مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 399-405

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر نانولوله‌های کربنی بر عمر چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی سوراخ‌کاری شده تحت بارگذاری خستگی

علی قلی‌زاده[1]، نعیم اکبری شاه خسروی[1]، رضا محمدی[2]، مهدی احمدی نجف‌آبادی[3*] حسین حیدری[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
* تهران، صندوق پستی 1587-4413، ahmadin@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 اسفند 1395
پذیرش: 7 اردیبهشت 1396
ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:
چند لایه کامپوزیتی
نانولوله کربن
سوراخ‌کاری
بارگذاری خستگی

چکیده

چند لایه‌های کامپوزیتی، به دلیل داشتن خواصی مانند استحکام مکانیکی خوب و وزن کم، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از راه‌های مونتاژ این قطعات، اتصال مکانیکی می‌باشد که نیاز به ایجاد سوراخ در قطعه توسط مته می‌باشد. سوراخ‌کاری باعث به وجود آمدن خرابی‌هایی از قبیل جدایش بین لایه‌ای، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف و آسیب‌های حرارتی در قطعه می‌شود. این خرابی‌های ایجاد شده باعث کاهش استحکام قطعه به خصوص در بارگذاری خستگی می‌شود. استفاده از نانولوله‌های کربنی، باعث بهبود خواص مکانیکی سازه از قبیل سختی، استحکام، مدول یانگ و چقرمگی، می‌شود. در پژوهش حاضر، به بررسی اثر مقدار درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی افزوده شده در عمر نمونه‌های سوراخ‌دار از جنس کامپوزیت شیشه/ اپوکسی تحت بارگذاری خستگی کشش کشش، پرداخته شده است. به همین منظور، نمونه‌هایی با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی ساخته شد و سپس توسط مته، با شرایط یکسان سوراخ شد. این نمونه‌ها توسط دستگاه، تحت بارگذاری خستگی کششی قرار گرفت. به منظور صحهگذاری بر نتایج بدست آمده، از سنسورهای نشر آوایی و همچنین دوربین میکروسکوپی نیز استفاده شد. در کل زمان بارگذاری، سنسور نشر آوایی نیز سیگنال‌های صوتی را ثبت کردند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانو لوله‌های کربنی افزوده شده، عمری که نمونه‌ها تحت بارگذاری با شرایط یکسان می‌توانند تحمل کنند نیز افزایش می‌یابد.

The effect of carbon nanotubes on the life of drilled glass / epoxy composite under fatigue loading

Ali Gholizade [1], Naeim Akbari Shah Khosravi [1], Reza Mohammadi [1], Mehdi Ahmadi Najafabadi[1*], Hossein Heidary[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran
* P.O.B.1587-4413, Tehran, Iran, ahmadin@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 March 2017
Accepted 27 April 2017
Available Online 25 August 2017

Keywords:
Composite laminate
carbon Nano tub
drilling
fatigue loading

ABSTRACT

This research presents a study on mechanical buckling of thick-walled cylindrical shell made of functionally graded materials with ring supported under uniform axial and lateral loads. The mechanical properties of shell are variable along the thickness direction. First, the governing equations on the buckling of the FGM cylindrical shell supported with ring are established based on third-order shear deformation theory. Then, the governing characteristic equations were employed using energy method and by applying the Ritz technique. In the following with solving characteristic equations, the critical load buckling of the FGM thick-walled cylindrical shell supported with axial and lateral loads are calculated. The boundary conditions represented by end conditions of the FGM shell are the following: clamped-clamped and free-free. To verify the validity of the proposed analytical method the results of this research are compared with the results that came from using the finite element software. Finally, the effects of the different parameters such as thickness variations, boundary conditions, loading conditions and geometrical parameters of shell and ring on the buckling behavior of FGM thick-walled cylindrical shell are investigated. The results showed that by increasing the FGM volume fraction power in the shell structure, the critical buckling load increases and the location of the ring support has a significant effect on the critical buckling load. The results presented can be used as an important benchmark for researchers to validate their numerical and analytical methods.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Gholizade, N. Akbari Shah Khosravi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. Heidary, The effect of carbon nanotubes on the life of drilled glass / epoxy composite under fatigue loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 399-405, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

