



## اثر نانو ذرات گرافن بر مقاومت ساختار پانل ساندویچی الهام گرفته شده از ریزساختار رگه بال سنجاقک تحت بارگذاری شبه استاتیک

مهدی رضوانی توکل، مهدی یارمحمد توسکی\*، محسن جباری، مهرداد جوادی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶  
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

### کلمات کلیدی:

ساختار کامپوزیت  
تست شبه استاتیک  
قابلیت ضربه پذیری  
جذب انرژی  
هسته فوم پلی اورتان

**خلاصه:** بال‌های سنجاقک یک ریز ساختار ترکیبی جذاب و ارگان‌های پروازی بسیار تخصصی هستند که سازگاری خوبی برای رفتار پرواز سنجاقک دارند. هدف از این مقاله، بررسی اثر نانو ذرات گرافن بر مقاومت یک ساختار ساندویچی الهام گرفته شده از پیکربندی ریزساختار بال سنجاقک تحت بارگذاری شبه استاتیک است. ساختارهای رگه‌ای ساندویچی از لایه‌های شیشه / اپوکسی با درصد‌های مختلف نانو ذرات گرافن ساخته شده‌اند. در هسته مرکزی رگه، از فوم پلی اورتان استفاده شد. بعد از تست شبه استاتیک، ویژگی‌های قابلیت ضربه‌پذیری در این ساختارها مورد بحث قرار گرفت. از طرفی، تأثیر فوم پلی اورتان در میزان آسیب ساختار ساندویچی در اثر نیروی شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آسیب در نمونه‌های ساخته شده، تصاویر سطح آسیب و نمای برش خورده آسیب گرفته شد و نتایج آن گزارش شد. در آخر، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی توزیع نانو ذرات گرافن در نمونه‌ها استفاده شد. نتایج نشان دادند که وجود نانو ذرات گرافن در رزین این نوع از ساختار ساندویچی با هسته فوم، اگر از یک مقدار کمتر باشد تأثیر چندانی در مقاومت ساختار نخواهد گذاشت. از طرفی، اگر نانو ذرات گرافن از یک مقداری بیشتر شود مقاومت نسبتاً خوبی را از خود نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

[۴]. این موضوع می‌تواند کمک بسیار خوبی به ما در طراحی مواد ساختاری جدید با نسبت استحکام به وزن بالا کند. پانل‌های ساندویچی با هسته فوم دسته‌ای از مواد کامپوزیتی محکم با هسته کم چگالی هستند که به دلیل دارا بودن مشخصه‌های مکانیکی همچون سفتی بالا، استحکام و وزن کم، به طور گسترده در صنایع دریایی، نظامی، هوافضا و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۱۰]. چنین ساختارهای مخصوص باعث مقاومت خمشی عالی و ظرفیت جذب انرژی پانل ساندویچی می‌شود [۱۱]. با وجود ثبات افزایش یافته و خواص سختی پانل‌های ساندویچی، آن‌ها اغلب از مقاومت به ضربه پایین رنج می‌برند [۱۲-۱۴]. ساختارهای کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی به دلیل تماس عرضی و ضربه با اشیاء خارجی، مستعد آسیب و شکست می‌باشند. 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 مؤثرتر است. ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی با هسته فوم، تحت بارگذاری شبه استاتیک می‌توانند حالت‌های متعددی از آسیب از جمله، شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، خرد شدن و لایه لایه

سنجاقک‌ها در میان انواع مختلف حشرات دارای ساختار قابل توجه بال با ثبات زیاد می‌باشند و مدت‌ها است که نظر فیزیکدانان و متخصصان زیست‌شناسی را از نظر حرکت پروازی و عملکرد مکانیکی به خود جلب کرده‌اند. بال سنجاقک دارای یک ریزساختار پیچیده است که به طور عمده از غشاء شبیه پوست نازک و رگه‌های طولی تشکیل شده‌اند [۱ و ۲]. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> می‌توان مشاهده کرد که غشاء دارای دو لایه شامل اپیدرم<sup>۲</sup> فوقانی و تحتانی در سطح کوچک است [۲]. علاوه بر این، رگه طولی بال دارای یک مدل ساختاری ساندویچی با دو پوسته کیتین<sup>۳</sup> و یک لایه پروتین میانی می‌باشد که ابتدا توسط وانگ و همکاران [۳] گزارش شده است. زمانی که سنجاقک در معرض بارهای تصادفی قرار دارد، ساختار ساندویج کامپوزیتی بال به آن اجازه عملکرد پرواز فوق‌العاده‌ای را می‌دهد

- 1 Scanning Electronic Microscope (SEM)
- 2 Epidermis
- 3 chitinous

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m\_yarmohammad@azad.ac.ir

[۲۶]. از طرفی، پانل‌های ساندویچی تقویت شده با تقویت کننده‌های تک جهتی، با مقاومت و سختی افزایش یافته مطلوب در یک جهت، مقاومت به ضربه خوبی نسبت به پانل‌های ساندویچی معمولی از خود نشان می‌دهند و از این رو پتانسیل کاربرد در ساختارهای فضایی را دارند [۲۷].

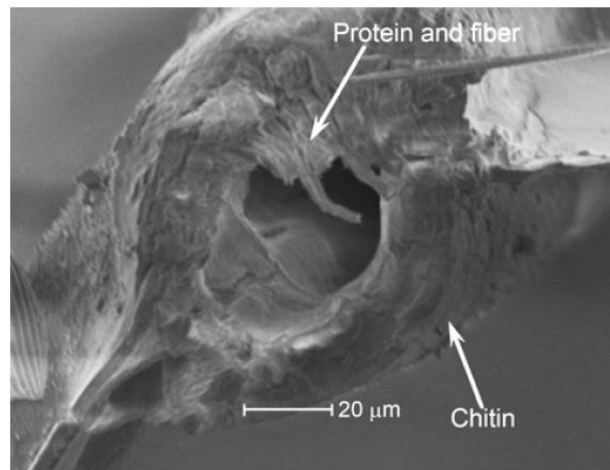
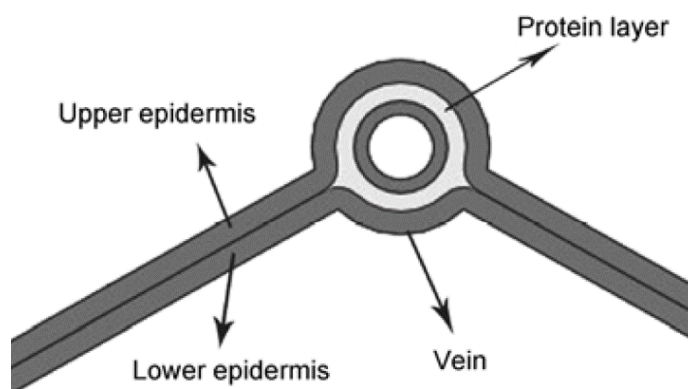
پلی‌اورتان<sup>۵</sup> متشکل از واحدهای آلی می‌باشد که توسط یورتان به هم متصل شده‌اند و برای کف کردن همزمان مناسب می‌باشد [۲۸]. فوم پلی‌اورتان به دلیل وزن کم و سهولت پردازش در زمینه‌های صنعتی محبوب است. این فوم به دلیل ویژگی‌های قابل توجهی از جمله وزن سبک، سازگار با محیط زیست، چگالی کم، ضربه و جذب آن و خاصیت ارتجاعی فوق‌العاده یکی از جامع‌ترین گروه‌های مورد تحقیق و بهره‌برداری از خانواده‌های پلیمری هستند. بیشتر مطالعات بر بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه فوم پلی‌اورتان تأکید کرده‌اند [۲۹-۳۲]. فوم نقش مهمی در مکانیزم له‌شدگی ایفا می‌کند، چون زمانی که تحت فشار قرار می‌گیرد باعث افزایش چگالی آن می‌شود [۳۳].

در مطالعه حاضر، اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت یک ساختار پانل ساندویچ کامپوزیتی جدید به عنوان طراحی الهام گرفته شده از ریز ساختار بال سنجاقک که از هسته فوم پلی‌اورتان تشکیل شده است، تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار پیشنهادی با یک رگه، شامل پوسته‌های لایه‌ای شده شیشه/اپوکسی کامپوزیت تک - جهته می‌باشد که به یک هسته فوم پلی‌اورتان پیوند داده شده و درصدهای وزنی مختلف نانوذرات گرافن به ترتیب صفر، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد در رزین اپوکسی میکس شدند. در اثر بارگذاری شبه استاتیکی، نمودارهای نیرو - جابجایی و جذب انرژی کل هریک از نمونه‌ها گزارش شده و مقایسه بین نتایج در پاسخ نیرو - جابجایی و ویژگی‌های قابلیت ضربه‌پذیری آنها شامل بازده نیروی له شدن<sup>۶</sup> و توانایی جذب انرژی<sup>۷</sup> نیز مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، نیروی پیک اولیه و جذب انرژی ویژه<sup>۸</sup> براساس منحنی نیرو - جابجایی محاسبه شد. در آخر، تصاویر آسیب و نمای برش داده شده آسیب برای نمونه‌ها قرار داده شده و نتایج آن نیز گزارش شده است.

شدن ماتریس را از خود نشان بدهند. زو و جین بوی [۱۵] حالت‌های آسیب و شکست پانل ساندویچ کامپوزیتی را تحت تست شبه استاتیک 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. دیکشیت و همکاران [۱۶] به تحلیل و بررسی تورفتگی شبه استاتیک بر روی کامپوزیت‌های ساندویچی با الیاف پیوسته چاپ سه بعدی پرداختند. نتایج تست تورفتگی شبه استاتیک نشان داد که ساختارهای ساندویچی سینوسی بالاترین ظرفیت تحمل بار را تا زمان شروع و ظرفیت جذب انرژی کل را دارا هستند. ژانگ و همکاران [۱۷] در مطالعه خود نشان دادند که ساختار ساندویچ کامپوزیت زمانی که تحت بار شبه استاتیکی قرار گیرد، دچار شکست برشی هسته و شکست فشاری پوسته‌ها و سپس جدا شدن بین پوسته و هسته می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۸] در یک مطالعه به بررسی تغییر شکل و شکست تیرهای ساندویچی مرکب هیبریدی با هسته فوم فلزی تحت تست شبه استاتیک و ضربه سرعت پایین پرداختند. آن‌ها دریافتند که تیرهای ساندویچی مرکب هیبریدی، دارای چهار حالت شکست فعال شامل شکستگی صفحه<sup>۱</sup>، فرورفتگی<sup>۲</sup>، برش هسته و برش کششی هسته<sup>۳</sup> می‌باشند. نانو ذرات گرافن<sup>۴</sup> خواص مکانیکی و فیزیکی قابل توجهی دارند و آنها به طور بالقوه، مواد ایده آلی برای تقویت پلیمرها هستند. اضافه کردن این نوع از نانو ذرات به ساختارهای کامپوزیتی، یک روش امیدوارکننده 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 نانو ذرات گرافن انجام شده است [۱۹-۲۲]. با اضافه کردن نانو مواد مبتنی بر گرافن به کامپوزیت‌های پلیمری، خواص مکانیکی و حرارتی آنها بهبود می‌یابد [۲۳]. بوراک و همکاران [۲۴] اثر ضربه سرعت پایین و پاسخ خمشی اتصالات دو بند تقویت شده با نانو ذرات گرافن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کار خود میزان درصد نانو ذرات را ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که مقاومت ضربه اتصالات تحت ضربه سرعت پایین با استفاده از تقویت کننده گرافن افزایش پیدا کرده است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که آسیب به پانل‌های ساندویچی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه در استحکام ساختاری آنها شود [۲۵] و

5 Polyurethan (PU)  
6 Crush force efficiency  
7 Energy absorption capability  
8 Absorption of Special Energy (SEA)

1 Face sheet-fracture  
2 Indentation  
3 Core shear-tensile  
4 Graphene Nanoparticles (GNs)



(ب)

(الف)

شکل ۱. (الف) ساختار ساندویچی بال سنجاقک [۱]، (ب) نمایش شماتیک یک مدل اتصال آلی [۲].

