



بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی بر روی پانل ساندویچی کامپوزیتی ساخته شده از الیاف بازالت با لحاظ نانوگرافن

احمدرضا قادری¹، اعظم قاسمی^{2*}، مهدی یارمحمدتوسکی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

2- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد

3- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

* نجف آباد، کد پستی 8514143131، a_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/3/19

پذیرش: 97/6/20

کلیدواژگان:

الیاف بازالت

نانوگرافن

شبه استاتیکی

پانل ساندویچی کامپوزیتی

چکیده

در این مقاله، تاثیر افزودن ذرات نانو گرافن به رزین و استفاده از الیاف بازالت در ساخت پانل ساندویچی کامپوزیتی، بر پاسخ نفوذ شبه استاتیکی و میزان جذب انرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این آزمایش بررسی میزان جذب انرژی و مقاومت در برابر نفوذ شبه استاتیکی در بین نمونه های پانل ساندویچی کامپوزیتی با درصد های وزنی 0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانو گرافن و انتخاب بهترین نمونه در جذب انرژی می باشد. در این پژوهش، در ساخت پانل ساندویچی کامپوزیتی از نانو گرافن با خلوص 90٪ و قطر 5-10 μm، تعداد 8 لایه الیاف بازالت با جرم واحد سطح 350 گرم بر متر مربع، هسته فوم از جنس پلی اورتان به ضخامت یک سانتی متر و با جرم حجمی 80 کیلو بر سانتی متر مکعب، رزین و سخت کننده EPR1080 استفاده شده است. نمونه ها با درصد های وزنی 0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانوگرافن ساخته شده اند. آزمایش نفوذ شبه استاتیکی بر روی نمونه ها با بارگذاری با سرعت 8 میلی متر بر دقیقه انجام شده است. از دیگر عوامل تاثیر گذار در این آزمایش می توان به ضخامت، جنس و دانسیته هسته فوم اشاره کرد. نتایج حاصل از آزمایش نفوذ شبه استاتیکی بر روی نمونه ها، نشان دهنده بهبود میزان جذب انرژی در پانل ساندویچی کامپوزیتی حاوی نانوگرافن است. این نتایج نشان می دهند که بهترین جذب انرژی و مقاومت در برابر نفوذ شبه استاتیکی، مربوط به نمونه ی حاوی 0.7٪ نانو گرافن می باشد. نمونه ها تحت آزمایش SEM قرار گرفته اند. تصاویر مربوط به این آزمایش نشان می دهد که در نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن، ساختار میکروسکوپی مناسب تری در مقایسه با سایر نمونه ها وجود دارد. نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن بیشترین جذب انرژی را قبل از شکست پانل ساندویچی کامپوزیتی و کمترین آسیب را بعد از نفوذ کامل دارد.

An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using nano-graphene

Ahmadreza Ghaderi¹, Aazam Ghasemi^{2*}, Mehdi Yarmohammad Tooski³

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

2- Modern Manufacturing Technologies Research Center, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran

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

* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Isfahan, Iran, a_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir

Keywords

Basalt fibers
Grapheme
Static force
Sandwich panel

Abstract

In this paper, the effect of adding graphene particles to resin and the use of basalt fibers in composite sandwich panels on the quasi-static permeation response and energy absorption has been studied. In this study graphene with a 90% degree of purity, 8 layers of basalt fiber with a mass unit area of 350 g / m², a polyurethane foam core of 1 cm thickness with a mass volume of 80 Kilograms per cubic meters, resin and EPR1080 hardener have been used. The samples of a mass percentage of 0, 0.3, 0.7, 1. Graphene have been made. The quasi-static penetration test was performed on the samples by loading at a speed of 8 mm / min. The results of the quasi-static penetration test on the above samples show the improvement of performance in the composite sandwich panel containing graphene. The results show that the best performance is related to the 0.7% graphene sample. The samples are tested under SEM testing. The images of this experiment show that in a sample with 0.7% graphene, there is a better microscopic structure than other samples. The sample with 0.7% graphene has the highest energy absorption before the failure of the composite sandwich panel and the least damage after full penetration.

1- مقدمه

وسیعگی از کاربردهای مهندسی مانند صنایع دریایی، خودرو، هوافضا و نفت مورد استفاده قرار می گیرد. گسترش علم نانو تکنولوژی و استفاده از آن در کامپوزیت، پیشرفت های نوید بخشی را در راستای تولید مواد کاربردی به وجود آورده است.

مطالعات انجام شده بر روی تجزیه و تحلیل شکست مکانیکی و طراحی پانل های ساندویچی به واسطه ویژگی ها و مزیت های برتر این مجموعه ها، در طیف

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Ghaderi, A.M. Ghasemi, A. and Yarmohammadi-Toski, M., "An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using nano-graphene", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 109-118, 2019.

رفتار کامپوزیت‌ها هنگامی که تحت ضربه قرار می‌گیرند به علت سرعت بالای بارگذاری و رخ دادن پدیده‌های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف، جدایش لایه‌ها، شکست الیاف و موارد مشابه به طور همزمان، بسیار پیچیده می‌شود. آگاهی یافتن از مکانیزم‌های نفوذ در سرعت‌های بسیار بالا دشوار است. بنابراین بارگذاری نفوذ شبه استاتیک بدلیل سرعت کم و کنترل آسان، برای این منظور مناسب است و به راحتی می‌تواند آسیب‌های ناشی از نفوذ را شناسایی کند. در چند سال گذشته، مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی متعددی در خصوص ویژگی عملکرد مکانیکی پانل‌های ساندویچی پلاست صورت گرفته است [1-10]. وانگ و همکاران [11] با استفاده از روشهای تجربی و عددی غیرمخرب بازرسی و روش‌های تجزیه و تحلیل مخرب، مطالعه جامعی در مورد تاثیرات ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با هسته فوم را انجام داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که حالت‌های مختلف آسیب دیدگی ماندگار دندانه‌ای با شکل گوی مانند (نیمه کرووی) باعث ترک خوردگی درونی ماتریس، شکست الیاف در دو طرف و له شدن فوم و صفحه زیرین شده و این تغییر شکل باقی می‌ماند. هو و همکاران [12] از روش تجربی و عددی برای بررسی پانل‌های ساندویچی با الیاف کربن تحت بارگذاری انفجاری استفاده کردند. روی و همکاران [13] از مدل تست کشش برای پیش بینی انقباض دیواره لانه زنبوری با معیار برش پیچشی استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که پیش بینی بارهای پیچشی به شروع شیب نیروی پیچشی از یک حالت به حالت دیگر در آن منطقه مرتبط است. رفیعی و همکاران [14] تاثیر صفحات نانوگرافن و نانو لوله‌های کربنی تک جداره را در درصد وزنی کم بر رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی بررسی کردند. کبیر و همکاران [15] واکنش پانل ساندویچی آلومینیومی شامل هسته فوم نازک و ورق‌های نازک دارای مقاومت کم و مقاومت کششی بالا را تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از ورق‌های نازک در صفحه رویی، هنگامی که از هسته فوم تری استفاده شود، کمترین کشیدگی اتفاق خواهد افتاد. ژانگ و همکاران [16] به منظور بهبود جذب انرژی و مقاومت ضربه سرعت پایین، پانل ساندویچی کریستالی با هسته‌ی پر شده از پلی اورتان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که تحت نیروی فشار، کارایی جذب انرژی پانل‌های ساندویچی پلاستیکی، با تراکم نسبی (2.58/ و 3.17/ درمقایسه با هسته‌های فوم مشبک که در حال پر شدن بودند کمتر است. به هر حال جذب انرژی پانل‌های ساندویچی پر شده با تراکم نسبی پایین، حدود 1.83/ هسته‌های مشبک، درمقایسه با بقیه نمونه‌ها کمتر است. سوراخکاری و یا افزایش ضخامت هسته کامپوزیت‌ها، بر روی عملکرد پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی تاثیر گذار است. در این تحقیق پانل ساندویچی، از هسته‌های فوم پی وی سی ساخته شده بود. شکریه و همکاران [17] تاثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزودن 0.5% وزنی نانو لوله کربنی، منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت کششی و برشی نانو کامپوزیت‌های حاوی نانو لوله کربنی به ترتیب 34 و 26 درصد نسبت به کامپوزیت‌های بدون نانو فیلر افزایش می‌یابد. عبدی و همکاران [18] بطور تجربی رفتار پانل ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم (FCS) و پانل تقویت شده با PRFCS برای فشرده سازی در برابر بارهای خمشی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با تقویت هسته فوم با پلیمرهای استوانه‌ای پین‌ها، خواص خمشی پانل‌ها بطور محسوسی افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که قطر لوله‌های پلیمری تاثیر زیادی در این تحقیق دارد. این در حالی بود که میزان بارگذاری، تاثیر معکوس بر سفتی خمشی هر دو نوع پانل