امروزه، از چند لایه‌های کامپوزیتی، به دلیل داشتن خواص مکانیکی مطلوب و وزن مخصوص کم، در سازه‌های مهندسی، بسیار استفاده می‌شود. در برخی از موارد به دلایلی مانند عدم امکان تولید یکپارچه سازه کامپوزیتی، سازه از اتصال چند قطعه ساخته می‌شود. یکی از روش‌های مونتاژ این قطعات به یکدیگر، استفاده از اتصالات مکانیکی مانند پیچ و پرچ می‌باشد. این روش اتصال از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و امکان جدا کردن آسان آن نیز وجود دارد. به منظور استفاده این اتصالات در سازه، نیاز به ایجاد سوراخ در قطعات می‌باشد. سوراخ ایجاد شده، به دلیل تمرکز تنش و ایجاد خرابی در حین فرایند سوراخ‌کاری، باعث کاهش استحکام سازه می‌شود [2,1].

سوراخ‌کاری مکانیکی با مته، با وجود مشکلات ناشی از ناهمسانگردی حاصل از الیاف تقویت کننده، یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش برای ایجاد سوراخ در کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشد [3]. سوراخ‌کاری، باعث ایجاد خرابی‌هایی مانند جدایش بین لایه‌ای، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف و آسیب‌های حرارتی می‌شود که باعث تاثیر بر خواص اجزاء و کاهش عمر کاری آن‌ها می‌شود [4]. جدایش بین لایه‌ای یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های خرابی می‌باشد که در حین فرایند سوراخ‌کاری ایجاد می‌شود. همان‌طور که در "شکل 1" نیز نشان داده شده است، جدایش بین لایه‌ای، معمولا در هنگام ورود مته[1] و خروج مته[2] از نمونه اتفاق می‌افتد. مقدار خرابی ایجاد شده در اثر هر دو مکانیزم جدایش بین لایه‌ای، رابطه مستقیمی با نیروی محوری دارد. در هنگام ورود مته، پس از آن‌که لبه‌ی برشی با ورق، تماس برقرار نمود، نیروی برشی اعمال شده در جهت محیطی، یک نیرو در راستای محوری به سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث جدایش بین لایه‌ای در سطح بالایی ورق کامپوزیتی می‌شود. زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد، ضخامت لایه بریده شده کم می‌شود. در چنین نقطه‌ای تنش ناشی از نیروی محوری، از مقاومت بین لایه‌ای بیشتر شده و باعث ایجاد جدایش بین لایه‌ای می‌شود [6,5]. سرعت برشی و نرخ پیشروی، از پارامترهای مهم و بحرانی در ایجاد جدایش بین لایه‌ای در سورخ‌کاری چند لایه‌های کامپوزیتی می‌باشند و می‌توان گفت که با افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی، فاکتور

با شروع تحقیقات در زمینه استفاده از افزودنی‌ها و تقویت کننده‌های نانومتری در ماتریس‌های پلیمری در دهه‌های اخیر، قابلیت شگفت انگیز آن‌ها در افزایش خواص مکانیکی و فیزیکی حتی در مقادیر اندک استفاده از نانو ذره، به خوبی مشاهده شد. در میان انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده در نانو کامپوزیت‌های پلیمری، نانولوله‌های کربنی همواره مورد توجه بوده‌اند. نانو لوله‌های کربنی، استوانه‌هایی بدون دوخت از یک یا چند لایه گرافیت با انتهای باز یا بسته هستند که به آن‌ها تک دیواره (SWNTs[3]) یا چند دیواره (MWCNTs[4]) گفته می‌شود. معمولا قطر نانولوله تک دیواره بین 0.8 تا 2 نانومتر و چند دیواره بین 5 تا 20 نانومتر می‌باشد. همچنین طول نانولوله می‌تواند کمتر از 100 نانو متر تا چندین سانتی متر باشد [8].