Fig. 1. (a) dragonfly wing sandwich structure [1], (b) schematic representation of an organic binding model [2].

۲/۵۴ گرم بر سانتی متر مکعب و دارای مقاومت کششی ۳۴۰۰ مگاپاسکال با ضخامت اسمی ۱۸ میکرومتر است. نانوذرات گرافن با مشخصات نشان داده شده در جدول ۱ [۲۰]، با درصدهای وزنی مختلف، به رزین اپوکسی مورد نظر اضافه گردید. بعلاوه، از فوم سلول بسته پلی‌اورتان، با چگالی ۵۰

جدول ۱. ویژگی‌های نانو ذرات گرافن GP7 [۲۰].

Table 1. Characteristics of GP7 graphene nanoparticles [20].

پارامترها (واحد)	۹۸-۱۰۳۴۳۴۳-
فرمول مولکولی	C
وزن مولکولی (g/mol)	۱۲/۰۱
شکل	پودر
رنگ	سیاه
مورفولوژی	پوسته پوسته شدن
لایه‌ها	۱۰-۵
ضخامت متوسط: (mm)	۱۵
ابعاد جانبی: (μm)	۵
مساحت سط: (g/m <sup>۲</sup> )	۸۰-۵۰
خلوص: (%)	۹۵
محتوای اکسیژن: (%)	>۱
نسبت نقص: (ID/IG)	۰/۶۴

## ۲- کار تجربی

### ۲-۱- مواد و خواص

در مطالعه حاضر، ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی، الهام گرفته شده از ویژگی‌های هندسی ریزساختار بال سنجاقک است که مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق مطالعات و مشاهدات قبلی [۴-۱ و ۳۴ و ۳۵]، غشاء بال سنجاقک شامل دو لایه است که نشان دهنده اپیدرم فوقانی<sup>۱</sup> و اپیدرم تحتانی<sup>۲</sup> می‌باشند [۲] و رگه<sup>۳</sup> طولی آن، دارای یک مدل ساندویچی با دو پوسته کیتین<sup>۴</sup> و یک لایه پروتئینی<sup>۵</sup> میانی در سطح میکرو هستند که در ساختار چارچوب کلی بال نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ساختار ساندویچی رگه بال سنجاقک و مدل شماتیک از اتصال آن در شکل ۱ (الف) [۱] و ۱ (ب) [۲] نشان داده شده است.

با توجه به کار قبل [۲۰]، که نمونه‌های مورد نظر تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفتند؛ مشابه آن در کار حاضر نیز لایه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه تک-جهته ۳۰۰ گرم بر سانتی متر مکعب و رزین اپوکسی (ای پی آر ۱۰۸۰)؛ همراه با هاردنر (ای پی اچ ۱۰۸۰) ساخته شدند. چگالی حجمی الیاف

- 1 Upper epidermis
- 2 Lower epidermis
- 3 Vein
- 4 Chitin
- 5 Protein layer
- 6 (EPR1080)
- 7 (EPH 1080)



شکل ۲. فرآیند میکس نانو ذرات گرافن با رزین اپوکسی.

Fig. 2. The process of mixing graphene nanoparticles with epoxy resin.

مرحله دوم شامل ساخت پانل‌های ساندویچی می‌باشد که در ابتدا برای ساخت یک سمت از نمونه، الیاف خام پیوسته تک - جهت شیشه در درون قالب با چیدمان زاویه‌ای  $[0/90/0/90]$  قرار داده شده و با استفاده از روش تزریق خلاء<sup>۳</sup> فشرده‌سازی الیاف انجام شد. بعد از آن، رزین اپوکسی با هاردنر ترکیب و در درون الیاف تزریق گردید. پس از پخت و خشک شدن، نمونه از قالب خارج شده و سمت دیگر نمونه به همین روش ساخته شد. سپس، هردو نمونه توسط رزین اپوکسی بهم چسبانده شدند. لوله داخلی با قطر ۱۰ میلی‌متر توسط الیاف تک جهته شیشه همراه با رزین اپوکسی آغشته گردید و در جهت طول لوله به دور قالب پیچیده شد و بعد از خشک شدن به همراه پوسته بیرونی کامپوزیتی در داخل فیکسچر جهت تزریق فوم پلی‌اورتان قرار گرفت. در مرحله آخر جهت تزریق فوم پلی‌اورتان برای هر نمونه، مقدار ۱۰ گرم از ماده پلی‌ال و مقدار ۱۰ گرم از ماده ایزوسیانات با هم ترکیب و در داخل نمونه تزریق شد. ابعاد نمونه‌های ساخته شد ۱۵۰ میلی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. مدل ساده شده ساختار ساندویچی رگه‌ای که به صورت شماتیک در نرم افزار سالیدورکس<sup>۴</sup> طراحی شده است، و مدل ساخته شده کامپوزیتی، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. مقادیر پارامترهای خصوصیات مکانیکی پانل ساندویچی بدست آمده از آزمایش کشش طبق استاندارد ۳۰۳۹D/M۳۰۳۹D [۳۶] در جدول ۲ [۲۰] آورده شده است.

کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد. جهت تزریق فوم پلی‌اورتان با ترکیب دو ماده پلی‌ال<sup>۱</sup> و ایزوسیانات<sup>۲</sup> با درصد وزنی مشخص، فوم پلی‌اورتان با چگالی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد.

## ۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

با توجه به مرجع [۳۴]، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، ضخامت دیواره بال ۲۵ میکرومتر و شعاع داخلی رگه ۴۲/۵ میکرومتر تخمین زده شد. همچنین، لایه‌های داخلی و خارجی پوسته کیتین دارای ضخامت ۷ میکرومتر و لایه پروتئین میانی دارای ضخامت ۱۱ میکرومتر است [۳۴]. در این مطالعه، ساختارهای کامپوزیتی با ضریب بزرگنمایی در حدود ۲۲۵ (در مقیاس ماکرو) از پیکربندی ساختار بال سنجاقک در نظر گرفته شدند. کل فرآیند تولید در این بخش به سه مرحله اصلی شامل آماده‌سازی اولیه، ساخت و تزریق فوم تقسیم شده است. در مرحله اول، قالب نمونه‌ها به ابعاد  $250 \times 1500$  میلی‌متر با ضخامت ۳۰ میلی‌متر، طراحی و ساخته شد. علاوه بر این، مواد اولیه شامل الیاف، رزین، فوم پولی‌اورتان و نانوذرات گرافن خریداری و آماده‌سازی شدند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نانو ذرات گرافن با درصدهای وزنی مختلف ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد به وسیله ترازو وزن شده و توسط دستگاه همگن کننده آلتراسونیک هر کدام به مدت ۱۵ دقیقه با توان ۳۰۰ در دمای محیط همراه با رزین اپوکسی میکس شدند.

3 Vacuum Infusion Process (VIP)

4 SolidWorks

1 Polyol

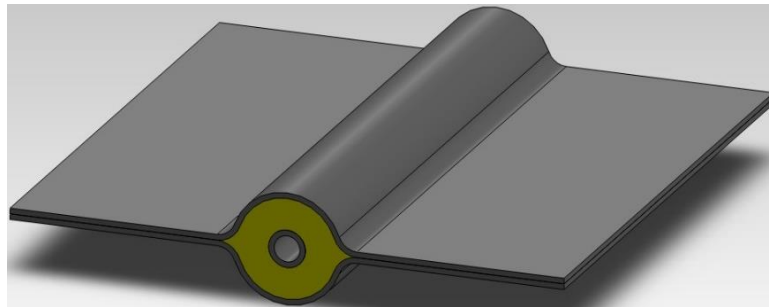
2 Isocyanate



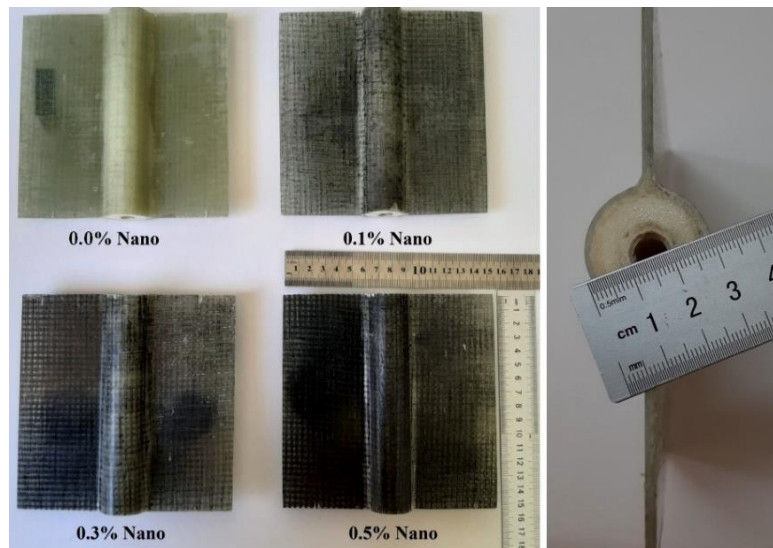
جدول ۲. پارامترهای مکانیکی پانل ساندویچی [۲۰].

Table 2. Mechanical parameters of sandwich panel [20].

پارامترها (واحد)	صفر درصد نانو	۰/۱ درصد نانو	۰/۳ درصد نانو	۰/۵ درصد نانو
چگالی: $\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	۸۷۷	۸۸۸	۹۵۸	۹۸۱
مدول یانگ: $E$ (GPa)	۷/۵	۷/۶	۸/۲	۸/۴
استحکام کششی نهایی: $\sigma_u$ (MPa)	۳۲۳	۳۲۶	۳۵۸	۳۸۸
تنش تسلیم: $\sigma_y$ (MPa)	۳۱۰	۳۱۸	۳۴۸	۳۷۵
تنش شکست: $\epsilon_u$ (%)	۴/۱	۴/۳	۴/۳	۴/۵



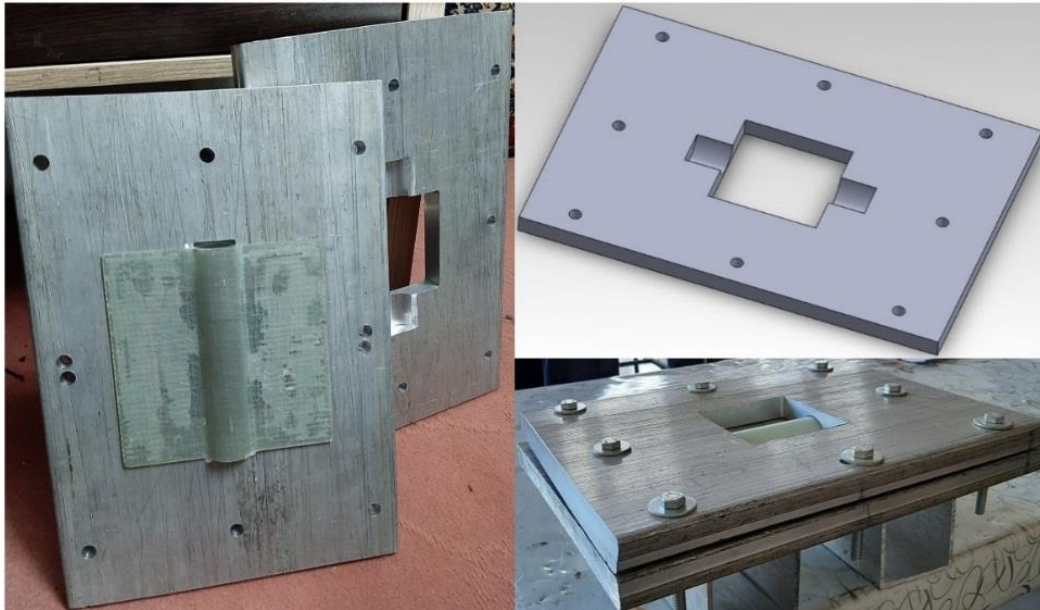
(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) مدل ساده شده یک رگه طولی با ساختار ساندویچی و (ب) نمونه‌های ساخته شده پانل‌های ساندویچی با درصد‌های مختلف نانو ذرات گرافن.

