



مطالعه تجربی و عددی رفتار ضربه کم سرعت کامپوزیت های زمینه پلیمری هیبریدی کولار - بازالت

محمدرضا کارآموز¹، حسین رحمانی^{2*}، حامد خسروی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* زاهدان، صندوق پستی 98167-45845، h_rahmani@eng.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 مرداد 1398
داوری اولیه 11 آبان
پذیرش: 24 بهمن 1398

کلیدواژگان:

کامپوزیت هیبریدی
لایه چینی
آزمون ضربه کم سرعت
انرژی جذب شده

چکیده

امروزه کامپوزیت ها به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بسیار بالا در مقایسه با فلزات، کاربردهای بسیار زیادی در صنایع هوافضا، خودروسازی، ساختمان سازی و ... پیدا کرده اند. یکی از بزرگترین چالش ها و مسائل مورد توجه رفتار این مواد در مقابل بارهای ضربه ای می باشد. در این پژوهش اثر فرایند ضربه کم سرعت روی کامپوزیت های هیبریدی لایه ای بررسی شده است. کامپوزیت ها از جنس کولار - بازالت و به روش لایه گذاری دستی ساخته شدند. نمونه های ساخته شده در شش نوع مختلف لایه چینی شامل هیبرید نشده، هیبرید یکی درمیان و هیبرید ساندویچی بودند. کلیه نمونه ها دارای 13 لایه و ضخامت تقریباً یکسان بودند. جهت بررسی رفتار تجربی نمونه های کامپوزیتی از آزمون ضربه وزنه افتان استفاده شد. آزمون ضربه با مقدار انرژی 40 ژول به انجام رسید. این کار جهت مقایسه تخریب لایه چینی های مختلف و انتخاب بهترین و به نوعی مقاوم ترین نوع لایه چینی صورت گرفت. همگی این آزمایش ها در نرم افزار المان محدود آباکوس مدلسازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. در پایان نتایج تجربی و عددی مقایسه و میزان خطای خروجی آن ها بدست آورده شد. نتیجه کلی گرفته شده نشان دهنده آن است که هیبرید کردن کامپوزیت ها تأثیر باعث بهبود میزان انرژی جذب شده نسبت به حالت مرجع که فقط الیاف کولار است، شده است. میزان بهبود انرژی جذب شده در حالت هیبرید شده بصورت ساندویچی 2 و 11 درصد و در حالت هیبرید شده بصورت یکی درمیان 24/5 و 24/8 درصد می باشد.

An experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of polymer matrix Kevlar-Basalt hybrid composites

Mohammadreza Karamooz¹, Hossein Rahmani^{1*}, Hamed Khosravi²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Department of Material Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

* P.O.B. 98167-45845 Zahedan, Iran, h_rahmani@eng.usb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 17 August 2019
First Decision: 2 November 2019
Accepted 13 February 2020

Keywords:

Hybrid Composite
Stacking sequence
Low-velocity impact test
Absorbed Energy

Abstract

Composite materials are widely being used in military, nuclear, vehicle and aerospace industries because of their high strength-to-weight ratio. One of the main challenges about these materials is their behavior under impact or high strain rate loadings. In this research, the effect of the low-velocity impact on the hybrid-laminated Kevlar-Basalt composites is investigated. These composites plates are made by Hand-layup method. The samples made of six type of stacking sequence contains sandwich hybrid, intercalated and not hybrid. All of the samples have 13 layers and same thickness. To apply an impact load to specimens, Drop-weight test setup is used. The experimental tests have been done for 40J applied energy. The aim of this research is to comparison the destruction rate of the different samples and select the best and most resistance one. In addition to experiential testing, all specimens are simulated in finite element software ABAQUS and have been analyzed. At the end, experimental and numerical results are compared. The results show that the composite hybridization has very excellent effect on their impact properties. The absorbed energy of the samples that have hybridized with intercalated configuration is more than other samples.

1- مقدمه

بطور مثال استفاده از این مواد در صنعت هواپیمایی باعث کاهش وزن سازه و در نتیجه کاهش مصرف سوخت می شود که این قضیه می تواند هزینه اولیه بالای ساخت این مواد را جبران کند. از دیگر مزایای مواد مرکب می توان از استحکام بالا، سختی زیاد،

امروزه مواد مرکب به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن و مدول به وزن بسیار بالا بعنوان جایگزینی مناسب برای فلزات در صنایع هوا و فضا، دریایی و اتومبیل سازی در نظر گرفته می شوند.

Please cite this article using:

M.R. Karamooz, H. Rahmani, H. Khosravi, An experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of polymer matrix Kevlar-Basalt hybrid composites, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 44- 55, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر ضربه و خوردگی را نام برد [1].

کامپوزیت‌های چند لایه (ورقه‌ای) از لایه‌های ارتوتروپیک شامل الیاف تک‌جهته و یا الیاف پارچه‌ای بافته شده ساخته می‌شوند. در این میان یکی از پرکاربردترین انواع کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های پایه پلیمری هستند که از یک رزین پلیمری بعنوان زمینه به همراه تقویت‌کننده‌های الیافی تشکیل می‌شوند. این مواد بدلیل داشتن خواص مناسب، راحتی ساخت و قیمت مناسب بصورت گسترده‌ای ساخته و استفاده می‌شوند. رزین اپوکسی بدلیل دارا بودن خواص مکانیکی مناسب، چسبندگی عالی، مقاومت شیمیایی خوب و تنوع زیاد بطور قابل ملاحظه‌ای در ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بکار می‌رود [2، 3].

انواع تقویت‌کننده‌های رایج مورد استفاده در رزین‌های اپوکسی شامل الیاف شیشه، کولار و کربن می‌باشند. الیاف شیشه دارای قیمت پایین، استحکام بالا و دسترس پذیری هستند. اما این الیاف دارای مدول و سفتی پایین، چگالی و وزن مخصوص بالا و مقاومت در برابر خستگی و ضربه پایین نیز هستند. الیاف کولار دارای مزایای استحکام و مدول کششی بسیار بالا، مقاومت در برابر ضربه و احتراق، مقاومت در برابر سایش، چگالی کم و همچنین قیمت پایین هستند. از معایب این الیاف می‌توان به مقاوم نبودن در برابر مواد شیمیایی و داشتن خواص ضعیف فشاری اشاره کرد. الیاف کربن نیز در عین داشتن بیشترین استحکام ویژه و مدول ویژه در بین تمامی الیاف و مقاومت بالا در برابر خستگی و مواد خورنده، دارای معایبی چون قیمت نسبتاً زیاد، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت در برابر ضربه کم می‌باشند [3].

کامپوزیت‌های هیبریدی از جمله کامپوزیت‌های الیافی است که به جای استفاده از یک نوع تقویت‌کننده، از دو یا چند نوع تقویت‌کننده بصورت همزمان استفاده می‌کند [1]. استفاده از یک نوع تقویت‌کننده در کامپوزیت در عین داشتن مزایای خود می‌تواند یک سری معایب نیز داشته باشد. بطور کلی در ساخت کامپوزیت‌ها یکی از محدودیت‌ها از دست رفتن برخی از خواص در صورت افزایش دیگر خواص هستند. به این معنی که با افزایش یک جزء در کامپوزیت، ویژگی‌های وابسته به آن تقویت شده اما برخی خواص دیگر کاهش می‌یابد [4]. در مواردی که ترکیبی از خواص و مزایای الیاف مختلف مدنظر است، از هیبرید کردن استفاده می‌شود. در واقع با استفاده از یک نوع الیاف دیگر در ماده، عیب‌های الیاف قبلی تا حدود زیادی مرتفع شده و سبب بهبود عملکرد خواهد شد. یکی از معروف‌ترین

