



اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت ساختار پانل ساندویچی تحت بارگذاری شبه استاتیک و ضربه سرعت پایین

مهدی رضوانی توکل¹، مهدی یارمحمد توسکی^{2*}، محسن جباری³، مهرداد جوادی²

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* تهران، صندوق پستی 11365-4435، m.yarmohammad.tooski@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله:

در دهه‌های اخیر، استفاده از نانوذرات در ساختارهای کامپوزیتی و پانل‌های ساندویچ کامپوزیتی به دلیل بدست آمدن خواص مکانیکی و فیزیکی گسترش پیدا کرده است. در مطالعه حاضر، اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت یک ساختار پانل ساندویچی با مدل هندسه‌ای رگه‌ای جدید تحت بارگذاری شبه استاتیک و ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار گرفته است. ساختارهای رگه‌ای از لایه‌های شیشه / اپوکسی با درصد‌های مختلف 0.0، 0.1، 0.3 و 0.5 درصد نانوذرات گرافن ساخته شده‌اند. بعلاوه، در مرکز ساختار رگه ساندویچی، از فوم پلی‌اورتان استفاده شده است. جهت بررسی آسیب در درون ساختار رگه، تصاویر نمای برش خورده آسیب تهیه و نتایج آن گزارش شده است. علاوه بر این، از آنالیز FE-SEM به منظور بررسی ریزساختار و ارزیابی توزیع نانوذرات گرافن در ساختار پلیمری استفاده شد. ویژگی‌های قابلیت ضربه‌پذیری در نمونه‌های آزمایش شده مورد بحث قرار گرفت. نتیجه گرفته شد که این نوع از ساختار رگه‌ای ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان، می‌تواند انتشار آسیب در بارگذاری شبه استاتیک و آزمون سقوط وزنه را محدود کند و ساختار ساندویچی را سالم نگه دارد. از طرفی، مشاهده شده است که در اثر ضربه چندین حالت شکست مختلف از جمله شکست لیاف، ترک ماتریس، لایه لایه شدگی، جدا شدگی بین لیاف و فوم، شکست فوم و له شدن فوم رخ داده است. بعد از آنالیز FE-SEM مشاهده شد که ساختار ساندویچی با 0.3 درصد نانوذرات، دارای تراکم بیشتری نسبت به سایر ساختارهای آزمایش شده می‌باشد.

دریافت: 1401/08/06

پذیرش: 1401/12/13

کلیدواژگان

ساختار کامپوزیتی، پانل ساندویچی، ضربه سرعت پایین، آزمون شبه استاتیک، جذب انرژی.

The effect of graphene nanoparticles on the strength of sandwich panel structure under quasi-static loading and low-velocity impact

Mahdi Rezvani Tavakol¹, Mahdi Yarmohammad Tooski^{1*}, Mohsen Jabbari¹, Mehrdad Javadi¹

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m.yarmohammad.tooski@gmail.com

Keywords

Composite structure, Sandwich panel, Low-velocity impact, Quasi-static test, Energy absorption.

Abstract

In recent decades, the use of nanoparticles in composite structures and composite sandwich panels has expanded due to the achievement of mechanical and physical properties. In the present study, the effect of graphene nanoparticles on the strength of a sandwich panel structure with a new vein geometry model under quasi-static loading and low-velocity impact has been investigated. The vein structures are made of glass/epoxy layers with different percentages of 0.0, 0.1, 0.3 and 0.5% of graphene nanoparticles. In addition, polyurethane foam was used in the center of the sandwich vein structure. In order to check the damage inside the vein structure, cut-out images of the damage have been prepared and the results have been reported. In addition, FE-SEM analysis was used to investigate the microstructure and evaluate the distribution of graphene nanoparticles in the polymer structure. The characteristics of crashworthiness in the tested samples were discussed. It was concluded that this type of sandwich vein structure with polyurethane foam core can limit the propagation of the damage in quasi-static loading and drop weight test and keep the sandwich structure healthy. On the other hand, as a result of the impact, several different failure modes have occurred, including fiber failure, matrix cracking, delamination, Foam detachment, foam failure, and foam crushing. After the FE-SEM analysis, it was observed that the sandwich structure with 0.3% of nanoparticles has a higher density than the other tested structures.

1- مقدمه

پانل‌های ساندویچی کامپوزیت متشکل از سطوح پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) و هسته فوم، به دلیل نسبت سختی به وزن بالا در سازه‌های سبک از جمله وسایل حمل و نقل، بال هواپیما و پانل‌های بدنه مورد استفاده قرار می‌گیرند [1-3]. چنین ساختار خاص باعث مقاومت خمشی عالی و ظرفیت جذب انرژی پانل ساندویچی می‌شود [4]. بررسی تجربی می‌تواند دید مستقیمی از پدیده تأثیر و اشکال آسیب را فراهم کند که در این صورت برای بدست آوردن منابع اساسی در آنالیز بیشتر، مناسب و مؤثر است. سازه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی به دلیل تماس عرضی و ضربه با اشیا خارجی، مستعد آسیب و شکست هستند. در یک رویداد ضربه‌ای، ساختارهای ساندویچی می‌توانند حالت‌های متعددی از شکست را از خود نشان بدهند. در این نوع از ساختارها، آزمایش‌های بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند شکستگی الیاف، ترک خوردگی ماتریس، خرد شدن و لایه لایه شدن می‌شوند. اگر آسیب ناشی از ضربه و بارگذاری شدید باشد، ممکن است منجر به شکست ناگهانی¹ ساختار کامپوزیتی شود. به طور کلی، متداول‌ترین مکانیزم‌های آسیب پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف تحت ضربه سرعت پایین، ترک خوردگی ماتریس و لایه لایه شدگی بین دولا لایه مجاور بوده و در فرآیند تکامل آسیب نیز به یکدیگر وابسته هستند [5]. رضائی گلشن و همکاران [6] به بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر پاسخ لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه محوری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش قطر داخلی، شیب نمودار تغییر نمی‌کند؛ به عبارت دیگر با افزایش قطر، استحکام نمونه افزایش و علاوه بر آن مقاومت نمونه در برابر ضربه هم افزایش پیدا می‌کند. شدت آسیب ناشی از ضربه به عواملی مانند شکل ضربه زننده یا نفوذ کننده، سرعت ضربه، نوع مواد سازه مورد استفاده، نوع ساختار کامپوزیت و نانوکامپوزیت و غیره بستگی دارد [7]. بوی و شنگ کینگ [8] حالت‌های آسیب و شکست پانل ساندویچ کامپوزیتی را تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثر ضخامت صفحه، سهم بسیار مهمی در حالت شکست و بار نهایی متناظر با آن را دارد. اکثر مطالعات [9-13]، مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش ضربه با استفاده از یک آزمون سقوط وزنه و نتایج بدست آمده از بارگذاری شبه استاتیکی را گزارش می‌دهند، که در برخی موارد نتایج دارای تناقض در میزان استحکام سازه در برابر این دو آزمایش می‌باشند. ژانگ و همکارانش [14] به بررسی تغییر شکل و شکست تیرهای ساندویچی مرکب هیبریدی با هسته فوم فلزی تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تیرهای ساندویچی مرکب هیبریدی، دارای چهار حالت شکست فعال شامل شکستگی صفحه لایه، فرورفتگی، برش هسته و برش کششی هسته می‌باشند. امامیه و همکاران [15] مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی تقویت شده با ذرات سیلیکا و نانو رس را مورد بررسی قرار دادند. فرآیند ساخت آن‌ها بصورت لایه‌گذاری دستی می‌باشد. آن‌ها دریافته‌اند که میزان مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی بعد از نانوذرات، تغییر کرده و بهبود یافته است. اسپرانک و همکارانش [16] مقایسه چندلایه‌های کربن / اپوکسی و شیشه / پلی‌آمید را با استفاده از آزمون ضربه سرعت پایین و بارگذاری شبه استاتیکی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کربن / اپوکسی در مقایسه با آزمون شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین به طور قابل توجهی متفاوت عمل می‌کند. کاراکوز و همکارانش [17] اثر دمای بالا بر رفتار مواد مرکب پیشرفته تحت بارگذاری

شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در موارد نفوذ شبه استاتیکی و آزمایش ضربه سرعت پایین، مقادیر انرژی جذب شده و استحکام برشی سنبه، رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. نانوذرات گرافن² (GNS) خواص مکانیکی و فیزیکی قابل توجهی دارند و آن‌ها به طور بالقوه مواد ایده آلی برای تقویت پلیمرها هستند. اضافه کردن نانوذرات گرافن به ساختارهای کامپوزیتی، یک روش مناسب برای بهبود بیشتر خواص مکانیکی مانند خواص برش کششی، خمشی، فشاری، سایش و بین لایه‌ای است. در این راستا، کارهای زیادی برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت ماتریس پلیمری تقویت شده با نانوذرات گرافن انجام شده است [18-21]. قادری و همکارانش [19] به بررسی نفوذ شبه استاتیکی بر روی پانل ساندویچی ساخته شده از الیاف بازالت با لحاظ نانوذرات گرافن پرداختند. آن‌ها در کار خود از نانوذرات گرافن با درصدهای مختلف 0، 0.3، 0.7 و 1.1 درصد استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه حاوی 0.7 درصد دارای بهترین جذب انرژی و مقاومت در برابر نفوذ شبه استاتیکی بوده است. ژانگ و همکارانش [22] نشان دادند که با اضافه کردن نانومواد مبتنی بر گرافن به کامپوزیت‌های پلیمری، خواص مکانیکی و حرارتی آن‌ها بهبود می‌یابد. بوراک و همکارانش [23] اثر ضربه سرعت پایین و پاسخ خم شدن اتصالات دو بند تقویت شده با نانوذرات گرافن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کار خود میزان درصد نانوذرات گرافن را 1٪، 2٪ و 3٪ در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت ضربه اتصالات تحت ضربه سرعت پایین با استفاده از تقویت گرافن افزایش پیدا کرده است.