Fig. 3. (a) Simplified model of a longitudinal vein with a sandwich structure and (b) fabricated samples of sandwich panels with different percentages of graphene nanoparticles.



شکل ۴. فیکسچر استفاده شده در تست شبه استاتیک.

Fig. 4. The fixture used in the quasi-static test.

به نمونه‌ها را همزمان ضبط کرده و تغییر شکل محوری با دقتی در حدود  $0/0001$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آزمون مذکور تا نفوذ نفوذ - کننده به مرکز لوله وسط رگه ساندویچی و ایجاد کامل نمودار نیرو - جابجایی ادامه می‌یابد. در هنگام تست، تصاویر توسط یک دوربین برای نظارت بر تاریخ روند له شدگی<sup>۳</sup> گرفته شد، (شکل ۷ فرآیند لهیدگی را نشان می‌دهد). همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مقدار فرورفتگی نفوذ - کننده و میزان له شدگی در تصاویر ۱ الی ۸ به ترتیب به مقدار صفر، ۵، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر، هرچقدر میزان بارگذاری بیشتر می‌شود، مقدار آسیب بیشتر می‌شود. در فرآیند لهیدگی، همانطور که در تصاویر شکل ۸ نشان داده است، به طور کلی منحنی نیرو - جابجایی نفوذ - کننده در ساختار کامپوزیتی با صفر درصد نانو به ۵ بخش و سایر ساختارهای نانو کامپوزیتی به ۴ بخش تقسیم بندی می‌شوند. در بخش اول که نمودار به صورت خطی است، مواد به صورت الاستیک رفتار می‌کنند. همچنین بر روی نقطه نیروی پیک اولیه ترک‌های کوچک بین لایه‌ای و درون لایه‌ای به عنوان ریزساختار وجود دارد، که تعیین کننده حالت شکست هستند و تمرکز تنش موضعی ایجاد می‌شوند. سپس در بخش دوم به دلیل

#### ۲-۳- تست شبه استاتیک

فیکسچر مورد نیاز برای آزمایش شبه استاتیکی از دو صفحه آلومینیومی مستطیلی شکل به ابعاد  $۲۵۰ \times ۳۵۰$  میلی‌متر مربع و ضخامت ۲۰ میلی‌متر با حفره‌ای مستطیلی شکل به ابعاد  $۹۰ \times ۹۰$  میلی‌متر مربع در مرکز آن ساخته شد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نمونه پانل ساندویچی بین دو صفحه فیکسچر قرار گرفت و با ۸ پیچ ثابت شد تا شرایط مرزی کاملاً گیردار در نمونه ایجاد شود.

آزمون شبه استاتیکی بر روی ساختارهای رگه‌ای ساندویچی با استفاده از دستگاه تست جهانی<sup>۱</sup>، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، انجام شد. ظرفیت بار این دستگاه ۵۰ کیلو نیوتن و سرعت تست آن ۳ میلی‌متر بر دقیقه است. سرعت بارگذاری برای انجام تست شبه استاتیکی در هر ۴ نمونه به صورت ثابت و به مقدار ۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد.

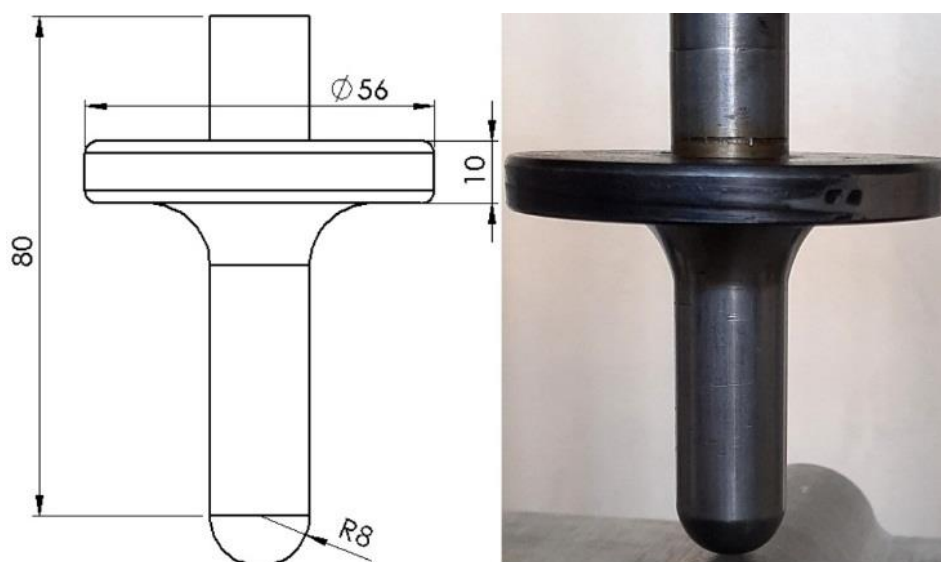
مدل هندسی نفوذ - کننده<sup>۲</sup> مورد استفاده در این آزمایش از نوع ضربه زننده نیم‌کروی است که درون رگه‌های ساندویچی نفوذ می‌کند. شکل ۶، نفوذ - کننده مورد استفاده را نشان می‌دهد. توسط لودسل موجود در بالای محل اتصال نفوذ - کننده، نیروی واکنش و جابجایی فشرده‌سازی

- 1 Universal testing machine
- 2 Indenter



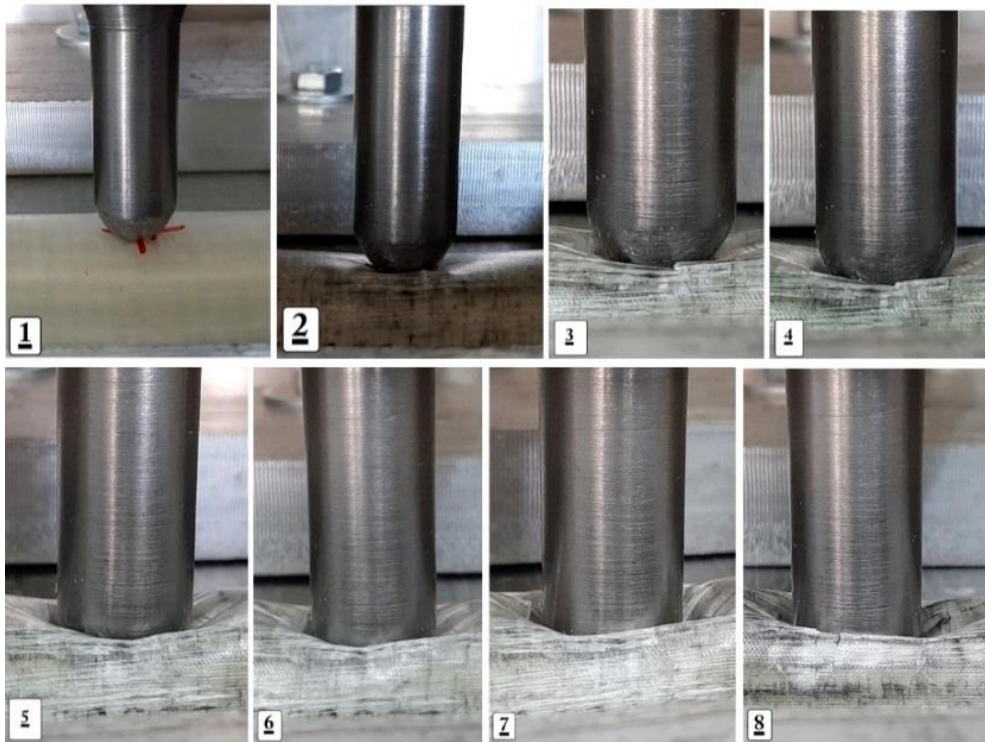
شکل ۵. دستگاه تست شبه استاتیک.

Fig. 5. Quasi-static test device.



شکل ۶. مدل هندسی نفوذ کننده مورد استفاده در تست شبه استاتیک.

Fig. 6. Geometric model of indenter used in quasi-static test.



شکل ۷. فرآیند لهیدگی نمونه تست شده در تست شبه استاتیکی.

Fig. 7. The crushing process of the sample tested in the quasi-static test.

در فشرده‌سازی هستند. از طرفی، نیروی میانگین  $P_m$  با انتگرال گیری از هر مقدار نیروی وابسته بر طول نمونه (جابجایی) له شده، در ناحیه انتشار لهیدگی بصورت زیر می‌باشد.

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

راندمان نیروی لهیدگی<sup>۲</sup>، نسبت میانگین نیروی میانگین  $P_m$  به نیروی پیک اولیه  $P_{peak}$  است. راندمان نیروی لهیدگی یک پارامتر مهم برای ارزیابی یکنواختی نیروی لهیدگی در تست شبه استاتیکی است و بصورت زیر بیان می‌شود.

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

وجود فوم پلی‌اورتان با گسترش لهیدگی به روش تدریجی یا (فاجعه‌بار<sup>۱</sup>)، نیروی نفوذ - کننده دچار افت شدید شده و این مرحله تا شکست کامل سطح بالایی ساختار ادامه یافت. بعد از آن، لوله کامپوزیتی داخل نمونه تحت تأثیر نیروی نفوذ - کننده قرار گرفت و مقاومت کمی را از خود نشان داد. در بخش آخر، زمانی که نیرو کاهش یافته است یعنی نفوذ - کننده به قسمت خلاء وسط نمونه رسیده و فرآیند لهیدگی انجام شده است. همچنین، برای محاسبه خصوصیات قابلیت ضربه‌پذیری از فرمول زیر استفاده می‌شود [۳۷ و ۳۸].

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

در اینجا،  $EA$  جذب انرژی کل (مساحت زیر منحنی نیرو - جابجایی بین فاصله شکست) است.  $F(x)$  با انتگرال گیری از نیروی لهیدگی در جهت محوری بدست می‌آید.  $S_f$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر جابجایی اولیه و نهایی

