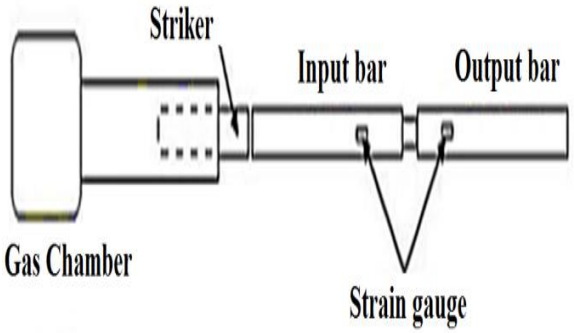

Fig. 2 A schematic view of the split Hopkinson pressure bar [29]

شکل 2 نمایی شماتیک از میله فشاری هاپکینسون [29]

میله ها به طور معمول از فولاد با استحکام بالا و یا کربید تنگستن ساخته می‌شوند. در این دستگاه یک میله ی دیگر به عنوان ضربه زننده برای ایجاد موج تنش فشاری در میله ی ورودی به کار می رود.

بلافاصله پس از ایجاد ضربه توسط ضربه‌زننده به انتهای میله اول، موج تنش در طول میله به طرف سطح مشترک میله ی اول و نمونه حرکت می کند. اگر امپدانس نمونه کمتر از امپدانس میله‌ها باشد (که باید باشد)، قسمتی از موج در سطح مشترک به طرف میله ی اول منعکس و قسمت دیگر آن از طریق نمونه به میله ی دوم منتقل می شود. موج برگشتی به صورتی یک موج کششی است، در حالی که پالس منتقل شده به شکل فشاری باقی می ماند. کرنش‌ها در هر دو میله فشار توسط کرنش سنج‌های قرار داده شده بر روی میله ها ثبت می شوند. تا زمانی که فشار در میله ها زیر حد الاستیک ماده است، تنش، کرنش و نرخ کرنش در نمونه با استفاده از کرنش های ثبت شده محاسبه می‌شوند.

تنش، نرخ کرنش و کرنش با استفاده از روابط 1 تا 3، بدست می‌آیند [30]:

$$\sigma = \frac{AE\varepsilon_t}{A_s} \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_r C_b}{h_s} \tag{2}$$

$$\varepsilon = \int \dot{\varepsilon}\, dt \tag{3}$$

با توجه به رابطه 2 و وابستگی نرخ کرنش به کرنش بازتابیده‌شده که متغیر می‌باشد، مقدار نرخ کرنش نیز بایستی متغیر درنظر گرفته شود. اما ازآنجایی‌که تغییرات نرخ کرنش، کمتر از 10 درصد می‌باشد، در نتیجه مقدار نرخ کرنش در این تحقیق همانند کارهای تجربی صورت گرفته شده [25] ثابت و برابر مقدار بیشینه آن در نظر گرفته می‌شود.

3-شبیه سازی به روش المان محدود

3-1- شبیه‌سازی دستگاه آزمایش

ودیا و همکاران در سال 2000 با بررسی بر روی کامپوزیت‌های چند منظوره به بررسی اثر ضربه در نرخ کرنش‌های متوسط($164\ s^{-1}$، $218\ s^{-1}$ و $327\ s^{-1}$) در نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته zپین، لانه زنبوری و فوم پرداختند[7]. سرعت ضربه‌زننده‌ها برای نرخ کرنش‌های بدست آمده از آزمایش، بر طبق شبیه‌سازی به‌ترتیب برابر $5.5\ \frac{m}{s}$، $7\ \frac{m}{s}$ و $8\ \frac{m}{s}$ می‌باشند.

روش المان محدود سه بعدی و استفاده از نرم افزار تجاری آباکوس، برای مقایسه نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، صورت پذیرفته است. مدل الاستیک برای مدل سازی میله‌های ورودی و خروجی و ورقه‌های سازه ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته شده است [30].

جهت بررسی رفتار ویسکوپلاستیک هسته ساخته شده از zپین، از مدل پلاستیسیته جانسون-کوک استفاده شده است. علت استفاده از این مدل، تطابق خوب نتایج این مدل با نتایج آزمایش‌های تجربی و موجود بودن ثوابت آزمایشگاهی برای فلزات مختلف می‌باشد [31]. این مدل به صورت رابطه 4 ارائه می‌گردد:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left(1 + Cln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left[1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m\right] \tag{4}$$

که A مقاومت استاتیکی، B مدل کرنش سختی، n ضریب کرنش سختی، C ضریب حساسیت به نرخ کرنش، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، T دمای کنونی، T_r دمای محیط، T_m دمای ذوب ماده و m ضریب حرارتی است[31]. جدول 1 ضرایب جانسون کوک برای فولاد ضدزنگ، آلومینیوم 1100 همچنین مس عاری از اکسیژن برای $\dot{\varepsilon}_0 = 1\ \frac{1}{s}$ و جدول 2 بیانگر خواص مکانیکی نمونه‌ها و میله‌ها می‌باشد. المان خطی C3D8R با هشت گره برای المان‌بندی مجموعه میله هاپکینسون و نمونه مورد استفاده قرار گرفته شده است. برای بررسی حساسیت مدل به اندازه المان، ابتدا المانی به طول 10 میلیمتر (المان 2 در شکل 4) برای میله فشاری ورودی انتخاب شده و جابجایی آن اندازه-گیری شد. سپس اندازه المانها به تدریج کوچکتر شده (تا 1میلیمتر) تا جایی-که جابجایی تغییر محسوسی پیدا نکند. این اندازه که برابر 5 میلیمترمی-باشد، به عنوان اندازه مرجع برای ضربه‌زننده و همچنین میله فشاری ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب المانی با طول 4 میلیمتر برای نمونه انتخاب شده است. برای اطلاعات بیشتر در مورد این روش حساسیت سنجی المان به مراجع [32-33] مراجعه شود. درنهایت، به عنوان تعداد کل المان‌های به کار رفته در مدلسازی دستگاه هاپکینسون برای هسته zپین با قطر 0.3175 برابر با 6703 است.