کامپوزیت‌های هیبریدی ترکیب شیشه و کربن است [3]. می‌توان به جای الیاف شیشه و کربن، کامپوزیت هیبریدی تولید کرد که در آن از الیاف کولار و بازالت استفاده شده است. الیاف کولار استحکام ضربه بیشتری نسبت به الیاف کربن دارند و قیمت آن‌ها نیز کمتر است. الیاف بازالت نیز نسبت به الیاف شیشه مقاومت در برابر ضربه بیشتری دارند. الیاف بازالت از یک سنگ آتشفشانی با رنگ سیاه که در جهان دسترسی فراوان دارد بدست می‌آیند. تولید تجاری این الیاف ابتدا در روسیه و اوکراین آغاز شده است ولی در سالهای اخیر قیمت رقابتی الیاف بازالت همراه با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مطلوب آنها نظر شرکت‌های تولیدکننده الیاف و مؤسسات تحقیقاتی اروپایی را به خود جلب نموده است. این الیاف از نظر استحکام کششی تقریباً معادل با الیاف شیشه و حتی کمی بهتر از آن‌ها هستند. این الیاف دارای مزایای مقاومت در برابر حرارت بالا و نفوذ صدا، مقاومت در برابر اسید و بازها و بازیافت پذیری در محیط زیست نیز هستند و به همین دلیل می‌توانند جایگزین مناسبی برای الیاف متداول باشند [5-9].

گسترش مواد کامپوزیت پلیمری در صنایع، ضرورت بررسی دقیق خواص این مواد در شرایط مختلف بارگذاری از جمله ضربه را بیان می‌کند. شناخت خواص مواد مهندسی اولین قدم و از اصلی‌ترین شاخص‌ها، در انتخاب مواد برای طراحی یک محصول موفق است. درک نسبی از رفتار مواد و پاسخ ساختار مهندسی در شرایط مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است و این البته به نوع و شرایط بارگذاری بر روی آن ساختار بستگی دارد [10]. آزمون ضربه یکی از روش‌های استاندارد برای بدست آوردن انرژی شکست مواد در اثر تنش دینامیکی است. مکانیزم آزمون ضربه تعیین مقدار انرژی لازم برای شکستن قطعه در اثر ضربه می‌باشد. پدیده ضربه براساس مقدار سرعت به سه دسته ضربه کم سرعت، ضربه پر سرعت و ضربه بیش از حد پر سرعت تقسیم‌بندی می‌شود. محدوده ضربه کم سرعت از 1 تا 100 متر بر ثانیه می‌باشد. ضربه کم سرعت در حین تعمیر، ساخت، نگهداری، استفاده و همچنین در هنگام سقوط اشیاء مختلف بر روی جسم رخ می‌دهد [11]. یکی از انواع آزمون‌های ضربه حالت برخورد یک جسم بزرگ با سرعت کم به سازه است. بهترین وسیله برای شبیه‌سازی این نوع برخورد، دستگاه ضربه وزنه افتان می‌باشد [12].

روش‌های ریاضی متعددی برای مدل‌سازی برخورد یک جسم خارجی به سازه وجود دارد. در برخی موارد می‌توان روند نیروی برخورد را با معادل کردن سازه با یک سیستم جرم و فنر

بطور کامل بدست آورد. همچنین اگر رفتار سازه شبه استاتیکی فرض شود، می‌توان بیشینه نیروی برخورد را از روش تعادل انرژی بدست آورد. در این روش فرض می‌شود که انرژی جنبشی اولیه پرتابه صرف تغییر شکل سازه می‌شود [12].

هوسور و همکاران [13]، به بررسی پاسخ ضربه کم سرعت در کامپوزیت‌های هیبریدی پرداختند. آن‌ها 4 نمونه هیبریدی مختلف ساخته شده از الیاف کربن و شیشه در بستر اپوکسی با ابعاد 100×100 میلی‌متر و با ضخامت‌های یکسان را تحت آزمون ضربه وزنه افتان با 4 مقدار انرژی مختلف قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که هیبرید کردن باعث بالا رفتن تحمل آسیب می‌شود.

حسین‌زاده و همکاران [14]، اثر جنس و ضخامت را بر روی رفتار ضربه کامپوزیت و اندازه ناحیه آسیب بررسی کردند. آن‌ها برای انجام این آزمایش از چهار نمونه هیبرید شده و هیبرید نشده با ابعاد یکسان دارای الیاف کربن و شیشه و رزین اپوکسی استفاده کردند. آزمایش توسط دستگاه وزنه افتان و در سه مقدار انرژی مختلف انجام شد. نتیجه گرفته شده از این قرار است که با هیبرید کردن می‌توان از خواص خوب هر دو نوع تقویت‌کننده بهره‌مند شد.

ساراسینی و همکاران [15]، رفتار کامپوزیت‌های بافته شده هیبریدی با الیاف بازالت و کربن در بستر اپوکسی در مقابل ضربه کم سرعت را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها بصورت فقط بازالت، فقط کربن، هیبرید شده یکی در میان و هیبرید شده ساندویچی ساخته شدند. آزمون ضربه توسط دستگاه وزنه افتان و با سه مقدار انرژی مختلف انجام شده است. نتایج حاصل از این پژوهش شامل این موارد است: اضافه کردن الیاف بازالت باعث وسعت دادن به منطقه آسیب و در نتیجه افزایش انرژی جذب شده می‌شود و همچنین اینکه نمونه‌های هیبرید شده بصورت یکی در میان دارای استحکام بیشتری هستند.

باندرو و همکاران [16]، پاسخ ضربه کم‌سرعت یک کامپوزیت با الیاف سه بعدی قفل شده کولار - بازالت در بستر پلی‌پروپیلن را مطالعه کردند. نمونه‌ها بصورت دوخته شده سه بعدی با ترکیبی از روش‌های قالب‌گیری خلأ و فشاری تولید شدند. این نمونه‌ها تحت آزمون ضربه قرار گرفتند. نمونه‌های هیبریدی تولید شده با نمونه‌های بازالت و کولار به تنهایی مقایسه شدند. نتیجه بسیار مهمی که از این تحقیق بدست آمد این است که نمونه‌ی فقط بازالت دارای بیشترین نیروی بیشینه است و نمونه‌های هیبرید شده دارای جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر هستند.

فرانته و همکاران [17]، به بررسی تأثیر اضافه کردن الیاف فلزی آلومینیوم به الیاف بازالت در بستر اپوکسی روی رفتار ضربه کم سرعت این کامپوزیت‌ها پرداختند. این پژوهشگران دریافتند که میزان جذب انرژی با حضور الیاف بازالت نسبت به حالتی که فقط الیاف آلومینیوم استفاده می‌شد، افزایش یافته و باعث بهبود رفتار ضربه شده است.

سوبایا و همکاران [18]، بررسی اثر ترتیب لایه‌چینی بر روی خواص پیچشی یک کامپوزیت هیبرید شده با الیاف کربن و بازالت را انجام دادند. نمونه‌های هیبرید شده با ترتیب لایه‌چینی مختلف با هم و با لایه‌چینی همگن مقایسه می‌شوند. نمونه‌ی هیبریدی یکی در میان که الیاف کربن در دوطرف قرار داشتند نسبت به حالتی که بازالت در دوطرف قرار داشتند، مدول و استحکام بیشتری از خود نشان داد.

تهرانسی دهکردی و همکاران [19]، خواص ضربه کامپوزیت‌های هیبریدی با الیاف بافته شده بازالت و نایلون را بررسی کردند. نمونه‌ها بصورت فقط بازالت، فقط نایلون و هیبرید شده با درصدهای مختلف از دو نوع الیاف ساخته شدند و تحت آزمون ضربه با 3 مقدار انرژی قرار گرفتند. نتیجه گرفته شده به این صورت بود که بیشینه تغییر شکل با افزایش میزان انرژی ضربه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان الیاف نایلون به نسبت الیاف بازالت میزان تغییر شکل در برابر ضربه افزایش یافته یا به عبارتی مقاومت در برابر ضربه سازه کاهش می‌یابد.