پلی‌اورتان³ (PU) متشکل از واحدهای آلی می‌باشد که توسط یورتان به هم متصل شده‌اند و برای کف کردن درجا مناسب می‌باشد [24]. PU از واکنش بین اجزای پلی‌ال⁴ (PO) و ایزوسیانات⁵ (ISO) تولید می‌شود که با توجه به ترکیبات اولیه خود، می‌تواند انواع فوم‌های مختلفی (مانند فوم نرم، سفت، الاستومری و صلب) را تولید کنند. فوم پلی‌اورتان به دلیل ویژگی قابل توجه از جمله وزن سبک، سازگار با محیط‌زیست، چگالی کم، جذب ضربه و خاصیت ارتجاعی فوق‌العاده، یکی از جامع‌ترین گروه‌های مورد تحقیق و بهره‌برداری از خانواده‌های پلیمری هستند. مطالعات زیادی بر روی بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه فوم پلی‌اورتان انجام شده است [25-28]. لوگاناتان و همکارانش [29] به بررسی تأثیر ضخامت و چگالی هسته بر رفتار ضربه سرعت پایین پانل‌های ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان پرداختند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که اثر چگالی هسته نقش مهمی در جذب انرژی ویژه و ضریب انرژی ضربه دارد. در کار آن‌ها با افزایش چگالی هسته فوم پلی‌اورتان، جذب انرژی بالاتر مشابه با تغییر ضخامت هسته مشاهده شد.

در مورد ساختار پانل ساندویچی کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی، به علت پیچیدگی آن‌ها در پاسخ به ضربه؛ وجود آسیب و تکامل آن در ساختار جدید با وجود نانوذرات گرافن در لایه‌های آن هنوز تحقیقات کاملی انجام نشده است. در مطالعه حاضر، اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت یک ساختار رگه‌ای جدید با هسته فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. ساختار رگه‌ای ساندویچی، متشکل از پوسته‌های لایه‌ای شده شیشه / اپوکسی کامپوزیت است. در زمان ساخت ساختارهای رگه‌ای ساندویچی، درصدهای وزنی مختلف نانوذرات گرافن 0.0، 0.1، 0.3 و 0.5 درصد برای آن‌ها در نظر گرفته شد. در اثر بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین، نمودارهای نیرو - جابجایی و انرژی - زمان

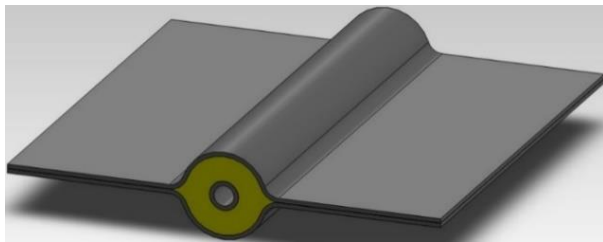
⁴ Polyol⁵ Isocyanate¹ Catastrophic failure² Graphene Nanoparticles³ Polyurethane

جدول 2 خواص مکانیکی فوم شکل پذیر.

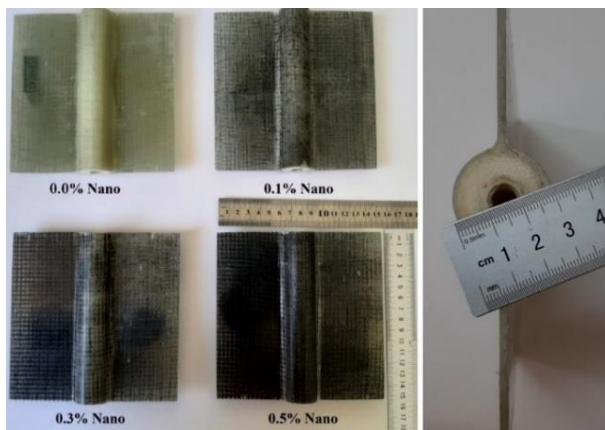
Table 2 The crushable foam mechanical properties.

پارمترها	مقادیر (واحد)
چگالی: ρ	50 (kg/m ³)
مقاومت فشاری: σ_c	0.37 (MPa) [30]
مدول فشاری: E_c	15.9 (MPa) [30]
مقاومت کششی: σ_T	0.37 (MPa) [30]
مدول کششی: E_T	18.7 (MPa) [30]
مقاومت برشی: τ_c	0.22 (MPa) [30]
مدول برشی: G_c	5.3 (MPa) [30]

نانوذرات گرافن با درصدهای وزنی 0.1، 0.3 و 0.5 درصد همراه با رزین اپوکسی میکس گردید و بعد از آن با هاردنر ترکیب و در درون الیاف مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت فوم پلی اورتان، مقدار 10 gr از ماده ایزوسیانات و 10 gr از ماده پلی ال با هم ترکیب و در هسته نمونه های ساندویچی تزریق شد. هر لایه از پوسته کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی ساخته شده دارای ضخامت اسمی 0.4 mm و پوسته توخالی استوانه ای دارای ضخامت 1.5 mm می باشد. ابعاد کلی نمونه های ساخته شده 150 × 150 mm² است. شکل 1، مدل ساده شده ساختار رگه ای که به صورت شماتیک در نرم افزار سالیید ورکس³ طراحی شده است، و مدل ساخته شده کامپوزیتی را نشان می دهد.



الف-ا



ب-ب

Fig. 1 a) A simplified model of a longitudinal vein with a sandwich structure and b) Samples made of sandwich vein structures with different percentages of graphene nanoparticles

شکل 1 الف) مدل ساده شده رگه طولی با ساختار ساندویچی، ب) نمونه های ساخته شده از ساختارهای رگه ای ساندویچی با درصد های مختلف نانوذرات گرافن.

مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه، ویژگی های قابلیت ضربه پذیری شامل قابلیت جذب انرژی و راندمان نیرو له شدگی در نظر گرفته شد. در آخر، جهت ارزیابی توزیع نانوذرات گرافن در ساختار رگه ای، از آنالیز FE-SEM استفاده شد.

2- کار تجربی

1-2- مواد و روش

در مطالعه حاضر، یک ساختار رگه ای¹ کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی جدید معرفی شده است. این نوع از هندسه، جهت بررسی مقاومت آن در برابر نیروهای ناشی از ضربه جسم خارجی در نظر گرفته شده است. برای ساخت لایه های کامپوزیتی، از الیاف شیشه تک جهته 300 gr/cm² و رزین اپوکسی (EPR1080) با ویسکوزیته 700 cp، همراه با هاردنر (EPR1080) استفاده گردید. الیاف با ضخامت اسمی 18 μm دارای خواص مکانیکی با چگالی 2.54 gr/cm³ و مقاومت کششی 3400 MPa است. نانوذرات گرافن (خریداری شده از شرکت ARMINA، واقع در ایران) با مشخصات نشان داده شده در جدول 1، با درصد های وزنی مختلف در ساخت نمونه ها استفاده شد. علاوه، از فوم سلول بسته پلی اورتان، با ترکیب دو ماده پلی ال و ایزوسیانات، با چگالی 50 kg/m³ استفاده شد. جدول 2 نشان دهنده خواص مکانیکی فوم شکل پذیر است.

2-2- روش ساخت

ساختارهای در نظر گرفته شده از پوسته های تک جهته شیشه / اپوکسی با درصد های وزنی مشخص نانوذرات گرافن تشکیل شده اند و به یک هسته فوم پلی اورتان متصل می باشند. برای ساخت نمونه ها، چیدمان الیاف خام پیوسته تک جهته شیشه به صورت [0/90/0/90] می باشد و برای فشرده سازی آن ها از روش تزریق خلأ² استفاده شد.

جدول 1 ویژگی های نانوذرات گرافن GP7.

Table 1 Characteristics of graphene nanoparticles GP7.

پارمترها (واحد)	1034343-98-0
فرمول مولکولی	C
وزن مولکولی: (g/mol)	12.01
شکل	پودر
رنگ	سیاه
مورفولوژی	پوسته پوسته شدن
لایه ها	5 - 10
ضخامت متوسط: (mm)	15
ابعاد جانبی: (μm)	5
مساحت سطحی: (g/m ²)	50 - 80
خلوص: (%)	95
محتوای اکسیژن: (%)	1 <
نسبت نقص: (ID/IG)	0.64

³ SolidWorks

¹ Vein

² Vacuum infusion

3-2- بارگذاری شبه استاتیکی

باشد را اندازه‌گیری می‌کند. با این وجود، جذب انرژی ویژه⁹ (SEA) بیانگر کارایی و قابلیت جذب انرژی در طی تغییر شکل ساختار است [32]. خصوصیات قابلیت ضربه‌پذیری از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$EA = \int_{S_i}^{S_f} F(x) dx \quad (1)$$

در اینجا، EA جذب انرژی کل (مساحت زیر منحنی نیرو - جابجایی بین فاصله شکست) است. $F(x)$ با انتگرال‌گیری از نیروی لهیدگی در جهت محوری بدست می‌آید. S_f و S_i به ترتیب مقادیر جابجایی اولیه و نهایی در فشرده‌سازی هستند. از طرفی، نیروی میانگین P_m با انتگرال‌گیری از هر مقدار نیروی وابسته بر طول نمونه (جابجایی) له شده، در ناحیه انتشار له شدگی بصورت زیر می‌باشد:

$$P_m = \frac{\int_{S_i}^{S_f} F(x) dx}{S_f} = \frac{EA}{S_f} \quad (2)$$

همچنین، راندمان نیرو له شدگی (CFE) نسبت میانگین نیروی میانگین P_m به نیروی پیک اولیه است. CFE یک پارامتر مهم برای ارزیابی یکنواختی نیروی له شدگی در آزمون شبه استاتیکی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$CFE = \frac{P_m}{P_{peak}} \quad (3)$$

بالتر بودن CFE یک مشخصه، جذب انرژی ایده آل را نشان می‌دهد و هر چه بالاتر باشد، قابلیت ضربه‌پذیری ساختارها نیز بهتر است [33، 34]. یکی از مهم‌ترین پارامترها برای ارزیابی ظرفیت جذب انرژی، جذب انرژی ویژه است. SEA، مقدار جذب کل انرژی EA بر وزن نمونه W_m است و به صورت فرمول زیر نشان داده می‌شود:

$$SEA = \frac{EA}{W_m} \quad (4)$$

SEA یک عامل مهم برای مقایسه جذب انرژی ساختارهای کامپوزیتی ساخته شده است، که دارای ویژگی‌های هندسی، پیکربندی و یا مواد پایه‌ای مختلف باشد. هر چه ارزش آن بیشتر باشد، ساختار از نظر جذب انرژی به صورت انبوه کارآمدتر است [31، 32]. این پارامتر به عنوان سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی هم تعریف می‌شود.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون شبه استاتیکی

پاسخ نیرو - جابجایی: نمودارهای نیرو - جابجایی هر یک از ساختارهای کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی تحت بارگذاری شبه استاتیکی در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به شکل 3، نمودار نیرو - جابجایی ساختار ساندویچی 0.0 درصد نانو به 5 بخش و سایر ساختارها با درصدهای نانوذررات گرافن، به 4 بخش تقسیم شده‌اند. با توجه به شکل، بخش اول نمودار AB بصورت خطی است که نشان‌دهنده رفتار الاستیک می‌باشد. این ناحیه نشان داده است که هدف

آزمون شبه استاتیکی بر روی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال¹ انجام شده است (شکل 2-الف). این دستگاه، دارای ظرفیت بار 50 kN و سرعت آزمون 2 mm/min می‌باشد. برای انجام آزمون شبه استاتیکی، سرعت بارگذاری به مقدار 2 mm/min و به صورت ثابت در نظر گرفته شد. نمونه بین دو صفحه فیکسچر قرار گرفت و با 8 پیچ ثابت گردید که شرایط مرزی کاملاً گیردار در نمونه ایجاد شد. علاوه بر این، مدل هندسی نفوذ کننده² از نوع نیم کروی³ با قطر 16 mm می‌باشد. آزمون شبه استاتیکی تا نفوذ کننده به مرکز لوله وسط رگه ساندویچی و ایجاد کامل نمودار نیرو - جابجایی ادامه داشت. نیروی واکنش و جابجایی در اثر فشرده‌سازی نمونه توسط لودسل⁴ موجود در بالای محل اتصال نفوذ کننده ثبت گردید و تغییر شکل محوری با دقتی در حدود 0.0001 mm اندازه‌گیری شد.