2- ساخت نمونه‌ها

2-1- مواد

برای ساخت پانل ساندویچی کامپوزیتی، از الیاف بازالت تولید کشور بلژیک استفاده شده است. بازالت از جنس سنگ سیاه دانه ریز آتشفشانی است که کمتر از 52/ سیلیس دارد. جرم واحد سطح آن 350 گرم بر مترمربع است. الیاف آن در دو جهت صفر و 90 بافته شده که در این دو جهت، خواص کاملاً یکسانی دارد (شکل 1). رزین و سخت کننده‌ی مورد استفاده در این تحقیق،

درصد وزنی نانو گرافن 154.335 کیلو ژول، برای نمونه با 0.7 درصد وزنی نانوگرافن، 160.375 کیلو ژول و برای نمونه 1.1 درصد وزنی 178.998 کیلو ژول بوده است. در مدت زمان استفاده از دستگاه التراسونیک به دلیل تولید حرارت و به منظور جلوگیری از کاهش خواص اپوکسی، محلول را در حین انجام التراسونیک در حمام یخ قرار دادیم.

پس از انجام همگن سازی توسط دستگاه التراسونیک منتظر ماندیم تا آنکه دمای محلول رزین و نانو گرافن به دمای محیط برسد. سپس محلول را از حمام آب یخ خارج نمودیم. در مرحله بعد، لایه گذاری الیاف انجام شده است. لایه گذاری نمونه‌ها بصورت دستی، با آرایش 4 لایه الیاف در بالا و چهار لایه در پایین، در وسط هسته فوم صورت گرفته است. طبق اطلاعات شرکت سازنده رزین، مدت زمان لازم برای پخت کامل نمونه در دمای محیط، هفت روز می‌باشد. به همین علت آزمایش بر روی نمونه‌ها پس از گذشت هفت روز انجام شده است. نمونه‌ها بر اساس فیکسچر دستگاه در اندازه 150×150 میلی‌متر مطابق شکل 2 بریده شده است.



Fig. 2 sandwich panel

شکل 2 پانل ساندویچی

3- ارزیابی عملکرد

3-1- آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

رفتار کامپوزیت‌ها هنگامی که تحت ضربه قرار می‌گیرند، به علت سرعت بالای بارگذاری و رخ دادن پدیده‌های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف، جدایش لایه‌ها، شکست الیاف و موارد مشابه به طور همزمان، بسیار پیچیده است. آگاهی یافتن از مکانیزم‌های نفوذ در سرعت‌های بسیار بالا دشوار بوده و بارگذاری نفوذ شبه استاتیکی به دلیل سرعت کم و کنترل آسان، برای اینکار مناسب بوده و به راحتی می‌تواند آسیب‌های ناشی از نفوذ را شناسایی کند. آزمایش نفوذ شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده با درصد های 0.3، 0.7 و 1.1 نانو گرافن، در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. دستگاه موجود در این آزمایشگاه که برای انجام تست نفوذ شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته، محصول کارخانه zuwick مدل 1494 ساخت کشور آلمان می‌باشد. دستگاه می‌تواند حداکثر نیروی 250KN را به نمونه وارد کند.

در شکل 3 نمای کلی دستگاه تست نفوذ شبه استاتیکی نشان داده شده است.

از خانواده اپوکسی با نام تجاری EPR1080 است که هر دو ساخت کشور روسیه می‌باشند. نسبت وزنی رزین مورد استفاده در این تحقیق براساس اطلاعات شرکت سازنده، 100 به 12 می‌باشد. ذرات نانو گرافن به قطر 10-5 میکرومتر و ضخامت 20-4 نانو متر، با خلوص 90٪ و هسته از جنس پلی اورتان به ضخامت 1 سانتی متر و جرم مخصوص 80 گرم بر مترمکعب در این تحقیق استفاده شده است. علت استفاده از نانو گرافن در این پژوهش استحکام بالا توام با انعطاف پذیری گرافن می‌باشد.