2 Crush Force Efficiency (CFE)

1 catastrophic



را نشان می‌دهد ادامه یافته است. نقطه C محل شروع خرابی در رگه است. به احتمال زیاد، این خرابی می‌تواند باعث ایجاد ترک عمیق در ماتریس، لایه لایه شدگی یا سوراخ شدگی در ساختار ساندویچی شده باشد. در بخش BC خیز ورق بصورت غیرخطی ادامه پیدا کرده و خرابی‌های مذکور بصورت آهسته گسترش یافتند. در بخش CD با افزایش خیز، در نیروی پیک (نقطه C) رگه ساندویچی دچار گسیختگی ناگهانی شد و افت شدید نیرو در نمودار نیرو - جابجایی مشاهده می‌شود که مقدار آن، بستگی به میزان مقاومت کم فوم پلی‌اورتان است که از خود نشان داده است. این گسیختگی تا نقطه D ادامه پیدا کرد. در بخش DE نفوذ - کننده به قسمت لوله کامپوزیتی مرکز نمونه رسیده و با وجود مقاومت کم آن دچار خیز الاستیکی ناچیزی شده است. این خیز الاستیک ناچیز تا نقطه E ادامه پیدا کرده است. در این نقطه به دلیل مقاومت کم لوله کامپوزیتی، دوباره گسیختگی ناگهانی و افت نیرو در این ناحیه از نمودار مشاهده شد. در بخش آخر EF مشاهده می‌شود که نیروی نفوذ - کننده کاهش پیدا کرده است. در انتهای فرآیند نفوذ نیرو - جابجایی (نقطه F)، تقریباً حالت افقی به خود گرفته و تنها نیروی مقاوم در برابر نفوذ، نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ - کننده و هدف کامپوزیتی است. شکل ۸ (ب) و ۸ (ج) نمودارهای نیرو - جابجایی رگه‌های ساندویچی ۰/۱ و ۰/۳ درصد نانو را به ترتیب با انحراف - استاندارد ۰/۵۳ و ۰/۵۸ کیلو نیوتن نشان می‌دهند. این نمودارها به ۴ بخش کلی تقسیم شده‌اند. ناحیه خطی در بخش AB خیز کلی الاستیک در اثر مقاومتی که رگه ساندویچی از خود نشان می‌دهد را مشخص کرده است. برخلاف نمودار شکل ۸ (الف)، در ساختارهایی که دارای درصدی از نانو هستند به دلیل مقاومت خوبی که از خود نشان داده‌اند، کمتر شاهد خیز ورق بصورت غیر خطی بودیم، بنابراین کمتر دچار آسیب اولیه الیاف در زمان وارد کردن نیرو می‌شوند و خیز الاستیک آنها تا نیروی پیک اولیه بصورت خطی ادامه پیدا کرده است. این بخش BC به دلیل مقاومت کم فوم پلی‌اورتان و افزایش خیز در نقطه B (نیروی پیک)، دچار گسیختگی ناگهانی و افت شدید نیرو در نمودار شده است. بعد از آن نفوذ - کننده به قسمت لوله نانو کامپوزیتی در مرکز هدف کامپوزیتی رسیده و ناحیه DE میزان مقاومت آن را در برابر نیروی وارد شده نشان می‌دهد. در بخش آخر فرآیند نفوذ، نمودار نیرو - جابجایی (نقطه E) حالت تقریباً افقی به خود گرفته و تنها نیروی مقاوم در برابر نفوذ، نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ - کننده و هدف کامپوزیتی است.

بالتر بودن راندمان نیروی لهیدگی یک مشخصه، جذب انرژی ایده آل را نشان می‌دهد و هر چه بالاتر باشد، قابلیت ضربه‌پذیری ساختارها نیز بهتر است [۳۹ و ۴۰]. جذب انرژی ویژه، یکی از مهمترین پارامترها برای ارزیابی ظرفیت جذب انرژی است. SEA، مقدار جذب کل انرژی EA بر وزن نمونه  $W_m$  است و به صورت فرمول زیر نشان داده می‌شود.

$$SEA = \frac{EA}{W_m} \quad (۴)$$

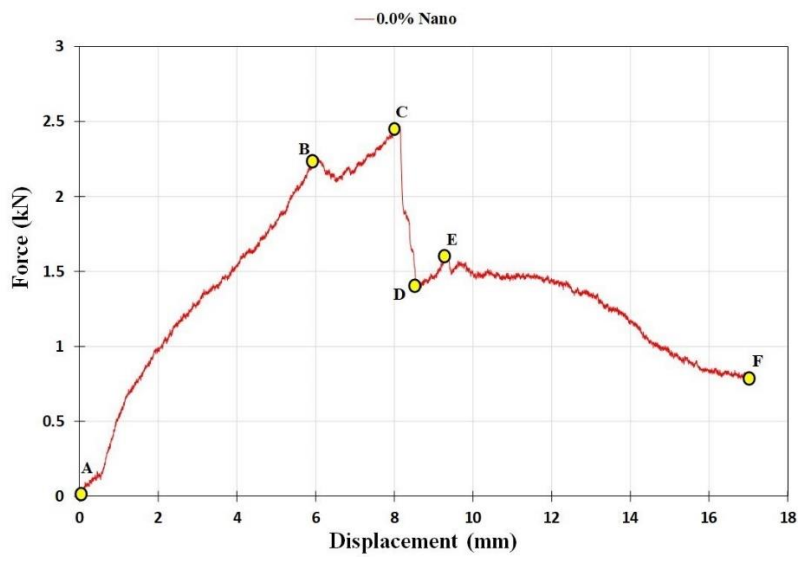
جذب انرژی ویژه، یک عامل مهم برای مقایسه جذب انرژی ساختار کامپوزیتی ساخته شده است، که دارای ویژگی‌های هندسی، پیکربندی و یا مواد پایه‌ای مختلف باشد. هر چه ارزش آن بیشتر باشد، ساختار از نظر جذب انرژی بصورت انبوه کارآمدتر است [۴۱ و ۴۲]. این پارامتر به عنوان سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی هم تعریف می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

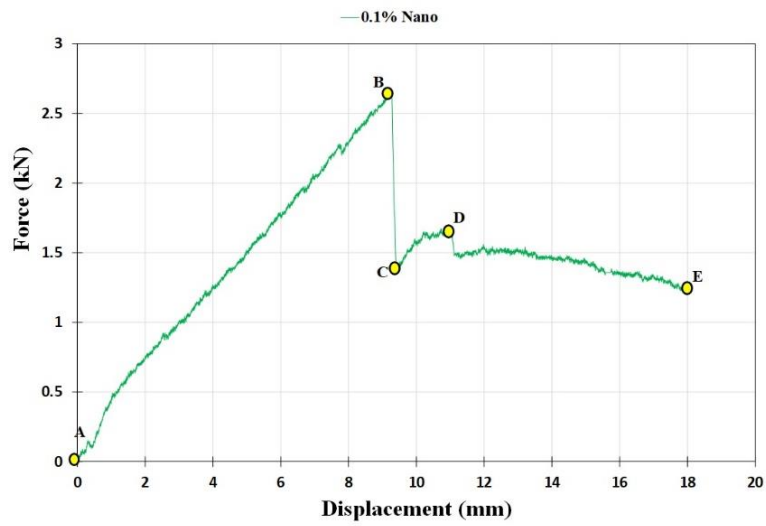
#### ۳-۱- پاسخ نیرو - جابجایی

نمودار نیرو - جابجایی حاصل از نیروی شبه استاتیک، یکی از مهمترین فاکتورها برای ارائه اطلاعات مربوط به له شدن است. نمودارهای نیرو - جابجایی هریک از نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانو در تصاویر شکل ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این، شکل ۹ نشان دهنده نمودار نیرو - جابجایی تمامی نمونه‌ها بصورت کلی و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد.

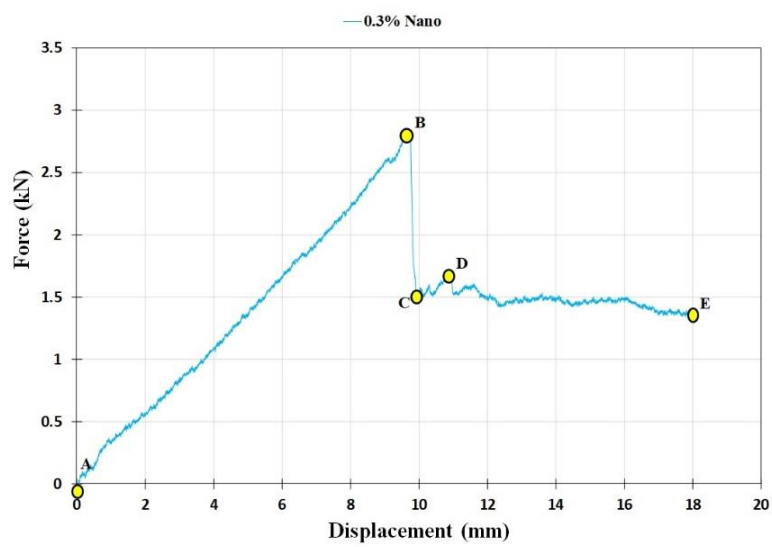
همانطور که در شکل ۸ (الف) مشاهده می‌شود، نمودار نیرو - جابجایی رگه ساندویچی صفر درصد نانو با انحراف - استاندارد ۰/۵۲ کیلو نیوتن تحت بار شبه استاتیک را نشان می‌دهد. این نمودار به ۵ بخش کلی تقسیم شده است. ابتدای نمودار، بخش اول خطی AB قرار دارد که در این ناحیه هدف کامپوزیتی در برابر نیروی شبه استاتیک از خود مقاومت نشان داده و دچار خیز کلی الاستیک شده و گسیختگی یا خرابی در هدف ایجاد نشده است. در نقطه B به دلیل نیروی نفوذ - کننده، الیاف و رزین رگه ساندویچی دچار آسیب شده که نمودار آن کمی کاهش یافته است؛ اما بصورت کامل تخریب نشده و مقاومت ساختار ساندویچی هدف تا نقطه C که میزان نیروی پیک



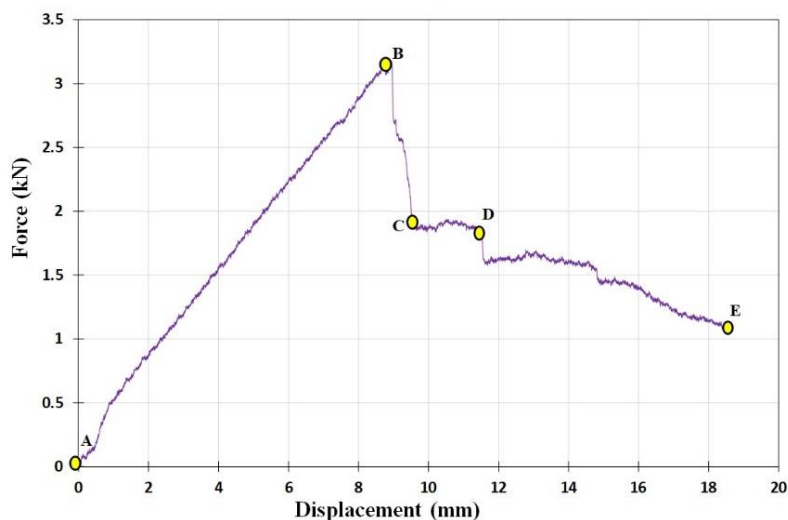
(الف)



(ب)



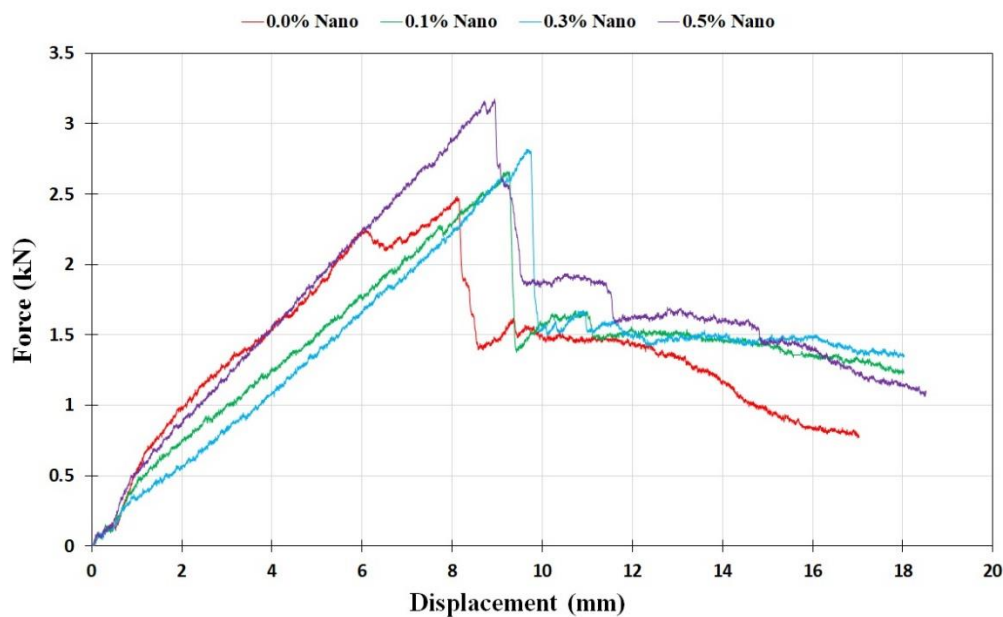
(ج)



(د)

شکل ۸. نمودار نیرو - جابجایی حاصل از بارگذاری شبه استاتیکی، (الف) ساختار ساندویچی بدون درصد نانو، (ب) ساختار ساندویچی با ۱ درصد نانو، (ج) ساختار ساندویچی با ۳ درصد نانو، (د) ساختار ساندویچی با ۵ درصد نانو.