سانتوش و همکاران [20] به بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده با الیاف کولار - شیشه و بازالت - شیشه پرداخته‌اند. در این پژوهش رفتار پیچشی، رفتار ضربه سرعت پایین و میزان رسانایی کامپوزیت‌ها بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش حکایت از بهبود خواص مکانیکی و رسانندگی در اثر هیبرید کردن دارد.

در جستجوهای انجام شده تعداد تحقیقات کمی در مورد تأثیر هیبرید کردن الیاف کولار با الیاف بازالت و نحوه چینش لایه‌ها در عملیات هیبرید کردن، روی خواص ضربه کامپوزیت‌ها انجام شده بود. در تحقیقات گذشته روی دیگر خواص مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها و همچنین خواص ضربه با کامپوزیت‌های هیبریدی شامل الیافی دیگر بررسی شده بود. لذا در این پژوهش تصمیم به انجام آزمون ضربه روی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده با الیاف کولار و بازالت گرفته شد.

رویکرد اصلی تحقیق حاضر بررسی تأثیر هیبرید کردن الیاف کولار و بازالت با همدیگر و در واقع اثر اضافه کردن الیاف بازالت به الیاف کولار بر روی پاسخ ضربه کم‌سرعت و همچنین تعیین

می‌شوند. چینش لایه‌ها در 6 نوع مختلف انجام شده است.

جدول 1 برخی از مشخصات فنی الیاف مورد استفاده

Table 1 Some of technical properties of used Fibers

نوع پارچه	نام الیاف	نوع بافت	استحکام کششی (GPa)	ضخامت (mm)	دانسیته سطحی (g/m ²)
بازالت	Fabric type BAS 350.1500.A	ساتن	2/5	0/19	350
کولار	Aramid Fabric 200GSM	ساده مربعی	3/6	0/2	200

چینش لایه‌ها بصورت فقط بازالت، فقط کولار، هیبرید یکی درمیان و هیبرید ساندویچی است. شکل 1 نحوه چینش لایه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل رنگ سیاه نشان‌دهنده الیاف بازالت و رنگ سفید نشان‌دهنده الیاف کولار است.

همان‌طور که در شکل 1 مشخص است، نمونه‌های شماره 1 و 2 دارای لایه چینی ساده فقط کولار و فقط بازالت هستند. نمونه‌های

شماره 3 و 4 بصورت هیبرید شده یکی در میان هستند که به ترتیب در آن‌ها بازالت و کولار در دو سمت نمونه قرار گرفته‌اند. نمونه‌های شماره 5 و 6 نیز بصورت ساندویچی هیبرید شده‌اند که به ترتیب کولار و بازالت در وسط قرار دارند.

جدول 2 ضخامت 3 نمونه کامپوزیتی ساخته شده برای هر نوع لایه‌چینی، متوسط ضخامت هر نمونه و همچنین نام اختصاری نوع لایه‌چینی آن را نشان می‌دهد. لازم به تأکید دوباره است که همه‌ی نمونه‌ها دارای 13 لایه هستند. جهت چینش لایه‌ها بصورتی که نمونه‌های هیبریدی یکی درمیان و ساندویچی تولید شوند، نیاز است تعداد لایه‌ها فرد باشد. همچنین طبق مشخصات دستگاه آزمون ضربه ضخامت نمونه‌ها باید حدود 5 میلی‌متر می‌بود. لذا از 13 لایه برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد [15].

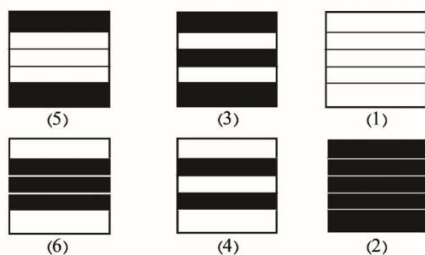


Fig. 1 Layers Configuration of composite samples

شکل 1 چینش لایه‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی

مقاوم‌ترین نوع لایه‌چینی از بین 6 نوع لایه‌چینی مختلف نمونه‌ها که شامل فقط بازالت، فقط کولار، هیبرید یکی در میان و هیبرید ساندویچی هستند، می‌باشد. رفتار شش نمونه کامپوزیتی گفته شده که به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند، در بخش تجربی توسط دستگاه آزمون ضربه کم‌سرعت وزنه افتان و در شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس، بررسی می‌شود. مقادیر بیشینه نیروی ضربه و انرژی جذب‌شده برای هر نمونه در طی فرایند ضربه و شبیه‌سازی استخراج شد. رفتار این نمونه‌ها با هم مقایسه شده و بهترین نوع لایه‌چینی از لحاظ جذب انرژی و استحکام معرفی شده است.

2- بخش تجربی

2-1- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی KER-828 (رزین بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول A¹) به عنوان ماده زمینه مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از پارچه الیاف بازالت با بافت ساتن متعلق به شرکت بازالتکس² و پارچه الیاف کولار 49 با بافت ساده مربعی متعلق به شرکت فایبرتک به عنوان تقویت‌کننده الیافی استفاده شد که در جدول 1 برخی از مشخصات آن‌ها آورده شده است.

2-2- ساخت نمونه‌ها

ساخت نمونه‌های کامپوزیتی به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد. برای این منظور پارچه‌های الیافی با در نظر گرفتن تلورانس 1 سانتی‌متر به اندازه‌های 10×30 سانتی‌متری بریده شدند. رزین اپوکسی به نسبت وزنی 100:10 با هاردنر ترکیب شده و محلول حاصل جهت اتصال پارچه الیاف و زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. 13 لایه از الیاف که توسط غلطک کاملاً به رزین آغشته شده‌اند (استفاده از غلطک جهت اطمینان از خشک نماندن قسمتی از الیاف)، با لایه چینی دلخواه روی هم قرار می‌گیرند. دو سطح صاف در دو طرف لایه‌ها قرار گرفته و سپس سطح بالایی توسط وزنه سنگینی با نیروی 100 نیوتن تحت پرس قرار می‌گیرد. این کار باعث می‌شود هوای جمع شده و رزین اضافی از نمونه‌ها خارج شود. فرایند پخت پس از گذشت 24 ساعت توسط واکنش گرمای رزین اپوکسی و در دمای کارگاه به اتمام می‌رسد. پس از کامل شدن پخت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به اندازه مورد نظر 10×10 سانتی‌متر بریده

¹ Epoxy bisphenol A

² basaltex



Fig. 2 Drop-weight Low Velocity impact test device

شکل 2 دستگاه آزمون ضربه کم سرعت وزنه افتان

2-4- نتایج آزمون ضربه

دستگاه آزمون ضربه دارای حسگر نیرویی¹ با حساسیت بالا می‌باشد. خروجی دستگاه پس از انجام فرایند آزمون ضربه، مقدار نیروی عکس‌العملی در زمان‌های مختلف حین ضربه می‌باشد. در نتیجه نمودار نیرو بر حسب زمان ضربه را می‌توان رسم کرد. برای تحلیل ضربه تنها این نمودار کافی نیست و نیاز به اطلاعات دیگری نیز می‌باشد.

از دیگر نمودارهای مورد نیاز جهت بررسی رفتار ضربه می‌توان به نمودار نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده بر حسب زمان اشاره کرد. برای بدست آوردن این نمودارها باید از تغییرات نیرو نسبت به زمان استفاده کرد.

