



## بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های مشبک تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چندجداره

رضا اسلامی فارسانی<sup>۱\*</sup>، علیرضا شهبابی فراهانی<sup>۲</sup>، حامد خسروی<sup>۳</sup>، محمدرضا زمانی<sup>۴</sup>

۱- دانشیار، مهندسی علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۱۹۹۹۱، eslami@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۵/۲/۱۵

پذیرش: ۹۵/۴/۱۵

### کلیدواژگان:

کامپوزیت مشبک چندمقیاسی  
هندسه شش ضلعی  
نانولوله‌های کربنی چندجداره  
خواص خمشی

### چکیده

سازه‌های مشبک کامپوزیتی با توجه به دارا بودن ساختار منحصر به فردی که به صورت یک ساختار شبکه‌ای متشکل از ریب‌ها است، دارای خواصی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، نسبت سفتی به وزن بالا، قابلیت جذب انرژی بسیار بالا و همچنین مقاومت به خوردگی مناسب هستند. در این مقاله، تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در درصد‌های وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴) بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مشبک زمینه پلیمری به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی مشبک حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد که در آن پوسته از رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و ریب‌ها با هندسه آنیزوگرید از رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن ساخته شدند. سپس بر روی این نمونه‌ها آزمون خمش سه نقطه‌ای صورت پذیرفت و پارامترهایی نظیر حداکثر بار خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان داد، بهترین رفتار خمشی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی حاصل می‌شود که در این حالت، میزان حداکثر بار خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی صفحات مشبک کامپوزیتی به ترتیب به میزان ۲۴، ۳۵ و ۲۵ درصد نسبت به نمونه مشبک فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بهبود خواص فصل‌مشرکی بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه را در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی نشان دادند که نقش بسزایی را در بهبود خواص مکانیکی سازه مشبک ایفا می‌کند.

## A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes

Reza Eslami-Farsani<sup>1\*</sup>, Alireza Shahrabi-Farahani<sup>1</sup>, Hamed Khosravi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Zamani<sup>2</sup>

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Ph.D. Candidate, Faculty of Mechanics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Multiscale grid composite  
Hexagonal geometry  
Multi walled carbon nanotubes  
Flexural Properties

### Abstract

Grid composite structures (GCSs) owing to their unique shape which is a network of ribs, have some interesting properties such as low strength to weight ratio, low stiffness to weight ratio, high energy absorption capability and good corrosion resistance. In this study, the effect of the multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) addition at various weight percentages with respect to the matrix (0, 0.1, 0.25 and 0.4) on the flexural behavior of GCSs was experimentally examined. For fabricating of the composites, hand lay-up method was used, where plain E-glass and unidirectional carbon fibers impregnated to the resin mixture were used in the skin and rib parts. Afterwards, 3-point bending test was performed on these specimens and the parameters such as maximum flexural load, flexural stiffness and energy absorption were studied. Experimental results showed that, the best flexural behavior was obtained with the addition of 0.4 wt. % of MWCNTs. In this case, the maximum flexural load, flexural stiffness and energy absorption of the GCSs increased by 24%, 35% and 25%, respectively compared to the specimen without MWCNTs addition. The microstructural investigations of the fracture surfaces using electron microscopy clearly indicated the improvement in the interfacial adhesion between the fibers and epoxy matrix in the case of the nanocomposite specimen. This case plays an important role for improvement in the mechanical properties of the GCSs.

### Please cite this article using:

Eslami-Farsani, R. Shahrabi-Farahani, A. Khosravi, H. and Zamani, M. R., "A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 101-108, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

از زمان ابداع مواد کامپوزیتی، تاثیر شگرف این مواد در صنایع مختلف غیر قابل انکار است. در این میان صنایع هوا و فضا شاهد بیشترین میزان بهره‌وری از این مواد بوده است [۱]. با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی اندیشه ساخت سازه‌های کامپوزیتی به دلیل استحکام و دوام این سازه‌ها در مقایسه با سازه‌های فلزی مطرح شد. سازه‌هایی تحت عنوان سازه‌های مشبک کامپوزیتی یکی از نتایج این تلاش‌ها بوده است [۲].

سازه‌های مشبک کامپوزیتی به دلیل دارا بودن مزایایی همچون استحکام و سفتی ویژه بالا، ظرفیت تحمل بار بسیار بالا، قابلیت جذب انرژی فوق‌العاده، مقاومت به ضربه بالا و خواص مقاومت به خوردگی مطلوب، امروزه به طور وسیعی در صنایع هواپیماسازی، صنایع موشکی و دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. یک سازه کامپوزیتی مشبک را می‌توان به صورت قرارگیری ریب‌های کامپوزیتی متصل به یکدیگر که تشکیل یک مجموعه پیوسته را می‌دهند، در نظر گرفت. این نوع سازه‌ها بسته به نوع کاربرد می‌توانند از یک طرف و یا از هر دو طرف سازه با پوسته پوشانیده شوند [۴]. ضخامت پوسته در سازه‌های مشبک کم بوده و بر اساس عملکرد سازه تعیین می‌شود [۵]. این سازه‌ها دارای تلورانس تخریب بالایی هستند که بدان علت است که به علت وجود ریب‌های مجزا، ترک‌ها قادر نمی‌باشند که از یک ریب به ریب مجاور آن رفته و بنابراین از این طریق میزان توانایی تحمل بار به وسیله سازه افزایش می‌یابد [۶]. با توجه به این‌که سازه‌های مشبک شامل مجموعه‌ای از گره‌ها<sup>۱</sup> و ریب‌ها هستند، بنابراین تحت بارگذاری‌های مختلف قادر به توزیع بهتر تنش‌های اعمالی و تحمل بیشتر آن‌ها نسبت به سایر سازه‌های کامپوزیتی هستند.