جدول 1 ضرایب جانسون-کوک برای فولاد ضدزنگ، مس و آلومینیوم

Table 1 Johnson-Cook Coefficients for Stainless Steel, Cooper and Aluminum

	A(MPa)	B(MPa)	n	C	m	T_m (K)
فولاد ضد زنگ[34]	305	1161	0.610	0.014	0.517	1793
مس[31]	90	292	0.31	0.025	1.09	1356
آلومینیوم [30]	148	361	0.184	0.001	1.03	1220

Table 2 Geometry and mechanical properties of samples and test machine[25], [30]

جدول 2 هندسه و خواص مکانیکی نمونه‌ها و دستگاه آزمایش[25], [30]

	ماده	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m³)	ضریب پواسون	سرعت انتشار موج (m/s)	هندسه نمونه (به شکل 5 و 12 رجوع شود.) L (mm)	a (mm)	b (mm)	d (mm)
zپین	فولاد ضد زنگ	190	7850	0.265	-	19.05	-	-	0.635
zپین	مس	129.8	8960	0.34	-	19.05			0.635
zپین	آلومینیوم	68.3	2689.8	0.34	-	19.05	-	-	0.635
zپین	فولاد ضد زنگ	190	7850	0.265	-	19.05	-	-	1
لانه زنبوری	کربن-گرافیت	27.6	2490	0.23	-	12	-	-	3.516
میله های ورودی و خروجی	فولاد	210	7850	0.3	5172	500	-	-	10
صفحه بالایی و پایینی	شیشه	85	2600	0.23	-	-	12.7	13.97	-
ضربه زننده	فولاد	210	7850	0.3	-	150	-	-	10

شکل 3 نشان دهنده نمای سه بعدی از میله هاپکینسون است. برای شبیه سازی تماس بین پرتابه و میله ورودی از گزینه تماس کلی [1] استفاده شده است. همچنین برای شبیه سازی تماس بین اجزاء مختلف هدف از تماس صفحه به صفحه [2] استفاده شده‌است. همچنین برای ایجاد شرایط مرزی، میله‌ها از حرکت و چرخش در جهتی به جز حرکت در راستای انتشار موج، جلوگیری شده‌است. روش حل صریح برای حل مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته شده‌است. شکل5 نمایی سه بعدی از نمونه zپین می‌باشد.

برای اندازه‌گیری نرخ کرنش، کرنش و تنش جریان بر طبق روابط 1-3 دو المان در مراکزمیله‌های ورودی و خروجی برای ثبت انتشار امواج مورد استفاده قرار می‌گیرند. این المان‌ها، نقش کرنش سنج‌ها در ازمایش‌های تجربی را ایفا می‌کنند.

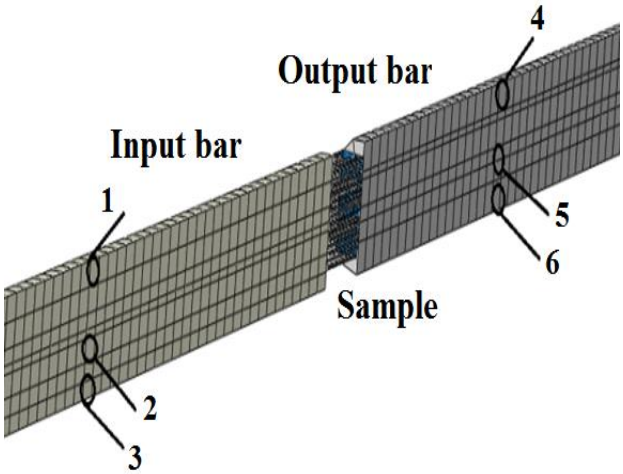

Fig. 4 A three-dimensional cross-sectional view of the target including the selection of elements using the Abacus software

شکل 4 مقطعی سه بعدی از هدف شامل انتخاب المان‌ها با استفاده از نرم افزار آباکوس

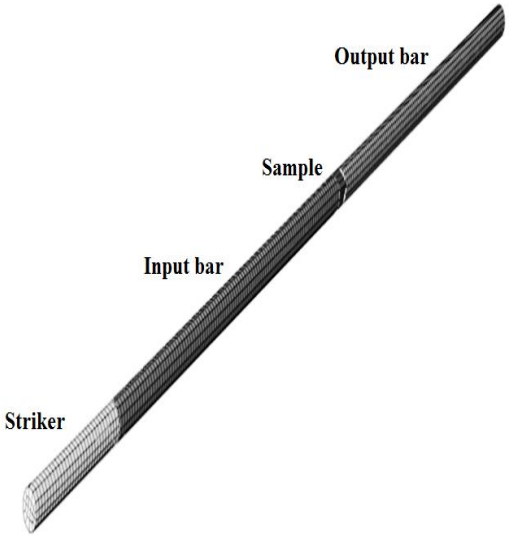

Fig. 3 A 3D view of the Hopkinson bar

شکل 3 نمای سه بعدی از میله هاپکینسون

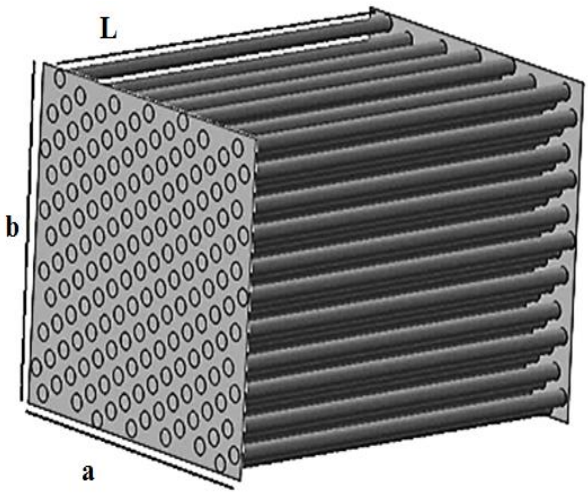

Fig. 5 A z-pin core made of steel and aluminum with a 10 degree angle

شکل 5 هسته zپین از جنس فولاد و آلومینیوم با زاویه 10 درجه

[1] General Contact
[2] Surface to Surface Contact

3-2-بررسی تشکیل موج صفحه‌ای در میله فشاری ورودی

برای تایید وجود موج صفحه‌ای تشکیل شده در میله فشاری ورودی با روش المان محدود، شش المان در دو مقطع مختلف میله فشاری ورودی و خروجی از مجموعه میله فشاری هاپکینسون انتخاب شده است (شکل 4).