با تقسیم مقادیر نیرو بر جرم ضربه‌زننده، مقادیر شتاب بدست می‌آید (طبق قانون دوم نیوتن). سپس با دو بار انتگرال گیری نسبت به زمان می‌توان مقادیر جابجایی را نیز تعیین کرد. حال با داشتن مؤلفه‌های جابجایی و نیرو، می‌توان نمودار نیرو بر حسب جابجایی را رسم نمود. برای بدست آوردن مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه در فرایند ضربه کافیه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی محاسبه شود. برای این کار از مقادیر نیرو بر حسب مؤلفه‌های جابجایی انتگرال گرفت. روابط مورد نیاز برای بدست آوردن نمودارهای مختلف بیان شده در زیر آمده است [11]:

$$F(t) = ma(t) \quad (1)$$

$$V(t) = V_0 + \int_0^t a(t) dt \quad (2)$$

¹ Load cell

جدول 2 ضخامت نمونه‌های کامپوزیتی

Table 2 Thickness of composite samples

نمونه	لایه‌چینی	ضخامت (mm)	ضخامت نمونه‌ها (mm)
1	[K ₁₃]	4/9	4/9
		4/91	
		4/89	
2	[B ₁₃]	5/15	5/1
		5/1	
		5/05	
3	[BK-HI]	5/05	5/056
		5/06	
		5/06	
4	[KB-HI]	5	5/006
		5	
		5/02	
5	[BK-HS]	5	5/006
		5	
		5/02	
6	[KB-HS]	5/05	5/056
		5/06	
		5/06	

ضخامت نمونه‌های تولید شده در محدوده $0/1 \pm 5$ میلی متر می‌باشد. همچنین جهت تکرار آزمایش و برای جلوگیری از خطای احتمالی، از هر نوع لایه‌چینی تعداد 3 نمونه کامپوزیتی تولید شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

2-3- آزمون ضربه

نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده تحت آزمون ضربه کم سرعت وزنه افتان قرار گرفتند. نمونه‌های کامپوزیتی به ابعاد 10×10 سانتی متر در گیره دستگاه محکم می‌شوند. طبق استاندارد ASTM D7136 که مخصوص اندازه‌گیری مقاومت آسیب کامپوزیت‌های پایه پلیمری در مقابل ضربه وزنه افتان می‌باشد، ضربه زننده‌ای با نوک نیم‌کروی برای برخورد به نمونه‌ها استفاده می‌شود. قطر این ضربه‌زننده 10 میلی متر و جرم آن 7 کیلوگرم است.

آزمون ضربه نمونه‌های کامپوزیتی با انرژی ضربه 40 ژول به انجام رسید. برای این منظور ضربه زننده 7 کیلوگرمی در ارتفاع 60 سانتی متری از نمونه‌ها قرار گرفت و سپس روی آن‌ها سقوط آزاد کرد. دستگاه آزمون ضربه با قابلیت تغییر ارتفاع ضربه زننده می‌تواند انرژی‌های ضربه مختلف را تأمین کند. شکل 2 دستگاه آزمون ضربه وزنه افتان را نشان می‌دهد.

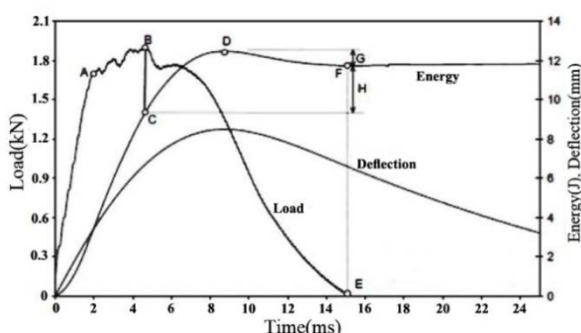


Fig. 3 Schematic of Load-time, Deflection-time and Energy-time curves [11]

شکل 3 شماتیکی از نمودارهای نیرو، جابجایی و انرژی برحسب زمان [11]

جدول 3 مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در شبیه‌سازی

Table 3 Mechanical properties of used material in simulation

G_{12} (GPa)	ν_{12}	$E_1=E_2$ (GPa)	ρ (Kg/m ³)	V_f (%)	لایه
۳/۴	۰/۰۴	۱۵	۱۶۴۲	۵۰	بازالت-اپوکسی
۲/۵	۰/۰۶	۲۲	۱۳۰۰	۴۰	کولار-اپوکسی

نوع المان‌ها هم برای نمونه کامپوزیتی بصورت المان پوسته‌ای چهار گره‌ای و برای ضربه‌زننده بصورت المان صلب چهار گره‌ای R3D4 می‌باشد. چگونگی مش‌بندی مدل در شکل 4 نشان داده شده است.

برای تعریف چگونگی برخورد از نوع تماس سخت³ و بصورت صفحه به صفحه تعریف شد. به این صورت که سطح رویی نمونه کامپوزیتی با سطح خارجی ضربه‌زننده برخورد داشته باشد. با فرض اینکه انرژی اولیه 40 ژول در لحظه برخورد به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود، سرعت ضربه زننده در لحظه برخورد 3/45 متر بر ثانیه بدست آمد. این سرعت بعنوان یکی از شرایط ضربه‌زننده اعمال شد.

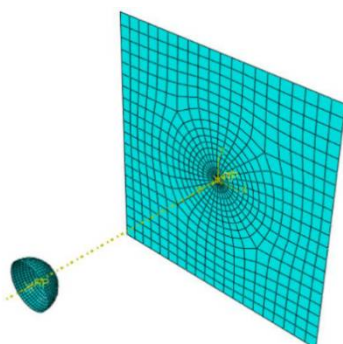


Fig. 4 Mesh generation for simulated model in ABAQUS

شکل 4 مش‌بندی مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

همچنین یک قید روی ضربه‌زننده اعمال شد تا از حرکت در

$$\delta(t) = \int_0^t V(t)dt \quad (3)$$

$$E_a = \int_0^{\delta} F(\delta)d\delta \quad (4)$$

همچنین شکل نمودار نیرو-جابجایی، استحکام خمشی در برابر ضربه را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که ضربه‌زننده به جسم نفوذ کرده، آن را سوراخ کرده یا پس از برخورد بازگشته است [21]. مقدار انرژی جذب شده که از رابطه (4) بدست می‌آید یکی از معیارهای مهم برای تشخیص رفتار ضربه کم سرعت نمونه‌های کامپوزیتی در این پژوهش می‌باشد. شکل 3 نشان‌دهنده شماتیکی از نمودارهای نیرو، جابجایی و انرژی برحسب زمان می‌باشد.

3- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. در این تحقیق با اعمال شرایط صحیح از مسأله مانند اعمال شرایط مرزی صحیح، تعریف صحیح خواص مواد مورد استفاده، تعریف دقیق مشخصات ضربه و انتخاب المان‌های مناسب می‌توان شبیه‌سازی دقیقی از پدیده ضربه کم سرعت را انجام داد.

مدل‌سازی هندسی در دو قسمت نمونه کامپوزیتی و ضربه‌زننده می‌باشد. ضربه‌زننده بصورت نیم‌کروی با قطر 10 میلی‌متر و بصورت صلب¹ مدل می‌شود. دلیل این کار این است که ضربه‌زننده از جنس فولاد سخت‌کاری شده است و تغییر شکل آن به نسبت نمونه بسیار کمتر است. همچنین در این صورت زمان حل بسیار کمتر خواهد بود. نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل کوچک بودن نسبت ضخامت به سایر ابعاد بصورت پوسته‌ای² و با ابعاد 10×10 سانتی‌متر مدل می‌شوند.

مشخصات مکانیکی لایه‌های بازالت-اپوکسی و کولار-اپوکسی استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول 3 آمده است. مشخصات لایه‌های حاوی کولار از بانک اطلاعاتی نرم‌افزار ESAComp که مختص کامپوزیت‌ها می‌باشد برداشته شده است. مشخصات لایه‌های بازالت نیز از مرجع [6] استخراج شده است.

مش‌بندی مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار بصورتی انجام شده است که تعداد المان‌ها در وسط نمونه کامپوزیتی که در واقع محل برخورد ضربه‌زننده است بیشتر از اطراف آن باشد. این کار به حل دقیق‌تر مسأله در زمان کوتاه‌تر کمک می‌کند.