کشف نانولوله‌های چند دیواره (که در "شکل 2" نشان داده شده است.)، در سال 1991، موجب شده است که فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در علوم به بحث نانوساختارهای کربنی و کاربردهای آن‌ها اختصاص یابد. دلیل عمده این مسئله تکامل ساختاری مورد انتظار آن‌ها، اندازه کوچک، چگالی کم،

[1] Peel Up
[2] Push Down
[3] single-walled carbon nanotubes
[4] Multi-walled carbon nanotubes

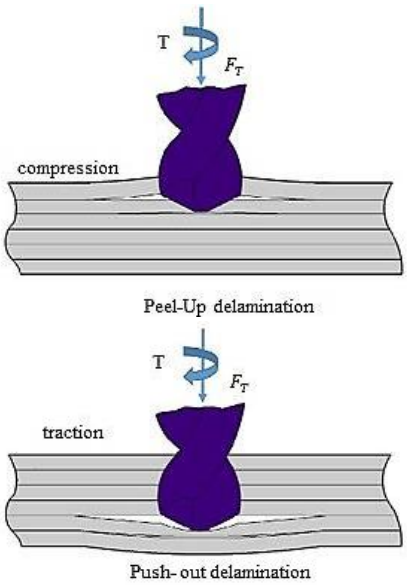

Fig. 1 Delamination that occurs in drilling [11]

شکل 1 جدایش بین لایه‌ای که در سوراخ‌کاری اتفاق می‌افتد [11].

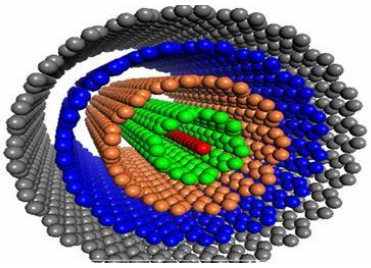

Fig. 2 Multi-walled carbon nanotubes

شکل 2 نانو لوله کربنی چند دیواره

سختی بالا، استحکام بالا و خواص الکتریکی عالی آن‌ها می‌باشد. در ابتدا، از نانولوله چند دیواره به‌عنوان فیلرهای رسانای الکتریکی در پلاستیک‌ها استفاده می‌شد. کامپوزیت‌های پلیمری که دارای 10 درصد وزنی نانولوله چند دیواره می‌باشند، به رسانایی‌های بالایی به اندازه $10000\ SM^{-1}$ می‌رسند. در سازه‌های کامپوزیتی که با تحمل بار و نیرو سروکار دارند، مخلوط کردن پودر نانولوله کربنی با پلیمر کامپوزیت، باعث افزایش سختی، استحکام، مدول یانگ و چقرمگی می‌شود [10,9].

رفتار مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری خستگی بسیار متفاوت از مواد فلزی است. در مواد فلزی بیشتر عمر خستگی مربوط به زمان قبل از ایجاد ترک است ولی در مواد کامپوزیتی ترک‌های اولیه در سیکل‌های اولیه ایجاد می‌شود. در این مواد با وجود تشکیل ترک‌های زیاد عمر خستگی کاهش محسوسی نمی‌کند. خرابی‌های ایجاد شده در اثر بارگذاری خستگی در این مواد به شکل جدایش الیاف و ماتریس، شکست الیاف، ترک خوردگی ماتریس، جدایش بین لایه‌ای و گسترش ترک است [12].

انتشار موج تنش الاستیک در ماده در اثر آزاد شدن سریع انرژی کرنشی یا وقوع خرابی در ماده را نشرآوایی یا آکوستیک امیشن[5] گویند. در برخی از پژوهش‌ها، از پارامترهای مختلف سیگنال‌های نشرآوایی از جمله فرکانس،

[5] Acoustic Emission

دامنه و انرژی سیگنال‌های دریافتی، به منظور تعیین مکانیزم‌های مختلف خرابی در چند لایه‌های کامپوزیتی، استفاده شده است. از مزایای استفاده از آکوستیک امیشن در بررسی خرابی کامپوزیت‌ها، می‌توان به قابلیت پایش بلادرنگ کامپوزیت و قابلیت جدا نمودن انواع مختلف خرابی، همچون ترک خوردگی ماتریس، شکست الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و جدایش بین لایه‌ای اشاره نمود [18,13].