Fig. 8. Force-displacement diagram resulting from quasi-static loading, (a) sandwich structure without nano%, (b) sandwich structure with 0.1% nano, (c) sandwich structure with 0.3% nano, (d) sandwich structure with 5 0.0% nano.



شکل ۹. مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی ساختارهای ساندویچی با درصدهای مختلف نانو ذرات تحت بارگذاری شبه استاتیکی.

Fig. 9. Comparison of force-displacement diagrams of sandwich structures with different percentages of nanoparticles under quasi-static loading.

شکست لهدیگی در تست شبه استاتیک است که در کارهای گذشته از آن استفاده شده است [۳۸ و ۴۱ و ۴۳]. همانطور که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌شود، ساختار رگه ساندویچی با ۰/۵ درصد نانو ذرات گرافن به مقدار ۳/۱۷۷ کیلونیوتن به عنوان حداکثر نیروی اولیه است. از طرفی، ساختار رگه ساندویچی بدون نانو به مقدار ۲/۴۸۵ کیلونیوتن به عنوان حداقل نیروی اولیه بدست آمده است.

نیروی لهدیگی میانگین  $P_m$ ، مقدار متوسط هر برنامه نیرو در مرحله بعد از شکست را نشان می‌دهد و شاخص خوبی از توانایی جذب انرژی کل سازه است [۳۸ و ۴۴]. با توجه به شکل ۱۰ (ب)، ساختار رگه ساندویچی با ۰/۵ درصد نانو به دلیل حالت له شدگی تدریجی، به عنوان بیشترین میانگین نیروی لهدیگی مشخص شده است. با این وجود، ساختار رگه ساندویچی با ۰/۵ درصد نانو، هم از نظر نیروی پیک و هم از نظر نیروی میانگین با ارائه نتایج مورد انتظار نسبت به ساختارهای دیگر با درصدهای مختلف نانو، ثابت شد که این نوع ساختار رگه‌ای با درصد نانو ذرات گرافن مشخص، می‌تواند بصورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرد.

راندمان نیروی لهدیگی، که نسبت بین نیروی لهدیگی میانگین  $P_m$  و نیروی پیک اولیه  $P_{peak}$  است، شاخص مفیدی برای اندازه‌گیری عملکرد جاذب [۴۵] و ارزیابی پایداری فرآیند له شدگی [۴۳ و ۴۴ و ۴۶] می‌باشد. هرچه مقدار راندمان نیروی لهدیگی پایین‌تر باشد به آن معنی است که تأثیر اثر ضربه اولیه بر روی ساختار بسیار واضح است و برای ساختارهای محافظ مناسب نیست؛ از طرفی هرچه راندمان نیروی لهدیگی بالاتر باشد به آن معنی است که افزایش جذب انرژی بیشتر و قابلیت ضربه‌پذیری سازه بهتر می‌شود که برای بدست آوردن حداقل خسارات در آزمایشات مد نظر می‌باشد [۴۰]. شکل ۱۱ راندمان نیروی لهدیگی در ساختارها را با درصدهای مختلف نانو ذرات گرافن نشان می‌دهد. ساختارهای رگه ساندویچی با درصدهای صفر درصد، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد نانو حداکثر بازده نیرو را به ترتیب ۱/۴۸۲، ۱/۲۳۷، ۱/۰۵۴ و ۱/۳۰۲ درصد نشان دادند.

### ۳-۲-۲-۲-۲ قابلیت جذب انرژی

انرژی جذب شده کل، سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی است که در شکل ۱۲ (الف) نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده بیشترین ظرفیت جذب انرژی مربوط به ساختار رگه‌ای با نسبت ۰/۵ درصد نانو ذرات گرافن است. علاوه بر این، تمامی ساختارهای ساندویچی جذب انرژی ویژه بالاتری نسبت به ساختار رگه‌ای با ۰/۳ درصد نانو داشتند. به طور کلی، با

شکل ۸ (د) نمودار نیرو - جابجایی رگه ساندویچی ۰/۵ درصد نانو با انحراف استاندارد ۰/۶۶ کیلو نیوتن را نشان می‌دهد. ابتدای نمودار، بخش خطی AB قرار دارد. در این ناحیه رگه ساندویچی هدف، دچار خیز الاستیک شده و به دلیل مقاومت خوب رزین که حاوی نانو ذرات گرافن بیشتری است، مقدار آسیب به الیاف بسیار ناچیز بوده و خیز الاستیک آن تا نیروی پیک (نقطه B) بصورت خطی ادامه پیدا کرده است. در بخش BC به دلیل مقاومت کم فوم پلی‌اورتان و همچنین افزایش خیز در نقطه B (نیروی پیک)، گسیختگی ناگهانی و افت شدید نیرو در نمودار مشاهده شد. سپس، نفوذ کننده به قسمت لوله ساختار نانو کامپوزیتی در مرکز هدف نیرو وارد کرده. ناحیه CD میزان مقاومت لوله نانو کامپوزیتی در نمودار را نشان می‌دهد. این مقدار بصورت تقریباً خطی مشخص شده است. در آخر فرآیند نفوذ نیرو - جابجایی (نقطه E)، حالت تقریباً خطی افقی رو به پایین به خود گرفته و تنها نیروی مقاومت در برابر نفوذ، نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ کننده و هدف کامپوزیتی است. شکل ۹ مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی کلی برای رگه‌های ساندویچی با درصدهای مختلف نانو ذرات گرافن را نشان می‌دهد. نمودار نیرو - جابجایی هدف کامپوزیتی با صفر درصد نانو، به دلیل عدم استفاده از نانو ذرات گرافن در رزین آن، دارای مقاومت و خیز الاستیک کمتری نسبت به هدف‌های کامپوزیتی با درصدهای مختلف نانو ذرات است. از طرفی، ساختار رگه ساندویچی با ۰/۵ درصد نانو ذرات گرافن، دارای بیشترین مقاومت است. در بخش آخر فرآیند نفوذ، به دلیل عدم استفاده از نانو ذرات گرافن در لوله کامپوزیتی ساخته شده برای اولین هدف مذکور (ساختار رگه‌ای صفر درصد نانو)، میزان افت نیرو شدت بیشتری گرفته است.

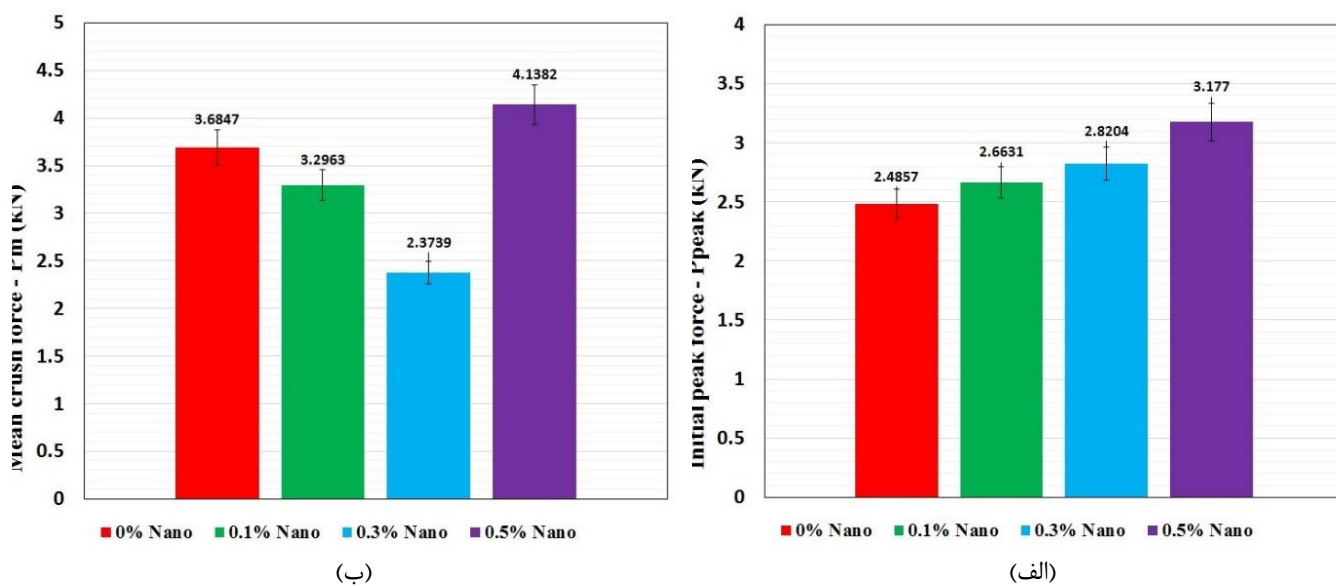
### ۳-۲-۲-۳ قابلیت ضربه‌پذیری

نیروی لهدیگی پیک و جذب انرژی ویژه دو پارامتر مهم هستند که برای ارزیابی میزان قابلیت ضربه‌پذیری سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیروی پیک بسیار مورد توجه می‌باشد، زیرا قابلیت سازه را برای این که در اثر بارگذاری شبه استاتیک یا ضربه سرعت پایین تغییر شکل دائمی نداشته باشد، اندازه‌گیری می‌کند، که مربوط به کاهش ساختار و آسیب است [۴۲]. از طرفی، جذب انرژی ویژه بیانگر کارایی و قابلیت جذب انرژی در طی تغییر شکل ساختاری است [۴۱].

### ۳-۲-۱-۱ راندمان نیروی لهدیگی

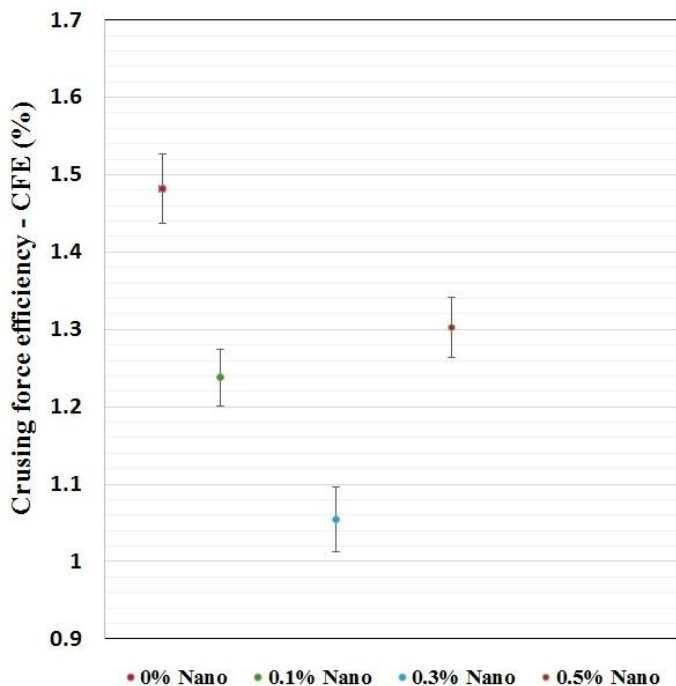
نیروی پیک اولیه  $P_{peak}$  یک پارامتر مهم برای ارزیابی آغاز روند