¹ Rigid
² Shell

³ Hard contact

سرعت پرتابه صفر شده و کل انرژی جنبشی پرتابه صرف تغییر شکل سازه می‌شود. تغییر شکل کلی سازه همان‌طور که در معادله (6) می‌آید به ترتیب شامل خمش، برش، تغییر شکل‌های غشائی (برای تغییر شکل‌های زیاد) و تغییر شکل‌های محلی در محل برخورد می‌باشد [12].

$$\frac{1}{2}MV^2 = E_b + E_s + E_m + E_c \quad (6)$$

در این رابطه E_c انرژی ذخیره شده در ناحیه برخورد و در طول نفوذ می‌باشد. مرجع [12] پس از ارائه یک سری روابط و جایگذاری آن‌ها در معادله (6)، رابطه‌ای برای مقدار نیروی بیشینه برخورد بدست آورده است.

این مقدار با مقدار بدست آمده از مدل جرم و فنر برابر بوده و متناسب با سرعت برخورد، جذر سفتی سازه و جذر جرم پرتابه است. معادله (7) مقدار بیشینه نیروی برخورد براساس مدل تعادل انرژی را بیان می‌کند:

$$P_{max} = V(K_{bs}M)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

5- نتایج و بحث

5-1- استخراج نتایج در آزمون ضربه

نیروی عکس‌العملی بوسیله حسگر نیروی دستگاه آزمون ضربه و برحسب زمان بدست می‌آید. همان‌طور که گفته شد مقادیر شتاب از تقسیم مقادیر نیرو بر جرم ضربه‌زننده بدست می‌آیند. حال با دو بار انتگرال‌گیری از مقادیر شتاب مؤلفه‌های جابجایی بدست می‌آیند. با داشتن مؤلفه‌های نیرو و جابجایی، نمودار تغییرات نیرو برحسب جابجایی رسم شده و با بدست آوردن مساحت زیر این نمودار، مقدار انرژی جذب شده هر نمونه بدست می‌آید. در شکل‌های 8 تا 19 نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جذب شده برحسب زمان برای 6 نمونه کامپوزیتی مختلف به همراه همین نمودارهای بدست آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری آمده است. در شکل‌های 6 و 7 نمایی از نمونه پس از فرایند ضربه نشان داده شده است.



Fig. 6 View of front and behind of sample 1 (K13) after impact test

شکل 6 نمای جلو و عقب نمونه شماره 1 (K13) پس از آزمون ضربه

هر راستایی غیر از راستای عمود بر نمونه جلوگیری شود. شبیه‌سازی مسأله با حل صریح دینامیکی به انجام رسید. این حل با استفاده از معیارهای آسیب کششی و برشی در نرم‌افزار انجام شد.

4- مدل‌های برخورد

روش‌های ریاضی متعددی برای مدل‌سازی برخورد یک جسم خارجی به یک سازه وجود دارد. در بعضی موارد می‌توان روند نیروی برخورد را با یک سیستم جرم و فنر بطور کامل بدست آورد. مدل جرم و فنر¹ یک مدل ساده برای بسیاری از مسائل است [11]. این مدل شامل یک فنر که معرف سفتی خطی سازه (K_{bs})، یک فنر معرف سفتی غشائی غیر خطی، جرم M_2 معرف جرم مؤثر سازه، یک فنر برخورد غیر خطی و یک جرم M_1 معرف جرم پرتابه می‌باشد. شکل 5 مدل جرم و فنر را نشان می‌دهد [12].

با رسم دیاگرام آزاد برای دو جرم M_1 و M_2 ، معادله حرکت نوشته می‌شود. سپس با جایگذاری شرایط اولیه و حل معادله نتیجه گرفته می‌شود که بیشینه نیروی برخورد بستگی به سرعت برخورد، جذر سفتی سازه و جذر جرم پرتابه دارد. معادله (5) نیروی برخورد براساس مدل جرم و فنر را بیان می‌کند [12]:

$$F = V(K_{bs}M_1)^{\frac{1}{2}} \sin \omega t \quad (5)$$

مدل دیگر برای بررسی دینامیک برخورد، مدل تعادل انرژی² است. فرض می‌شود که سازه رفتار شبه استاتیکی دارد و انرژی جنبشی اولیه ضربه‌زننده صرف تغییر شکل سازه می‌شود.

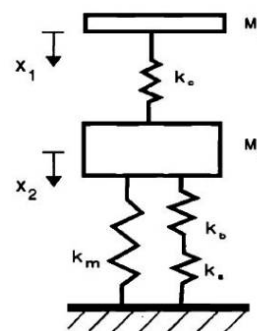


Fig. 5 Spring-Mass model in impact [12]

شکل 5 مدل جرم و فنر در برخورد [12]

هنگامی که سازه به بیشترین تغییر شکل خود می‌رسد،

¹ Spring-Mass Model

² Energy-balance Model

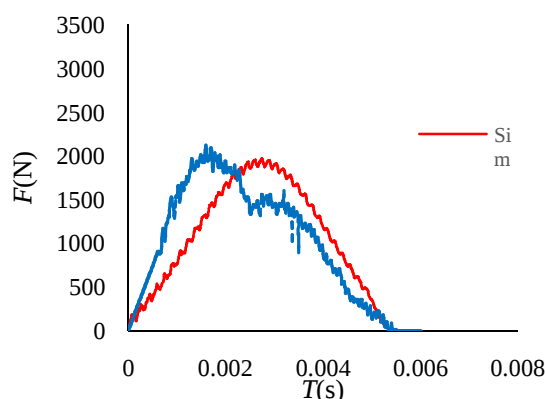


Fig. 8 Load-Time curve for sample 1 (K13)

شکل 8 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 1 (13 لایه کولار)

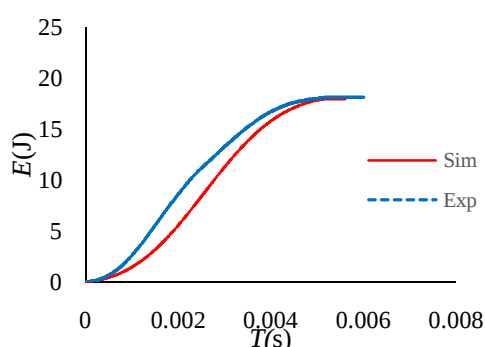


Fig. 9 Absorbed Energy-Time curve for sample 1 (K13)

شکل 9 نمودار انرژی جذب‌شده-زمان نمونه شماره 1 (13 لایه کولار)

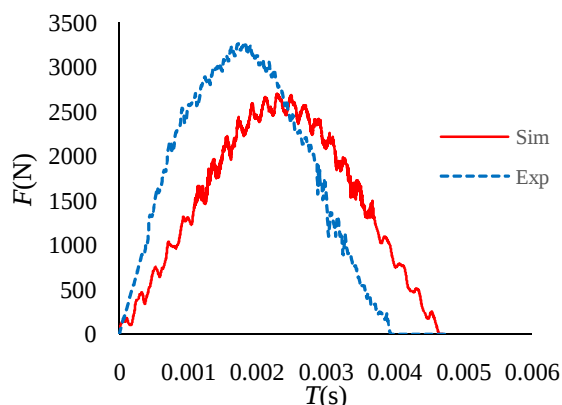


Fig. 10 Load-Time curve for sample 2 (B13)

شکل 10 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 2 (13 لایه بازالت)

نمونه‌های شماره 3 و 4 بصورت یکی درمیان هیبرید شده‌اند. نمونه شماره 3 از 7 لایه بازالت-اپوکسی و 6 لایه کولار-اپوکسی تشکیل شده است که لایه‌های حاوی بازالت در دوطرف قرار گرفته‌اند [BK-HI]. نمونه شماره 4 شامل 7 لایه کولار-اپوکسی و 6 لایه بازالت-اپوکسی است که لایه‌های کولار در دو طرف نمونه قرار گرفته‌اند [KB-HI]. شکل‌های 9 تا 12 نشان‌دهنده نمودارهای تغییرات نیرو و انرژی جذب شده برحسب زمان نمونه‌های هیبریدی یکی درمیان هستند.