اکبری و همکاران [19]، با استفاده از روش‌های المان محدود و آکوستیک امیشن، مکانیزم‌های مختلف خرابی در نمونه‌های سوراخ‌دار از جنس کامپوزیت شیشه/ اپوکسی که تحت بارگذاری کششی قرار داشت را بررسی کردند. آن‌ها توانستند مکانیزم‌های مختلف خرابی ایجاد شده در نمونه‌ها را شناسایی کنند و همچنین درصد هر یک از مکانیزم‌های خرابی را با استفاده از تبدیل موجک، به‌صورت کیفی مشخص نمایند.

موسوی نسب و همکاران [20]، به بررسی رفتار مکانیکی و آکوستیک امیشن جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/ اپوکسی تحت بارگذاری خستگی مود I پرداختند. همچنین آن‌ها رابطه خطی بین انرژی تجمعی نشر آوایی و رشد ترک خستگی، ارائه دادند و توانستند منحنی نرخ رشد ترک خستگی را به کمک منحنی تغییرات نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی، پیش‌بینی نمایند.

عباسی و همکاران [21]، به بررسی اثر پارامترهای سوراخ‌کاری مانند نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و قطر مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های نانوکامپوزیتی شیشه/ اپوکسی به‌همراه نانولوله‌های کربنی، پرداختند. همچنین، آن‌ها اثر میزان نانولوله‌های کربنی افزوده شده به نمونه‌ها را بر نیروی محوری و جدایش بین لایه‌ای نیز بررسی کردند.

نیکسون و همکاران [22] گسترش خرابی ایجاد شده، در نمونه کامپوزیتی سوراخ‌دار از جنس کربن/اپوکسی تحت بارگذاری خستگی کشش کشش را مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از روش المان محدود توانستند به درستی خرابی‌های ایجاد شده در نمونه‌ها را پیش‌بینی کنند.

شکار و همکاران [23]، مقاومت برشی نانوکامپوزیت کربن/ اپوکسی دارای نانولوله چند دیواره کربنی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی بین لایه‌ای در این نمونه‌ها به طور قابل توجهی در جهت طولی بالاتر از جهت عرضی می‌باشد، به همین منظور این مواد برای کاربردهایی نظیر حمل و نقل و صنعت هوا فضا بسیار مناسب می‌باشد.

در پژوهش حاضر، اثر میزان نانولوله‌های کربنی افزوده شده به نانوکامپوزیت شیشه/اپوکسی سوراخ‌دار، در عمر خستگی آن‌ها تحت بارگذاری سیکلی کششی بررسی شده است. به همین منظور از سه گروه نمونه که دارای 0.1، 0.5 و 1 درصد وزنی، نانولوله کربنی می‌باشند، استفاده شد. برای ایجاد سوراخ، از روش سوراخ‌کاری مکانیکی توسط مته استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی خرابی‌های ایجاد شده در حین فرایند بارگذاری، از روش آکوستیک امیشن استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که، با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی اضافه شده، عمر خستگی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد و نمونه سیکل بیشتری را می‌تواند تحمل کند.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، از رزین اپوکسی با نام تجاری ایپون 828 و سفت‌کننده با نام تجاری F 205 استفاده شد. همچنین الیاف استفاده شده به‌عنوان تقویت کننده، الیاف بافته شده از جنس شیشه E[1] می‌باشد. از نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) اصلاح شده با هیدرواکسید استفاده شد که در "شکل 3" نشان داده شده است.

برای تولید نانوکامپوزیت اپوکسی/ نانولوله کربنی، باید ابتدا به منظور خشک نمودن نانوذرات لوله کربنی، این ذرات به مدت 24 ساعت در درجه حرارت 70 درجه سانتی‌گراد در آون[2] خلا قرار داده شد. سپس نانوذرات خشک شده با درصدهای وزنی .0.1، 0.5 و 1 نسبت به کل سیستم رزین (اپوکسی و سخت کننده) به اپوکسی اضافه شد و با همزن مکانیکی به صورت اختلاط برشی با سرعت 3000 rpm به مدت 180 دقیقه مخلوط شد. سپس با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت 30 دقیقه تحت امواج فراصوتی با توان 150 kW/cm^2 و دامنه 5µm قرار گرفت تا نانوذرات درون اپوکسی پخش شوند و از تشکیل کلوخه‌ها جلوگیری شود. در نهایت مجدداً مخلوط رزین و نانوذرات با همزن مکانیکی به مدت 60 دقیقه با همان دور rpm 3000 هم‌زده شد. برای حذف حباب‌های ایجاد شده در مخلوط، طی عملیات اختلاط، اپوکسی نانوذرات تهیه شده برای مدت 15 دقیقه در دمای 60 درجه سانتی‌گراد در آون خلا قرار داده شد و پس از حباب‌زدایی در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا دمای آن تا درجه حرارت محیط کاهش یابد. پس از تهیه مخلوط رزین و نانولوله‌کربنی، سفت کننده را به آن اضافه می‌کنیم و آن را به آرامی هم می‌زنیم.