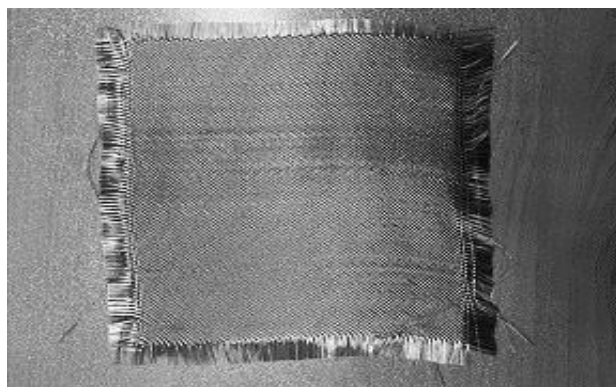


Fig.1 basalt fibre

شکل 1 الیاف بازالت

2-2- ساخت پانل ساندویچی کامپوزیتی

در این پژوهش پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی با روش لایه گذاری دستی ساخته شده است. ابتدا الیاف به مقدار مورد نیاز بریده شده و باتوجه به توصیه سازنده (100 به 12) رزین مورد نیاز آماده شده است. برای داشتن ضخامت یکسان و خواص برابر، نمونه‌ها بصورت یک تکه ساخته شده و سپس به ابعاد 150×150 میلی‌متر برش داده شده‌اند. برای داشتن محلولی یکنواخت از رزین و نانوگرافن به جهت جلوگیری از کلوخه شدن ذرات نانوگرافن در رزین هنگام مخلوط کردن، از روش التراسونیک برای همگن سازی محلول استفاده شده است. دستگاه التراسونیک با ارسال امواج مافوق صوت موجب می‌شود که ترکیب خوشه‌ای نانو ساختارها به اجزای ریزتری شکسته شده و میزان نسبت سطح به حجم در ساختارهای نانو و میکرو نانو افزایش یابد. در نتیجه باعث افزایش واکنش‌های شیمیایی خواهد شد. دستگاه التراسونیک مورد استفاده در این پژوهش، ساخت کارخانه BANDELIN مدل SONOPULS HD کشور آلمان است که متعلق به آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. این دستگاه، حداکثر توان 200 وات را در فرکانس 20 کیلوهرتز تولید کرده و امواج التراسونیک را توسط پرابی (فرستنده امواج) که از نوع VS-70 می‌باشد، به محلول ارسال می‌کند. نمونه‌های پانل ساندویچی کامپوزیتی با درصد‌های وزنی 0.3، 0.7 و 1.1 نانو گرافن و همچنین یک نمونه بدون نانو ساخته شده است. افزودن نانو گرافن به رزین به این صورت بوده است که پس از اندازه گیری میزان نانو با ترازوی دیجیتال، ابتدا محلول رزین و نانوگرافن را بوسیله همزن مکانیکی به مدت 5 دقیقه هم زده و سپس به مدت 20 دقیقه از دستگاه التراسونیک برای شکست ذرات نانو گرافن و ایجاد مخلوطی همگن برای هر نمونه استفاده شده است. میزان انرژی صرف شده جهت شکست نانوگرافن بوسیله دستگاه التراسونیک طی مدت 20 دقیقه برای نمونه با 0.3

3-2- استخراج نمودارها

پس از انجام آزمایش نفوذ شبه استاتیکی، نتایج آن که از میانگین گیری تکرار 5 آزمایش بر روی هر کدام از نمونه ها حاصل می شود، برای هر یک از نمونه ها با درصد های وزنی 0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانوگرافن، بصورت نمودار نیرو- زمان بدست آمده است.

3-2-1- بررسی نمونه بدون نانو گرافن

اطلاعات بدست آمده از شکل 5، در جدول 1 آورده شده است.

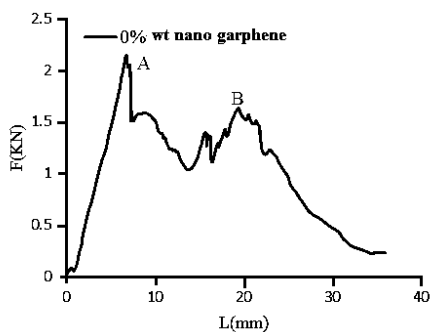


Fig. 5 Force-displacement graph of without garphene sample

شکل 5 نمودار نیرو جابجایی برای نمونه بدون نانوگرافن

میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه ی بدون نانوگرافن توسط دستگاه نفوذ شبه استاتیکی، 53.9 ژول است. بیشترین نیروی وارده به آن 2160 نیوتن در ضخامت 6.81 میلی متر می باشد. در جابجایی 19.4 میلی متر نیرویی معادل 1646 نیوتن برای شکسته شدن صفحه زیرین پانل ساندویچی کامپوزیتی صرف شده است (ضخامت قطعه مربوطه 20 میلی متر می باشد). همانطور که در شکل 6 مشاهده می شود، در هنگام تماس سنبه با صفحه بالایی، نیروی زیادی برای ایجاد سوراخ مورد نیاز است. دلیل این افزایش نیرو قرار گرفتن فوم در زیر صفحه بالایی است، بطوریکه میزان جذب انرژی و همچنین نیروی تماسی برای نفوذ افزایش می یابد. در نمودار شکل 5 که با حرف A مشخص شده میزان افزایش نیروی تماسی جهت نفوذ به صفحه بالایی نشان داده شده است. به دلیل فشردگی فوم، مقدار این نیرو افزایش می یابد. نقاط ماکزیمم A و B در شکل 5 نشان دهنده ی ناحیه های است که سنبه در حال عبور از فوم است. به دلیل خاصیت فشرده پذیری فوم و همچنین نیروی اصطکاک بین سنبه و فوم رفتار نامشخصی در نمودار پدید می آید که تماما به ضخامت، دانسیته و شکل هندسی فوم بستگی دارد. به دلیل عدم وجود فوم در زیر صفحه زیرین که جاذب انرژی می باشد، سنبه از صفحه زیرین با نیروی کمتری عبور می کند (در شکل 5 در روی نمودار با حرف B نشان داده شده است).

جدول 1 نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی بدون نانوگرافن

Table 1 Results of quasi-static test without graphene

| کارانجام شده تا شکست (J) | جابجایی (ضخامت) که نیرو حاد اکثر شده (mm) | حداکثر نیرو (N) | نیروی در 19.4mm (N) |
|--------------------------|---|-----------------|---------------------|
| 35.9 | 6.81 | 2160 | 1646 |

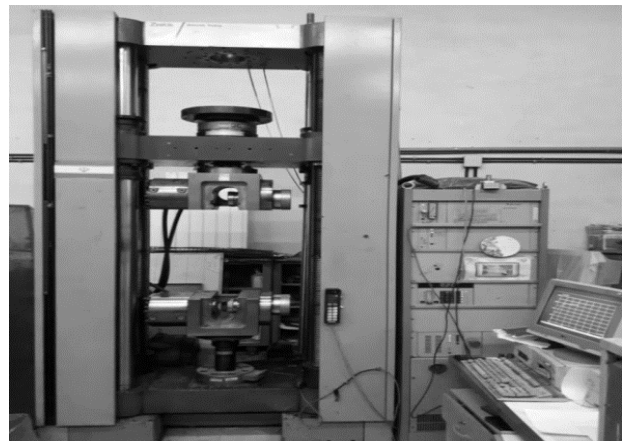


Fig. 3 Quasi-static test machine

شکل 3 دستگاه آزمون شبه استاتیکی

نمونه ها پس از قرار گیری در فیکسچر، روی فک پایینی دستگاه قرار می گیرند. سنبه ی مورد استفاده در این پژوهش بصورت نیم کروی بوده که در فک متحرک دستگاه قرار داده می شود. باتوجه به اینکه نمونه ها دارای سطحی نسبتا سخت و هسته ای نرم هستند، برای جلوگیری از شکست ناگهانی قطعه قبل از نفوذ، ابتدا از سرعت های پایین جهت اعمال نیرو به سطح نمونه استفاده می شود. سرعت حرکت سنبه را پس از آزمایش بر روی نمونه های دیگر (به غیر از نمونه های مورد آزمایش)، از سرعت 3 میلی متر بر دقیقه شروع و نهایتا سرعت حرکت سنبه 8 میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. علت انتخاب سرعت 8 میلی متر بر دقیقه به علت لود سل مناسب جهت رسم نمودار نیرو- زمان و شروع تغییرات از مبدا مختصات بوده است. همچنین، با توجه به اینکه افزایش سرعت حرکت سنبه در هنگام اعمال نیرو، باعث ایجاد خمش و در نهایت شکستن نمونه قبل از نفوذ می گردد. لازم بذکر است که انتخاب سرعت حرکت سنبه برای مواد مختلف براساس تجربه ی اپراتور دستگاه، میزان مقاومت قطعه در مقابل خمش و نیز نوع آزمایش انجام می گیرد. با حرکت سنبه با سرعت 8 میلی متر بر دقیقه، ابتدا به سطح بالایی نیرو وارد شده و پس از نفوذ در سطح بالایی و عبور از فوم، به سطح پایینی رسیده و پس از نفوذ به سطح پایینی از آن خارج می گردد. در این حالت نفوذ بطور کامل اتفاق افتاده است. شکل 4 نحوه ی قرار گیری نمونه در فیکسچر و نصب در دستگاه نفوذ شبه استاتیکی را نشان می دهد.