شکل 6 بیانگر تاریخچه زمانی تنش در راستای انتشار موج برای شش المان است. المان‌های 1، 2 و 3 مربوط به میله فشاری ورودی و المان‌های 4، 5 و 6 مربوط به میله فشاری خروجی است. با در نظر گرفتن شکل اختلاف بیشترین مقدار تنش سه المان در میله فشاری ورودی و همین‌طور میله فشاری خروجی کمتر از ٪3 است. در نتیجه می‌توان فرض کرد که هنگامی که موج در میله فشاری ورودی، نمونه و همچنین هنگامی که در میله فشاری خروجی منتشر می‌شود، صفحه‌ای است [30].

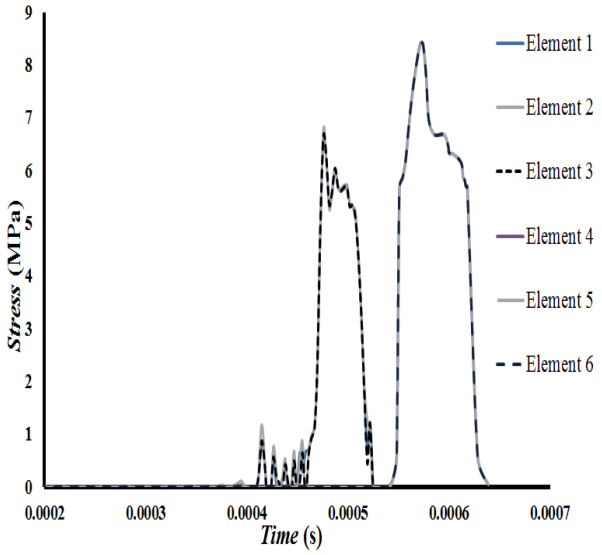

Fig. 6 Stress histories for the selected elements in the input and output bar.

شکل 6 تاریخچه زمانی تنش برای المان‌های انتخاب شده در میله فشاری ورودی و میله فشاری خروجی

4-نتایج و بحث

هدف اصلی این مقاله، بررسی عددی رفتار مکانیکی سازه ساندویچی با هسته zپین و بدست آوردن منحنی تنش-کرنش دینامیکی مواد در شرایط مختلف هندسی و جنس ماده هسته zپین در سازه ساندویچی می‌باشد

با توجه به روابط 1، 2 و 3 به ترتیب مقادیر تنش، نرخ کرنش و کرنش با استفاده از کرنش‌های اندازه گیری شده در میله‌های ورودی و خروجی بدست می‌آیند. شکل 7 نمودار مربوط به تاریخچه زمانی کرنش‌های اندازه‌گیری شده به روش المان محدود در میله‌های ورودی و خروجی برای نمونه ردیف 1 جدول شماره 3 می‌باشد. علامت امواج فشاری، منفی فرض می‌شود که در اینجا هر دو پالس تابیده شده ε_i و منتقل شده ε_t به علت ماهیت فشاری، منفی می‌باشند و پالس بازتابیده‌شده ε_r به صورت کششی و مثبت می‌باشد.

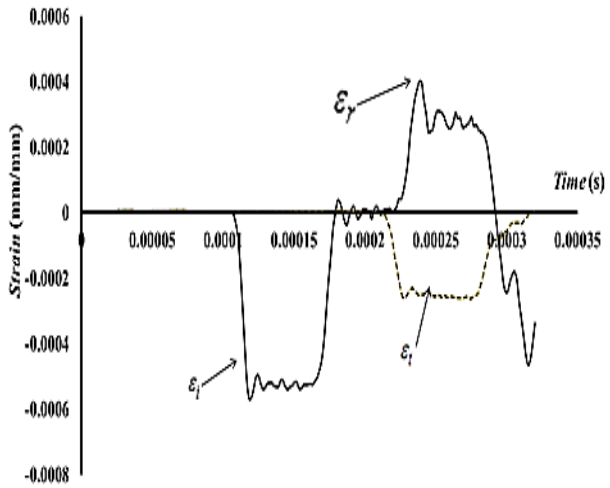

Fig .7 Incident, transmitted and reflected strain wave for a steel z-pin at the strain rate 164 s^{-1} .

شکل 7 موج کرنشی تابیده شده، منتقل شده و بازتابیده شده zپین فولادی در نرخ کرنش 164 s^{-1}

جهت صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی شده میله فشاری هاپکینسون، منحنی‌های تنش-کرنش سازه‌های ساندویچی با هسته zپین با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند. جدول 3 بیانگر بیشترین مقدار نرخ کرنش و تنش از طریق شبیه‌سازی به روش المان محدود و نتایج تجربی مرجع [25] برای هسته zپین می‌باشد. با توجه به مقادیر درصد خطا، مشاهده می‌گردد توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی وجود دارد. شکل 8 بیانگر نمودار تنش-کرنش هسته zپین ردیف 2 در جدول 3 به روش‌های تجربی و المان محدود می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر تنش و کرنش که از شبیه‌سازی دستگاه هاپکینسون به دست می‌آید، مقادیر مهندسی هستند.