4-2- ضربه سرعت پایین

آزمون ضربه سرعت پایین بر روی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی توسط دستگاه آزمون سقوط وزنه⁵ با ظرفیت انرژی 60 J، همانطور که در شکل 2-ب نشان داده شده است، انجام شد. برای ضربه، سطوح انرژی 20 J، 30 J و 45 J با ارتفاع سقوط⁶ مختلف (0.35، 0.45 و 0.52 متر) در نظر گرفته شد و ضربه زننده⁷ بدون سرعت اولیه رها گردید. همچنین، اثر ضربه در بخش پوسته بیرونی رگه و مرکز ساختار ساندویچی در نظر گرفته شد. توسط لودسل موجود در محل اتصال ضربه زننده، نیروهای ضربه‌ای ثبت گردید. این سیگنال نیرو به عنوان تابعی از سیگنال زمان برای بدست آوردن سرعت، به صورت عددی یکپارچه شد. ساختارهای ساندویچی بین دو صفحه فیکسچر با 4 گیره ثابت شد تا شرایط مرزی کاملاً گیردار در نمونه ایجاد شود. مدل هندسی ضربه زننده از نوع نیم کروی با قطر 16 mm و وزن 5.2 kg است.



Fig. 2 Experimental apparatus of sandwich vein structures under a) quasi-static loading and b) low-velocity impact.

شکل 2 دستگاه‌های آزمایشی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی تحت الف) بارگذاری شبه استاتیکی، ب) ضربه سرعت پایین.

5-2- قابلیت ضربه‌پذیری

دو پارامتر مهم برای ارزیابی میزان قابلیت ضربه‌پذیری⁸ سازه‌های تحت بارگذاری شبه استاتیکی، نیروی له شدگی پیک و جذب انرژی ویژه می‌باشند. نیروی پیک بسیار مورد توجه است [31]. به دلیل اینکه ساختار ساندویچی در اثر بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین تغییر شکل دائمی نداشته

⁶ Drop height

⁷ Impactor

⁸ Crashworthiness

⁹ Specific energy absorption

¹ Universal

² Indenter

³ Hemispherical

⁴ Load cell

⁵ Drop-weight testing

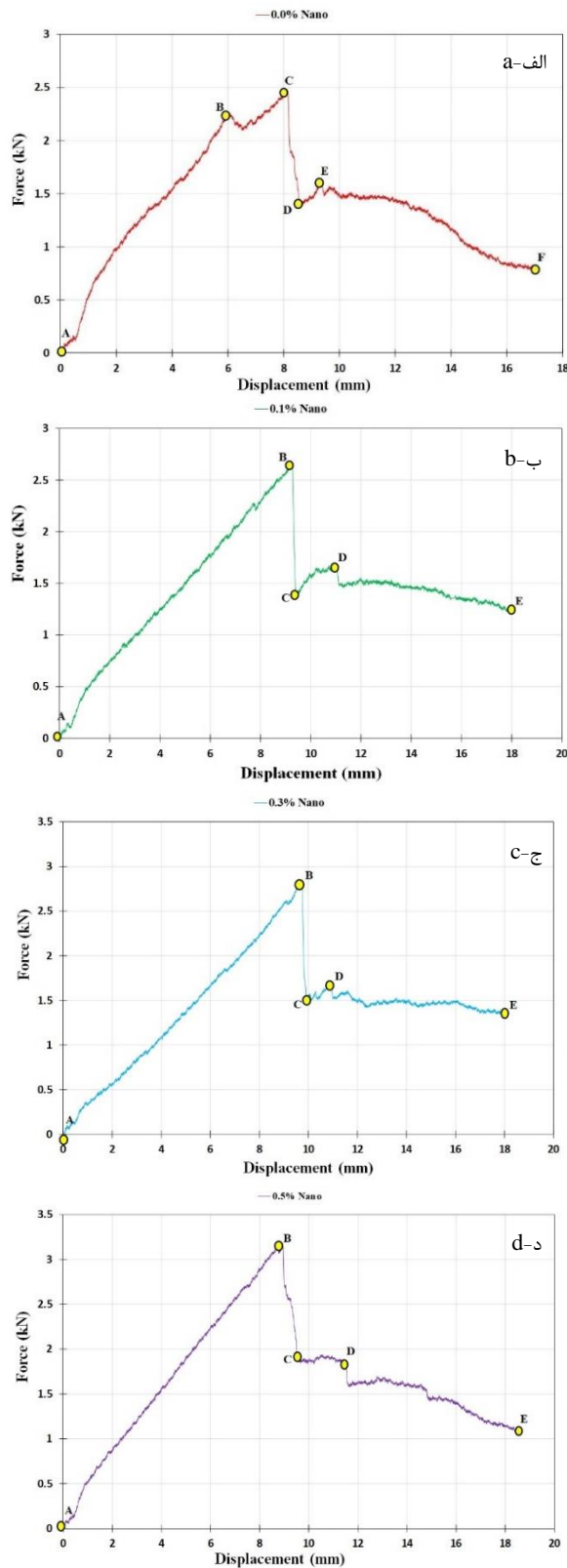


Fig. 3 Force – displacement diagrams of sandwich vein structures; a) 0.0 % graphene nanoparticles, b) 0.1 % graphene nanoparticles, c) 0.3 % graphene nanoparticles, d) 0.5 % graphene nanoparticles.

شکل 3 نمودار نیرو - جابجایی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی؛ الف) 0.0 درصد نانوذرات گرافن، ب) 0.1 درصد نانوذرات گرافن، ج) 0.3 درصد نانوذرات گرافن و د) 0.5 درصد نانوذرات گرافن.

کامپوزیتی دچار خیز الاستیک شده، اما گسیختگی یا خرابی در هدف ایجاد نشده است. در نقطه B، الیاف و رزین در سطح بالای رگه، به دلیل نیروی نفوذ کننده دچار آسیب شده، اما به صورت کامل تخریب نشده و مقاومت ساختار ساندویچی تا نقطه C ادامه داشته است. نقطه C نیروی پیک را نشان داده است که محل شروع خرابی در ساختار رگه است. این خرابی ممکن است باعث ایجاد ترک عمیق در ماتریس، لایه لایه شدگی و یا سوراخ شدگی در ساختار شود. در بخش CD، شاهد افت شدید نیرو هستیم که مقدار آن بستگی به میزان مقاومت کم فوم پلی‌اورتان دارد و این گسیختگی تا نقطه D ادامه پیدا کرده است. بخش DE نشان داده است که نفوذ کننده به قسمت لوله مرکزی ساختار ساندویچی رسیده و با وجود مقاومت کم آن دچار خیز الاستیکی ناچیزی شده است. بخش EF نشان‌دهنده کاهش نیروی نفوذ کننده است. در انتهای فرآیند، نمودار تقریباً حالت افقی به خود گرفته است و تنها نیروی مقاوم در برابر نفوذ، نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ کننده و ساختار ساندویچی است. سایر ساختارهای ساندویچی با درصدهای مختلف نانوذرات، تقریباً همین روال داشته‌اند. با توجه به نتایج حاصل از آزمون شبه استاتیک بر روی نمونه‌ها، وجود نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی این نوع از ساختارهای ساندویچی رگه‌ای در تغییرات نمودار نیرو - جابجایی نقش مهم و قابل ملاحظه‌ای داشته است. با توجه به نتایج بدست آمده، ساختارهای ساندویچی با 0.1، 0.3 و 0.5 درصد نانوذرات گرافن، نسبت به ساختار ساندویچی 0.0 درصد نانو به دلیل مقاومت خوبی که نانوذرات در نمونه‌ها از خود نشان داده‌اند، شاهد خیز الاستیک بصورت خطی تا نیروی پیک اولیه بودیم. براین اساس، نمونه‌های دارای درصد وزنی نانوذرات، در زمان وارد کردن نیروی شبه استاتیک کمتر دچار آسیب اولیه در الیاف و رزین شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده مقاومت خوب نانوذرات گرافن در این نوع از ساختارهای ساندویچی تحت نیروی شبه استاتیک است و نقش بسیار مهمی در عملکرد ساختارهای ساندویچی رگه‌ای دارد.

راندمان نیروی له شدگی: نیروی پیک اولیه P_{peak} یک پارامتر مهم برای ارزیابی آغاز روند شکست له شدگی در آزمون شبه استاتیک است. شکل 4-الف نیروی پیک اولیه ساختارها را با درصدهای مختلف نانوذرات گرافن نشان می‌دهد. حداکثر نیروی اولیه مربوط به ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو به مقدار 3.177 kN به عنوان حداکثر نیروی اولیه، و ساختار ساندویچی با 0.0 درصد نانو به مقدار 2.485 kN به عنوان حداقل نیروی اولیه بدست آمده است. مقدار نیروی پیک اولیه با اضافه کردن درصدهای مختلف نانوذرات گرافن به ساختار ساندویچی با 0.1، 0.3 و 0.5 درصد نانو به ترتیب به مقدار 1.071، 1.134 و 1.278 درصد افزایش داشته است. دلیل افزایش نیروی پیک نشان‌دهنده مقاومت خوب ساختارهای رگه‌ای در اثر افزایش نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی می‌باشد که هر چقدر میزان درصد نانوذرات بیشتر شده است مقاومت اولیه ساختار تا نیروی پیک در اثر نیروی اولیه افزایش پیدا کرده است. از طرفی، نیروی له شدگی میانگین، شاخص خوبی برای توانایی جذب انرژی کل سازه می‌باشد [35، 36]. همانطور که در شکل 4-ب نشان داده شده، بیشترین میانگین نیروی له شدگی مربوط به ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو است. این موضوع نشان می‌دهد که ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو تحت بارگذاری شبه استاتیک دارای بیشترین نیروی پیک اولیه و نیروی میانگین است. CFE یک شاخص مفید برای اندازه‌گیری عملکرد جاذب [37] و ارزیابی پایداری فرآیند له شدگی [36، 38، 39] است.