معیارهای مختلفی برای پیش‌بینی شکست در سازه‌های مشبک وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به شکست ریب‌ها، کمانش ریب‌ها، مودهای تخریب برشی، جدایش لایه‌ها و جدایش ریب‌ها از پوسته اشاره نمود [۷]. به دلیل استفاده وسیع از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف، مطالعات زیادی بر روی خواص مکانیکی آن‌ها صورت گرفته است. اصلاح خواص کامپوزیت‌های زمینه پلیمری الیافی از طریق افزودن ذرات در مقیاس نانومتری منجر به بهبود رفتار مکانیکی آن‌ها می‌شود که به این دسته از مواد، کامپوزیت‌های چندمقیاسی<sup>۲</sup> اطلاق می‌شود [۸].

نانولوله‌های کربنی به دلیل دارا بودن خواص ویژه نظیر وزن مخصوص پایین، مدول یانگ بالا و استحکام مکانیکی فوق‌العاده به طور وسیعی به عنوان تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹]. در ارتباط با بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف از طریق افزودن نانولوله‌های کربنی تحقیقات بنیادی و کاربردی صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که خواص مکانیکی این دسته از نانوکامپوزیت‌ها با افزودن نانولوله‌های کربنی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که وابسته به نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی درون زمینه کامپوزیت است. در ادامه به بررسی خلاصه نتایج برخی کارهای تجربی در این زمینه پرداخته شده است.

ژانگ و همکاران [۱۰] به مطالعه تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف کربن/اپوکسی پرداختند و نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به زمینه اپوکسی منجر به افزایش ۱۰ درصد در استحکام کششی کامپوزیت می‌شود. ژو و همکاران [۱۱] به

بررسی تجربی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص خمشی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن پرداختند و نشان دادند که با افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی استحکام خمشی کامپوزیت ۲۸ درصد در مقایسه با اپوکسی خالص، افزایش پیدا می‌کند. زین‌الدین و همکاران [۱۲] نشان دادند که افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی منجر به افزایش ۲۵ درصد استحکام خمشی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه در مقایسه با اپوکسی خالص می‌شود.

لی و همکاران [۱۳] به بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با سیلان بر خواص کششی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی موجب افزایش ۳۴ درصدی استحکام کششی و ۶۰ درصدی مدول کششی کامپوزیت نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله‌های کربنی می‌شود. کیم و همکاران [۱۴] نشان دادند افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با سیلان منجر به بهبود استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف بازالت به میزان ۱۰ درصد و مدول خمشی کامپوزیت به میزان ۱۴ درصد می‌شود.

تحقیقات رحمان و همکاران [۱۵] نشان داد که به ازای افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با گروه‌های عاملی آمینی استحکام خمشی کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی به میزان ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. شکریه و همکاران [۱۶] به بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی پرداختند و تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی منجر به افزایش ۱۳ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت می‌شود. خسروی و همکاران [۱۷] نشان دادند که به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، استحکام خمشی و مدول خمشی کامپوزیت الیاف بازالت-اپوکسی به ترتیب به میزان ۳۸ درصد و ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

نانولوله‌های کربنی به علت دارا بودن مساحت ویژه<sup>۳</sup> و نسبت طول به قطر بالا<sup>۴</sup> تمایل زیادی به تجمع خوشه‌ای دارند. تجمع نانولوله‌های کربنی باعث ایجاد تمرکز تنش در کامپوزیت می‌شود که در ادامه باعث آن می‌شود که خواص مکانیکی کامپوزیت دچار افت شود. بنابراین نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی نقش بسیار مهمی را در عملکرد این نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی ایفا می‌کند. بر این اساس، روش‌هایی نظیر استفاده از امواج اولتراسونیک و اختلاط با سرعت بالا به منظور بهبود توزیع نانولوله‌های کربنی داخل زمینه پلیمری در منابع مختلف ارائه شده است [۱۸-۲۱].

طبق مطالعات صورت گرفته در ارتباط با تأثیر افزودن نانوذرات سرامیکی بر رفتار مکانیکی سازه‌های مشبک کامپوزیتی تاکنون تحقیقات جامعی صورت نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر هدف آن است تا اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی کربوکسیل (MWCNT-COOH)<sup>۵</sup> در درصد‌های وزنی مختلف نسبت به زمینه (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴) بر رفتار خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی با هندسه آیزوگرید به صورت تجربی مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای مورد بررسی آزمون شامل بار حداکثر خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی سازه می‌باشند. همچنین برای توجیه نتایج حاصله از مطالعات میکروسکوپی سطح شکست نمونه‌ها استفاده شده است.

3. Specific Surface Area

4. Aspect Ratio

5. Multi-walled carbon nanotubes functionalized with carboxyl groups

1. Nodes

2. Multiscale Composites

## ۲-۲- ساخت قالب سیلیکونی

برای ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی، قالب سیلیکونی ساخته شد. بدین منظور، در مرحله اول طرح شبکه مشبک توسط نرم افزار SolidWorks طراحی شد. سپس روی ورق از جنس پلی وینیل کلرید (PVC) الگوی شبکه مشبک شش ضلعی و شابلون با استفاده از دستگاه CNC ایجاد گردید. سپس سیلیکون قالب‌گیری درون شابلون ریخته شده و پس از پخت، قالب سیلیکونی از شابلون جدا شد. در شکل ۲ نمایی از قالب و شابلون نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ نمایی از الف) شابلون مورد استفاده برای ساخت قالب با هندسه شش ضلعی و ب) قالب مورد استفاده برای ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی