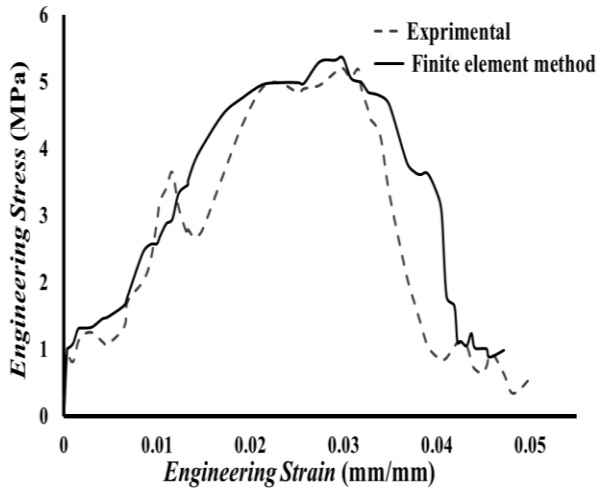

Fig. 8 Stress-strain diagrams of sandwich panel with z-pin core according to No.2, table 3 by experimental methods and finite element

شکل 8 نمودار تنش- کرنش سازه ساندویچی با هسته zپین مطابق جدول 3 ردیف 2 با روش‌های تجربی و المان محدود

Table 3 CoMPares the highest stresses and strain rates in experimental and numerical simulations for steel z-pin

جدول3 مقایسه بیشترین مقدار تنش و نرخ کرنش در حالت تجربی و شبیه سازی عددی برای zپین فولادی

ردیف	هسته	زاویه (درجه)	سرعت ضربه‌زننده (m/s)	نرخ کرنش تجربی [25]	نرخ کرنش المان محدود s^{-1}	درصد خطا نرخ کرنش	بیشترین تنش‌تجربی [25]	بیشترین تنش المان محدود (MPa)	درصد خطا تنش
1	zپین فولادی	10	5.5	164	168	3.40%	3.60	3.75	4.00%
2	zپین فولادی	10	7	218	237	8.70%	5.30	5.35	0.95%
3	zپین فولادی	10	8	327	301	8.00%	5.35	5.80	8.00%

پس از صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی موجود، به بررسی پارامترهای موثر در جهت افزایش مقاومت مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های z پین، پرداخته شده است.

این پارامترها عبارتند از:

- زاویه قرار گیری zپین‌ها نسبت به افق
- جنس ماده تشکیل‌دهنده zپین‌ها
- بررسی تغییر قطر zپین‌ها

در انتها به مقایسه خواص مکانیکی سازه ساندویچی با هسته zپین و هسته لانه‌زنبوری پرداخته شده است.

4-1- زاویه قرار گیری zپین‌ها نسبت به افق

در ابتدا به بررسی تغییرات حاصل از زاویه قرارگیری zپین‌ها نسبت به افق (r در شکل 1) پرداخته شده است. مشخصات درنظر گرفته شده برای شبیه‌سازی مطابق ردیف 1 از جدول 3 برای مقادیر مختلف r (از صفر تا 60 درجه) و برای سرعت ضربه‌زننده $5.5\ \frac{m}{s}$ می‌باشد.

با توجه به شکل 9 و جدول 4، مشخص می‌گردد همزمان با افزایش زاویه zپین‌ها، میزان تحمل تنش جریان توسط نمونه نیز افزایش می یابد. Z پین با زاویه صفر درجه دارای کمترین تحمل تنش جریان و در زاویه 60 درجه بیشترین تنش جریان را دارد.

توضیح بیشتر آنکه، هنگام طراحی و ساخت ورقه های کامپوزیتی، با توجه به خاصیت ارتوتروپیک کامپوزیت‌ها، جهت گیری الیاف‌ها تاثیر بسزایی در افزایش یا کاهش مقاومت در برابر بارهای فشاری، کششی یا پیچشی دارند. به طوریکه مقاومت فشاری با افزایش زاویه بیشتر شده و همینطور در زاویه 45 درجه بیشترین مقاومت در برابر بارهای پیچشی وجود دارد. این رفتار در سازه چندمنظوره ساندویچی با هسته zپین نیز وجود دارد. یعنی اگر دستگاه میله پیچشی هاپکینسون برای بررسی رفتار سازه چندمنظوره ساندویچی با هسته zپین مورد استفاده قرار گیرد، انتظار می‌رود در زاویه 45 درجه بیشترین استحکام پیچشی مشاهده شود [35].

4-2-جنس ماده تشکیل‌دهنده zپین‌ها

در این قسمت، از سه فلز با جنس فولاد ضدزنگ، آلومینیوم 1100 و مس عاری از اکسیژن برای ماده تشکیل دهنده zپین‌ها با زاویه چینش 10 درجه برای تمامی حالات استفاده شده است. شرایط شبیه‌سازی برای هر سه نوع ماده کاملا یکسان در نظر گرفته شده است. ضرایب جانسون-کوک برای هر سه فلز در جدول 1 ارائه شده است. پس از مشاهده نتایج موجود در شکل 10 و جدول 5 مشخص گردید، تغییر جنس ماده‌ای که zپین‌ها از آن ساخته می‌شوند، تاثیر قابل توجهی در تحمل تنش جریان را دارد. در بررسی نتایج موجود مشخص شد، زمانیکه از فولاد ضدزنگ به عنوان ماده تشکیل دهنده zپین‌ها استفاده شود، نمونه می‌تواند بیشترین تنش جریان که برابر با 5.85 مگاپاسکال را تحمل کند. در مقایسه بین آلومینیوم و مس نیز مشخص می‌شود، آلومینیوم 0.5 مگاپاسکال بیشتر از مس توانایی تحمل تنش را دارد.

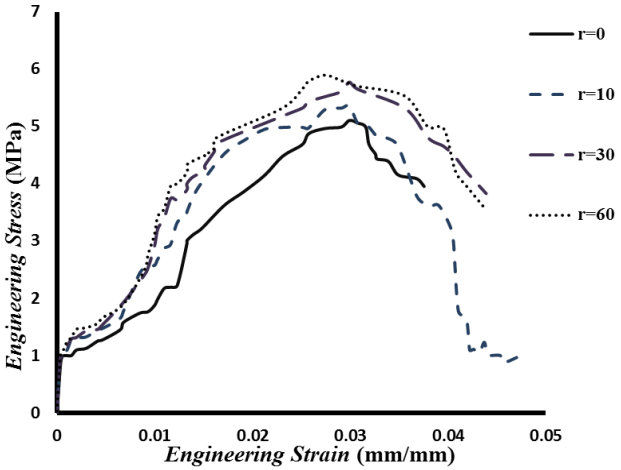

Fig. 9 Stress-strain diagram for z-pin specimen to investigate the effect of the positioning of the z-pin over the horizon

شکل 9 نمودار تنش- کرنش برای نمونه zپین فولادی به منظور بررسی اثر زاویه قرار گیری zپین‌ها نسبت به افق