قابلیت جذب انرژی: EA مساحت سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی است که در شکل 5-الف نشان داده شده است. بر اساس نتایج گزارش شده، بیشترین ظرفیت جذب انرژی مربوط به ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو می‌باشد. از طرفی، ساختار ساندویچی با 0.3 درصد نانو دارای کمترین جذب انرژی ویژه نسبت به سایر ساختارهای ساندویچی است. هرچقدر میزان EA بیشتر باشد، ظرفیت جذب انرژی یک ساختار بهتر خواهد بود [40]. شکل 5-ب نتایج جذب انرژی ویژه ساختارهای ساندویچی را نشان می‌دهد. این نتایج اطلاعات بهتری را برای درک جذب انرژی فراهم می‌کند. با توجه به نتایج، ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو نسبت به سایر ساختارها دارای بیشترین جذب انرژی ویژه می‌باشد. جذب انرژی ویژه در ساختارهای ساندویچی با 0.0، 0.1 و 0.3 درصد نانو به ترتیب 0.034، 0.053 و 0.056 درصد نسبت به ساختار رگه‌ای با 0.5 درصد نانو کاهش داشته‌اند. علت تغییرات جذب انرژی در نمونه‌های دارای نانو تا حدودی به نحوه پراکندگی نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی برمی‌گردد که باعث تغییر در سفتی پوسته‌ها می‌شود. این نتایج در آزمون شبه استاتیکی نشان آن است که با کاهش میزان درصد نانوذرات گرافن، قابلیت شکست این نوع از ساختارهای رگه‌ای تحت نفوذ شبه استاتیکی بیشتر شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده می‌توان دریافت که این نوع از ساختار ساندویچی بدون نانوذرات بارگذاری شبه استاتیکی، باعث افزایش دو عامل مهم یعنی جذب انرژی کل و جذب انرژی ویژه شده است. از طرفی، با اضافه کردن نانوذرات گرافن با درصدهای کم، باعث کاهش این دو عامل می‌شود و اگر مقدار درصد نانوذرات گرافن از یک حدی بیشتر شود، جذب انرژی کل و جذب انرژی ویژه نیز بیشتر شده است. پارامترهای شاخص در جذب انرژی ساختارهای ساندویچی رگه‌ای برای بارگذاری شبه استاتیکی در جدول 3 گزارش شده است. فوم پلی‌اورتان در جذب انرژی ساختارهای ساندویچی با هسته فوم تحت آزمون شبه استاتیکی بسیار تأثیرگذار است. وجود فوم پلی‌اورتان در هسته مرکزی ساختارهای ساندویچی رگه‌ای، باعث کاهش شدید میزان نیرو بعد از نیروی پیک است. فوم پلی‌اورتان در هسته مرکزی منجر به افزایش کارایی ساختار از لحاظ مقدار ظرفیت جذب انرژی شده است. علاوه بر این، فوم پلی‌اورتان باعث شد تا گسترش بیشتر آسیب در ساختار رگه‌ای محدود شود و بقیه ساختار سالم باقی بماند.

آنالیز شکست: هنگامی که یک جسم خارجی بر روی ساختار ساندویچ کامپوزیتی اثر می‌گذارد، چندین حالت آسیب مانند شکست الیاف، ترک ماتریس و لایه لایه شدگی اتفاق می‌افتد. تصاویر بازرسی بصری بعد از آزمون شبه استاتیکی ساختارهای ساندویچی رگه‌ای در شکل 6 نشان داده شده است. با بررسی سطح آسیب دیده، حالت آسیب اولیه یعنی شکست الیاف و به دنبال آن ترک ماتریس و انتشار آسیب در سطح بیرونی رگه‌ها مشاهده شد. علاوه بر این، برای بررسی دقیق آسیب، نمونه‌های آزمون شده توسط دستگاه CNC برش داده شدند. با توجه به تصاویر گزارش شده، با فشار نفوذ کننده در داخل رگه‌های ساندویچی، جداسازی بین الیاف و فوم رخ داده است. از سوی دیگر، لایه‌های بالایی ساختار رگه‌ای، به دلیل فشار نفوذ کننده باعث لایه لایه شدگی در فصل مشترک بین لایه‌ها شده است. این امر می‌تواند به دلیل جهت‌گیری لایه‌های کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی باشد که در تمامی نمونه‌ها یافت می‌شود [13]. بر اثر فشار نفوذ کننده در هسته فوم، آسیب‌هایی از جمله له شدگی فوم و شکست فوم مشاهده شد. عیوب ایجاد شده در هنگام ساخت لایه‌ها، از جمله توزیع غیر یکنواخت رزین، چسبندگی ضعیف بین لایه‌ها و وجود خلأ، نقش مهمی در حالت خرابی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم دارند که موجب لایه

هرچقدر مقدار CFE بالاتر باشد، باعث افزایش جذب انرژی بیشتر و قابلیت ضربه‌پذیری ساختار نیز بهتر می‌شود و برای بدست آوردن حداقل خسارت در آزمایش‌های مهم می‌باشد [34]. شکل 4-ج نشان‌دهنده مقدار CFE در ساختار با درصدهای مختلف نانوذرات گرافن می‌باشد. ساختارهای ساندویچی با 0.0، 0.1، 0.3 و 0.5 درصد نانو حداکثر بازده نیرو را به ترتیب 1.237، 1.054 و 1.302 درصد داشتند. علت این تغییرات مختلف در شکل، میزان درصد نانوذرات گرافن در ساختار است. با این وجود، در آزمون شبه استاتیکی، ساختار ساندویچی بدون نانوذرات گرافن، قابلیت ضربه‌پذیری بهتری را از خود نشان داده است. از طرفی، در حالت وجود نانوذرات گرافن، مشخص است که مقدار نانوذرات با درصدهای کم تأثیر چندانی بر روی قابلیت ضربه‌پذیری ساختار ندارد و حتی باعث کاهش قابلیت ضربه‌پذیری آن می‌شود، اما اگر مقدار درصد نانوذرات گرافن در این نوع از ساختار بیشتر شود باعث افزایش قابلیت ضربه‌پذیری در برابر آزمون شبه استاتیکی می‌شود.

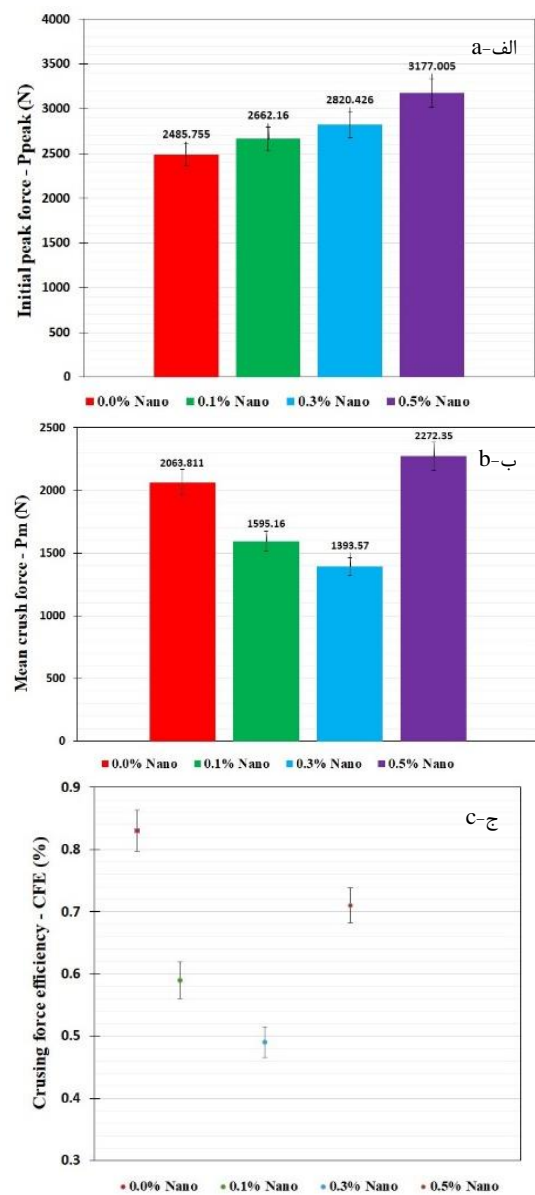


Fig. 4 a) Initial peak force, b) mean crushing force, c) crushing force efficiency.

شکل 4 الف) نیروی پیک اولیه، ب) نیروی له شدگی میانگین، ج) راندمان نیروی له شدگی.

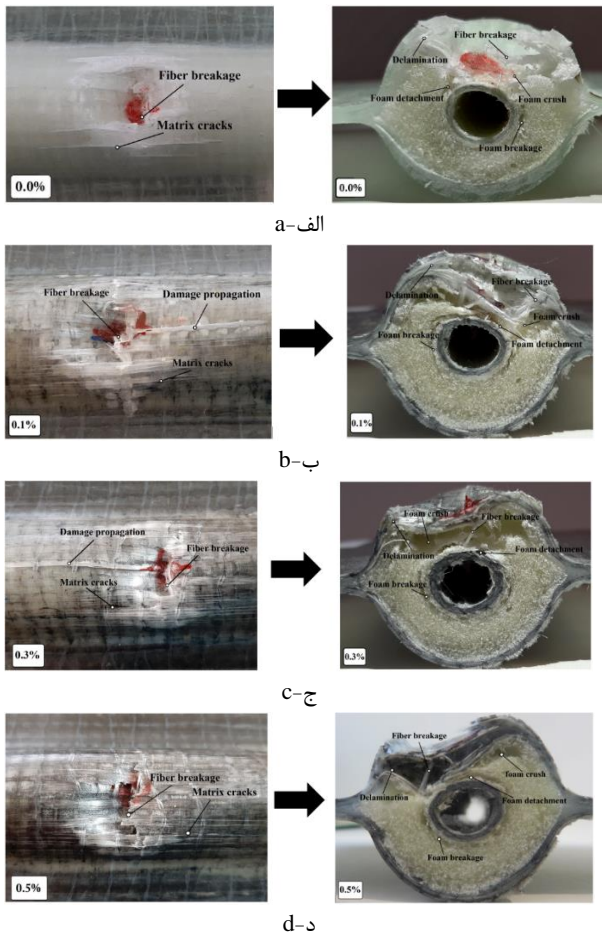


Fig. 6 Damage modes in sandwich vein structures under quasi-static test; a) 0.0% nano, b) 0.1% nano, c) 0.3% nano, d) 0.5% nano.