## ۲-۳- توزیع نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی

به منظور توزیع نانولوله‌های کربنی درون زمینه اپوکسی در ابتدا رزین اپوکسی با استون به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ رقیق شد که این امر منجر به پایین آمدن ویسکوزیته رزین و توزیع هر چه بهتر نانولوله‌های کربنی درون زمینه می‌شود. نانولوله‌های کربنی در مقادیر مختلف ۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴ درصد وزنی به رزین اپوکسی اضافه شدند و با استفاده از همزن مکانیکی دور بالا (ساخت شرکت فاین تک کره جنوبی) به مدت ۲۰ دقیقه تحت دور rpm ۲۰۰۰ عملیات اختلاط اولیه نانولوله‌های کربنی داخل رزین اپوکسی صورت پذیرفت. پس از اتمام این مرحله، مخلوط حاصله به منظور شکستن خوشه‌های باقیمانده تحت امواج اولتراسونیک (دستگاه ساخت شرکت فاپن ایران) با توان ۱۲۰ W و فرکانس ۲۴ kHz قرار گرفتند. پس از اعمال امواج اولتراسونیک به منظور خروج حباب‌های گیرافتاده هوا تا حد امکان، مخلوط نهایی به مدت ۲۰ دقیقه تحت فشار ۰/۱ bar توسط پمپ خلاء هواگیری شد [۲۲].

## ۲-۴- ساخت صفحات مشبک نانوکامپوزیتی

ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی شامل دو قسمت ساخت تقویت‌کننده‌ها و سپس ساخت پوسته است. برای ساخت صفحات مشبک کامپوزیتی از روش

نانولوله‌های کربنی به علت دارا بودن مساحت ویژه<sup>۱</sup> و نسبت طول به قطر بالا<sup>۲</sup> تمایل زیادی به آگلومره شدن دارند. آگلومره شدن نانولوله‌های کربنی باعث ایجاد تمرکز تنش در کامپوزیت می‌شود که باعث می‌شود خواص مکانیکی کامپوزیت تقلیل یابد. بنابراین نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی نقش بسیار مهمی را در عملکرد این ذرات در بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی ایفا می‌نماید. بر این اساس، روش‌هایی نظیر استفاده از امواج اولتراسونیک و اختلاط با سرعت بالا به منظور بهبود توزیع نانولوله‌های کربنی داخل زمینه پلیمری در منابع ارائه گردیده است [۱۸-۲۱].

در زمینه تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های مشبک تحقیقاتی انجام نشده است. بر این اساس، در این پژوهش اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با گروه‌های عاملی کربوکسیل (MWCNT-COOH)<sup>۳</sup> در درصد‌های وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴) روی رفتار خمشی صفحات مشبک کامپوزیت زمینه اپوکسی با هندسه شش ضلعی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی ML-506 بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول F و هاردنر پلی آمینی HA-11 با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ نسبت به پایه اپوکسی با آن مخلوط می‌شود از سری محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. الیاف شیشه استفاده شده نوع E با بافت دو بعدی و وزن واحد سطح  $400 \text{ g/m}^2$  متعلق به شرکت لینتکس<sup>۴</sup> کشور چین به عنوان تقویت‌کننده پوسته و رووینگ الیاف کربن با دانسیته حجمی  $1/76 \text{ g/cm}^3$  و استحکام کششی  $2600 \text{ MPa}$  به عنوان تقویت‌کننده ریب‌ها استفاده شدند.

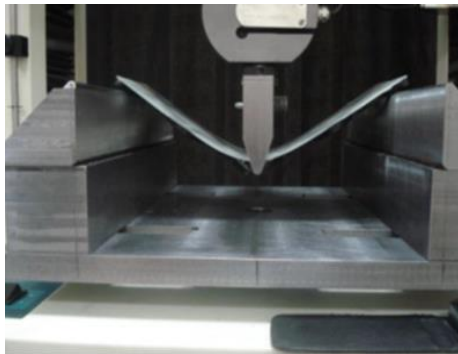
در این تحقیق، نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با کربوکسیل (۲ درصد وزنی) با خلوص بیش از ۹۵ درصد، قطر داخلی ۱۰-۵ نانومتر، قطر خارجی ۲۰-۱۰ نانومتر و طول ۳۰-۱۰ میکرومتر متعلق به شرکت چیپ تیوبز<sup>۵</sup> کشور آمریکا به عنوان تقویت‌کننده در مقیاس نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند که در شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۶</sup> نانولوله‌های کربنی نمایش داده شده است.



شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانولوله‌های کربنی مورد استفاده

1. Specific Surface Area
2. Aspect Ratio
3. Multi-walled carbon nanotubes functionalized with carboxyl groups
4. Lintex
5. CheapTubes
6. Transission Electron Microscopy

کیلونیوتن استفاده شد. مشخصات نمونه مورد استفاده برای آزمون خمش در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴ صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بار خمشی

#### ۵-۲- بررسی‌های ریزساختاری

به منظور بررسی سطح شکست نمونه‌ها از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی عمق میدانی<sup>۲</sup> (FESEM) مدل Mira 3-XMU و HITACHI S-4160 استفاده شد.