جدول 4 بیشترین مقدار تنش و نرخ کرنش برای نمونه zپین فولادی به منظور بررسی اثر زاویه قرار گیری zپین‌ها نسبت به افق

Table 4 Maximum stress and strain rate for z-pin specimen to determine the effect of positioning pins relative to the horizon

زاویه درجه	نرخ کرنش المان محدود s^{-1}	بیشترین تنش المان محدود (MPa)
0	150	5.10
10	168	5.36
30	166	5.77
60	167	5.89

نکته قابل توجه آنست که بیشترین مقدار تنش جریان برای فولاد نسبت به آلومینیوم 14.5 درصد بیشتر می‌باشد، درصورتیکه وزن آلومینیوم 1100 به مراتب سبک‌تر از فولاد ضدزنگ می‌باشد. درنتیجه، درصورتیکه وزن نمونه

zپین مهم باشد، با در نظر گرفتن این درصد اختلاف استحکام نهایی، zپین ساخته شده از آلومینیوم 1100 به‌جای فولاد ضدزنگ، پیشنهاد می‌گردد. ولی اگر استحکام هسته zپین مدنظر نباشد، استفاده از zپین با جنس فولاد ضدزنگ توصیه می‌شود.

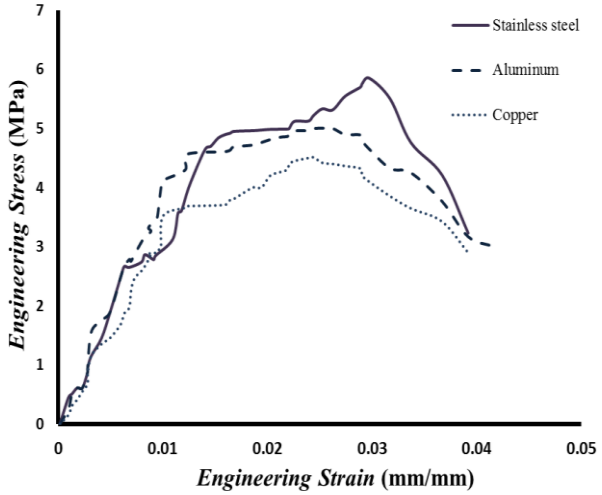

Fig. 10 Stress-strain diagram for z-pin specimen to determine the effect of zپین modification of the material

شکل10 نمودار تنش- کرنش برای نمونه zپین به منظور بررسی اثر تغییر جنس ماده تشکیل دهنده zپین

جدول 5 بیشترین مقدار تنش و نرخ کرنش برای نمونه zپین به منظور بررسی اثر تغییر جنس ماده تشکیل دهنده zپین

Table 5 Maximum stress and strain rate for z-pin specimen to determine the effect material of the change of z-pin component

جنس	نرخ کرنش المان محدود s^{-1}	بیشترین تنش المان محدود (MPa)
آلومینیوم	303	5.00
فولاد ضد زنگ	301	5.85
مس	305	4.50

4-3-بررسی تغییر قطر zپین‌ها

همچنین zپین‌ها در 3 قطر مختلف شبیه‌سازی شده‌اند، در نمونه اول قطر هر zپین برابر با 0.5 میلی‌متر، در نمونه دوم قطر هر zپین 0.635 میلی‌متر و در نمونه سوم قطر هر z پین برابر با 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بررسی اثر قطر پین باید به گونه‌ای باشد که در شرایط برابر برای سه حالت صورت پذیرد. یعنی با توجه به اینکه قطر zپین‌ها در حالت متفاوت می‌باشد، می‌بایست در هریک از حالت فوق تعداد zپین‌ها و فاصله zپین‌ها با یکدیگر به گونه‌ای انتخاب شود که در هر سه حالت، جرم و حجم zپین‌ها و درنتیجه هسته یکسان باشد. همچنین طول پین‌ها و جنس ماده تشکیل دهنده zپین‌ها کاملا یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به این شرایط، تعداد پین‌ها در نمونه اول، دوم و سوم به ترتیب 165، 126 و 85 می‌باشد.

با بررسی نتایج حاصل از این بررسی در شکل 11 و جدول 6 مشخص می‌شود کاهش قطر zپین‌ها باعث افزایش تحمل تنش جریان می‌شود. با مقایسه zپین با قطر 0.5 میلی‌متر با zپین دارای قطر 1 میلی‌متر، به مقدار 1.10 مگاپاسکال تحمل تنش جریان تفاوت دارد. این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که هرچقدر میزان قطر zپین‌ها کوچکتر شود، تعداد آنها افزایش پیدا کرده و فضاهای خالی موجود در نمونه بیشتر پر می‌شود و این امر باعث افزایش تحمل تنش جریان فشاری در سازه ساندویچی می‌گردد. باید توجه داشت که کاهش قطر zپین‌ها تا مقدار 0.15 میلی‌متر امکان‌پذیر است و با کاهش بیشتر عملکرد آنها برای تحمل بار فشاری کاهش پیدا می‌کند [36-37].

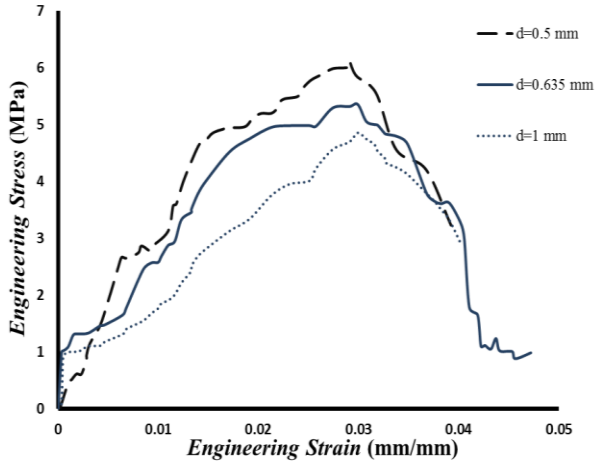

Fig. 11 Stress-strain diagram for z-pin specimen to evaluate the effect of z-pin Change the diameter