شکل 6 حالت‌های آسیب در ساختارهای رگه‌های ساندویچی تحت آزمایش شبه الاستیک؛ الف) 0.0 درصد نانو، ب) 0.1 درصد نانو، ج) 0.3 درصد نانو و د) 0.5 درصد نانو.

بارگذاری اینرسی به عنوان نیروی ناشی از شتاب بدنه صلب³ نمونه، معمولاً در زمان اولیه ضربه اتفاق می‌افتد [41]. در انرژی‌های ضربه‌ای 20 و 30 ژول، میزان خیز الاستیک نیروی تماس اوج بعد از محدوده بارگذاری اینرسی بصورت خطی و با شیب بیشتری اتفاق افتاده است. نیروی تماس به طور مداوم افزایش داشته است تا سرعت ضربه زنده با وجود برخی از نوسانات افت کند و به صفر برسد. این نیرو به طور ناگهانی از محدوده نیروی پیک تماس به صفر کاهش پیدا کرده است. علت آن آسیب کامل نمای بالای ساختار ساندویچی می‌باشد که توسط ضربه زنده نفوذ کرده است. در انرژی ضربه 45 ژول، نمودارهای نیروی تماس - جابجایی کاملاً با هم متفاوت هستند. دلیل آن می‌تواند افزایش میزان درصد نانو و انرژی ضربه نیز باشد. با این وجود، ساختار 0.3 درصد نانو در تمام سطوح انرژی ضربه‌ای، دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختار می‌باشد. نمودار انرژی - زمان ساختارهای رگه‌های ساندویچی با سطوح انرژی 20، 30 و 45 ژول (J) به ترتیب در شکل 8-الف، 8-ب و 8-ج نشان داده شده است. با توجه به نمودار، سرعت ضربه زنده کاهش و به صفر رسیده، انرژی جنبشی آن به سازه منتقل شده و در طی بازبایی صفحه⁴، به دنبال آسیب در ساختار و اصطکاک، انرژی جنبشی آن به یک مقدار پایدار رسیده است.

لایه شدگی و تغییر شکل ساختار می‌شوند. این عیوب بر رفتار مکانیکی پانل های ساندویچی مانند استحکام و سختی تأثیرگذار باشند.

2-3- نتایج آزمون ضربه سرعت پایین

سطوح انرژی: پاسخ‌های نیروی تماس - جابجایی ساختارهای ساندویچی با سطوح انرژی 20، 30 و 45 ژول (J) به ترتیب در شکل 7-الف، 7-ب و 7-ج نشان داده شده است. بخش اول نمودار، در زمان اولیه کمتر از 0.002 ثانیه، بارگذاری اینرسی¹ در نمودار رخ داده است.

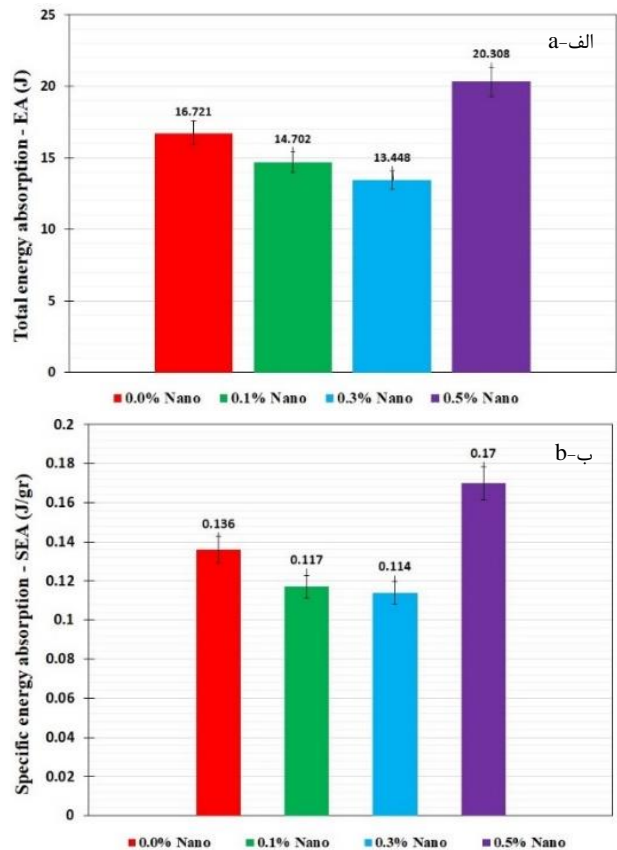


Fig. 5 Energy absorption capability; a) total absorption energy, b) specific energy absorption.

شکل 5 قابلیت جذب انرژی؛ الف) جذب انرژی کل، ب) جذب انرژی ویژه.

جدول 3 ویژگی‌های جذب انرژی نمونه‌ها.

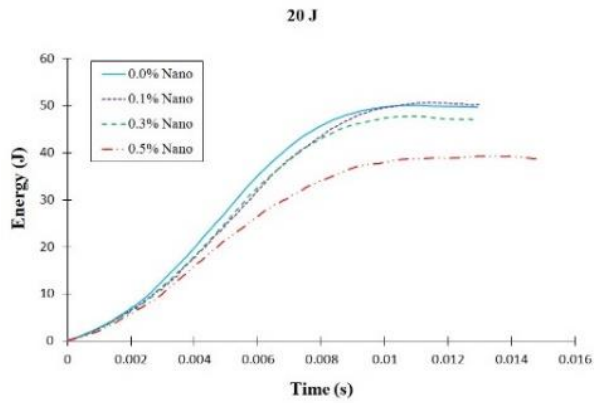
Table 3 Energy absorption characteristics of specimens.

نمونه‌ها	EA (J)	P _m (kN)	P _{peak} (kN)	CFE (%)	SEA (J/gr)	W _m (gr)
0.0 درصد	16.72	3.68	2.48	1.48	0.13	122.20
0.1 درصد	14.70	3.29	2.66	1.23	0.11	125.58
0.3 درصد	13.44	2.37	2.82	1.05	0.11	117.20
0.5 درصد	20.30	4.13	3.17	1.30	0.17	118.88

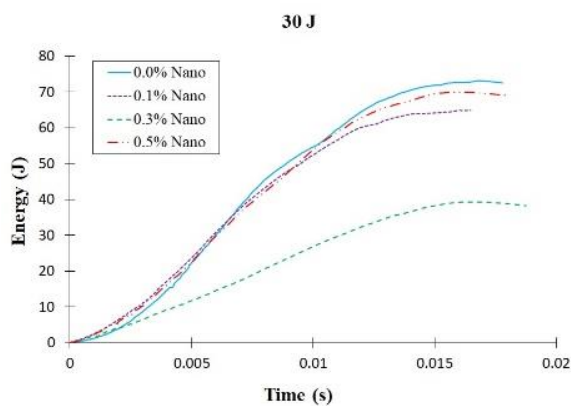
³ Plate recovery

¹ Inertial loading

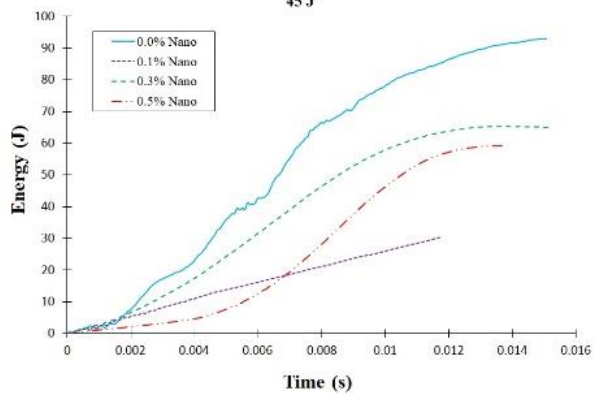
² Rigid-body acceleration



الف-ا

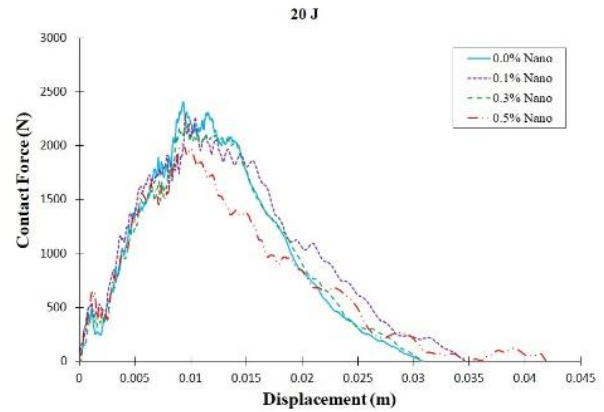


ب-ب

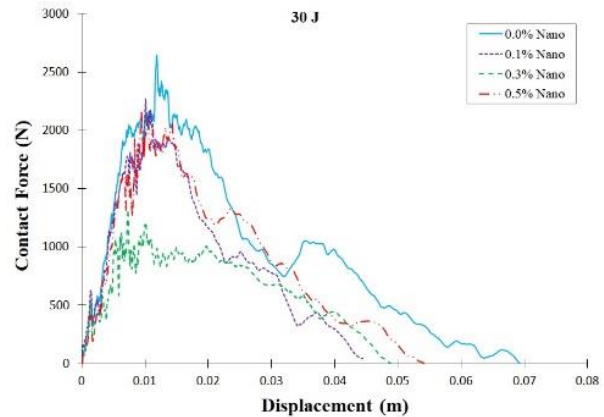


ج-ج

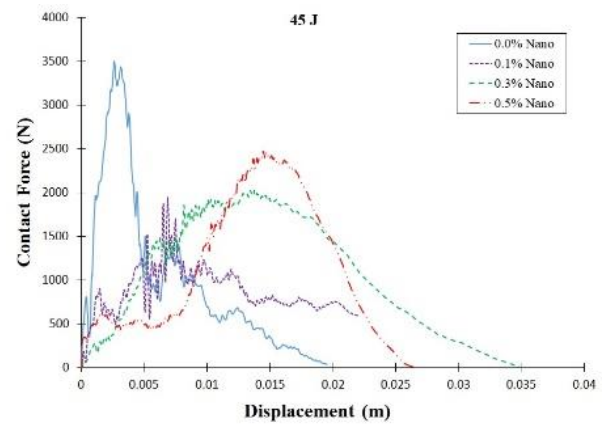
Fig. 8 Energy-time diagrams of sandwich vein structures; a) impact energy of 20 J, b) impact energy of 30 J, c) impact energy of 45 J [21].
شکل 8 نمودار انرژی - زمان ساختارهای رگه‌ای ساندویچی؛ الف) انرژی ضربه 20 ژول، ب) انرژی ضربه 30 ژول، ج) انرژی ضربه 45 ژول [21].