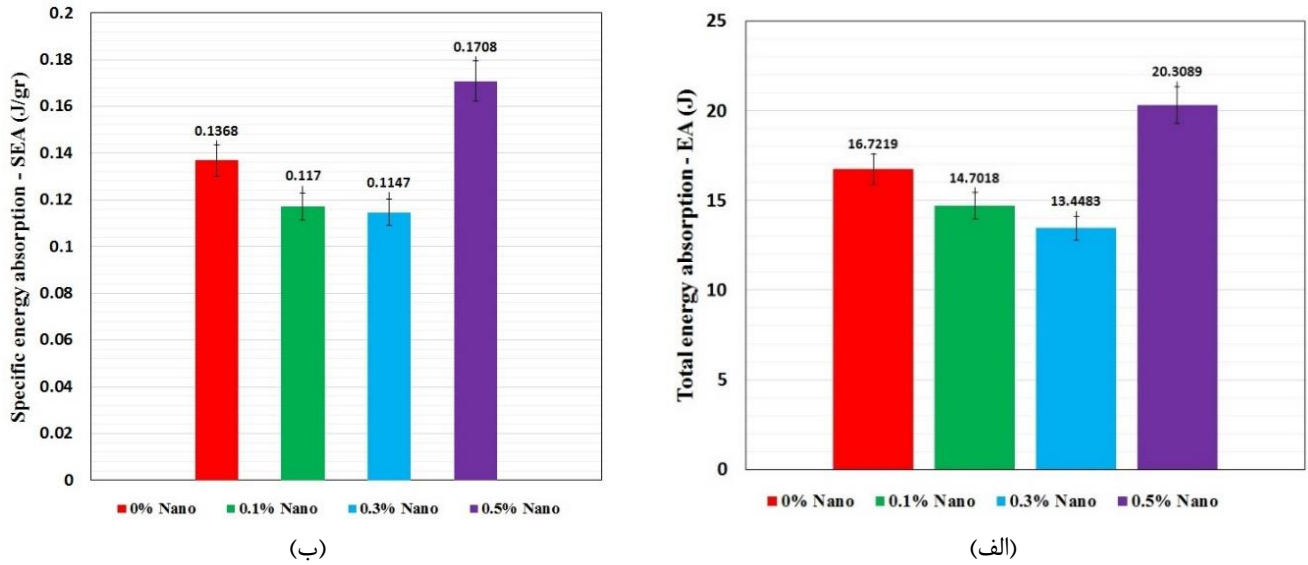
شکل ۱۰. (الف) نیروی پیک اولیه، (ب) نیروی لهیدگی میانگین.

Fig. 10. (a) Initial peak force, (b) average crushing force.



شکل ۱۱. راندمان نیروی لهیدگی در تست شبه استاتیکی.

Fig. 11. Crushing force efficiency in quasi-static test.



شکل ۱۲. (الف) انرژی جذب کل، (ب) جذب انرژی ویژه.

Fig. 12. (a) Total absorption energy, (b) absorption specific energy.

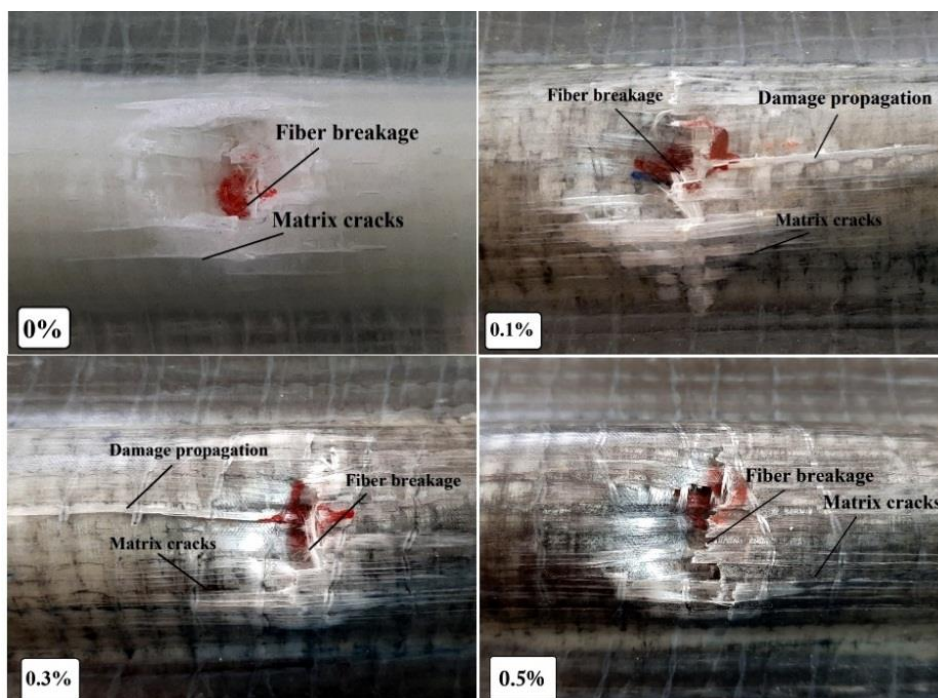
جدول ۳. ویژگی‌های جذب انرژی ساختارهای رگه‌ای.

Table 3. Characteristics of energy absorption of vein structures.

$W_m(\text{gr})$	$SEA(\text{J/gr})$	$CFE(\%)$	$P_{peak}(\text{kN})$	$P_m(\text{kN})$	$EA(\text{J})$	نمونه‌ها
۱۲۲/۲۰	۰/۱۳۶	۱/۴۸۲	۲/۴۸۵	۳/۶۸۴	۱۶/۷۲۱	صفر درصد
۱۲۵/۵۸	۰/۱۱۷	۱/۲۳۷	۲/۶۶۳	۳/۲۹۶	۱۴/۷۰۱	۰/۱ درصد
۱۱۷/۲۰	۰/۱۱۴	۱/۰۵۴	۲/۸۲۰	۲/۳۷۳	۱۳/۴۴۸	۰/۳ درصد
۱۱۸/۸۸	۰/۱۷۰	۱/۳۰۲	۳/۱۷۷	۴/۱۳۸	۲۰/۳۰۸	۰/۵ درصد

۰/۰۵۳، ۰/۰۳۴ و ۰/۰۵۶ درصد نسبت به ساختار رگه‌ای با ۰/۵ درصد نانو ذرات کاهش یافتند. این امر مشخص می‌کند که اگر میزان درصد نانو ذرات گرافن در این نوع ساختار رگه‌ای ساندویچی از یک مقداری کمتر باشد، قابلیت شکست این نوع ساختار ساندویچی بیشتر می‌شود و از طرفی اگر میزان درصد نانو ذرات بیشتر باشد، باعث بهبود قابلیت شکست آنها می‌شود. سهم فوم پلی‌اورتان در جذب انرژی نیرو بسیار مهم است. تأثیر وجود فوم پلی‌اورتان در داخل نمونه‌ها باعث جلوگیری از کاهش شدید میزان نیرو بعد از نقطه پیک می‌شود. طبق مقایسه نمودارها با یکدیگر مشاهده شد که میزان مقاومت ساختارهای رگه‌ای ساندویچی بعد از رسیدن به نیروی پیک اولیه، دچار کاهش یکنواخت شده‌اند. این در صورتی است که در ساختارهای

افزایش ضخامت دیواره سازه‌های کامپوزیتی، جذب انرژی افزایش می‌یابد [۴۷]. محاسبه پارامترهای شاخص در جذب انرژی ساختارهای رگه‌ای در جدول ۳ آورده شده است. نتایج جذب انرژی ویژه در شکل ۱۲ (ب) نشان داده شده است، که این نتایج اطلاعات بهتری را برای درک جذب انرژی فراهم می‌کند. پانلهای ساندویچی با صفر درصد، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد نانو ذرات گرافن به ترتیب دارای مقادیر جذب انرژی ویژه ۰/۱۱۷، ۰/۱۳۶، ۰/۱۱۴ و ۰/۱۷۰ ژول می‌باشند که در اینجا ساختار رگه‌ای با ۰/۵ درصد نانو ذرات گرافن دارای بیشترین جذب انرژی ویژه و ساختار رگه‌ای با ۰/۳ درصد نانو ذرات گرافن دارای کمترین جذب انرژی ویژه می‌باشد. با این وجود، جذب انرژی ویژه در نمونه‌های صفر درصد، ۰/۱ و ۰/۳ درصد نانو، به ترتیب



شکل ۱۳. حالت‌های آسیب در ساختارهای رگه‌ای تحت بارگذاری شبه استاتیکی.

Fig. 13. Damage modes in vein structures under quasi-static loading.

ترک ماتریس، آسیب فوم و لایه لایه شدگی (تورق) مشاهده شد. با توجه به شکل ۱۳، میزان خسارت در تمامی ساختارها تقریباً یکسان می‌باشد. علاوه، در تمامی ساختارها شکستگی الیاف و ترک ماتریس مشترک می‌باشد. در ساختارهای ساندویچی با ۱/۰ و ۳/۰ درصد نانو، انتشار آسیب<sup>۴</sup> در الیاف مشاهده شد، و در ساختار ساندویچی با صفر درصد و ۵/۰ درصد نانو ذرات، انتشار آسیب در الیاف وجود ندارد. این موضوع نشان دهنده آن است که وجود نانو ذرات گرافن در رزین اگر از یک حدی کمتر باشد باعث کاهش مقاومت الیاف و ماتریس می‌شود و اگر مقدار آن در رزین به حد قابل قبولی باشد باعث مقاومت الیاف و ماتریس می‌شود.

شکل ۱۴ تصاویر برش خورده ساختارهای رگه‌ای ساندویچی با هسته فوم را نشان می‌دهد که در محل آسیب برش داده شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در هنگام آزمایش شبه استاتیکی و فشار نفوذ – کننده در داخل رگه‌های ساندویچی، جداشدگی بین الیاف و فوم<sup>۵</sup> رخ داده است. لایه‌های کامپوزیتی بالایی رگه به دلیل فشار نفوذ کننده، علاوه بر آسیب قابل توجهی که در قالب شکستگی الیاف متحمل شدند، لایه لایه شدگی نیز در فصل مشترک بین لایه‌ها مشاهده شده است. دلیل این امر

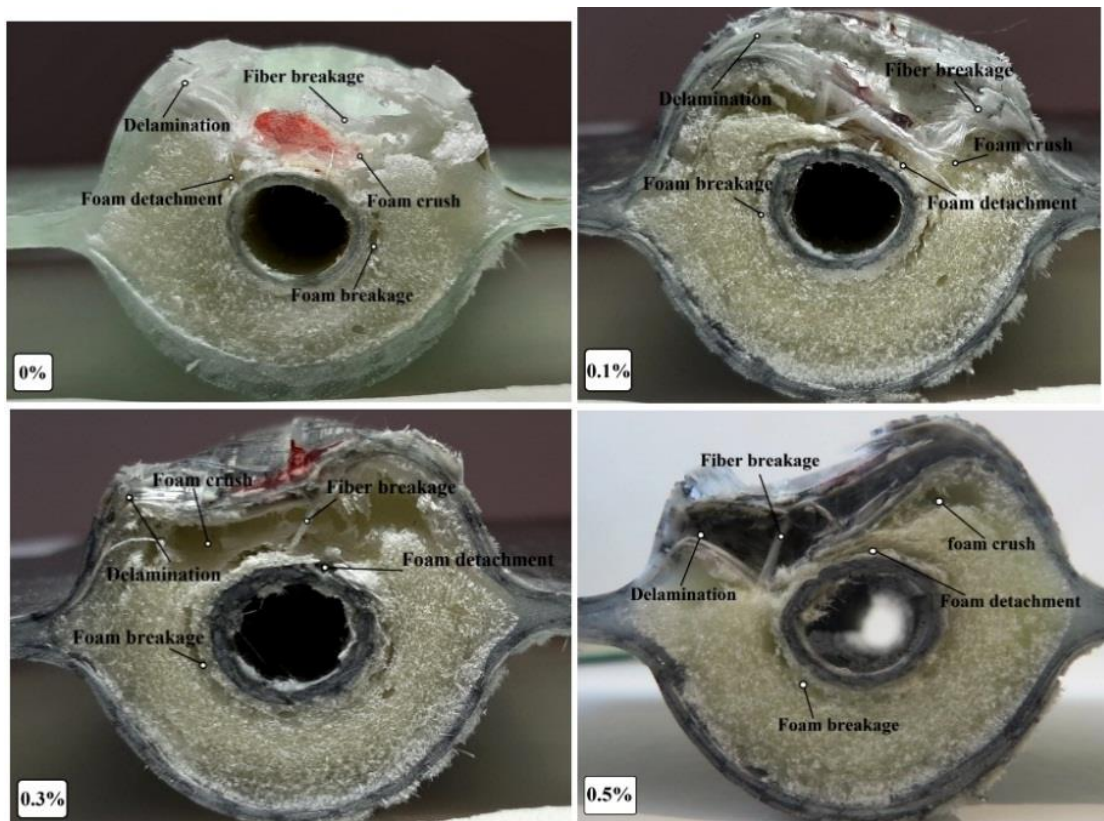
دارای نانو ذرات گرافن، هیچ تأثیری در میزان کاهش یا افزایش مقاومت فوم پلی‌اورتان حاصل نشده است و دلیل آن مقاومت خوب نانو ذرات گرافن می‌باشد. بنابراین وجود فوم پلی‌اورتان در مرکز ساختارهای ساندویچی ساخته شده منجر به افزایش کارایی ساختارها از لحاظ مقدار ظرفیت جذب انرژی می‌شود. همچنین فوم پلی‌اورتان باعث محدود شدن گسترش بیشتر آسیب در این نوع از ساختارها شده است.