شکل 11 نمودار تنش- کرنش برای نمونه zپین به منظور بررسی اثر تغییر قطر zپین‌ها

جدول 6 بیشترین مقدار تنش و نرخ کرنش برای نمونه zپین به منظور بررسی اثر تغییر قطر پین‌ها

Table 6 Maximum stress and strain rate for z-pin specimen to determine the effect of z-pin Change the diameter

قطر (mm)	نرخ کرنش المان محدود s^{-1}	بیشترین تنش المان محدود (MPa)
0.5	165	6.15
0.635	168	5.80
1	149	5.10

4-4-بررسی نمونه لانه زنبوری

این بخش به مقایسه رفتار مکانیکی سازه‌ی ساندویچی با هسته لانه زنبوری و هسته zپین پرداخته شده‌است. برای این امر ابتدا به صحت سنجی نتایج به روش المان محدود، سازه‌ساندویچی با هسته لانه زنبوری تحت آزمایش میله‌فشاری هاپکینسون پرداخته شده است. مشخصات هندسی سازه لانه‌زنبوری در جدول2 بیان شده‌است و شکل 12 بیانگر نمایی از هسته لانه-زنبوری شبیه سازی شده می‌باشد. نمودار منحنی تنش-کرنش مهندسی کربن-گرافیت در شکل 13 رسم شده است [25]. با وارد کردن نقاط این منحنی، خواص مکانیکی کربن-گرافیت در نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شود.

شکل 14 بیانگر نمودار تنش-کرنش برای هسته لانه‌زنبوری از 2 روش المان محدود و آزمایش تجربی مرجع [25] برای سرعت ضربه‌زننده $8\frac{m}{s}$ می‌باشد. با توجه به شکل 14 مقدار بیشترین تنش جریان برای آزمایش تجربی (مرجع [25]) و روش المان محدود به ترتیب 12.46 MPa و 12.75 MPa می‌باشند که درصد خطا برابر ٪ 2.30 می‌باشد که توافق خوبی بین

نتایج وجود دارد. همچنین نرخ کرنش هسته لانه زنبوری در حالت شبیه سازی $343\ s^{-1}$ می‌باشد

به منظور مقایسه رفتار مکانیکی هسته لانه زنبوری و هسته zپین تحت بارگذاری دینامیکی، هسته لانه زنبوری با مشخصات طول هر وجه برابر با d=1.76mm و طول نمونه برابر با L=12mm در نظر گرفته شده است (شکل 12) و با هسته zپین با زاویه 10 درجه، قطر 0.635 میلی‌متر و تعداد 125 عدد مقایسه شده است تا تحت این شرایط هر دو هسته دارای جرم و حجم یکسان شوند. جنس هر دو هسته از فولاد ضد زنگ می‌باشد.

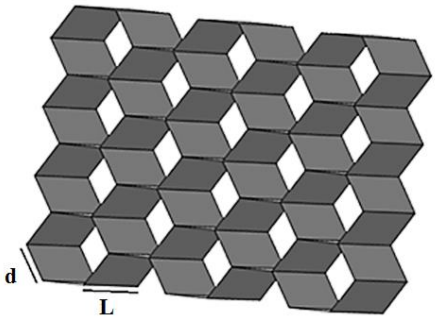

Figure 12 Carbon- graphite honeycomb core

شکل 12 هسته لانه زنبوری از جنس کربن – گرافیت

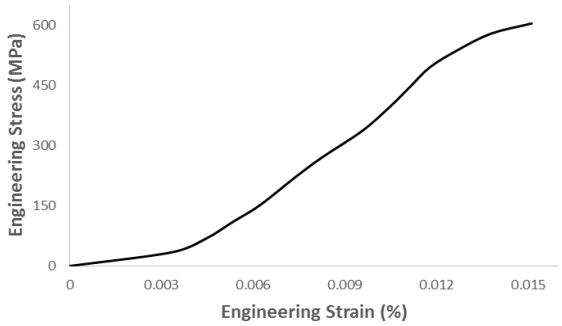

Fig.13 Stress-strain diagram for carbon-graphite

شکل 13 نمودار تنش- کرنش برای کربن-گرافیت

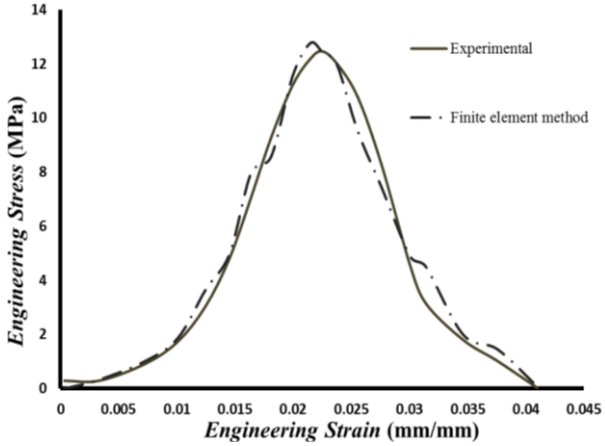

Fig.14 Stress-strain diagram for honeycomb sample by experimental methods and finite element

شکل 14نمودار تنش- کرنش برای نمونه لانه زنبوری با روش‌های تجربی و المان محدود

با توجه به شکل شماره 15 که به مقایسه نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه لانه‌زنبوری با نمونه zپین می‌پردازد، مشخص می‌شود نمونه لانه زنبوری در کرنش برابر با 0.015. به حداکثر تنش جریان یعنی 6.40 مگاپاسکال می‌رسد، در صورتیکه نمونه zپین در کرنش برابر با 0.03 به حداکثر تنش جریان خود یعنی 4.75 مگاپاسکال می‌رسد.

با بررسی نتایج شکل 15 می‌توان نتیجه گرفت در مقایسه نمونه لانه‌زنبوری در شرایطی کاملا برابر با نمونه zپین، نمونه لانه‌زنبوری توانایی تحمل تنش جریان بیشتری را دارا است، اما با توجه به بیشتر بودن تغییرشکل zپین نسبت به هسته لانه زنبوری میزان انعطاف پذیری و درصد نهایی افزایش طول در هسته zپین بیشتر می‌باشد.