جدول ۱ مشخصات نمونه مورد استفاده برای آزمون خمش

مقدار	مشخصه
۳۰۰×۱۲/۵×۷/۸	ابعاد نمونه (mm <sup>3</sup> )
۶×۶	سطح مقطع ریب‌ها (mm <sup>2</sup> )
۱/۸	ضخامت پوسته (mm)
۳۰	مقدار الیاف کربن در ریب‌ها (Vol.%)
۴۸	مقدار الیاف شیشه در پوسته (Vol.%)
(۰/۴ و ۰/۲۵، ۰/۱، ۰)	مقدار نانولوله کربنی در زمینه (Wt.%)

#### ۳- نتایج و بحث

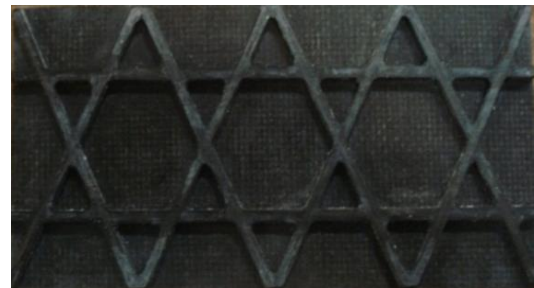
##### ۳-۱- منحنی‌های نیرو- جابجایی

در شکل ۵ منحنی‌های نیرو- جابجایی برای صفحات مشبک کامپوزیتی دارای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها قابل مشاهده است رفتار تخریب برای کلیه نمونه‌ها یکسان بوده و افزودن نانولوله‌های کربنی رفتار خمشی سازه‌های مشبک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در کلیه نمونه‌ها در ابتدا یک ناحیه خطی الاستیک قابل مشاهده است که پس از عبور از این ناحیه و رسیدن به نقطه حداکثر بار افت نیرو اتفاق می‌افتد و سازه تا زمان شکست مقداری انرژی جذب می‌کند. لازم به ذکر است که در این سازه‌ها بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از شکست اولیه سازه در نقطه حداکثر بار مشاهده می‌شود که تلورانس تخریب بالای این سازه‌ها به علت وجود مسیرهای بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد. زمانی که صفحه مشبک کامپوزیتی از سمت پوسته تحت بارگذاری خمشی قرار می‌گیرد ریب‌های افقی سازه بیشترین میزان بار کششی را تحمل می‌کنند و نقطه بار حداکثر در منحنی‌های نیرو- جابجایی محلی است که شکست اولیه ریب افقی را در سطح بیرونی آن شاهد هستیم. در ادامه به منظور تحلیل بهتر نتایج مقادیر عددی حداکثر بار خمشی، سفتی خمشی و جذب انرژی از منحنی‌های حاصله استخراج شد که نتایج آن به صورت تابعی از درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در ادامه آورده شده است.

لایه‌گذاری دستی<sup>۱</sup> استفاده شد. رزین تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی با هاردنر در دمای محیط مخلوط شده و سپس الیاف کربن پیش آغشته شده با رزین به صورت لایه به لایه درون شیارهای قالب قرار داده شد. در مرحله بعد سطح روی قالب توسط رزین تر شد و سپس لایه گذاری پوسته توسط ۴ لایه الیاف شیشه حصیری صورت پذیرفت. نمونه ساخته شده بین ۲ تا ۳ ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا عمل پخت رزین صورت گیرد و پس از آن نمونه از قالب جدا گردید. به‌منظور رسیدن به حداکثر استحکام نیز نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط قرار گرفتند. در شکل ۳ نمای از صفحات مشبک کامپوزیتی ساخته شده، نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳ صفحات مشبک کامپوزیتی با هندسه شش ضلعی (الف) فاقد نانولوله‌های کربنی، (ب) تقویت شده با نانولوله‌های کربنی

##### ۵-۲- آزمون خمش سه نقطه‌ای

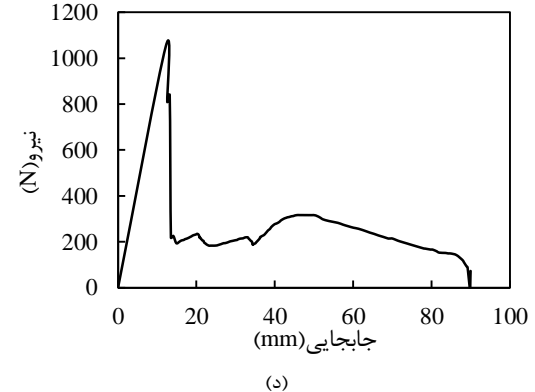
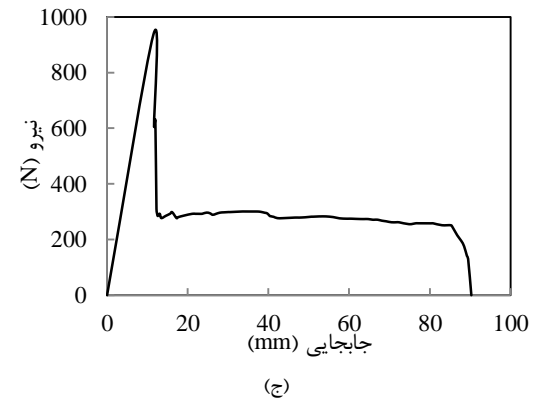
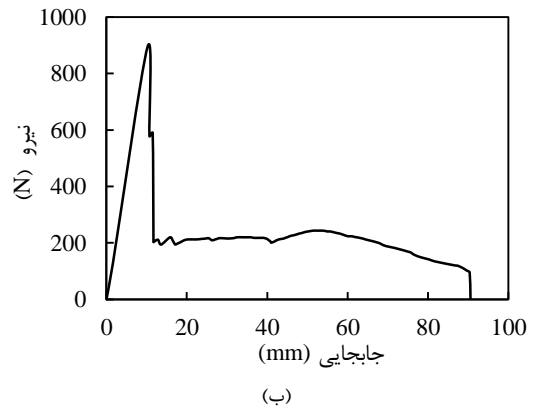
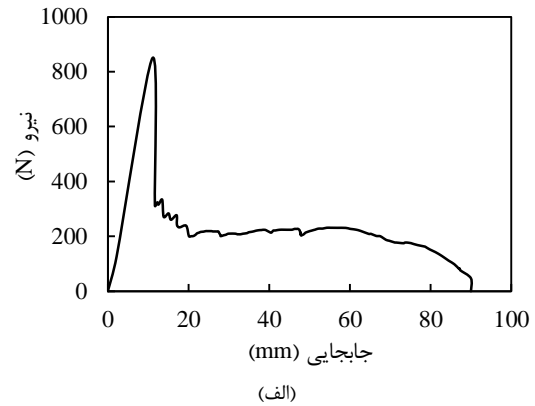
آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی صفحات مشبک کامپوزیتی مطابق با ملزومات استاندارد ASTM D7264-07 صورت پذیرفت. برای جلوگیری از لغزش نمونه‌ها در حین انجام آزمون، نمونه از هر طرف تکیه‌گاه باید به میزان حداقل ۱۰ درصد از فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد. نسبت فاصله بین دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه طبق استاندارد برابر با ۳۲ به ۱ در نظر گرفته شد [۲۳]. برای تمامی آزمون‌ها فاصله بین دو تکیه‌گاه ثابت و معادل ۲۵۰ میلی‌متر بود تا نسبت ۳۲ به ۱ برای نسبت فاصله دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه مطابق استاندارد رعایت شده باشد. همچنین سرعت حرکت دماغه بارگذاری برابر با ۵ mm/min در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه بهتر خواص خمشی نمونه‌ها، پس از رسیدن به میزان جابجایی ۹۰ میلی‌متر در حین آزمون، بارگذاری متوقف شد. در شکل ۴ نحوه قرارگیری نمونه بر روی نگهدارنده در حین آزمون نشان داده شده است. لازم به ذکر است که آزمون خمش بر روی کلیه نمونه‌ها از سمت پوسته صورت پذیرفت. به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده، هر آزمایش حداقل سه مرتبه تکرار شد. برای انجام آزمون خمش از دستگاه هانسفیلد مدل H25KS با ظرفیت اعمال بار ۲۵