### ۳-۳- آنالیز شکست

هنگامی که یک جسم خارجی بر روی یک پانل ساندویچی با هسته فوم تأثیر می‌گذارد، چندین حالت آسیب شامل شکستگی الیاف<sup>۱</sup>، ترک ماتریس<sup>۲</sup> و لایه لایه شدگی<sup>۳</sup> اتفاق می‌افتد. به طور کلی، حالت آسیب به پارامترهایی همچون ضربه زننده و خواص مواد بستگی دارد [۴۸]. شکل ۱۳ تصاویر بازرسی بصری از ساختار رگه‌ای ساندویچی تحت بارگذاری شبه استاتیکی است که نشان دهنده نمای بالا سطح آسیب دیده می‌باشند. در این مطالعه، با بررسی دقیق نمونه‌ها، حالت آسیب اولیه یعنی شکستگی الیاف و به دنبال آن

- 4 Damage propagation
- 5 Foam detachment

- 1 Fiber breakage
- 2 Matrix cracks
- 3 Delamination



شکل ۱۴. تصاویر نمونه‌های برش خورد در محل آسیب.

Fig. 14. Pictures of cut samples at the place of damage.

#### ۴- آنالیز FE-SEM

پراکندگی نانو ذرات در رزین اپوکسی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. ناهمگونی<sup>۳</sup> می‌تواند منجر به انباشتگی<sup>۴</sup> نانو ذرات شود که می‌تواند به عنوان عوامل تنش‌زا<sup>۵</sup> عمل کرده و خواص مکانیکی را بدتر کند [۴۹]. برای ارزیابی پراکندگی نانو ذرات در داخل رزین و مطالعه مکانیزم های شکست از آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۶</sup> گسیل میدانی استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، به منظور ارزیابی توزیع نانو ذرات گرافن در ساختار پلیمری، ساختارهای رگه‌ای حاوی نانو ذرات گرافن با درصد های وزنی مختلف نانو با استفاده از دستگاه آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی تحلیل شدند. شکل ۱۵، توزیع نانو ذرات در قسمتی از ماتریس را برای درصد های وزنی مختلف

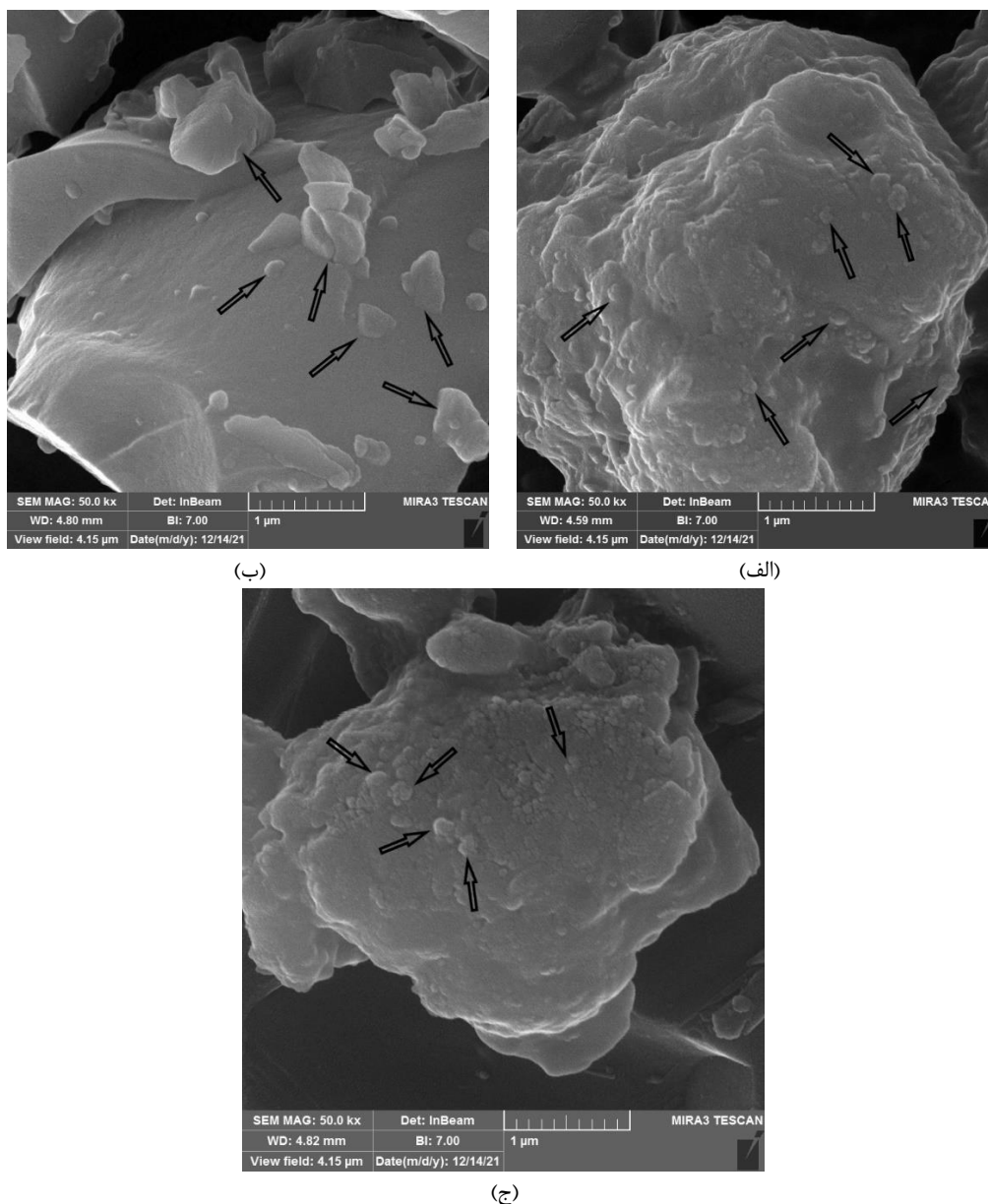
می‌تواند این باشد که تمام لایه‌ها کامپوزیتی جهت گیری متفاوتی داشتند و این رفتار در تمامی نمونه یافت می‌شود [۴۸]. علاوه براین، در اثر فشار نفوذ کننده، در هسته فوم آسیب‌هایی از جمله له شدگی فوم<sup>۱</sup> و شکستگی فوم<sup>۲</sup> مشاهده شد.

عیوب ایجاد شده در لایه‌ها مانند توزیع غیریکنواخت رزین در نمونه‌ها، چسبندگی ضعیف بین لایه‌های کلی کامپوزیت و وجود خلاء نقش مهمی در حالت خرابی ساختارهای ساندویچی با هسته فوم ایفا می‌کنند که در شرایط ضربه یا نیرو موجب لایه لایه شدگی و تغییر شکل می‌شوند [۴۸]. این عیوب می‌توانند بر رفتار مکانیکی پانل‌های ساندویچی با هسته فوم شامل سختی و استحکام تأثیر گذار باشند.

3 Inhomogeneity  
4 Agglomeration  
5 Stress raisers  
6 Field Emission Scanning Electron Microscopes (FE-SEM)

1 Foam crush  
2 Foam breakage





شکل ۱۵. پراکندگی نانو ذرات در ساختارهای ساندویچی، (الف) ۰/۱ درصد نانو، (ب) ۰/۳ درصد نانو، (ج) ۰/۵ درصد نانو.

Fig. 15. Dispersion of nanoparticles in sandwich structures, (a) 0.1% nano, (b) 0.3% nano, (c) 0.5% nano.

ماتریس بسیار کوچکتر و جزئی هستند. اما در ساختار ساندویچی حاوی ۰/۳ درصد نانو ذرات مقدار انباشتگی موجود در ماتریس کمی بزرگتر می باشد. با وجود این که، شرایط میکس نانو ذرات با رزین برای هر سه وضعیت یکسان بوده است اما ساختار رگه ای حاوی ۰/۳ درصد نانو ذرات نسبت به سایر ساختارها دارای انباشتگی بزرگتری می باشد.

نانو ذرات گرافن نشان می دهد. تراکم نانو ذرات اغلب در کامپوزیتها با بالا بودن محتوای نانو ذرات اتفاق می افتد و معمولاً به عنوان دلیل اصلی تخریب خواص مکانیکی در نظر گرفته می شود [۱۷]. همانطور که در تصاویر دیده می شود، نانو ذرات گرافن به خوبی در ماتریس پراکنده شده اند. با این وجود، میزان انباشتگی نانو ذرات قابل توجه بود. در ساختارهای نانو کامپوزیتی حاوی درصدهای وزنی ۰/۱ و ۰/۵ درصد نانو، مقدار انباشتگی موجود در

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر نانو ذرات گرافن بر مقاومت ساختار پانل ساندویچ جدید، به عنوان طرحی الهام گرفته شده از ساختار بال سنجاقک، تحت بارگذاری شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. ساختارهای رگه‌ای ساندویچی، ساخته شده از پوسته‌های لایه‌ای شده شیشه / اپوکسی تک جهت با روش تزریق خلاء ساخته و به یک هسته فوم پلی‌اورتان پیوند داده شده‌اند. جهت انجام آزمایش شبه استاتیک از یک نفوذ کننده با مدل هندسی نیم کره استفاده شد. با توجه به نتایج گزارش شده، یک توافق خوبی از نظر تاریخچه نمودار نیرو - جابجایی بدست آمد. از طرفی، ویژگی‌های قابلیت ضربه‌پذیری نمونه‌های تست شده شامل راندمان نیروی له شدگی و قابلیت جذب انرژی نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که وجود ساختار رگه‌ای ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان در اثر نیروهای شبه استاتیکی می‌تواند انتشار آسیب را محدود کنند و بقیه ساختار را سالم باقی بگذارند. با این وجود، با اضافه کردن نانو ذرات گرافن به رزین ساختار مورد نظر در درصدهای پایین، مقاومت چندان از خود نشان ندادند، اما زمانی که میزان نانوذرات گرافن از یک حدی افزایش پیدا کرد، این نوع ساختار مقاومت قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان داد. در ساختار پانل ساندویچی با ۰/۱ درصد نانو، رفتار پایدارتری در پاسخ‌های نیرو - جابجایی توسط حالت لهیدگی مشاهده شد. برای ساختار رگه‌ای ساندویچی با ۰/۵ درصد نانو ذرات به دلیل مقاومت خوب آن، مقدار نیروی پیک اولیه افزایش یافت و ساختار ساندویچی صفر درصد نانو دارای کمترین مقدار نیروی پیک اولیه است که نشان دهنده مقاومت کم آن می‌باشد. بعد از مشاهده محل آسیب رگه ساندویچی در نمای برش خورده، آسیب‌هایی از جمله شکستگی الیاف و به دنبال آن ترک ماتریس و لایه لایه شدگی در لایه‌های کامپوزیتی و نانو کامپوزیتی مشاهده شد. از طرفی، بعد از فشار نفوذ کننده در تست شبه استاتیک، آسیب‌هایی از جمله له شدگی فوم و شکستگی فوم در هسته فوم و جدا شدگی بین فوم و الیاف نیز ایجاد گردید.