نمونه‌ها با استفاده از روش لایه چینی دستی آماده شدند. ضخامت نمونه‌ها 2.6±0.1 میلی‌متر می‌باشد، که دارای 12 لایه الیاف شیشه بافته شده می‌باشد. برای پخت رزین، نمونه در دستگاه اتوکلاو[3] قرار داده شد. سپس با استفاده از دستگاه واترجت[4]، نمونه‌ها در ابعاد 150×20 mm برش داده شدند.

به منظور ایجاد سوراخ در نمونه‌ها از مته به قطر 5 mm از جنس HSS و دارای استاندارد ISO 9002، تحت سرعت برشی 315 rpm و نرخ پیشروی 0.06 mm/rev استفاده شد که بر روی دستگاه فرز عمودی نصب شده بود.

2-2- تجهیزات مورد استفاده

از دستگاه فرز اونیورسال ماشین‌سازی تبریز مدل FP4M برای سوراخ‌کاری نمونه‌ها استفاده شد، که دارای حداکثر دور اسپیندل 2500 rpm و حداکثر نرخ پیشروی 315 mm/min می‌باشد.

برای بارگذاری شبه استاتیکی و سیکلی نمونه‌ها، از دستگاه دارتک[5] با ظرفیت

Fig. 3 Carbon nanotubes

شکل 3 نانولوله کربنی

[1] E-glass
[2] Oven
[3] Autoclave
[4] Waterjet
[5] Dartec

5 ton، با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری در محدوده 0.1-500mm/min و محدوده فرکانسی 1-100 Hz استفاده شد. قطعات با سرعت ثابت 2mm/min تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفتند و نمونه‌های آزمون خستگی با فرکانس 5 Hz تحت بارگذاری نوسانی کششی قرار گرفتند.

برای ثبت داده‌های نشرآوایی در حین آزمایش‌ها، از سیستم آکوستیک امیشن دو کاناله به همراه نرم افزار آی‌ای‌وین[1] و سیستم پی‌سی‌آی-2[2] با نرخ داده برداری 1 Ms/s استفاده شد. از یک سنسور پیزوالکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع به نام پیکو[3]، محصول کمپانی پک[4]، مدل آر-50- دی[5] استفاده شد. فرکانس تشدید سنسور 513.28 kHz و محدوده بهینه کاری آن 100-750 kHz است. سیگنال‌های دریافت شده سنسور به‌وسیله پیش تقویت کننده با ضریب 40 dB تقویت شدند. برای بهبود عبوردهی سیگنال بین نمونه و سنسور و اتصال مناسب سنسور به سطح نمونه، از گریس سیلیکون خلا استفاده شد. به‌دلیل این‌که سنسور نشر آوایی به نویزهای مکانیکی و مغناطیسی حساس بوده، لذا برای شناسایی و حذف نویزها، ابتدا دستگاه آزمون کشش را به‌صورت بدون بار، چندین مرتبه به‌صورت بدون بار حرکت داده و سیگنال‌های نشر آوایی ثبت شده توسط سنسورها که ناشی از نویزهای مغناطیسی و مکانیکی دستگاه و محیط است، با تنظیم سطح آستانه حذف می‌شوند. با انجام این فرایند، حد آستانه 37 dB برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد، به‌طوری که در حین آزمایش نمونه‌ها، نویزها حذف شده و دستگاه نشر آوایی فقط فعالیت‌های نشر آوایی نمونه‌های آزمایش را ثبت می‌نماید.

به منظور مشاهده بلادرنگ گسترش خرابی‌های ایجاد شده در نمونه، از دوربین میکروسکوپی مدل دینو لایت[6] با بزرگ‌نمایی 45 X و بزرگ‌نمایی دیجیتال 300 X، استفاده شد.