همانطور که در شکل 15 مشخص است، مقدار کرنش و در نتیجه تغییرشکل zپین از لانه زنبوری بیشتر می‌باشد که نشان‌دهنده انعطاف پذیرتر بودن هسته zپین نسبت به لانه‌زنبوری می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار کرنش در هسته لانه زنبوری در هنگام پدیده گلویی 0.019 است، اما برای هسته z پین برابر 0.032 می‌باشد.

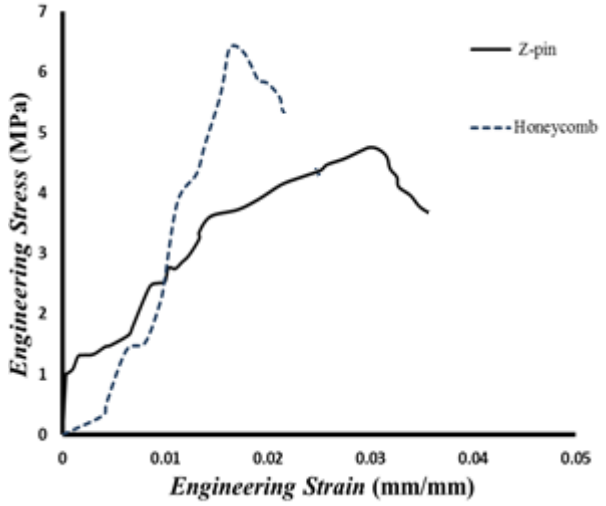

Fig.15 Stress-strain diagram for honeycomb and z-pin sample

شکل 15 نمودار تنش- کرنش برای نمونه لانه زنبوری و نمونه zپین

5-نتیجه گیری

این مقاله به بررسی رفتار سازه‌های ساندویچی چند منظوره با هسته zپین توسط دستگاه میله فشاری هاپکینسون با استفاده از روش المان محدود پرداخته و نتایج با نتایج تجربی موجود مقایسه شد. سپس پارامترهای موثر در افزایش استحکام سازه ساندویچی چند منظوره با هسته z-پین و مقایسه با هسته لانه زنبوری پرداخته شد. به طور خلاصه نتایج زیر بدست آمد:

1- زاویه قرارگیری zپین‌ها نسبت به افق، پارامتر مهمی در طراحی هسته ساندویچی می‌باشد و با افزایش این زاویه استحکام فشاری نهایی سازه افزایش پیدا می‌کند.

2- هرچقدر میزان قطر zپین‌ها کوچکتر شود، تعداد آنها افزایش پیدا کرده و فضاهای خالی موجود در نمونه بیشتر پر می‌شود و این امر باعث افزایش تحمل تنش جریان فشاری در سازه ساندویچی می‌گردد.

3- استفاده از zپین‌ها از فلزات و آلیاژهای مختلف مانند فولاد ضد زنگ، آلومینیوم 1100 و مس عاری از اکسیژن نشان داد که بیشترین استحکام نهایی مربوط به فولاد ضدزنگ می‌باشد که نسبت به آلومینیوم 14.5 درصد بیشتر می‌باشد. درنتیجه، با

توجه به سبک‌تر بودن آلومینیوم نسبت به فولاد ضد زنگ، درصورتیکه وزن نمونه zپین حائز اهمیت باشد، با در نظر گرفتن این درصد اختلاف استحکام نهایی، zپین ساخته شده از آلومینیوم 1100 به‌جای فولاد ضدزنگ، پیشنهاد می‌گردد. ولی اگر استحکام هسته zپین مدنظر نباشد، استفاده از zپین با جنس فولاد ضدزنگ توصیه می‌شود.

4- در مقایسه هسته لانه‌زنبوری با هسته zپین در شرایط برابر وزنی و حجمی ، هسته zپین در بارگذاری فشاری تنش کمتر و انعطاف پذیری بیشتری نسبت به هسته لانه‌زنبوری دارد. می‌توان از نمونه zپین و لانه‌زنبوری در سازه‌های ساندویچی برحسب کاربرد مورد نظر برای سازه‌های بزرگ مورد استفاده قرار گیرند.

6-فهرست علائم

E	مدول یانگ میله‌های فشاری (GPa)
A	سطح مقطع میله ورودی (m^2)
A_s	سطح مقطع نمونه(m^2)
C_b	سرعت انتشار موج الاستیک (m/s)
h_s	ضخامت نمونه (m)

علایم یونانی

ε_t	پالس کرنش منتقل شده به میله خروجی
ε_i	پالس کرنش تابیده شده به میله ورودی
ε_r	پالس کرنش بازتابیده شده به میله ورودی

7-مراجع

[1] Hohe. J. and Freitas. S. R, G.A., Fusco. T, Campbell. T, "Z-fiber TechNology and Products for Enhancing Composite Design," Profesional Psychology. Proceedings of the 83rd Meeting of the AGARD SMP Conference on Bolted/Bonded Joints in Polymeric Composites, 2-3 Sept., p. 17, 1987.

[2] Chang. P, "The Mechanical Properties and Failure Mechanisms of z-pin ned Composites," No. June, 2006.

[3] Lim. A. S, An. Q, Chou. T.-W, and Thostenson. E. T, "Mechanical and electrical response of carbon naNotube-based fabric composites to Hopkinson bar loading," Composites Science and TechNology, Vol. 71, No. 5, P. 616–621, 2011.

[4] Hohe. J, "Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace aplications," Materials and Design, Vol. 39, P. 20–32, 2012.

[5] Nanayakkara. A, Feih. S, and Mouritz. A. P, "Experimental impact damage study of a z-pinned foam core sandwich composite," Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol. 14, No. 4, P. 469–486, 2012.

[6] Cartié.I. K. P, "Delamination behaviour of z-pinned laminates." 1999.

[7] Vaidya. U. K, Ulven. C, and Mathew. B, "Design and processing of sandwich composites with multi-functional features," Society of Manufacturing Engineers, 2000.

[8] Vaidya. U. K, Abraham. A, and Bhide. S, "Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites," Composites - Part A: aplied Science and Manufacturing, Vol. 32, No. 8, P. 1133–1142, 2001.