2. Field emission electron microscopy

1. Hand lay-up

۲-۳- حداکثر بار خمشی

در شکل ۶ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر حداکثر بار خمشی قابل تحمل صفحات مشبک کامپوزیتی نشان داده شده است.



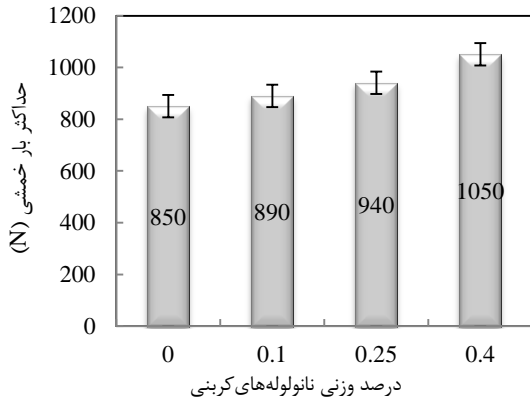
شکل ۵ منحنی‌های نیرو-جابجایی برای صفحات مشبک نانوکامپوزیتی (الف) فاقد نانولوله‌های کربنی، (ب) حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، (ج) حاوی ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و (د) حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی

به‌ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی حداکثر بار خمشی صفحات مشبک ۵ درصد و به‌ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، حداکثر بار خمشی ۲۴ درصد نسبت به صفحات مشبک فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش می‌یابد.

افزایش حداکثر بار خمشی به‌ازای افزودن نانولوله‌های کربنی ناشی از بهبود فصل مشترک بین زمینه و الیاف است. فصل مشترک در مواد کامپوزیتی از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا انتقال تنش از طریق فصل مشترک الیاف و زمینه صورت می‌پذیرد. بنابراین رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی تحت تأثیر فصل مشترک قرار دارد. فصل مشترک قوی بین زمینه و تقویت‌کننده موجب بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود [۲۴، ۲۵].

شرایط فصل مشترک نیز حالت شکست کامپوزیت را تعیین می‌نماید. نانولوله‌های کربنی منجر به افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف شده که در نتیجه فصل مشترک زمینه و الیاف بهبود می‌یابد. از آن‌جا که انتقال تنش از طریق فصل مشترک صورت می‌گیرد، بهبود خواص فصل مشترک منجر به بهبود انتقال تنش گشته و در نهایت ظرفیت تحمل بار افزایش می‌یابد [۲۶].

از طرف دیگر استحکام فصل مشترک، طول انتقال تنش را مشخص می‌نماید. فصل مشترک مستحکم‌تر، منجر به طول انتقال تنش کوتاه‌تر می‌شود و بنابراین بخش زیادی از الیاف، بار اعمال شده را تحمل می‌نماید که منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار می‌شود. برعکس فصل مشترک ضعیف‌تر طول انتقال تنش زیادتری دارند و بخش کمی از الیاف، بار اعمال شده را تحمل می‌نماید که منجر به کاهش ظرفیت تحمل بار می‌شود [۲۷].



شکل ۶ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر حداکثر بار خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی

در شکل ۷، نحوه شکست صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بار خمشی در پوسته و ریب نشان داده شده است. مکانیزم‌های اصلی شکست هنگامی که یک صفحه مشبک آنیزوگراید تحت بارگذاری خمشی از سمت پوسته قرار می‌گیرد شامل پارگی الیاف و میکروکمانش الیاف است. میکروکمانش الیاف هنگامی رخ می‌دهد که تنش موضعی فشاری در امتداد الیاف به مقدار استحکام فشاری کامپوزیت برسد. در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، سطح الیاف و فصل مشترک زمینه و الیاف به عنوان مناطق تمرکز تنش هستند و این مناطق تمرکز تنش عمدتاً مناطقی برای جوانه‌زنی ترک می‌باشند [۲۸]. افزودن نانولوله‌های کربنی به زمینه می‌تواند به صورت مؤثری تمرکز تنش بر روی سطح الیاف را کاهش دهد و تنش مورد نیاز برای پارگی الیاف و ریزکمانش پوسته را افزایش می‌دهد. این بدان علت است که به علت تقویت زمینه از طریق افزودن نانولوله‌های کربنی بخش بیشتری از بار توسط زمینه تحمل می‌شود و از میزان بار بر روی الیاف کاسته می‌شود.