الف-ا



ب-ب



ج-ج

Fig. 7 Contact force - displacement diagrams of sandwich vein structures; a) impact energy of 20 J, b) impact energy of 30 J, c) impact energy of 45 J [21].

شکل 7 نمودارهای نیروی تماس - جابجایی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی؛ الف) انرژی ضربه 20 ژول، ب) انرژی ضربه 30 ژول، ج) انرژی ضربه 45 ژول [21].

از طرفی، به دلیل کلوخه شدن احتمالی نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی موجب کاهش در جذب انرژی می‌شود. اما بعد آزمایش ساختارها با انرژی ضربه بیشتر، نتایج نشان داد که در ضربه 30 و 45 ژول ساختارهای ساندویچی دارای نانو، جذب انرژی بهتری نسبت به ساختارهای ساندویچی بدون نانو داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که با اضافه کردن نانوذرات گرافن به این نوع از ساختار ساندویچی رگه‌ای باعث افزایش مقاومت و جذب انرژی در آزمون سقوط وزنه شده است. جدول 4، نتایج تجربی برای پارامترهای نمونه‌های آزمون شده تحت ضربه سرعت پایین را گزارش کرده است. از طرفی، وجود فوم پلی‌اورتان در

قابلیت جذب انرژی: میزان انرژی جذب شده ساختارهای رگه‌ای ساندویچی تحت سطوح انرژی ضربه‌ای 20، 30 و 45 ژول (J) به ترتیب در شکل 9-الف، 9-ب و 9-ج نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون ضربه سرعت پایین، در ضربه 20 ژول ساختارهای ساندویچی دارای نانو جذب انرژی متفاوت و کمتری نسبت به ساختار بدون نانو داشتند؛ دلیل آن می‌تواند میزان تراکم نانوذرات در رزین اپوکسی نمونه‌ها و پایین بودن میزان انرژی ضربه و یا تا حدودی خطای ناچیز در دستگاه آزمون نیز باشد.

آنالیز شکست: ساختارهای ساندویچ کامپوزیتی با هسته فوم هنگامی که تحت اثر یک جسم خارجی قرار می‌گیرند، چندین حالت آسیب در الیاف، ماتریس و هسته فوم آن‌ها به وجود می‌آید. تصاویر برش خورده ساختارهای رگه‌ای ساندویچی پس از آزمایش ضربه سرعت پایین در شکل 10 نشان داده شده است. با بررسی سطح نمونه‌های آزمون شده، حالت‌های آسیب اولیه از جمله شکست الیاف، ترک ماتریس، خرد شدن فوم، شکست فوم، جدا شدن فوم¹ و لایه لایه شدگی در آن‌ها مشاهده گردید. با توجه به تصاویر نشان داده شده، انتشار آسیب در هسته فوم بیشتر در ساختار ساندویچی با 0.5 درصد نانو اتفاق افتاده است. این موضوع نشان می‌دهد که با توجه به اثر ضربه پرتابه، میزان آسیب به هسته فوم بیشتر بوده است. لایه‌های کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی در قسمت بالایی رگه به دلیل افزایش انرژی ضربه، علاوه بر آسیب قابل توجهی که در قالب شکستگی الیاف متحمل شده است، لایه لایه شدگی نیز در فصل مشترک بین لایه‌ها اتفاق افتاده است. دلیل این امر جهت‌گیری لایه‌های متفاوت لایه‌های کامپوزیتی می‌باشد و این رفتار در تمامی نمونه‌ها یافت می‌شود [13]. لایه لایه شدگی در ساختار ساندویچی 0.3 درصد نانوذرات گرافن نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر دیده می‌شود. بعلاوه، در ساختارهای 0.1 و 0.5 درصد وزنی نانوذرات گرافن شاهد جداشدگی فوم و انتشار آسیب بیشتری در لایه‌های نانو کامپوزیت و هسته فوم بودیم. دلیل آن می‌تواند افزایش و کاهش نانوذرات گرافن در رزین اپوکسی نسبت به ساختار ساندویچی با 0.3 درصد نانو باشد که میزان مقاومت را کاهش داده است. با این وجود، ساختارهای دارای درصد وزنی نانوذرات گرافن دارای مقاومت بیشتری نسبت به ساختار بدون بودند. از طرفی، در جذب انرژی نیروی تماس ساختارهای ساندویچی، وجود فوم پلی‌اورتان بسیار مهم است. با توجه به نتایج تجربی، وجود فوم پلی‌اورتان در هسته مرکزی، باعث جلوگیری از آسیب شدید ساختارهای ساندویچی در هنگام ضربه شده است. به طور کلی، در آزمایش ضربه سرعت پایین، فوم پلی-اورتان در این نوع از ساختارهای رگه‌ای باعث محدود شدن گسترش بیشتر آسیب در رگه شده است.

3-3- آنالیز FE-SEM

میزان پراکندگی ذرات در رزین اپوکسی یکی از عوامل مهم در ساختارهای نانو کامپوزیتی می‌باشد. ناهمگونی² در ساختار نانو، باعث ایجاد تراکم³ ذرات نانو در ماتریس می‌شود و به عنوان عوامل تنش‌زا⁴ عمل کرده و باعث بدتر شدن خواص مکانیکی می‌شود [42]. در مطالعه حاضر، از آزمایش میکروگراف FE-SEM برای ارزیابی پراکندگی نانوذرات گرافن در داخل رزین استفاده گردید. میزان بزرگ‌نمایی در آنالیز FE-SEM به مقدار 50 kx در نظر گرفته شد. شکل 11، توزیع نانوذرات در بخشی از ماتریس برای درصدهای وزنی مختلف نانوذرات گرافن را نشان می‌دهد. در ساختارهای نانو کامپوزیت، با بالا بودن محتوای ذرات، تراکم ذرات نانو اتفاق می‌افتد که معمولاً به عنوان دلیل اصلی تخریب خواص مکانیکی در نظر گرفته می‌شوند [43]. با وجود یکسان بودن شرایط میکس نانوذرات با رزین برای هر سه وضعیت، اما در ساختارهای نانو کامپوزیتی با 0.1 و 0.5 درصد نانو، مقدار تراکم موجود در ماتریس بسیار کوچک‌تر و جزئی هستند. با این وجود، تراکم موجود در ماتریس ساختار نانو کامپوزیتی با 0.3 درصد نانو بزرگ‌تر نشان داده شده است.

جذب انرژی نیروی تماس ساختارهای رگه‌ای با هسته فوم تحت ضربه سرعت پایین بسیار مهم است. با توجه به نتایج تجربی، وجود فوم پلی‌اورتان در هسته مرکزی ساختارهای آزمون شده، از آسیب شدید ساختارها در هنگام آزمون وزنه افتان جلوگیری کرده است. به طور کلی، در ضربه سرعت پایین، فوم پلی اورتان در این نوع از ساختارها باعث محدود شدن گسترش بیشتر آسیب در رگه شده است.

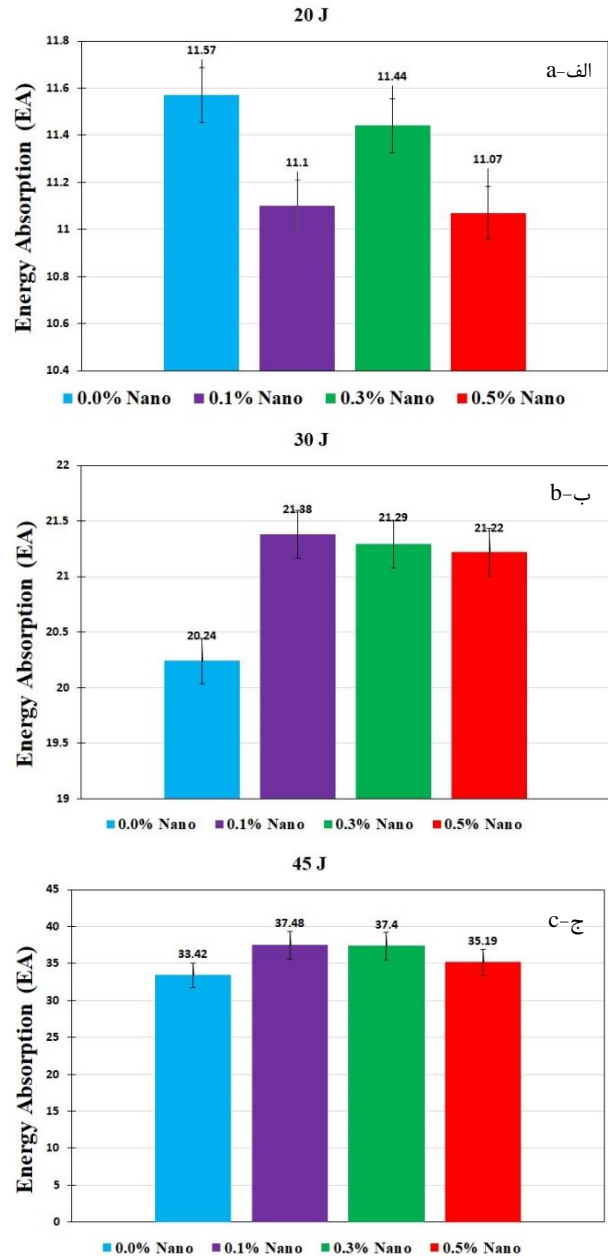


Fig. 9 Energy absorption capability at a) impact energy of 20 J, b) impact energy of 30 J, c) impact energy of 45 J [21].

شکل 9 قابلیت جذب انرژی در الف) انرژی ضربه 20 ژول، ب) انرژی ضربه 30 ژول، ج) انرژی ضربه 45 ژول [21].

³ Agglomeration
⁴ Stress raisers

¹ Foam detachment
² Inhomogeneity

جدول 4 نتایج تجربی برای پارامترهای کلیدی ضربه بر ساختارهای ساندویچی.

Table 4 Experimental results for key parameters of impact on the sandwich structures.