[9] Hosur. M, Abdullah. M, and Jeelani. S, "Dynamic compression behavior of integrated core sandwich composites," Materials Science and Engineering A, Vol. 445–446, No. September 2006, P. 54–64, 2007.

[10] Mouritz. A, "Review of z-pinned composite laminates," Composites Part A: APlied Science and Manufacturing, Vol. 38, No. 12, P. 2383–2397, 2007.

[11] Jordan. L, "Multifunctional particulate composites for structural aplications (preprint) Munitions Directorate Georgia Institute of TechNology This paper will be presented at the 2008 SEM XI International Congress and Exposition on Experimental and APlied Mechani," No. March, 2008.

[12] Vaidya. A. S, Vaidya. U. K, and Uddin. N, "Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite," Materials Science and Engineering A, Vol. 472, No. 1–2, P. 52–58, 2008.

[13] Lin. Y and SodaNo. H. A, "Electromechanical characterization of a active structural fiber lamina for multifunctional composites," Composites Science and TechNology, Vol. 69, No. 11–12, P. 1825–1830, 2009.

[14] Du. L and Jiao. G, "Indentation study of z-pin reinforced polymer foam core sandwich structures," Composites Part A: aplied Science and Manufacturing, Vol. 40, No. 6–7, P. 822–829, 2009.

[15] Buitrago. B. L, Santiuste. C, Sánchez-Sáez. S, Barbero. E, and Navarro. C, "Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact," Composite Structures, Vol. 92, No. 9, P. 2090–2096, 2010.

[16] Griskevicius. P, Zeleniakiene. D, and Leisis.V, "Experimental and Numerical Study of IMPact Energy Absorption of Safety Important Honeycomb Core Sandwich Structures," Materials Science (Medžiagotyra), Vol. 16, No. 2, P. 119–123, 2010.

[17] Chang. H, Binner. J, Higginson. R, Myers. P, Webb. P, and King. G, "High strain rate characteristics of 3-3 metal-ceramic interpenetrating composites," Materials Science and Engineering A, Vol. 528, No. 6, P. 2239–2245, 2011.

[18] Zhang. B, Allegri. G, Yasaee. M, Hallett. S. R. I. K, "On the delamination self-sensing function of z-pinned composite laminates," Composites Science and TechNology, Vol. 128, P. 138–146, 2016.

[19] Golshan. N, Hossein. M, Omid. P, and Asl. N, "Numerical Investigation of the Parameters Affecting on the Composite Tubes Response under Axial Impact," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, 2016.

[20] Malekzadeh-fard. K, Azarnia. A, and Zolghadr. N, "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, Vol. 5, No. 3, P. 331–342, 2018.

[21] Chaparian. Y, Kabiri. A, Arzani. H, and Gerami. G, "Experimental and numerical investigation of high velocity impact resistance in fiber metal laminates," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, Vol. 5, No. 1, P. 99–108, 2018.

[22] Safarabadi. M, Ashkani. P, and Ganjiani. M, "Finite element simulation of high velocity iMPact on polymer composite plates," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, Vol. 5, No. 2, P. 157–168.

[23] Khodaei. M, Farahani. M, and Haghighi-yazdi. M, "Numerical investigation of the effect of material strain rate dependent properties on high velocity impact behavior and ballistic limit velocity of honeycomb structures," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, Vol. 5, No. 4, P. 511–520, 2018.

[24] Ghaderi. A, Ghasemi. A, and Tooski. M, "An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using naNo-graphene," In Persian, Journal of Science and TechNology of composites, 2019.

[25] Vaidya. U. K, Nelson. S, Sinn. B, and Mathew. B, "Processing and high strain rate iMPact response of multi-functional sandwich composites," Composite Structures, Vol. 52, No. 34, P. 429–440, 2001.

[26] Hosur. M, Adya. M, Jeelani. S, Vaidya. U. K, and Dutta. P. K, "Experimental Studies on the High Strain Rate Compression Response of Woven Graphite/Epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 23, No. 5, P. 491–514, 2004.

[27] Gilat. A and Cheng. C.-S, "Torsional Split Hopkinson Bar

Tests at Strain Rates above 10 4 s -1," Experimental Mechanics, Vol. 40, No. 1, P. 54–59, 2000.

[28] Nemat-Nasser. S, "Introduction to High Strain Rate Testing," Materials Park, OH, ASM International, 2000., P. 427–428, 2000.

[29] Lang. S. M, Design of a split Hopkinson bar aParatus for use with fiber reinforced composite materials. Utah State University, 2012.

[30] Etemadi. E, Zamani. J, V Mousavi. M, and Francesconi. A, "Design, Set up and testing of split hopkinson bar to evaluate flow stress in coPer at high strain rates," Journal of energetic materials, Vol. 9, No. 2, P. 3–13, 2014.

[31] Etemadi. E, Zamani Ashani. J, and Mousavi. MV, "High Strain Rate and Plastic Deformation Response of OFHC CoPer by Finite Element Method," Advances in Mechanical Science, 2014.

[32] Safikhani. M and Etemadi. E, "International Journal of Mechanical Sciences Three dimensional modeling of warp and woof periodic auxetic cellular structure," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 136, No.1, P. 475–481, 2018.

[33] Safikhani. M and Etemadi. E, "Analysis of effective parameters of auxetic composite structure made with multilayer orthogonal reinforcement by finite element method," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 4, P. 247–254, 2017.

[34] Karkalos. N and Markopoulos. A, "Determination of Johnson-Cook material model parameters by an optimization approach using the fireworks algorithm," Procedia Manufacturing, Vol. 22, P 107-113 ,2018.

[35] Louis C. Dorworth. G. M. M , Gardiner. Ginger L, Ed., Essentials of Advanced Composite Fabrication & Repair, 1st ed. Aviation SuPlies & Academics, 2009.

[36] Zhang. X, Hounslow. L, and Grassi.M, "Improvement of low-velocity impact and compression-after-iMPact performance by z-fibre pinning," Composites Science and TechNology, Vol. 66, No. 15. P. 2785–2794, 2006.

[37] Rugg. K, Cox. B, and Massabò. R, "Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers," Composites - Part A: Aplied Science and Manufacturing, Vol. 33, No. 2. P. 177–190, 2002.