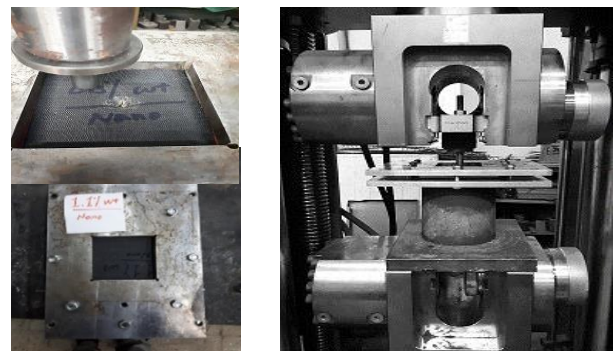


Fig. 4 Sample placement in the fixture and the static pseudo metering device

شکل 4 نحوه قرار گیری نمونه در فیکسچر و دستگاه شبه استاتیکی

میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه 0.7٪ توسط دستگاه نفوذ شبه استاتیکی، 38.1٪ ژول و بیشترین نیروی وارده به آن 1932 نیوتن در جابجایی 7.96 میلی‌متر می‌باشد. در جابجایی 18.7 میلی‌متر نیرویی معادل 1602 نیوتن صرف شکست شدن صفحه زیرین پانل ساندویچی شده است (ضخامت قطعه مربوطه 20 میلی‌متر می‌باشد).

جدول 3 نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه با درصد وزنی 0.7 نانو گرافن.

Table 3 Results of quasi-static test of 0.7 wt garphene sample

| نیروی در 18.70mm (N) | حداکثر نیرو (N) | جابجایی (ضخامت) که در آن، نیرو حداکثر شده (mm) | کار انجام شده تا شکست (J) |
|----------------------|-----------------|--|---------------------------|
| 1602 | 1932 | 7.96 | 38.1 |

همانطور که در نمودار شکل 7 ملاحظه می‌شود، به دلیل افزودن نانوگرافن، استحکام صفحه نفوذ بالا رفته در نتیجه سنبه نیروی بیشتری را برای نفوذ صرف می‌کند. از طرف دیگر به دلیل افزودن نانو، استحکام فشاری نمونه افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه فوم نیز جاذب انرژی است، بنابراین در این حالت فوم بیشتر فشرده می‌شود. پس از سوراخ شدن صفحه نفوذ (صفحه بالایی) که در نمودار شکل 7 با نقطه A نشان داده شده، فشرده شدن فوم از یک طرف و وجود نیروی اصطکاک بین فوم و سنبه از طرف دیگر، ناحیه ای با رفتار نامشخص در بین نقاط A,B را بوجود آورده است. هنگامی که سنبه به صفحه پایینی می‌رسد، به دلیل عدم وجود فوم، با نیروی کمتری به صفحه زیرین نفوذ می‌کند.

3-2-3- بررسی نمونه با درصد وزنی 1.1 نانوگرافن

اطلاعات بدست آمده از شکل 8 در جدول 4 نشان داده شده است.

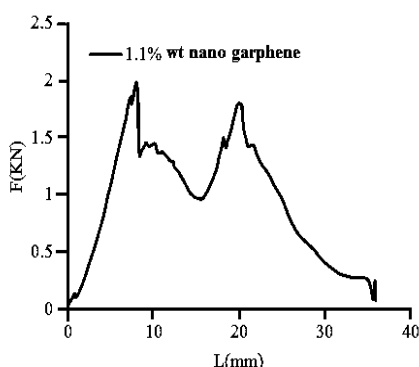


Fig. 8 Force-displacement graph of 1.1wt gharphene

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی با درصد وزنی 1.1 نانوگرافن

میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه با درصد وزنی 1.1 نانوگرافن توسط دستگاه نفوذ شبه استاتیکی، 32.9 ژول بوده است. بیشترین نیروی وارده به آن 1992 نیوتن در جابجایی 8.01 میلی‌متر می‌باشد. در جابجایی 20 میلی‌متر نیرویی معادل 1820 نیوتن صرف شکست شدن صفحه زیرین پانل ساندویچی شده است (ضخامت قطعه مربوطه 20 میلی‌متر می‌باشد).

3-2-2- بررسی نمونه با درصد وزنی 0.3 نانوگرافن

اطلاعات بدست آمده از شکل 6 در جدول 2 آورده شده است.

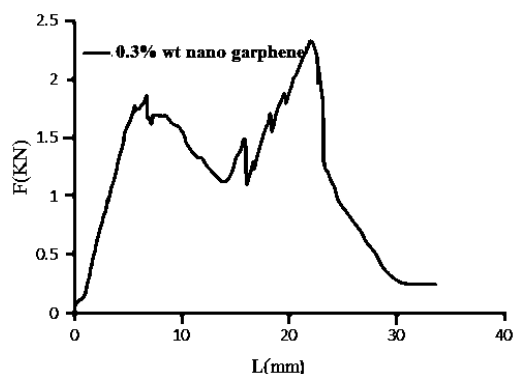


Fig. 6 Force-displacement graph of 0.3 wt garphene sample

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه با درصد وزنی 0.3 نانو گرافن

میزان انرژی صرف شده برای سوراخ کردن نمونه با درصد وزنی 0.3 نانوگرافن توسط دستگاه نفوذ شبه استاتیکی 31.3 ژول بوده است. بیشترین نیروی وارده به آن 2158 نیوتن در جابجایی 20.63 میلی‌متر می‌باشد. در جابجایی 7.3 میلی‌متر نیرویی معادل 1726 نیوتن صرف شکسته شدن صفحه زیرین پانل ساندویچی شده است (ضخامت قطعه مربوطه 20 میلی‌متر می‌باشد).