جذب انرژی (J)				ماکزیمم جابجایی (mm)				نیروی تماس ماکزیمم (kN)				انرژی ضربه (J)
0.5	0.3	0.1	0.0	0.5	0.3	0.1	0.0	0.5	0.3	0.1	0.0	
درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	درصد نانو	
11.07	11.44	11.10	11.57	41.89	30.78	34.66	30.85	2.01	2.21	2.28	2.41	20 J
21.22	21.29	21.38	20.24	54.18	48.69	48.86	69.20	2.17	1.32	2.27	2.64	30 J
35.19	37.40	37.48	33.42	26.38	34.95	34.95	34.18	2.47	1.03	1.94	4.01	45 J

4- جمع بندی

در این مطالعه، اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت یک ساختار رگه‌ای ساندویچ کامپوزیتی جدید، تحت بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار گرفت. ساختارهای ساندویچی از پوسته‌های لایه‌ای شده شیشه / اپوکسی تک‌جهت با روش تزریق خلأ ساخته شده‌اند که در مرکز آن‌ها از هسته فوم پلی‌اورتان استفاده شد. میزان درصد‌های نانوذرات گرافن برای ساختارها به ترتیب 0.0، 0.1، 0.3 و 0.5 درصد می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه سرعت پایین از پرتابه‌ای با مدل هندسی نیم کروی استفاده شد. در آزمایش بارگذاری شبه استاتیکی، ویژگی‌های قابلیت ضربه‌پذیری شامل راندمان نیروی له شدگی و قابلیت جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، برای آزمایش ضربه سرعت پایین، انرژی‌های مختلف ضربه‌های 20، 30 و 45 ژول (J) در نظر گرفته شد. میزان پراکندگی و تراکم ذرات گرافن در ماتریس، توسط آنالیز FE-SEM مورد ارزیابی قرار گرفت. با مشاهده نتایج، می‌توان دریافت که وجود ساختارهایی مانند ساختار رگه‌ای ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان می‌تواند در برابر ضربه انتشار آسیب را محدود کرده و بقیه ساختار سالم باقی بگذراند. با مقایسه نتایج هر دو آزمایش انجام شده بر روی نمونه‌ها می‌توان دریافت که در آزمون شبه استاتیکی، با اضافه کردن نانوذرات گرافن به این نوع از ساختارهای رگه‌ای ساندویچی در درصد‌های پایین، مقاومت چندان در برابر نفوذ شبه استاتیکی نداشتند، اما زمانی که میزان نانوذرات گرافن از یک حدی افزایش پیدا کرد، این نوع ساختار مقاومت قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان دادند. از طرفی، در آزمون ضربه سرعت پایین می‌توان دریافت که با اضافه کردن نانوذرات گرافن مقاومت ساختارهای رگه‌ای در آزمون سقوط وزنه مقاومت بیشتری را از خود نشان دادند و حتی انتشار آسیب را تا حدودی محدود کرده‌اند. علاوه بر این، وجود نانوذرات گرافن تأثیر خوبی در مقاومت این نوع از ساختار داشته است. با افزایش نانوذرات گرافن میزان مقاومت ساختار افزایش یافت. سهم فوم پلی‌اورتان در جذب انرژی این نوع از ساختارها بسیار مؤثر بوده است. وجود فوم پلی‌اورتان باعث جلوگیری از آسیب شدید ساختار در هنگام ضربه شد. بعد از آنالیز FE-SEM بخشی از ماتریس ساختار، مشاهده شد که با وجود یکسان بودن شرایط میکس نانوذرات، ساختار 0.3 درصد نانو دارای تراکم بیشتری بوده است. به طور کلی، می‌توان دریافت که با وارد کردن ضربه به رگه ساندویچی با این نوع از ساختار، ساختاری انعطاف‌پذیرتر به وجود می‌آورد.

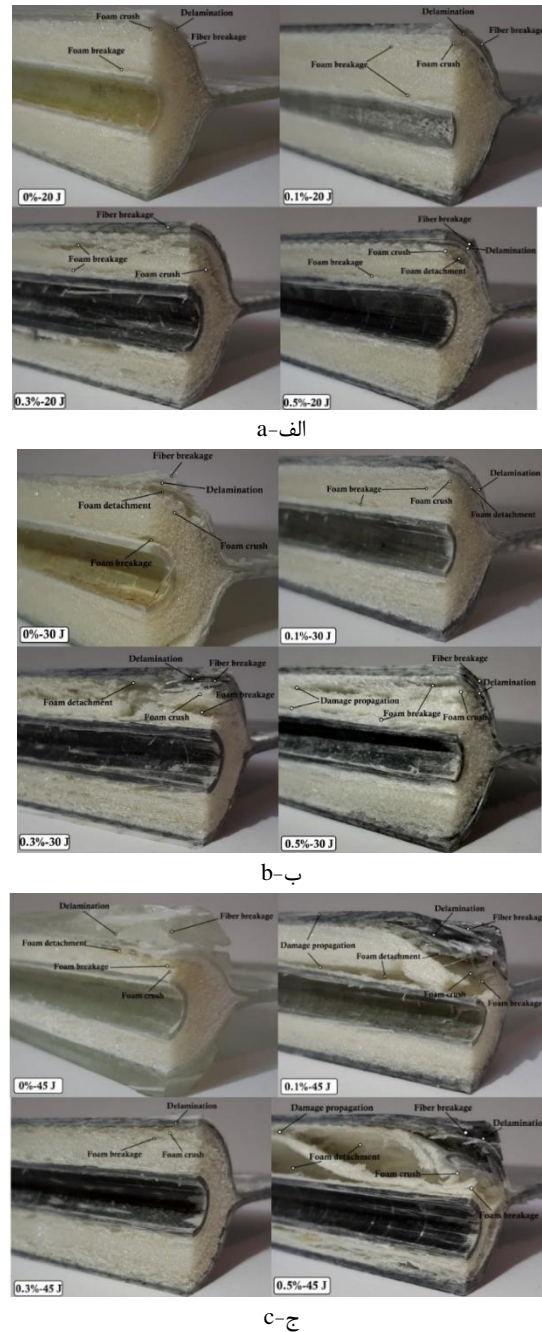


Fig. 10 Damage modes in longitudinal and transverse sectioned specimens; a) impact energy of 20 J, b) impact energy of 30 J, c) impact energy of 45 J [21].

شکل 10 حالت‌های آسیب در نمونه‌های برش خورده طولی و عرضی؛ الف) انرژی ضربه 20 ژول، ب) انرژی ضربه 30 ژول، ج) انرژی ضربه 45 ژول [21].

5- مراجع

[1] Zangana, S., Epaarachchi, J., Ferdous, W. and Leng, J., "A Novel Hybridised Composite Sandwich Core with Glass, Kevlar and Zylon Fibres—Investigation under Low-Velocity Impact" International Journal of Impact Engineering, Vol. 137, pp. 103430, 2020.

[2] McCracken, A. and Sadeghian, P., "Partial-Composite Behavior of Sandwich Beams Composed of Fiberglass Facesheets and Woven Fabric Core" Thin-walled structures, Vol. 131, pp. 805-815, 2018.

[3] Castanié, B., Bouvet, C. and Ginot, M., "Review of Composite Sandwich Structure in Aeronautic Applications" Composites Part C: Open Access, Vol. 1, pp. 100004, 2020.

[4] Zhu, Y. and Sun, Y., "Low-Velocity Impact Response of Multilayer Foam Core Sandwich Panels with Composite Face Sheets" International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 209, pp. 106704, 2021.

[5] He, Y., Zhang, X., Long, S., Yao, X. and He, L., "Dynamic Mechanical Behavior of Foam-Core Composite Sandwich Structures Subjected to Low-Velocity Impact" Archive of Applied Mechanics, Vol. 86, No. 9, pp. 1605-1619, 2016.

[6] Rezaei Golshan, N., Pol, M. H. P. and Najafzade Asl, O., "Numerical Investigation of the Parameters Affecting on the Composite Tubes Response under Axial Impact" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 200-212, 2019.

[7] Kumar, S. A. and Kumar, S. A., "Low-Velocity Impact Damage and Energy Absorption Characteristics of Stiffened Syntactic Foam Core Sandwich Composites" Construction and Building Materials, Vol. 246, pp. 118412, 2020.

[8] Zhu, S. and Chai, G. B., "Damage and Failure Mode Maps of Composite Sandwich Panel Subjected to Quasi-Static Indentation and Low Velocity Impact" Composite structures, Vol. 101, pp. 204-214, 2013.

[9] Sarasini, F., Tirillò, J., Ferrante, L., Sergi, C., Russo, P., Simeoli, G., Cimino, F., Ricciardi, M. R. and Antonucci, V., "Quasi-Static and Low-Velocity Impact Behavior of Intraply Hybrid Flax/Basalt Composites" Fibers, Vol. 7, No. 3, pp. 26, 2019.

[10] Belingardi, G. and Vadori, R., "Influence of the Laminar Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate" Composite structures, Vol. 61, No. 1-2, pp. 27-38, 2003.

[11] Symons, D. D., "Characterisation of Indentation Damage in 0/90 Lay-up T300/914 Cfrp" Composites science and technology, Vol. 60, No. 3, pp. 391-401, 2000.

[12] Breen, C., Guild, F. and Pavier, M., "Impact of Thick Cfrp Laminates: The Effect of Impact Velocity" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 36, No. 2, pp. 205-211, 2005.

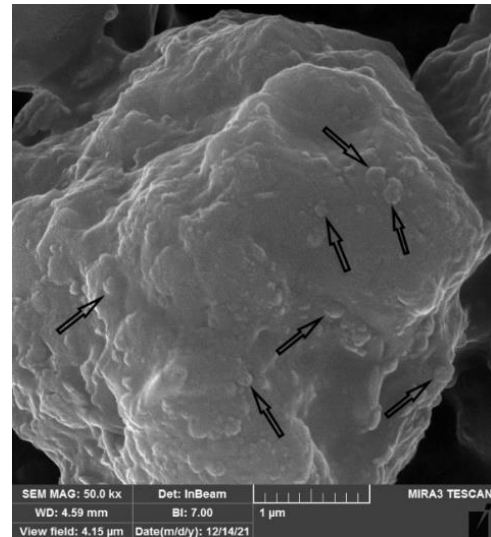
[13] Ahmed, A., Bingjie, Z., Ikbali, M. H., Qingtao, W., Obed, A. and Wei, L., "Experimental Study on the Effects of Stacking Sequence on Low Velocity Impact and Quasi-Static Response of Foam Sandwich Composite Structures" Advances in Structural Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1789-1805, 2015.

[14] Zhang, W., Qin, Q., Li, J., Li, K., Poh, L., Li, Y., Zhang, J., Xie, S., Chen, H. and Zhao, J., "Deformation and Failure of Hybrid Composite Sandwich Beams with a Metal Foam Core under Quasi-Static Load and Low-Velocity Impact" Composite Structures, Vol. 242, pp. 112175, 2020.