## منابع

- [1] J. Sun, B. Bhushan, The structure and mechanical properties of dragonfly wings and their role on flyability, *Comptes Rendus Mécanique*, 340(1-2) (2012) 3-17.
- [2] Y. Chen, X. Wang, H. Ren, X. Li, An organic junction between the vein and membrane of the dragonfly wing, *Chinese Science Bulletin*, 56(16) (2011) 1658-1660.
- [3] X.-S. Wang, Y. Li, Y.-F. Shi, Effects of sandwich microstructures on mechanical behaviors of dragonfly wing vein, *Composites Science and Technology*, 68(1) (2008) 186-192.
- [4] Y. Chen, X. Wang, H. Ren, H. Yin, S. Jia, Hierarchical dragonfly wing: Microstructure-biomechanical behavior relations, *Journal of Bionic Engineering*, 9(2) (2012) 185-191.
- [5] T. Sadowski, J. Bęc, Effective properties for sandwich plates with aluminium foil honeycomb core and polymer foam filling—Static and dynamic response, *Computational Materials Science*, 50(4) (2011) 1269-1275.
- [6] H. Molatefi, H. Mozafari, Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method, *Modares Mechanical Engineering*, 14(15) (2015) 177-185.
- [7] V. Deshpande, N. Fleck, Multi-axial yield behaviour of polymer foams, *Acta materialia*, 49(10) (2001) 1859-1866.
- [8] O.A. Mocian, D.M. Constantinescu, M. Sandu, D. Rosu, M. Feuchter, Impact response of sandwich panels with polyurethane and polystyrene core and composite facesheets, *Materials Today: Proceedings*, 12 (2019) 192-199.
- [9] A. McCracken, P. Sadeghian, Partial-composite behavior of sandwich beams composed of fiberglass facesheets and woven fabric core, *Thin-walled structures*, 131 (2018) 805-815.
- [10] S. Zangana, J. Epaarachchi, W. Ferdous, J. Leng, A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon fibres—Investigation under low-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 137 (2020) 103430.
- [11] Y. Zhu, Y. Sun, Low-velocity impact response of multilayer foam core sandwich panels with composite face sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 209 (2021) 106704.
- [12] J. Gustin, A. Joneson, M. Mahinfalah, J. Stone, Low

- [21] A. Safamanesh, S.M. Mousavi, H. Khosravi, E. Tohidlou, On the low-velocity and high-velocity impact behaviors of aramid fiber/epoxy composites containing modified-graphene oxide, *Polymer Composites*, 42(2) (2021) 608-617.
- [22] E. Kazemi-Khasragh, F. Bahari-Sambran, S.M.H. Siadati, R. Eslami-Farsani, S. Arbab Chirani, The effects of surface-modified graphene nanoplatelets on the sliding wear properties of basalt fibers-reinforced epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 136(39) (2019) 47986.
- [23] B. Zhang, R. Asmatulu, S.A. Soltani, L.N. Le, S.S. Kumar, Mechanical and thermal properties of hierarchical composites enhanced by pristine graphene and graphene oxide nano-inclusions, *Journal of Applied Polymer Science*, 131(19) (2014).
- [24] B. Hülägü, H.Y. Ünal, V. Acar, T. Khan, M.R. Aydın, O.A. Aydın, S. Gök, Y. Pekbey, H. Akbulut, Low-velocity impact and bending response of graphene nanoparticle-reinforced adhesively bonded double strap joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(22) (2021) 2391-2409.
- [25] D. Ruan, G. Lu, Y.C. Wong, Quasi-static indentation tests on aluminium foam sandwich panels, *Composite Structures*, 92(9) (2010) 2039-2046.
- [26] S. Cheng, X. Zhao, Y. Xin, S. Du, H. Li, Quasi-static localized indentation tests on integrated sandwich panel of aluminum foam and epoxy resin, *Composite Structures*, 129 (2015) 157-164.
- [27] R. Vignjevic, J. Campbell, K. Hughes, M. Orłowski, S. Garcea, P. Withers, J. Reed, Soft body impact resistance of composite foam core sandwich panels with unidirectional corrugated and tubular reinforcements, *International Journal of Impact Engineering*, 132 (2019) 103320.
- [28] K. Choupani Chaydarreh, A. Shalbfan, J. Welling, Effect of ingredient ratios of rigid polyurethane foam on foam core panels properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 134(17) (2017).
- velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites, *Composite structures*, 69(4) (2005) 396-406.
- [13] A. Wada, T. Kawasaki, Y. Minoda, A. Kataoka, S. Tashiro, H. Fukuda, A method to measure shearing modulus of the foamed core for sandwich plates, *Composite Structures*, 60(4) (2003) 385-390.
- [14] D. Horrigan, R. Aitken, G. Moltschaniwskyj, Modelling of crushing due to impact in honeycomb sandwiches, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2(2) (2000) 131-151.
- [15] S. Zhu, G.B. Chai, Damage and failure mode maps of composite sandwich panel subjected to quasi-static indentation and low velocity impact, *Composite structures*, 101 (2013) 204-214.
- [16] V. Dikshit, A.P. Nagalingam, G.D. Goh, S. Agarwala, W.Y. Yeong, J. Wei, Quasi-static indentation analysis on three-dimensional printed continuous-fiber sandwich composites, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(2) (2021) 385-404.
- [17] F. Zhang, R. Mohammed, B. Sun, B. Gu, Damage behaviors of foam sandwiched composite materials under quasi-static three-point bending, *Applied Composite Materials*, 20(6) (2013) 1231-1246.
- [18] W. Zhang, Q. Qin, J. Li, K. Li, L. Poh, Y. Li, J. Zhang, S. Xie, H. Chen, J. Zhao, Deformation and failure of hybrid composite sandwich beams with a metal foam core under quasi-static load and low-velocity impact, *Composite Structures*, 242 (2020) 112175.
- [19] H. Amirbeygi, H. Khosravi, E. Tohidlou, Reinforcing effects of aminosilane-functionalized graphene on the tribological and mechanical behaviors of epoxy nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 136(18) (2019) 47410.
- [20] M. Rezvani Tavakol, M. Yarmohammad Tooski, M. Jabbari, M. Javadi, Effect of graphene nanoparticles on the strength of sandwich structure inspired by dragonfly wings under low-velocity impact, *Polymer Composites*, 42(10) (2021) 5249-5264.

- study on intraply fiber hybridization of filament wound composite pipes subjected to quasi-static compression loading, *Polymer Testing*, 79 (2019) 106082.
- [39] S. Mohsenizadeh, R. Alipour, M. Shokri Rad, A. Farokhi Nejad, Z. Ahmad, Crashworthiness assessment of auxetic foam-filled tube under quasi-static axial loading, *Materials & Design*, 88 (2015) 258-268.
- [40] F. Wu, X. Xiao, J. Yang, X. Gao, Quasi-static axial crushing behaviour and energy absorption of novel metal rope crochet-sintered mesh tubes, *Thin-Walled Structures*, 127 (2018) 120-134.
- [41] Q. Liu, H. Xing, Y. Ju, Z. Ou, Q. Li, Quasi-static axial crushing and transverse bending of double hat shaped CFRP tubes, *Composite Structures*, 117 (2014) 1-11.
- [42] F. Tarlochan, S. Ramesh, Composite sandwich structures with nested inserts for energy absorption application, *Composite Structures*, 94(3) (2012) 904-916.
- [43] D.Y. Hu, M. Luo, J.L. Yang, Experimental study on crushing characteristics of brittle fibre/epoxy hybrid composite tubes, *International Journal of Crashworthiness*, 15(4) (2010) 401-412.
- [44] L.N.S. Chiu, B.G. Falzon, D. Ruan, S. Xu, R.S. Thomson, B. Chen, W. Yan, Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading, *Composite Structures*, 131 (2015) 90-98.
- [45] J.-S. Kim, H.-J. Yoon, K.-B. Shin, A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers, *International Journal of Impact Engineering*, 38(4) (2011) 198-207.
- [46] J. Xu, Y. Ma, Q. Zhang, T. Sugahara, Y. Yang, H. Hamada, Crashworthiness of carbon fiber hybrid composite tubes molded by filament winding, *Composite Structures*, 139 (2016) 130-140.
- [47] A. Othman, S. Abdullah, A. Ariffin, N. Mohamed, Investigating the quasi-static axial crushing behavior of polymeric foam-filled composite pultrusion square tubes, *Materials & Design*, 63 (2014) 446-459.
- [29] H. Wang, T.-T. Li, L. Wu, C.-W. Lou, J.-H. Lin, Spacer fabric/flexible polyurethane foam composite sandwiches: Structural design and quasi-static compressive, bursting and dynamic impact performances, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(4) (2021) 1366-1382.
- [30] T. Khan, V. Acar, M.R. Aydin, B. Hülügü, H. Akbulut, M.Ö. Seydibeyoğlu, A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores, *Polymer Composites*, 41(6) (2020) 2355-2400.
- [31] X. Zeng, T. Tang, J. An, X. Liu, H. Xiang, Y. Li, C. Yang, T. Xia, Integrated preparation and properties of polyurethane-based sandwich structure composites with foamed core layer, *Polymer Composites*, 42(9) (2021) 4549-4559.
- [32] F. Zhao, L. Wu, Z. Lu, J.-H. Lin, Q. Jiang, Design of shear thickening fluid/polyurethane foam skeleton sandwich composite based on non-Newtonian fluid solid interaction under low-velocity impact, *Materials & Design*, 213 (2022) 110375.
- [33] D. Zangani, M. Robinson, A. Gibson, Progressive failure of composite hollow sections with foam-filled corrugated sandwich walls, *Applied Composite Materials*, 14(5) (2007) 325-342.
- [34] H. Rajabi, M. Moghadami, A. Darvizeh, Investigation of microstructure, natural frequencies and vibration modes of dragonfly wing, *Journal of Bionic Engineering*, 8(2) (2011) 165-173.
- [35] E. Appel, L. Heepe, C.P. Lin, S.N. Gorb, Ultrastructure of dragonfly wing veins: composite structure of fibrous material supplemented by resilin, *Journal of Anatomy*, 227(4) (2015) 561-582.
- [36] A.C.D.-o.C. Materials, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM international, 2008.
- [37] G. Zhu, G. Sun, G. Li, A. Cheng, Q. Li, Modeling for CFRP structures subjected to quasi-static crushing, *Composite Structures*, 184 (2018) 41-55.
- [38] Ö. Özbek, Ö.Y. Bozkurt, A. Erklığ, An experimental



- [49] H. Ulus, T. Üstün, Ö.S. Şahin, S.E. Karabulut, V. Eskizeybek, A. Avcı, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *Journal of composite materials*, 50(6) (2016) 761-770.
- [48] A. Ahmed, Z. Bingjie, M.H. Ikbali, W. Qingtao, A. Obed, L. Wei, 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*, 18(11) (2015) 1789-1805.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rezvani Tavakol, M. Yarmohammad Tooski, M. Jabbari, M. Javadi, *The Effect of Graphene Nanoparticles on the Strength of the Sandwich Panel Structure Inspired by the Dragonfly Wing Vein Microstructure under Quasi-Static Loading*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(12) (2023) 2821-2842.

DOI: 10.22060/mej.2023.21615.7478