جدول 2 نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه 0.3٪

Table 2 Results of quasi-static test sample 0.3 wt garphene

| نیروی در 7.30mm (N) | حداکثر نیرو (N) | جابجایی که نیرو حداکثر شده (mm) | کار انجام شده تا شکست (J) |
|---------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1726 | 2158 | 20.63 | 31.3 |

3-2-3- بررسی نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن

اطلاعات بدست آمده از شکل 7 در جدول 3 آورده شده است

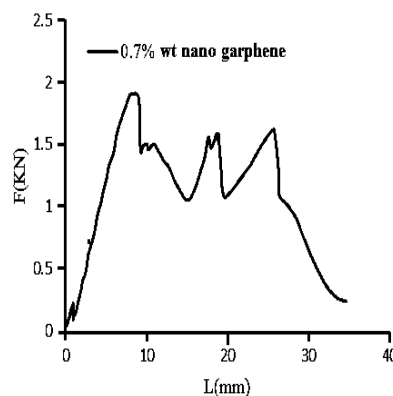


Fig.7 Force-displacement graph of 0.7wt garphene

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی، با درصد وزنی 0.7 نانو گرافن

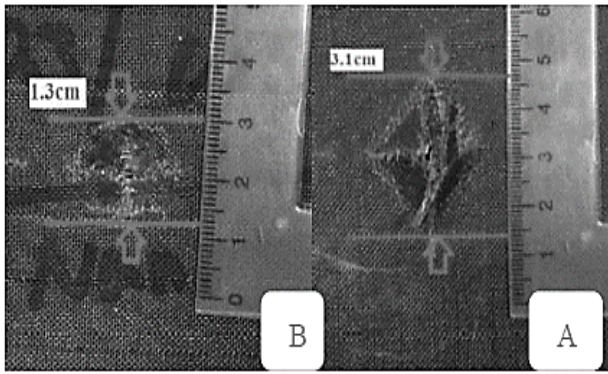


Fig. 10 Damage location on 0.3/wt graphene sample, on impact side B, non-impact side A

شکل 10 محل آسیب دیدگی بر روی نمونه با درصد وزنی 0.3٪ نانوگرافن، بر روی صفحه ضربه خورده شده B، پشت صفحه ضربه خورده شده A

مطابق شکل 10 میزان آسیب دیدگی در هنگام نفوذ سنبه به سطح ضربه خورده شده، 1.3 سانتی متر (شکل 10 قسمت B) و در پشت صفحه ضربه خورده شده ی نمونه، 3.1 سانتی متر (شکل 10 قسمت A) می باشد. همانطور که در شکل 10 مشاهده میگردد، نمونه سوراخ شده است. همچنین در پشت صفحه ی زیرین (شکل 10 قسمت B) لایه ها چین برداشته اند. ترک های طولی و محیطی در صفحه ی ضربه خورده شده (شکل 10 قسمت B) و پشت آن (شکل 10 قسمت A) نمایان است. هر سه مود آسیب شامل تورق، لایه لایه شدن و شکست ماتریسی در نمونه ها اتفاق افتاده است.

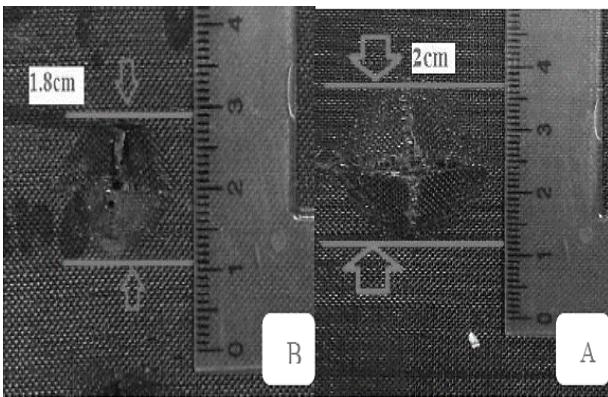


Fig.11 Damage location on %0.7 graphene sample on impact side B, non-impact side A

شکل 11 محل آسیب دیدگی نمونه با درصد وزنی 0.7٪ نانوگرافن، بر روی صفحه خورده شده B، پشت صفحه ضربه خورده شده A

در شکل 11 میزان آسیب دیدگی در هنگام نفوذ سنبه به سطح ضربه خورده شده از لحاظ ظاهری 1.8 سانتی متر (شکل 11 قسمت B) و در پشت صفحه ی ضربه خورده شده به اندازه 2 سانتی متر (شکل 11 قسمت A) می باشد. همانطور که در شکل 11 مشاهده می شود، در صفحه ی ضربه خورده شده ضمن اینکه نمونه سوراخ شده است، در راستای طولی نیز سوراخ شده گی گسترش پیدا کرده است. ترک های طولی و محیطی در پشت صفحه ی ضربه خورده شده دارای بازشدگی یکسانی هستند.

جدول 4 نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی نمونه با درصد وزنی 1.1 نانو گرافن
Table 4 Results of quasi-static test of 1.1 wt garphene sample

| کارانجام شده تا شکست (J) | جابجایی (ضخامت) که نیرو حد اکثر شده (mm) | حداکثر نیرو (N) | نیرو در 20mm (N) |
|--------------------------|--|-----------------|------------------|
| 32.9 | 8.01 | 1992 | 1820 |

4- بررسی آسیب

در این تحقیق، به دلیل عبور کامل سنبه از نمونه و ظاهر شدن آن از پشت نمونه، نفوذ رخ داده است. بطور کلی حالت های آسیب در کامپوزیت ها شامل: 1- ترک ماتریس، 2- واماندگی الیاف، 3- تورق (لایه لایه شدن) می باشد. در این آزمایش کلیه نمونه ها شامل هر سه حالت آسیب می باشند. جهت بررسی میزان آسیب در نمونه ها از روش غیرمخرب استفاده شده است. مقدار آسیب در هنگام نفوذ در صفحه ضربه خورده شده و همچنین صفحه پایینی پانل ساندویچی کامپوزیتی، اندازه گیری شده است. و برای صحت بخشی به نتایج بدست آمده از آزمون شبه استاتیکی، آزمایش SEM بر روی نمونه ها انجام شده است.

1-4- بررسی آسیب از لحاظ شکل ظاهری نمونه ها با درصد وزنی 0.0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانوگرافن

در شکل 9 محل آسیب دیدگی نمونه های پانل های ساندویچی کامپوزیتی از قسمت پشت و روی صفحه نفوذ نشان داده شده است.

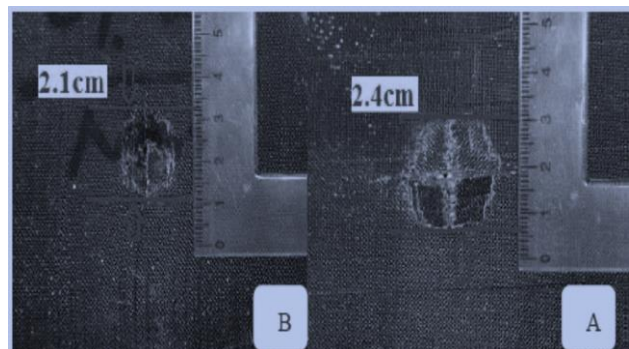


Fig.9 Damage location on without graphene sample on impact side B, non-impact side A

شکل 9 محل آسیب دیدگی نمونه بدون نانو گرافن، بر روی صفحه ضربه خورده شده B، پشت صفحه ضربه خورده شده A

در شکل 9 میزان آسیب دیدگی در هنگام نفوذ سنبه به سطح ضربه خورده شده، 2.1 سانتی متر و در پشت صفحه ی ضربه خورده شده، 2.4 سانتی متر می باشد. همانطور که در شکل 9 مشاهده می شود، نمونه سوراخ شده است. ترک های طولی و محیطی در صفحه ی ضربه خورده شده و در پشت آن نمایان است. سه مود آسیب در کامپوزیت ها که شامل: واماندگی الیاف، ترک ماتریس و تورق می باشد، در اینجا اتفاق افتاده است.