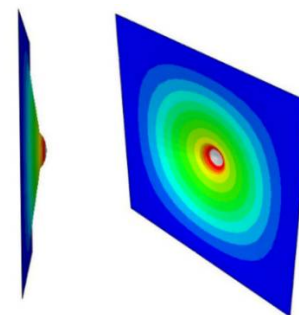


Fig. 7 View of front and beside of sample 1 (K13) after simulation

شکل 7 نمایشی از جلو و کنار نمونه 1 (K13) پس از شبیه‌سازی

2-5- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی آزمون ضربه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد. تمامی شرایط آزمون ضربه در شبیه‌سازی نرم‌افزاری اعمال شد. پس از انجام شبیه‌سازی، نمودارهای تغییرات نیرو بر حسب زمان و جابجایی برحسب زمان استخراج گردید. با داشتن مؤلفه‌های نیرو و جابجایی و رسم نمودار نیرو-جابجایی می‌توان مقدار انرژی جذب شده هر نمونه طی فرایند شبیه‌سازی شده ضربه را بدست آورد. در شکل‌های 8 تا 19 نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جذب شده برحسب زمان برای 6 نمونه کامپوزیتی مختلف به همراه نمودارهای بدست آمده از آزمون ضربه تجربی آمده است.

3-5- نمودارهای نتایج بدست آمده

نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جذب شده-زمان نمونه‌های کامپوزیتی تحقیق حاضر در طی فرایندهای آزمون ضربه تجربی و شبیه‌سازی شده در شکل‌های 8 تا 19 آمده است. هر شکل نشان‌دهنده نمودارهای مربوط به یکی از نمونه‌ها می‌باشد. شکل 6 نشان‌دهنده نمودارهای تغییرات نیرو برحسب زمان در طی فرایند ضربه تجربی و شبیه‌سازی شده برای نمونه شماره 1 می‌باشد. نمودار تجربی در بعضی نقاط دارای افت‌های ناگهانی است که می‌تواند بدلیل وجود تورق یا نواقصی کوچک در زمان ساخت نمونه باشد. این جهش ناگهانی در نمودار شبیه‌سازی بدلیل فرض بدون عیب بودن ماده وجود ندارد.

شکل 7 نمودار تغییرات انرژی جذب شده توسط نمونه شماره 1 در طی فرایند آزمون ضربه تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد.

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نشان‌دهنده نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جذب شده برحسب زمان در طی فرایند آزمون ضربه تجربی و شبیه‌سازی شده برای نمونه شماره 2 که دارای 13 لایه بازالت-اپوکسی است، می‌باشد.

7 لایه بازالت-اپوکسی است که در بین 3 لایه کولار-اپوکسی از هر طرف قرار گرفته است [KB-HS]. نمودارهای نیرو-زمان و انرژی جذب شده نمونه‌های کامپوزیتی هیبریدی ساندویچی برحسب زمان در شکل‌های 14 تا 17 نشان داده شده است.

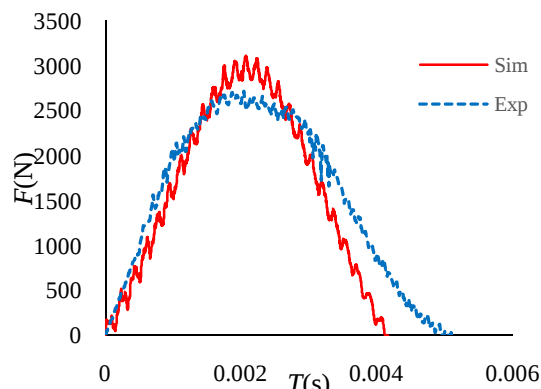


Fig. 14 Load-Time curve for sample 4 (KB-HI)

شکل 14 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 4 (هیبرید یکی درمیان کولار در دوطرف)

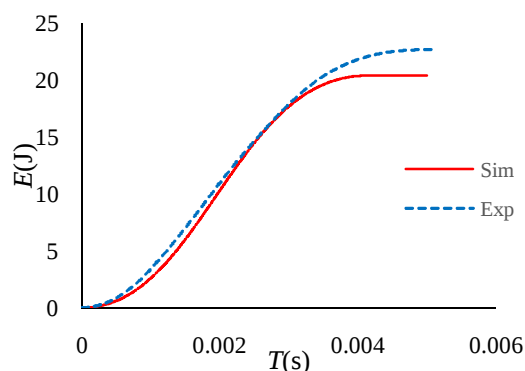


Fig. 15 Absorbed Energy-Time curve for sample 4 (KB-HI)

شکل 15 نمودار انرژی جذب شده-زمان نمونه شماره 4 (هیبرید یکی درمیان کولار در دوطرف)

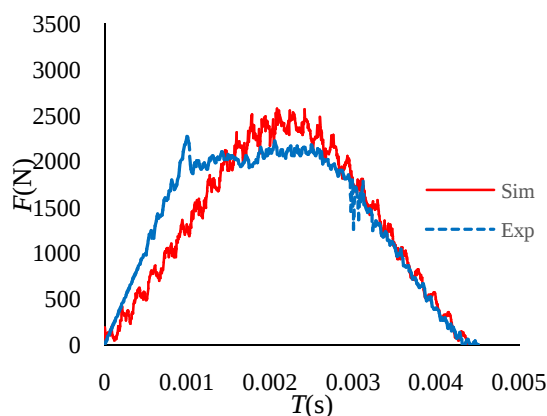


Fig. 16 Load-Time curve for sample 5 (BK-HS)

شکل 16 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 5 (هیبرید ساندویچی کولار در وسط)

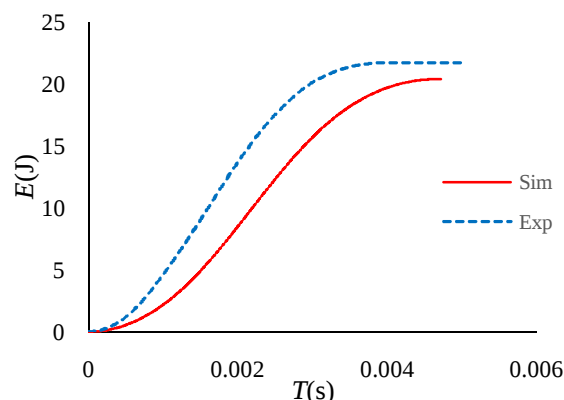


Fig. 11 Absorbed Energy-Time for sample 2 (B13)

شکل 11 نمودار انرژی جذب شده-زمان نمونه شماره 2 (13 لایه بازالت)

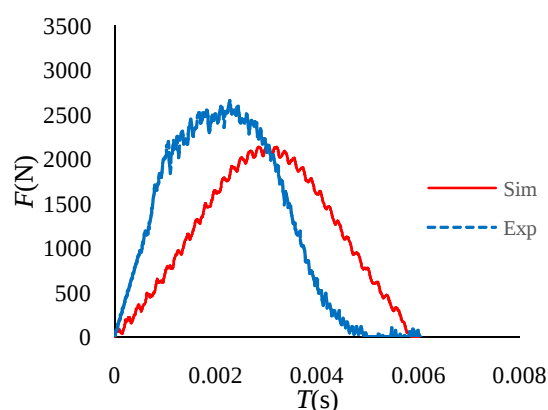


Fig. 12 Load-Time curve for sample 3 (BK-HI)

شکل 12 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 3 (هیبرید یکی درمیان بازالت در دوطرف)