3-2 - روش آزمایش

3-2-1- بارگذاری شبه استاتیکی

آزمایش‌های شبه‌استاتیکی براساس استاندارد ASTM D5766 و در دمای 24°C و با سرعت ثابت 2mm/min انجام شدند. میزان بار اعمالی و جابجایی به دو انتهای نمونه، به‌طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شد.

3-2-2- بارگذاری سیکلی

آزمایش‌ها در دمای 24°C و با فرکانس بارگذاری 5 Hz انجام شدند. بیشینه نیروی اعمالی در بارگذاری سیکلی برابر با 80% بیشترین نیروی تحمل شده در بارگذاری شبه‌استاتیکی انتخاب شد و نسبت $R = (P_{max}/P_{min})^2$ برای همه نمونه‌ها برابر با مقدار ثابت 0.1 در نظر گرفته شد. میزان بار اعمالی و جابجایی به دو انتهای نمونه، به‌طور پیوسته توسط دستگاه کشش ثبت شد. پیش روی جدایش بین لایه‌ای حین بارگذاری توسط دوربین میکروسکوپی با قدرت بزرگنمایی اپتیکال 45 X و بزرگنمایی دیجیتال 300 X به‌طور پیوسته ثبت شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بارگذاری استاتیکی

در "شکل 4" نمای کلی چیدمان مورد استفاده برای انجام این تست‌ها نشان داده شده است.

همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، به منظور تعیین نیروهای حداکثر و حداقل در بارگذاری خستگی، نیاز به انجام تست کشش استاتیکی می‌باشد. به همین منظور، یک نمونه سوراخ‌دار که دارای 0.1 درصد نانولوله‌های کربنی می‌باشد، تحت بارگذاری کششی استاتیکی قرار گرفت. دلیل استفاده از نمونه با 0.1 درصد نانولوله این است که، طبق تحقیقاتی که در گذشته انجام شده [21]، با کاهش درصد نانولوله کربنی، استحکام نمونه نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه، نمونه با 0.1 درصد نانولوله کربنی دارای کمترین استحکام نسبت به دیگر نمونه‌ها می‌باشد.

برای انجام این تست، نیرو به روش جابه‌جایی ثابت، اعمال شد. به عبارت دیگر، قطعه با سرعت ثابت 2 mm/min کشیده شد. نمودار نیرو، جابه‌جایی مربوط به این تست، در "شکل 4" نشان داده شده است.

با توجه به نمودار "شکل 5"، حداکثر نیرویی که نمونه تحت بارگذاری کششی استاتیکی قبل از شکست توانسته است تحمل کند (F_{max})، برابر است با 7.1 kN، در نتیجه، حداکثر نیروی اعمالی در بارگذاری خستگی (P_{max}) را برابر با 80 درصد F_{max} در نظر می‌گیریم که می‌شود 5.68 kN و همچنین حداقل نیروی اعمالی (P_{min}) نرخ 0.1 در نظر گرفته می‌شود که برابر با 1.77kN است.

3-2- بارگذاری خستگی

برای انجام این تست‌ها از دستگاه کشش دارتک استفاده شد و همچنین به منظور ثبت داده‌های نشر آوایی از یک سنسور آکوستیک امیشن استفاده شد. به‌منظور ثبت تصاویر از رشد خرابی‌ها در زمان بارگذاری خستگی نیز از یک دوربین میکروسکوپی استفاده شد که ناحیه اطراف سوراخ را در حین بارگذاری، فیلم‌برداری می‌کرد.

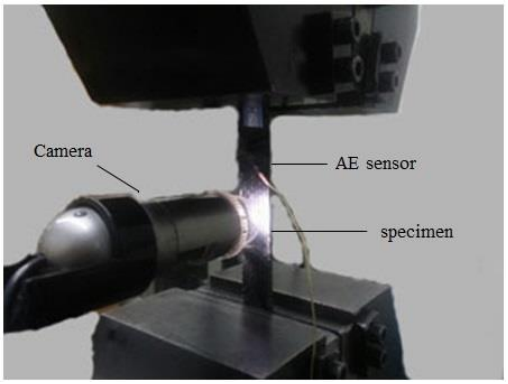

Fig. 4 The experimental setup of the OHT tests.