2-4- بررسی نمونه توسط آزمایش SEM

برای بررسی ساختار میکروسکوپی قرارگیری ذرات نانو گرافن در رزین و صحه گذاری بر روی نتایج آزمایش نفوذ شبه استاتیکی، آزمایش SEM بر روی تمامی نمونه ها با درصد وزنی 0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانوگرافن انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در قالب عکس‌هایی با بزرگنمایی 2 میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

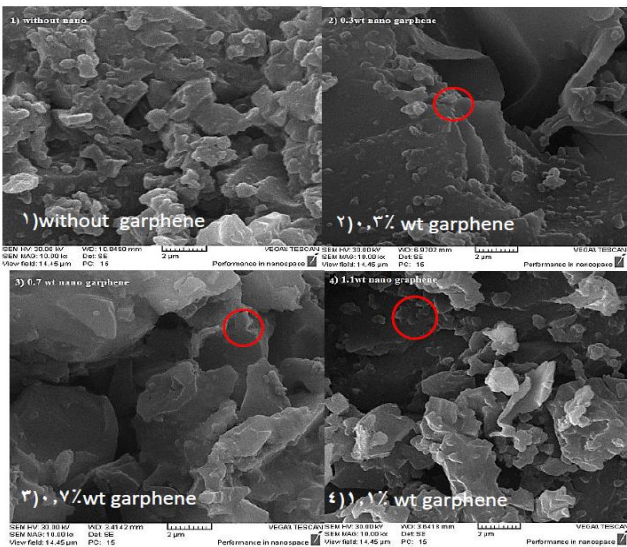


Fig.13 SEM semimensons with a magnification of 20 μm 1) Sample without a graphene 2) A sample with a wt of 0.3graphon 3) A sample with a wt of 0graphon 4)A sample with a wt of 1.1 graphon
شکل 13 تصاویر SEM با بزرگنمایی 2 میکرو متر (1 نمونه بدون نانوگرافن 2) نمونه با درصد وزنی 0.3 نانوگرافن (3) نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن (4) نمونه با درصد وزنی 1.1 نانوگرافن

نتایج بدست آمده از آزمایش نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد، که نمونه با درصد وزنی 0.7 نانو گرافن در بین نمونه های مورد آزمایش در این پژوهش، بهترین عملکرد از لحاظ جذب انرژی و همچنین مقاومت فشاری را دارد. در شکل 13 تصویر شماره 3 مشاهده می‌گردد که صفحات نانو گرافن آرایش منظم‌تری نسبت به تصویر شماره 2 و 1 دارند. در تصویر شماره 4 با افزایش درصد نانو گرافن، صفحات گرافن دچار فشردگی زیادی شده و همین موضوع باعث کاهش خواص مکانیکی نمونه شده است. بنابراین همانطور که در تصویر شماره 3 مشاهده می‌گردد، به علت پراکنده شدن ذرات نانو گرافن در درصدهای پایین تر اثر تقویت کنندگی آن بیشتر شده و در نتیجه موجب بهبود استحکام در نمونه 0.7٪ نانوگرافن شده است. اما در درصدهای بالای نانو گرافن به علت فشرده شدن گرافن پدیده توده شدن رخ می‌دهد. توده‌های گرافن مهمترین فاکتور در کاهش خواص مکانیکی می‌باشد. همین موضوع در خصوص نانوگرافن 1.1٪ درصد (تصویر شماره 4) رخ داده و موجب کاهش خواص مکانیکی آن شده است.

5- بحث و نتیجه گیری

آزمایش شبه استاتیکی بر روی 4 نمونه با درصد های وزنی 0، 0.3، 0.7 و 1.1 نانوگرافن انجام شده که به منظور درک درست از رفتار دینامیکی در پانل ساندویچی کامپوزیتی از نمودار نیرو-جابجایی استفاده گردیده است. با استفاده از این نمودار مدل های شکست و مکانیزم های خرابی شناسایی و ارزیابی

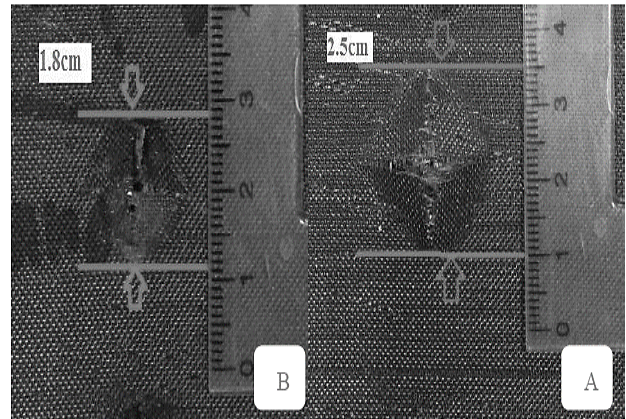


Fig.12 Damage location on 1.1wt graphene sample on impact side B, non-impact side A

شکل 12 محل آسیب دیدگی بر روی نمونه با درصد وزنی 1.1٪، نانوگرافن شکل B: روی صفحه‌ی خورده شده‌ی، شکل A: پشت صفحه‌ی ضربه خورده شده

در شکل 12 میزان آسیب دیدگی در هنگام نفوذ سنبه به سطح ضربه خورده شده 1.8 سانتی‌متر و در پشت صفحه ضربه خورده شده نمونه 2.5 سانتی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل 12 دیده می‌شود سوراخ شدگی وسیعی در صفحه ضربه خورده شده مشاهده می‌شود. دهانه ترک‌های طولی و محیطی در صفحه ضربه خورده شده و پشت آن باز شده است. سه مود آسیب در کامپوزیتها شامل واماندگی الیاف، ترک ماتریس و تورق اتفاق افتاده است. اطلاعات بدست آمده از شکل های 12، 11، 10، 9 در جدول شماره 5 جهت نتیجه گیری بهتر آورده شده است.

جدول 5 نتایج بدست آمده از میزان آسیب ظاهری آزمون نفوذ شبه استاتیکی

Table 5 Results obtained from the apparent damage to the quasi-static penetration test

| درصد وزنی نانو | میزان آسیب روی صفحه ضربه خورده (cm) | میزان آسیب پشت صفحه ضربه خورده (cm) |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 0% | 2.1 | 2.4 |
| 0.3% | 1.3 | 3.1 |
| 0.7% | 1.8 | 2 |
| 1.1% | 1.8 | 2.5 |

در جدول 5 میزان آسیب از نظر ظاهری در هنگام ورود سنبه به صفحه بالایی و نفوذ به و سپس خروج از صفحه پایینی آورده شده است. همانطور که از اعداد داخل جدول 5 ملاحظه میشود که میزان تخریب ظاهری در نمونه های حاوی نانو گرافن نسبت به نمونه های بدون نانوگرافن کمتر است که با مقایسه این میزان تخریب در حالت نفوذ به صفحه بالایی و همچنین به صفحه پایینی مشخص شده است. از لحاظ تخریب ظاهری، نمونه با درصد وزنی 0.7 نانو گرافن کمترین تخریب ظاهری را در صفحه رویی و صفحه پایینی دارد.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر افزودن نانوگرافن به محلول رزین جهت تقویت ساختار پانل ساندویچی کامپوزیتی تحت نفوذ شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهند که استفاده از نانوگرافن موجب تاثیر مثبتی بر میزان جذب انرژی و بهبود عملکرد آن می شود.