### ۳-۳- سفتی خمشی

سفتی خمشی به صورت پارامتر سفتی<sup>۱</sup> تعریف می‌شود که مدول خمشی بوده و برابر با شیب منحنی نیرو-جابجایی در قسمت خطی اولیه است که واحد آن نیوتون بر میلی‌متر است. افزایش این پارامتر منجر به افزایش سفتی نمونه مشبک می‌شود.

### ۳-۴- انرژی جذب شده

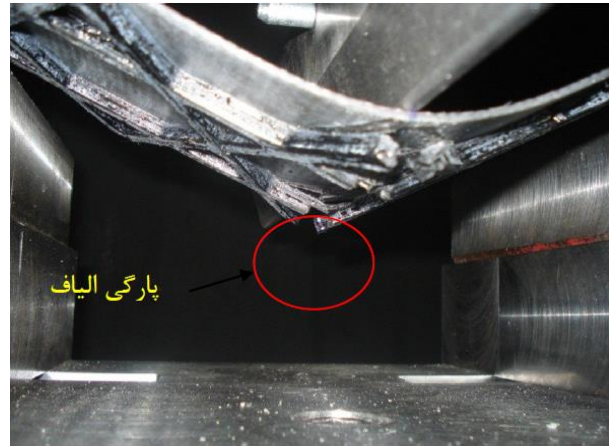
میزان جذب انرژی سازه‌های مشبک از طریق اندازه‌گیری سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی حاصل می‌شود. تغییرات میزان جذب انرژی برحسب درصد وزنی نانولوله‌های کربنی برای نمونه‌های مورد مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است.

به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، میزان جذب انرژی به میزان ۹ درصد نسبت به صفحه مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش یافته است و این در حالی است که با افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، میزان جذب انرژی به میزان ۲۵ درصد افزایش یافته است. افزایش میزان جذب انرژی صفحات مشبک کامپوزیتی در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی می‌تواند مربوط به اثر پل‌زنی<sup>۲</sup> نانولوله‌های کربنی باشد که شماتیک آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

نانولوله‌ها معمولاً به خاطر قابلیتشان برای پل‌زدن ترک در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شناخته شده‌اند. طول کل این ساختارهای کربنی معمولاً به قدری بزرگ است (بیشتر از ۱۰ میکرومتر) که یک منطقه پل کوچک در دنباله ترک ظاهر می‌شود.

نخستین حالت تخریب در کامپوزیت‌های لایه‌ای تشکیل ریزترک در زمینه است. از آن‌جا که زمینه پلیمری ضعیف‌ترین نقطه در کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود، ترک ایجاد شده در اثر بارگذاری در امتداد زمینه رشد می‌نماید تا هنگامی که به فصل مشترک الیاف و زمینه برسد. اگر پیوند بین زمینه و الیاف قوی نباشد ترک به راحتی اشاعه پیدا می‌کند [۱۰،۳۰].

در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی فصل مشترک بین زمینه و الیاف بهبود می‌یابد و نانولوله‌های کربنی به دلیل دارا بودن نسبت طول به قطر بالا از باز شدن دهانه ترک در حال رشد، ممانعت می‌کنند. بنابراین انرژی بیشتری برای اشاعه ترک نیاز است که در نتیجه میزان جذب انرژی کامپوزیت مشبک افزایش می‌یابد [۳۰،۳۱].

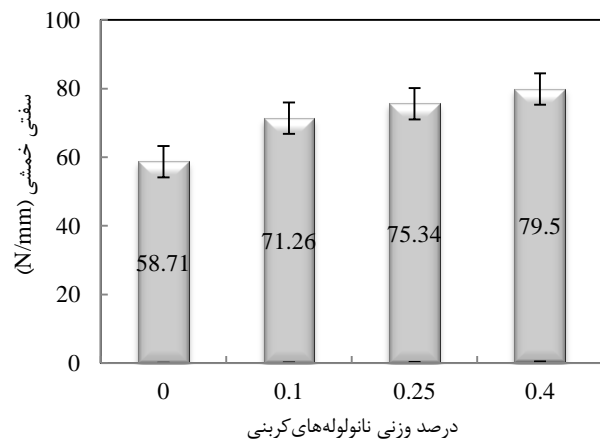


(الف)



(ب)

شکل ۷ شکست صفحه مشبک کامپوزیتی تحت بار خمشی (الف) شکست کششی ریب‌ها، (ب) کمانش پوسته



شکل ۸ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر پارامتر سفتی خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی

در شکل ۸ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر تغییرات فاکتور سفتی خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی نمایش داده شده است. به‌ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، فاکتور سفتی خمشی ۲۱ درصد و به‌ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، فاکتور سفتی خمشی ۳۵ درصد نسبت به سازه مشبک فاقد نانولوله‌های کربنی، افزایش می‌یابد.

افزایش مدول خمشی در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی، به دلیل سفتی بالاتر نانولوله‌های کربنی در مقایسه با زمینه اپوکسی می‌باشد. همچنین توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی داخل زمینه پلیمری باعث افزایش پیوند و چسبندگی بین سطحی نانولوله‌های کربنی و زمینه پلیمری شده که موجب محدود شدن جنبش و تحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری می‌شود. که نتیجه این امر افزایش مدول خمشی کامپوزیت است [۲۹].

۱- صفحات مشبک کامپوزیتی دارای تلورانس تخریب بسیار مطلوبی هستند که به علت وجود ریب‌های مجزا در ساختار این سازه‌ها است. بخش قابل توجهی از جذب انرژی در این سازه‌ها پس از شکست اولیه در نقطه حداکثر بار مشاهده شد.