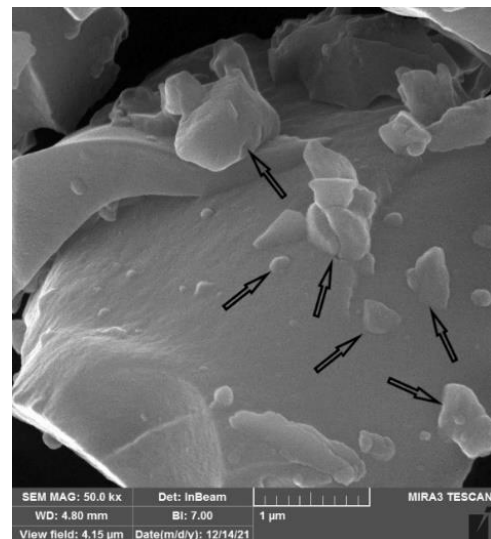
[15] Emamieh, H. R., Yarmohammad Tooski, M., Jjabbari, M. and Khorshidvand, A. R., "An Experimental Investigation of Impact Resistance of Sandwich Panels Reinforced by Nano-Silica and Nano-Clay" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1573-1582, 2021.

[16] Spronk, S., Kersemans, M., De Baerdemaeker, J., Gilbert, F., Sevenois, R., Garoz, D., Kassapoglou, C. and Van Paepegem, W., "Comparing Damage from Low-Velocity Impact and Quasi-Static Indentation in Automotive Carbon/Epoxy and Glass/Polyamide-6 Laminates" Polymer Testing, Vol. 65, pp. 231-241, 2018.

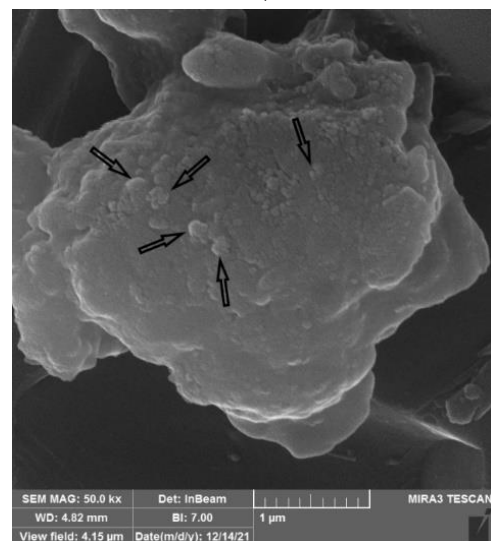
[17] Karakuzu, R., Djele, A. and Dogan, A., "High Temperature Effect on Quasi-Static and Low Velocity Impact Behaviors of Advanced Composite Materials" Proceedings of the Institution of Mechanical



الف-ا



ب-ب



ج-ج

Fig. 11 FE-SEM images of the dispersion of graphene nanoparticles; a) 0.1% nanoparticles, b) 0.3% nanoparticles, c) 0.5% graphene.

شکل 11 تصاویر FE-SEM از پراکندگی نانوذرات گرافن، الف) 0.1 درصد نانوذرات، ب) 0.3 درصد نانوذرات و ج) 0.5 درصد نانوذرات.

- Filled Tube under Quasi-Static Axial Loading" *Materials & Design*, Vol. 88, pp. 258-268, 2015/12/25/, 2015.
- [34] Wu, F., Xiao, X., Yang, J. and Gao, X., "Quasi-Static Axial Crushing Behaviour and Energy Absorption of Novel Metal Rope Crochet-Sintered Mesh Tubes" *Thin-Walled Structures*, Vol. 127, pp. 120-134, 2018/06/01/, 2018.
- [35] Özbek, Ö., Bozkurt, Ö. Y. and Erkiğ, A., "An Experimental Study on Intraply Fiber Hybridization of Filament Wound Composite Pipes Subjected to Quasi-Static Compression Loading" *Polymer Testing*, Vol. 79, pp. 106082, 2019/10/01/, 2019.
- [36] Chiu, L. N. S., Falzon, B. G., Ruan, D., Xu, S., Thomson, R. S., Chen, B. and Yan, W., "Crush Responses of Composite Cylinder under Quasi-Static and Dynamic Loading" *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 90-98, 2015/11/01/, 2015.
- [37] Kim, J.-S., Yoon, H.-J. and Shin, K.-B., "A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers" *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 198-207, 2011/04/01/, 2011.
- [38] Xu, J., Ma, Y., Zhang, Q., Sugahara, T., Yang, Y. and Hamada, H., "Crashworthiness of Carbon Fiber Hybrid Composite Tubes Molded by Filament Winding" *Composite Structures*, Vol. 139, pp. 130-140, 2016/04/01/, 2016.
- [39] Hu, D. Y., Luo, M. and Yang, J. L., "Experimental Study on Crushing Characteristics of Brittle Fibre/Epoxy Hybrid Composite Tubes" *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 15, No. 4, pp. 401-412, 2010/10/14, 2010.
- [40] Zhu, G., Sun, G., Yu, H., Li, S. and Li, Q., "Energy Absorption of Metal, Composite and Metal/Composite Hybrid Structures under Oblique Crushing Loading" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 135, pp. 458-483, 2018/01/01/, 2018.
- [41] Feraboli, P., "Some Recommendations for Characterization of Composite Panels by Means of Drop Tower Impact Testing" *Journal of aircraft*, Vol. 43, No. 6, pp. 1710-1718, 2006.
- [42] Ulus, H., Üstün, T., Şahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. and Avcı, A., "Low-Velocity Impact Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Multiscale Hybrid Nanocomposites Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes and Boron Nitride Nanoplates" *Journal of composite materials*, Vol. 50, No. 6, pp. 761-770, 2016.
- [43] Zhang, F., Mohammed, R., Sun, B. and Gu, B., "Damage Behaviors of Foam Sandwiched Composite Materials under Quasi-Static Three-Point Bending" *Applied Composite Materials*, Vol. 20, No. 6, pp. 1231-1246, 2013.
- Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, No. 23, pp. 7110-7119, 2021.
- [18] Korsavi-Kashani, S. A. and Eslami-Farsani, R., "Experimental Investigation on Effect of Functionalized Nano Silica and Nano Graphene on Basalt Fibers-Epoxy Composite under High Velocity Impact" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 1, pp. 675-682, 2020.
- [19] Ghaderi, A., Ghassemi, A. and Yarmohamad Toski, M., "An Experimental Investigation of Quasi-Static Indentation on a Composite Sandwich Panel Made of Basalt Fiber Using Nano-Graphene" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 109-118, 2019.
- [20] Nakhaei, M.-R., Mohammadi, S., Naderi, G. and Ghoreishy, M.-H., "Experimental Study of Microstructure, Thermal and Mechanical Properties of Pa6/Nbr Nanocomposites Reinforced with Graphene Nanoparticle" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 3, pp. 419-426, 2019.
- [21] Rezvani Tavakol, M., Yarmohammad Tooski, M., Jabbari, M. and Javadi, M., "Effect of Graphene Nanoparticles on the Strength of Sandwich Structure Inspired by Dragonfly Wings under Low-Velocity Impact" *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 10, pp. 5249-5264, 2021.
- [22] Zhang, B., Asmatulu, R., Soltani, S. A., Le, L. N. and Kumar, S. S., "Mechanical and Thermal Properties of Hierarchical Composites Enhanced by Pristine Graphene and Graphene Oxide Nanoinclusions" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 131, No. 19, 2014.
- [23] Hülagü, B., Ünal, H. Y., Acar, V., Khan, T., Aydın, M. R., Aydın, O. A., Gök, S., Pekbey, Y. and Akbulut, H., "Low-Velocity Impact and Bending Response of Graphene Nanoparticle-Reinforced Adhesively Bonded Double Strap Joints" *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 35, No. 22, pp. 2391-2409, 2021.
- [24] Choupani Chaydarreh, K., Shalbafan, A. and Welling, J., "Effect of Ingredient Ratios of Rigid Polyurethane Foam on Foam Core Panels Properties" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 134, No. 17, 2017.
- [25] Wang, H., Li, T.-T., Wu, L., Lou, C.-W. and Lin, J.-H., "Spacer Fabric/Flexible Polyurethane Foam Composite Sandwiches: Structural Design and Quasi-Static Compressive, Bursting and Dynamic Impact Performances" *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 23, No. 4, pp. 1366-1382, 2021.
- [26] Zhao, F., Wu, L., Lu, Z., Lin, J.-H. and Jiang, Q., "Design of Shear Thickening Fluid/Polyurethane Foam Skeleton Sandwich Composite Based on Non-Newtonian Fluid Solid Interaction under Low-Velocity Impact" *Materials & Design*, Vol. 213, pp. 110375, 2022.
- [27] Zeng, X., Tang, T., An, J., Liu, X., Xiang, H., Li, Y., Yang, C. and Xia, T., "Integrated Preparation and Properties of Polyurethane-Based Sandwich Structure Composites with Foamed Core Layer" *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 9, pp. 4549-4559, 2021.
- [28] Khan, T., Acar, V., Aydın, M. R., Hülagü, B., Akbulut, H. and Seydibeyoğlu, M. Ö., "A Review on Recent Advances in Sandwich Structures Based on Polyurethane Foam Cores" *Polymer Composites*, Vol. 41, No. 6, pp. 2355-2400, 2020.
- [29] Loganathan, S. B. and Shivanand, H. K., "Effect of Core Thickness and Core Density on Low Velocity Impact Behavior of Sandwich Panels with Pu Foam Core" *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 3, No. 03, pp. 164, 2015.
- [30] Garrido, M., Madeira, J., Proença, M. and Correia, J., "Multi-Objective Optimization of Pultruded Composite Sandwich Panels for Building Floor Rehabilitation" *Construction and Building Materials*, Vol. 198, pp. 465-478, 2019.
- [31] Tarlochan, F. and Ramesh, S., "Composite Sandwich Structures with Nested Inserts for Energy Absorption Application" *Composite Structures*, Vol. 94, No. 3, pp. 904-916, 2012/02/01/, 2012.
- [32] Liu, Q., Xing, H., Ju, Y., Ou, Z. and Li, Q., "Quasi-Static Axial Crushing and Transverse Bending of Double Hat Shaped Cfrp Tubes" *Composite Structures*, Vol. 117, pp. 1-11, 2014/11/01/, 2014.
- [33] Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Shokri Rad, M., Farokhi Nejad, A. and Ahmad, Z., "Crashworthiness Assessment of Auxetic Foam-