جدول 6 نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ شبه استاتیکی

Table 6 Results of quasi-static test

| نمونه | درصد وزنی نانوگرافن | انرژی صرف شده تا مرحله شکست (J) | ضخامتی که نیرو ماکزیمم شده (mm) | نیروی ماکزیمم (N) |
|-------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 0 | 30.9 | 6.81 | 1860 |
| 2 | 0.3 | 31.3 | 7.3 | 2158 |
| 3 | 0.7 | 38.1 | 7.96 | 1932 |
| 4 | 1.1 | 32.9 | 8.01 | 1992 |

طبق جدول 6، نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن مقاومت بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد. داده‌های آزمایش طبق جدول 6 نشان می‌دهد که افزایش درصد نانوگرافن موجب افزایش مقاومت نمونه نمی‌گردد. بلکه تنها به ازاء درصد خاصی از نانوگرافن از بین نمونه‌های مورد آزمایش انتخاب شده است. در این پژوهش نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن از نظر میزان جذب انرژی در بین نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته در این پژوهش، به عنوان بهینه انتخاب شده است. برای نتیجه گیری بهتر، نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به تمام نمونه‌ها در شکل 14 برای درک بهتر فرآیند آورده شده است. با توجه به اینکه میزان جذب انرژی فوم برای تمام نمونه‌ها یکسان است، بنابراین تنها مقاومت صفحه‌ی نفوذ در میزان جذب بیشتر انرژی، تاثیر داشته است. همانطور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، سنبه برای نفوذ به صفحه رویی نمونه‌ها نیروی بیشتری را صرف کرده تا صفحه‌ی نفوذ را سوراخ کند و پس از آن نمودار (شکل 14) تقریباً حالت یکنواختی را طی می‌کند. جدول 6 نشان می‌دهد که افزودن نانوگرافن در یک درصد مشخص، باعث افزایش میزان جذب انرژی شده و پس از آن علیرغم افزایش درصد نانوگرافن، این میزان شروع به کاهش کرده و به حالتی که بدون نانو است نزدیک و یا کمتر از آن می‌گردد. در این آزمایش نمونه‌ی 0.7٪ نانو طبق جدول 6 میزان جذب انرژی بالاتری نسبت به بقیه نمونه‌ها داشته است و برخلاف تصور نمونه با درصد وزنی 1.1 نانوگرافن از حالت نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن با وجود افزایش نانوگرافن انرژی کمتری را جذب کرده است. به عبارت دیگر با افزودن نانوگرافن به منظور افزایش جذب انرژی در یک درصد مشخص، این میزان ابتدا به بالاترین مقدار خود رسیده و پس از آن حتی باعث کاهش جذب انرژی نسبت به نمونه‌ی بدون نانوگرافن می‌گردد. برای بررسی دقیق تر و اطمینان بیشتر از تمامی نمونه‌ها آزمایش SEM بعمل آمد. نتایج بدست آمده از تصاویر میکروسکوپی نشان داد که نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن بخاطر چیدمان صفحات گرافن، عملکرد بهتری نسبت به مابقی نمونه‌ها داشته است. تمامی نمونه‌های پانل ساندویچی کامپوزیتی دچار آسیب‌های ترک ماتریس، و اماندگی

می‌شوند تا تدبیر مناسبی برای جلوگیری از شکست‌های ناگهانی در سازه‌های کامپوزیتی اتخاذ گردد.

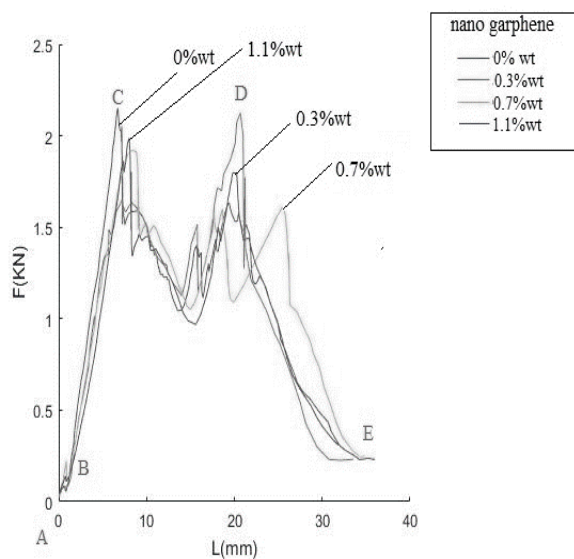


Fig.14 Force-displacement graph

شکل 14 نمودار نیرو جابجایی

به طور کلی می‌توان مکانیزم شکست پانل ساندویچی کامپوزیتی را همانطور که در شکل 14 نشان داده شده است به 4 ناحیه اصلی تقسیم کرد. در مرحله نخست سطح جلویی سنبه با روی نمونه تماس پیدا کرده و در حال اعمال نیرو می‌باشد (در شکل 14 با حرف A نشان داده شده است). از مرحله A تا مرحله B محدوده‌ی الاستیک خطی است. در این مرحله هیچ گونه خرابی و یا پارگی بر روی سطح پانل ساندویچی ایجاد نشده است. از مرحله B تا C خرابی صفحه رویی پانل ساندویچی آغاز می‌گردد. بدین صورت که ابتدا در نقطه B ماتریس شروع به ترک برداشتن کرده و خرابی از این مرحله شروع و با افزایش نیرو، صفحه رویی پانل ساندویچی کامپوزیتی شکسته شده و سنبه در صفحه بالایی نفوذ می‌کند (نمودار با C نشان داده شده است). در این حالت هر سه مود آسیب که شامل تورق، لایه لایه شدن و ترک ماتریس است، در صفحه رویی اتفاق می‌افتد. از نقطه C تا D سنبه در حال عبور از هسته فوم می‌باشد. همانطور که از نمودار شکل 14 ملاحظه می‌شود، نمودار دچار اغتشاش شده است. علت وقوع این پدیده، از یک طرف رفتار نامشخص فوم در برابر اعمال نیروی شبه استاتیکی و از طرف دیگر اصطکاک بین سنبه و فوم در حال عبور از هسته پانل ساندویچی است. پس از آن سنبه به صفحه زیرین رسیده و شکسته می‌شود که در نمودار شکل 14 با نقطه D نشان داده شده است. در این حالت صفحه زیرین نیز شامل هر سه مود آسیب یعنی تورق، لایه لایه شدن و شکست ماتریس می‌شود. از نقطه D تا E نفوذ کامل صورت گرفته و سنبه بطور کامل از پانل ساندویچی عبور می‌کند. اطلاعات بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی در خصوص میزان جذب نیروی وارده در جدول 6 آورده شده است. همچنین بر طبق آزمایش SEM مشاهده که نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن (شکل 13 تصویر شماره 3)، باعث گردیده با آرایش بهتر صفحات نانو گرافن خواص مکانیکی نمونه عملکرد بهتری در جذب انرژی داشته باشند.