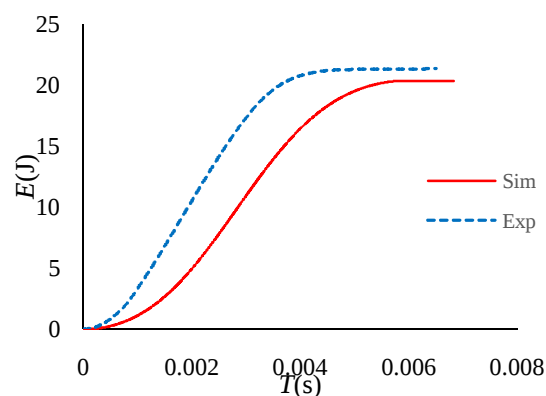


Fig. 13 Absorbed Energy-Time curve for sample 3 (BK-HI)

شکل 13 نمودار انرژی جذب شده-زمان نمونه شماره 3 (هیبریدی یکی درمیان بازالت در دوطرف)

نمونه‌های کامپوزیتی شماره 5 و 6 مورد بحث در این تحقیق هیبرید شده بصورت ساندویچی هستند. نمونه شماره 5 دارای 7 لایه کولار-اپوکسی است که در بین 3 لایه بازالت-اپوکسی از هر طرف قرار گرفته است [BK-HS]. همچنین نمونه شماره 6 دارای

ضربه و شبیه‌سازی نرم‌افزاری ضربه را نشان داده و در هر مورد مقدار اختلاف نتایج تجربی و عددی را ارائه می‌کند. همان‌طور که از جدول 4 مشخص است، بیشترین مقدار نیروی بیشینه ضربه در آزمون تجربی مربوط به نمونه شماره 2 که فقط از لایه‌های بازالت تشکیل شده است، می‌باشد. این قضیه با نتایج مرجع [13] برای نمونه B13 مطابقت دارد. الیاف کولار دارای مقاومت در برابر ضربه بسیار خوبی هستند. ترکیب این الیاف با الیاف بازالت که نرمی قابل توجهی داشته و با گسترش دادن مساحت منطقه آسیب می‌توانند مقاومت کلی سازه را افزایش دهند، سبب افزایش مقدار بیشینه نیروی ضربه و همچنین مقدار انرژی جذب شده می‌شود. در نتیجه نمونه‌های دارای بازالت نیروی بیشینه ضربه و انرژی جذب شده بیشتری خواهند داشت. جدول 5 نیز مقادیر انرژی جذب شده هر نمونه را در طی فرایندهای آزمون تجربی و شبیه‌سازی شده ارائه کرده و برای هر نمونه میزان اختلاف نتایج تجربی و عددی را بیان می‌کند. همان‌طور که از جدول 5 مشخص است بیشترین مقدار انرژی جذب شده را نمونه‌های هیبریدی یکی در میان دارند (شکل 20).

جدول 4 مقادیر بیشینه نیروی ضربه

Table 4 Amounts of Impact Peak Force

نمونه	تجربی (N)	شبیه‌سازی (N)	مقدار خطا (%)
1	2122	1972	7
2	3280	2685	18
3	2612	2156	17
4	2686	3107	12
5	2263	2750	11
6	2285	2645	13

جدول 5 مقادیر انرژی جذب شده

Table 5 Amounts of Absorbed Energy

نمونه	تجربی (J)	شبیه‌سازی (J)	مقدار خطا (%)
1	18/32	17/94	2
2	21/62	20/3	6
3	22/81	20/34	10
4	22/87	20/4	10
5	18/62	18/11	3
6	20/46	18/32	10

در جداول 4 و 5 مقادیر نیروی بیشینه و انرژی جذب شده نمونه‌های مختلف در حین فرایند ضربه تجربی و شبیه‌سازی

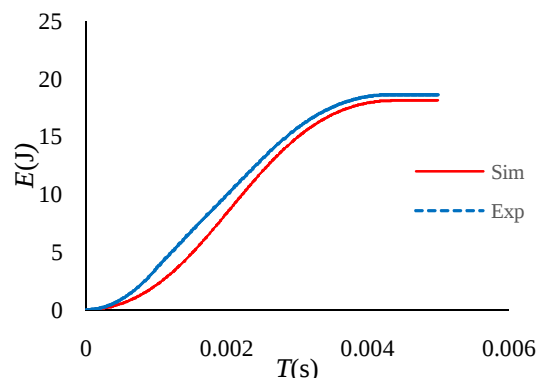


Fig. 17 Absorbed Energy-Time curve for sample 5 (BK-HS)

شکل 17 نمودار انرژی جذب شده-زمان نمونه شماره 5 (هیبرید ساندویچی کولار در وسط)

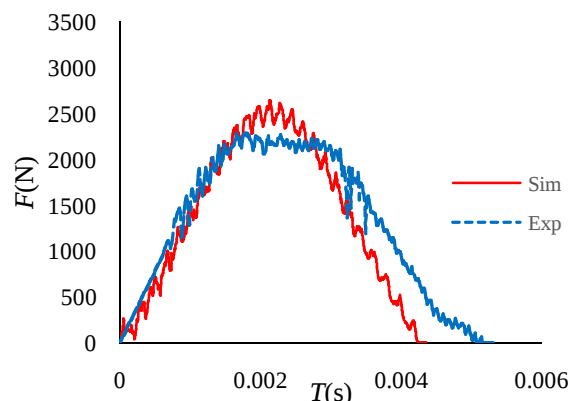


Fig. 18 Load-Time curve for sample 6 (KB-HS)

شکل 18 نمودار نیرو-زمان نمونه شماره 6 (هیبرید ساندویچی بازالت در وسط)

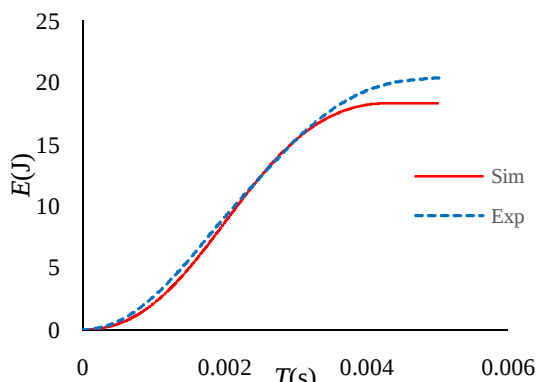


Fig. 19 Absorbed Energy-Time curve for sample 6 (KB-HS)

شکل 19 نمودار انرژی جذب شده-زمان نمونه شماره 6 (هیبرید ساندویچی بازالت در وسط)

افت‌های ناگهانی در مقادیر نیرو در نمودارهای تجربی می‌تواند ناشی از ایجاد تورق در حین فرایند ضربه و یا وجود عیبهایی از زمان ساخت نمونه باشد.

4-5- بحث و مقایسه نتایج تجربی و عددی

جدول 4 مقادیر نیروی بیشینه ضربه حاصل از آزمون تجربی

و هم باعث افزایش مقدار انرژی جذب شده شود. این قضیه از مقایسه چینش لایه‌هایی که در آن بازالت وجود دارد نسبت به نمونه دارای فقط الیاف کولار کاملاً مشخص است.

- هیبرید کردن الیاف کولار با الیاف بازالت سبب افزایش مقدار انرژی جذب شده می‌شود.

- نمونه‌های هیبریدی شده به صورت یکی در میان دارای انرژی جذب شده بیشتری نسبت به نمونه‌های هیبرید شده بصورت ساندویچی هستند. همچنین این نمونه‌ها دارای بیشترین میزان جذب انرژی در بین دیگر نمونه‌ها هستند.

- در زمینه مقدار انرژی جذب شده، نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی تطابق خوبی با هم دارند. از هر دو فرایند نتیجه گرفته می‌شود که نمونه‌های هیبریدی یکی در میان دارای بهترین رفتار و پس از آن‌ها به ترتیب نمونه‌های فقط بازالت، ساندویچی و در انتها فقط کولار قرار می‌گیرند.

- نمونه کامپوزیتی فقط بازالت دارای میزان انرژی جذب شده بیشتری نسبت به نمونه‌های هیبریدی ساندویچی است که این موضوع می‌تواند به دلیل خاصیت الیاف بازالت باشد. میزان جذب انرژی این نمونه از نمونه‌های هیبریدی یکی در میان کمتر است.