شکل 4 نمای کلی تجهیزات آزمایش نمونه‌های کامپوزیتی سوراخ‌دار

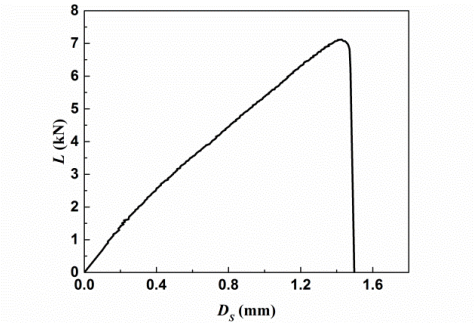

Fig. 5 Load displacement diagram for static loading

شکل 5 نمودار نیرو جابه‌جایی در بارگذاری استاتیکی

[1] AEWin
[2] PCI-2
[3] PICO
[4] PAC
[5] R50D
[6] Dino lite

به‌دلیل این‌که بارگذاری خستگی به‌صورت حداکثر و حداقل بار ثابت اعمال شد، معیار مشخص کردن میزان رشد خرابی‌ها تغییرات جابه‌جایی اعمال شده به نمونه در هر سیکل در نظر گرفته شد و نمودارهای مکانیکی به‌دست آمده از دستگاه کشش، براساس میزان جابه‌جایی در هر سیکل رسم شد.

در "شکل 6" میزان جابه‌جایی در هر سیکل برای نمونه دارای 0.1 درصد نانو لوله کربنی، تا زمان شکست، رسم شده است، همچنین، میزان انرژی تجمعی سیگنال‌های آکوستیکی دریافت شده در حین بارگذاری نیز، در این نمودار، رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش سیکل، به دلیل ایجاد خرابی‌ها، مقدار جابه‌جایی و همچنین انرژی تجمعی سیگنال‌های آکوستیکی نیز افزایش می‌یابد.

در "شکل 7" نیز، میزان جابه‌جایی در هر سیکل و همچنین میزان انرژی تجمعی سیگنال‌های آکوستیکی دریافت شده، برای نمونه دارای 0.5 درصد وزنی نانولوله کربنی، نشان داده است. که همانند نمونه قبل، با افزایش سیکل، مقدار جابه‌جایی و انرژی تجمعی نیز افزایش می‌یابد. اما این نمونه تعداد سیکل بیشتری را نسبت به نمونه با 0.1 درصد نانولوله کربنی، قبل شکست می‌تواند تحمل کند.

در "شکل 8" خرابی‌های ایجاد شده در ناحیه اطراف سوراخ در نمونه با 0.5 درصد نانولوله کربن، که در اثر فرایند سوراخ‌کاری با مته ایجاد شده است، نشان داده شده است. همچنین در "شکل 9" نیز محل شکست این نمونه، بعد از بارگذاری خستگی نشان داده شده است.

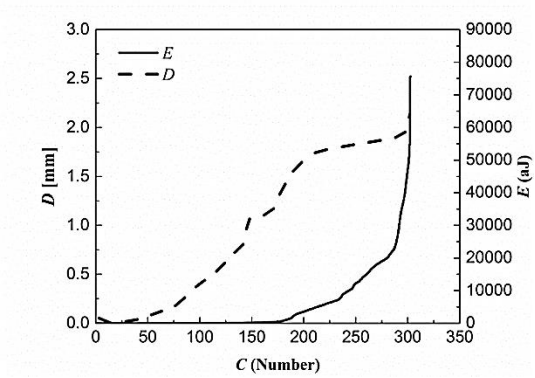

Fig. 6 Diagram of displacement and cumulative energy per cycle for specimen with 0.1 percent carbon nanotube

شکل 6 نمودار جابه‌جایی و انرژی تجمعی برحسب سیکل نمونه با 0.1 درصد نانولوله کربن

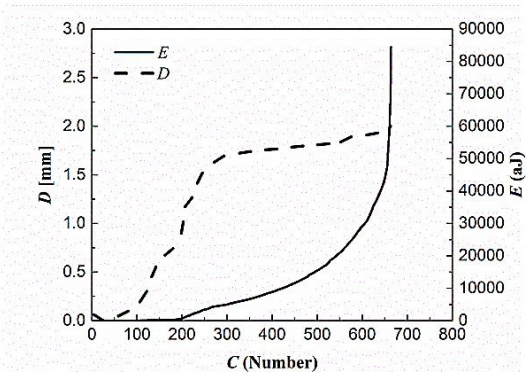

Fig. 7 Diagram of displacement and cumulative energy per cycle for specimen with 0.5 percent carbon nanotube