- Resin and Glass/Epoxy Laminated Composites", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No.9, pp. 125-133, 2015.
- [18] Abdi B, Azwan S, Abdullah MR, Ayob A, Yahya Y, Xin L., "Flatwise Compression and Flexural Behavior of Foam Core and Polymer Pin-Reinforced Foam Core Composite Sandwich Panels", *Int J Mech Sci*, Vol. 88, pp.44-138, 2014.
- [19] Mathieson H, Fam A., "High Cycle Fatigue under Reversed Bending of Sandwich Panels with GFRP Skins and Polyurethane Foam Core", *Compos Struct*, Vol. 113, pp.9-31, 2014.
- [20] George T, Deshpande VS, Sharp KNG, Wadley H., "Hybrid Core Carbon Fiber Composite Sandwich Panels: Fabrication and Mechanical Response", *Compos Struct*, Vol. 108, pp.108-696, 2014.
- [21] Shokrieh, M. M. Zeinedini, A. Ghoreishi, S. M., "On the Mixed Mode I/II Delamination R-curve of E-Glass/epoxy Laminated Composites" *Composite Structures*, Vol. 171, pp. 19-31, 2017.
- [22] Liu J, Zhu X, Zhou Z, Wu L, Ma L., "Effects of Thermal Exposure on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composite Pyramidal Truss Core Sandwich Panel", *Compos Part B-Eng*, Vol. 60, pp.82-90, 2014
- [23] Avila F, Carvalho MG AR, Dias C, da Cruz D ETL., "Nano-Structured Sandwich Composites Response to Low-Velocity Impact", *Compos Struct*, Vol. 92, No. 3, pp.51-745, 2010.
- [24] Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-Polyurea B-layer", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.
- [25] Sachse S, Poruri M, Silva F, Michalowski S, Pieliowski K, Njuguna J., "Effect of Nanofillers on Low Energy Impact Performance of Sandwich Structures with Nanoreinforced Polyurethane foam Cores", *J Sandw Struct Mater*, Vol. 16(2), pp.94-173, 2014.
- [26] Kazemi khasrag, E. Siadati, M.H. and Eslami-Farsani, R., "Effect of Surface Modification of Graphene Nanoplatelets on the High Velocity Impact Behavior of Basalt Fibers Reinforced Polymer-Based Composites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 1, pp. 109, 116, 2018
- الیاف، تورق (لایه لایه شدن) شده‌اند. بررسی آسیب نشان می‌دهد که نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن دارای آسیب ظاهری کمتری نسبت به مابقی نمونه می‌باشد. بنابراین افزودن نانوگرافن باعث کاهش آسیب بر روی نمونه‌ها می‌شود.
- 9- مراجع**
- [1] Dong J, Locquet A, Declercq NF and Citrin DS, "Polarization-Resolved Tera Hertz Imaging of Intra and Inter-Laminar Damages in Hybrid Fiber-Reinforced Composite Laminate Subject to Low-Velocity Impact," *Compos Part B-Eng*, Vol. 92, pp.74-167, 2016.
- [2] Mosallam AS., "Structural Evaluation and Design Procedure for Wood Beams Repaired and Retrofitted with FRP Laminates and Honeycomb Sandwich Panels," *Compos Part B-Eng*, Vol. 87, pp.196-213, 2016.
- [3] Scarponi C, Sarasini F, Tirillo J, Lampani L, Valente T and Gaudenzi P., "Low-Velocity Impact Behaviour of Hemp Fibre Reinforced Bio-Based Epoxy Laminates," *Compos Part B-Eng*, Vol. 91, pp.91-162, 2016.
- [4] Feng D and Aymerich F., "Damage Prediction in Composite Sandwich Panels Subjected to Low-Velocity Impact," *Compos Part A- Appls*, Vol. 52, pp. 12-22, 2013.
- [5] Sadeghi, M. and Pol, M. H., "Experimental Investigation of the Effect Effective of Factors and Parameters on the Punch on the Properties of Quasi-Static Punching Shear the Glass/Epoxy Composite", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 13-22, 2016.
- [6] Li B, Li Z, Zhou J, Ye L, Li E., "Damage Localization in Composite Lattice Truss Core Sandwich Structures based on Vibration Characteristics", *Compos Struct*, Vol. 126, pp.34-51, 2015.
- [7] Tuwaira H, Hopkins M, Volz J, ElGawady M, Mohamede M, Chandrashekhara K, et al., "Evaluation of Sandwich Panels With Various Polyurethane Foam-Cores and Ribs", *Compos Part B-Eng*, Vol. 79, pp.76-262, 2015.
- [8] Yang P, Shams SS, Slay A, Brokate B, Elhajjar R., "Evaluation of Temperature Effects on Low Velocity Impact Damage in Composite Sandwich Panels with Polymeric Foam Cores", *Compos Struct*, Vol. 129, pp.23-213, 2015.
- [9] Montemurro M, Catapano A, Doroszewski D., "A Multi-Scale Approach for the Simultaneous Shape and Material Optimisation of Sandwich Panels with Cellular Core", *Compos Part B-Eng*, Vol. 91, pp.72-458, 2016.
- [10] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/Basalt/Carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, 2016.
- [11] Wang J, Waas AM, Wang H. Experimental and Numerical Study on the Lowvelocity Impact Behavior of Foam-Core Sandwich Panels. *Compos Struct*, Vol. 96, pp.298-311, 2013.
- [12] Hua Y, Akula PK, Gu L., "Experimental and Numerical Investigation of Carbon Fiber Sandwich Panels Subjected to Blast Loading", *Compos Part B-Eng* Vol. 56, pp.63-456, 2014.
- [13] Roy R, Nguyen KH, Park YB, Kweon JH., Choi JH., "Testing and Modeling of Nomex™ Honeycomb Sandwich Panels with Bolt Insert", *Compos Part B-Eng*, Vol. 56, pp.9-762, 2014.
- [14] Rafiee, M. A. Rafiee, J. Wang, Z. Song, H. Yu, Z. Z. and Koratkar, N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content" *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- [15] Kabir K, Vodenitcharova T, Hoffman M., "Response Alaluminium foam-cored sandwich panels to bending load", *Compos Part B-Eng*, Vol. 64, pp.24-32, 2014.
- [16] Zhang G, Wang B, Ma L, Wu L, Pan S, Yang J., "Energy Absorption and Low Velocity Impact Response of Polyurethane Foam Filled Pyramidal Lattice Core Sandwich Panels", *Compos Struct*, Vol. 108, pp.10-304, 2014.
- [17] Shokrieh, M. M. Zeinedini, A. Ghoreishi, S. M., "Effects of Adding Multiwall Carbon Nanotubes on Mechanical Properties of Epoxy