۱- به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، میزان حداکثر بار خمشی به میزان ۲۴ درصد نسبت به نمونه مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی افزایش یافت.

۲- به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، میزان سفتی خمشی به میزان ۳۵ درصد نسبت به نمونه مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی افزایش یافت.

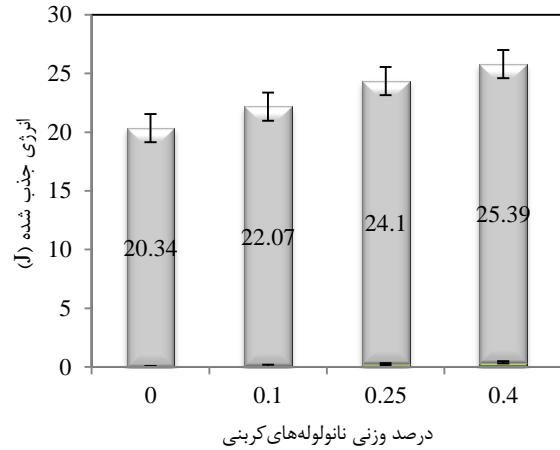
۳- به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، میزان جذب انرژی به میزان ۲۵ درصد نسبت به نمونه مشبک کامپوزیتی فاقد نانولوله‌های کربنی افزایش یافت.

۴- مکانیزم‌های اصلی شکست صفحات مشبک کامپوزیتی هنگامی که از سمت پوسته تحت بار خمشی قرار گرفتند، شامل شکست کششی الیاف در ریب‌ها و میکروکمانش الیاف در پوسته بودند.

۵- بهبود در رفتار خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی به ازای افزودن نانولوله‌های کربنی ناشی از بهبود خواص فصل‌مشارکتی زمین و الیاف و همچنین تقویت‌کنندگی زمینه است که باعث می‌شود انتقال بار موثرتری از زمینه به الیاف صورت پذیرد. مطالعات میکروسکوپی سطح شکست ادعاهای فوق را تایید کردند.

#### ۵- مراجع

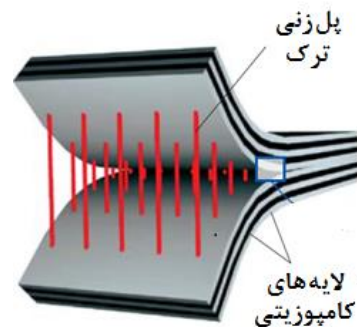
- [1] Lim, K. He, W. Guan, Z., "Buckling Analysis of Advanced Grid Stiffened Composite Cylinders", *Advanced Materials Research*, Vol. 875-877, pp. 755-762, 2014.
- [2] Morozov, E. V. Lopatin, A.V. and Nesterov, V.A., "Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Cylindrical Shells", *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 308-323, 2011.
- [3] Vasiliev, V.V. Barynin, V.A. and Razin, A.F., "Anisogrid Composite Lattice Structures, Development and Aerospace Applications," *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 1117-1127, 2012.
- [4] Huybrechts, S.M. Meink, T.E. Wegner, P.M. Ganley, J.M., "Manufacturing Theory for Advanced Grid Stiffened Structures", *Composites Part A*, Vol.33, pp. 155-161, 2002.
- [5] Vasiliev, V.V. and Razin A.F., "Anisogrid Composite Lattice Structures For Spacecraft And Aircraft Applications", *Composite Structures*, Vol. 76, pp. 182-189, 2006.
- [6] Totaro, G., "Local Buckling Modelling Of Isogrid And Anisogrid Lattice Cylindrical Shells With Hexagonal Cells", *Composite Structures*, Vol. 95, pp. 403-410, 2013.
- [7] Jingxuan, H. Mingfa, R. Shiyong, S. Huang, Q. Sun, X., "Failure Prediction on Advanced Grid Stiffened Composite Cylinder Under Axial Compression", *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1939-1946, 2011.
- [8] Shokrieh, M.M. Saeedi, A. and Chitsazzadeh, M., "Evaluating The Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Chopped Strand Mat/Polyester Composites", *Materials Design*, Vol. 56, pp. 274-279, 2014.
- [9] Khan, S.H. and Kim, J., "Impact and Delamination Failure of Multiscale Carbon Nanotube- Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review", *International Journal of Aeronautical and Space Science*, Vol. 12, pp. 115-133, 2011.
- [10] Zhang, J. Su, J. Jiang, D. and Peng, H., "Reducing Dispersity Of Mechanical Properties Of Carbon fiber/Epoxy Composites By Introducing Multi-Walled Carbon Nanotubes", *Composites*, Vol. 54, pp. 371-376, 2013.
- [11] Zhou, Y. Pervin, F. Rangari, V. K. and Jeelani, S., "Fabrication and Evaluation of Carbon Nanofiber filled Carbon/Epoxy Composite", *Materials Science and Engineering*, Vol. 426, pp. 221-228, 2006.
- [12] Zainuddin, S. Fahim, A. Arifin, T. Hosur, M. V. Rahman, M. M. Tyson, J. D. and Jeelani, S., "Optimization of Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of Epoxy and E-Glass/Epoxy Composites Using NH<sub>2</sub>-MWCNTs, Acetone Solvent And Combined Dispersion Methods", *Composite Structures*, Vol. 110, pp. 39-50, 2014.
- [13] Lee, J. H. Rhee, K. Y. and Park, S. J., "The Tensile and Thermal Properties of Modified CNT-Reinforced Basalt/Epoxy Composites", *Materials Science and Engineering*, Vol. 527, pp. 6838- 6843, 2010.