- نمونه‌های کامپوزیتی هیبرید شده با بازالت دارای خواص ضربه بهتری نسبت به حالت فقط کولار دارند. اما نمونه هیبریدی که کولار در دو طرف خود دارد و در واقع ضربه‌زننده ابتدا به لایه دارای کولار برخورد می‌کند، دارای میزان جذب انرژی بیشتری می‌باشد.

7- فهرست علائم

F	نیروی برخورد (N)
m	جرم ضربه‌زننده (Kg)
a	شتاب ضربه‌زننده (ms^{-2})
V	سرعت ضربه‌زننده (ms^{-1})
V_0	سرعت اولیه ضربه‌زننده هنگام برخورد (ms^{-1})
E_a	انرژی جذب شده حین برخورد (J)
E_1	مدول الاستیسیته در جهت 1 (GPa)
E_2	مدول الاستیسیته در جهت 2 (GPa)
V_f	درصد حجمی الیاف در نمونه (%)
G	مدول برشی (GPa)

علائم یونانی

δ	جابجایی یا تغییر شکل نمونه (m)
ρ	چگالی لایه (Kg m^{-3})

شده ارائه شده است. این مقادیر جهت مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی و همچنین مقایسه این مؤلفه‌ها برای نمونه‌های هیبرید شده نسبت به نمونه مرجع که نمونه فقط کولار است، می‌باشد.

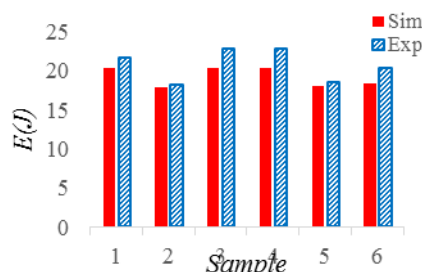


Fig.20 Comparison between amounts of Absorbed Energy

شکل 20 مقایسه بین مقادیر انرژی جذب شده

6- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار ضربه کم سرعت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری هیبریدی کولار-بازالت و همچنین تأثیر هیبریدسازی الیاف بازالت با الیاف کولار پرداخته شده است.

برای این منظور نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف پارچه‌ای کولار و بازالت در بستر اپوکسی و با روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. این نمونه‌ها در 6 نوع چینش مختلف شامل فقط کولار، فقط بازالت، هیبرید شده یکی در میان و هیبرید شده ساندویچی جهت مقایسه نوع چینش الیاف و انتخاب بهترین نوع آن از نظر پاسخ ضربه، آماده شدند. آزمون ضربه توسط دستگاه آزمون ضربه وزنه افتان با مقدار انرژی ضربه 40 ژول به انجام رسید. همچنین شبیه‌سازی آزمون ضربه در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد.

بطور کلی می‌توان نتایج حاصل از پژوهش حاضر را به صورت خلاصه در موارد زیر بیان کرد:

- بطور کلی نتایج آزمون ضربه کم سرعت بیانگر بهبود خواص ضربه در اثر هیبرید کردن الیاف در نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد.

- مقدار بیشینه نیروی ضربه برای نمونه کامپوزیتی که فقط دارای 13 لایه بازالت می‌باشد، بیشتر از بقیه است. این قضیه به دلیل خاصیت خود الیاف بازالت است که با شکل‌پذیری بالای خود باعث گسترش منطقه آسیب و در نتیجه افزایش نیروی ضربه می‌شوند.

- همین خاصیت الیاف بازالت باعث می‌شود که اضافه کردن آن‌ها به الیاف کولار هم باعث افزایش مقدار نیروی بیشینه ضربه

v_{12} ضریب پواسن

8- مراجع

- behavior of fiber-reinforced plans against Drop-weight low velocity impact, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, 2010. (in Persian فارسی)
- [12] S. Abrate, *Impact on composite structures*, Cambridge University Press, England, 1998.
- [13] M. Hosur, M. Abdullah, M. Jeelani, Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites, *Journal of composite structures*, Vol. 67, No. 3, pp. 253-262, 2005.
- [14] R. Hosseinzadeh, M. Shokrieh, L. Lessard, Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts, *Journal of composite science and technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 61-68, 2006.
- [15] F. Sarasini, J. Tirillo, L. Ferrante, M. Valente, T. Valente, L. Lampani, P. Gaudenzi, S. Cioffi, S. Iannace, L. Sorrentino, Drop-weight impact behavior of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composite Part B: Engineering*, Vol. 59, pp. 204-220, 2014.
- [16] A. Bandaru, S. Patel, Y. Sachan, R. Alagirusami, N. Bhatnagar, S. Ahmad, Low velocity impact response of 3D angle-interlock Kevlar/Basalt reinforced Polypropylene composites, *Journal of Material and Design*, Vol. 105, pp. 323-332, 2016.
- [17] L. Ferrante, F. Sarasini, J. Tirillo, L. Lampani, T. Valente, P. Gaudenzi, Low velocity impact response of Basalt-Aluminium fiber metal laminates, *Journal of Material and Design*, Vol. 98, pp. 98-107, 2016.
- [18] I.D.G. Ary Subagia, Y. Kim, L.D. Tijing, C.S. Kim, H.K. Shon, Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composite Part B*, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [19] M. Dehkordi, H. Nosraty, M. Shokrieh, G. Minak, D. Ghelli, Low velocity impact properties of intraply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics, *Material and Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3835-3844, 2010.
- [20] M. S. Santhosh, R. Sasikumar, L. Natrayan, M. S. Kumar, V. Elango, M. Vanmathi, Investigation of mechanical and electrical properties of Kevlar/E-glass and Basalt/E-glass reinforced hybrid composites, *International journal of mechanical and production engineering research and development*, Vol. 8, pp. 591-598, 2018.
- [21] I. Taraghi, A. Fereidoon, F. Taheri-Behrooz, Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures, *Material and Design*, No. 53, pp. 152-158, 2014.
- [1] K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor and Francis Group, pp. 2-53, 2006.
- [2] B. İÇTEN, *Damage in Laminated composite plates subjected to low velocity impact*, PhD Thesis, Dokuz Eylül University, Turkey, 2006.
- [3] P. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites; Material, Manufacturing and Design*, Third Edition, Department of Mechanical Engineering University of Michigan, pp. 20-126, 2007.
- [4] S.N. Hosseini Abbandanak, M. Abdollahi Azghan, R. Eslami-Farsani, Investigation the interface and charpy impact behavior of fiber metal laminates containing graphene nanoplatelets and glass/Kevlar hybrid fibers, *Iranian journal of manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 10-19, 2019. (in Persian فارسی)
- [5] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza, A review on Basalt Fibre and its Composites, *Composite Part B*, Vol. 74, pp. 74-94, 2015.
- [6] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnejad-Khaljiri, An experimental study on mechanical properties of Epoxy-Basalt-Carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings, *Journal of Science and Technology of composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016. (in Persian فارسی)
- [7] V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.J. Park, D. Hui, a short review on Basalt fiber reinforced polymer composites, *Composite Part B: Engineering*, Vol. 73, pp. 166-180, 2015.
- [8] H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, enhanced mechanical properties of unidirectional basalt fiber/epoxy composites using silane-modified Na⁺-montmorillonite nanoclay, *Polymer testing*, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.
- [9] F. Bahari-Sambaran, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnejad-Khaljiri, Experimental investigation of flexural behavior of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites containing Nano clay particles, *Iranian journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-54, 2018. (in Persian فارسی)
- [10] M. Safarabadi, P. Ashkani, S.M. Ganjani, Finite element simulation of high velocity impact on polymer composite plates, *Journal of Science and Technology of composites*, Vol. 5, No. 2, pp. 157-168, 2018. (in Persian فارسی)
- [11] A. Rassaf, *Examining some effective factors on*