شکل ۹ اثر افزودن نانولوله‌های کربنی بر انرژی جذب شده صفحات مشبک کامپوزیتی

#### ۳-۵- مطالعات میکروسکوپی

در شکل ۱۱ سطح شکست ریب‌های افقی مربوط به دو نمونه شاهد بدون افزودن نانولوله کربنی (شکل ۱۱ الف) و نمونه دارای ۰/۴ درصد وزنی نانولوله کربنی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود سطوح الیاف برای نمونه شاهد با زمینه اپوکسی صاف و عاری از هرگونه رزین زمینه روی آن است که موید آن است که در ارتباط با این نمونه فصل‌مشارکت زمینه و الیاف ضعیف بوده و جدایش فصل‌مشارکت مکانیزم اصلی شکست به شمار می‌رود. اما در مقابل برای نمونه با زمینه نانوکامپوزیتی (شکل ۱۱ ب) آثاری از زمینه متصل به الیاف قابل مشاهده است که خواص خوب فصل-مشارکت الیاف و زمینه را در این حالت نشان می‌دهد. در ارتباط با این نمونه شکست زمینه مکانیزم اصلی شکست به شمار می‌رود. تصویر میکروسکوپی الکترونی با بزرگنمایی بالا از سطح شکست زمینه نانوکامپوزیتی (شکل ۱۲)، نشان‌دهنده حضور نانولوله‌های کربنی است که یا شکسته شده و یا از سطح بیرون زده‌اند که این‌ها شواهدی بر وقوع مکانیزم پل‌زنی ترک در زمینه توسط این ناوذرات است [۱۷].



شکل ۱۰ مکانیزم پل‌زنی ترک توسط نانولوله‌های کربنی [۲۰]

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره اصلاح شده با گروه‌های عاملی کربوکسیل در درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴) نسبت به زمینه بر خواص خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج نهایی آن به شرح زیر است:

- [14] Kim, M.T. Rhee, K.Y. Park, S.J., and Hui, D., "Effects of Silane-Modified Carbon Nanotubes on Flexural and Fracture Behaviors of Carbon Nanotube-Modified Epoxy/Basalt Composites", *Composites (Part B)*, Vol. 43, pp. 2298-2302, 2012.
- [15] Rahman, M.M. Zainuddin, S. Hosur, M.V. Malone, J.E. Salam, M.B.A. Kumar, A. and Jeelani, S., "Improvements In Mechanical And Thermo-Mechanical Properties Of E-Glass/Epoxy Composites Using Amino Functionalized MWCNTs", *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 2397-2406, 2012.
- [16] Shokrieh, M. M. Zeinedini, A. and Ghoreishi, S. M., "Effects Of Adding Multi Wall Carbon Nanotubes On Mechanical Properties Of Epoxy Resin And Glass/Epoxy Laminated Composites", In *Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 125- 133, 2015.
- [17] Khosravi, H. and Eslami Farsani, R., "On the Mechanical Characterizations of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Laminated Composites with 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes-Enhanced Matrix", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 35, pp. 421-434, 2016.
- [18] Sinar, A. A. Nurazni, M. A. Firuz, Z. Hazizan, M. A. SitiShuhadah, M. S. and Sahrim, H. A., "Treatment Method For Dispersion Of Carbon Nanotubes A Review", *Materials Science Forum*, Vol. 803, pp. 299-304, 2015.
- [19] Huang, Y.Y. and Terentjev, M.E., "Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties", *Polymers*, Vol. 4, pp. 275-295, 2012.
- [20] Peng, M. Siddiqui, N. Marom, G. and Kim, J.K., "Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: a Review" *Composites, Part A*, Vol. 41, pp. 1345-1367, 2010.
- [21] Xie, L.X. Mai, W.Y. and Zhou, P.X., "Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix: A Review", *Materials Science and Engineering*, Vol. 49, pp. 89-112, 2005.
- [22] Khosravi, H. Eslami-Farsani, R., "Reinforcing Effect of Surface-Modified Multiwalled Carbon Nanotubes on Flexural Response of E-Glass/ Epoxy Isogrid-Stiffened Composite Panels", *Polymer Composites*, 2016. First Online Published, DOI 10.1002/pc.24118.
- [23] Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standard, D7264/D7264M-07, 2007.
- [24] Kim, J.K. and Mai, Y.W., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites", Elsevier, pp. 93- 94, 1998.
- [25] Kocsis, J.K. Mahmood, H. Pegoretti, A., "Recent Advances In Fiber/Matrix Interphase Engineering For Polymer Composites", *Progress in Materials Science*, Vol. 73, pp. 1-43, 2015.
- [26] Irshidat, R. M. Al-Saleh, M.H. and Al-Shoubaki, M., "Using Carbon Nanotubes To Improve Strengthening Efficiency Of Carbon Fiber/Epoxy Composites Confined RC Columns", *Composite Structures*, Vol. 134, pp. 523-532, 2015.
- [27] Mehan, M. L. and Schadler, L. S., "Micromechanical behavior of short-Fiber polymer composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 1013-1026, 2000.
- [28] Houshyar, S. Shanks, A. and Hodzic, A., "Modelling Of Polypropylene Fiber-Matrix Composites Using Finite Element Analysis", *Express Polymer Letters*, Vol. 3, pp. 2-12, 2009.
- [29] Tehrani, M. Boroujeni, A. Y. Hartman, T. B. Haugh, T. P. Case, S. W. and Al-Haik, M.S., "Mechanical Characterization and Impact Damage Assessment of a Woven Carbon fiber Reinforced Carbon Nanotube-Epoxy Composite", *Composites Science and Technology*, Vol. 75, pp. 42-48, 2013.
- [30] Garcia, J. E. Wardle, B. L. Hart, A. J., "Joining Prepreg Composite Interfaces With Aligned Carbon Nanotubes", *Composites part A*, Vol. 39, pp. 1065-1070, 2008.
- [31] Seshadri, M. Saigal, S. and ASCE, F., "Crack Bridging in Polymer Nanocomposites", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, pp. 911-918, 2007.