شکل 7 نمودار جابه‌جایی و انرژی تجمعی برحسب سیکل نمونه با 0.5 درصد نانولوله کربن

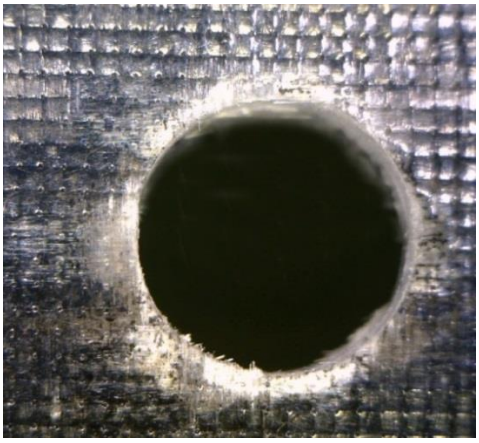

Fig. 8 Damages occurs in drilling of specimen with 0.5 percent nanotube

شکل 8 خرابی‌های ایجاد شده در اثر سوراخ‌کاری نمونه با 0.5 درصد نانولوله کربن

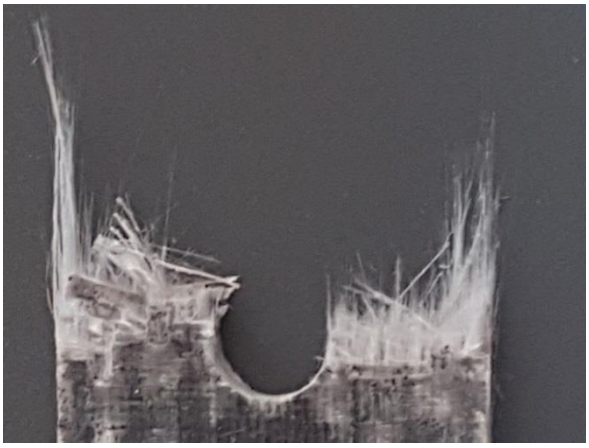

Fig. 9 Failure area in specimen with 0.5 percent carbon nanotube after fatigue loading

شکل 9 سطح شکست نمونه با 0.5 درصد نانولوله کربن پس از بارگذاری خستگی

در "شکل 10" نیز، میزان جابه‌جایی در هر سیکل و همچنین میزان انرژی تجمعی سیگنال‌های آکوستیکی دریافت شده، برای نمونه دارای 1 درصد وزنی نانولوله کربنی، نشان داده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، این نمونه، نسبت به دو نمونه دیگر، تعداد سیکل بیشتری را قبل از شکست می‌تواند تحمل کند.

همان‌طور که در نمودارها نیز مشاهده می‌شود، نمونه با 0.1 درصد نانولوله کربن، پس از گذراندن 302 سیکل شکسته شد. نمونه با 0.5 درصد نانولوله کربن پس از گذراندن 662 سیکل شکسته شد و همچنین نمونه با 1 درصد نانو لوله کربن پس از گذراندن 1066 سیکل شکسته شد. با توجه به این اطلاعات، در نمودار "شکل 8" اثر افزایش درصد نانولوله کربن بر روی تعداد سیکل قابل تحمل توسط نمونه، نشان داده شده است. همان‌طور که درنمودار "شکل 11" نیز مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی، مقدار عمر قطعه تحت بارگذاری خستگی نیز تقریبا به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

رابطه خطی بدست آمده برای محاسبه تعداد سیکل برحسب درصد وزنی نانولوله‌های کربنی افزوده شده نیز در معادله (1) نشان داده شده است. این رابطه تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد و حداکثر خطایی که بین رابطه و داده‌های تجربی وجود دارد، 2.5 درصد می‌باشد.

$$C = 847.21W_t + 224.82 \quad (1)$$

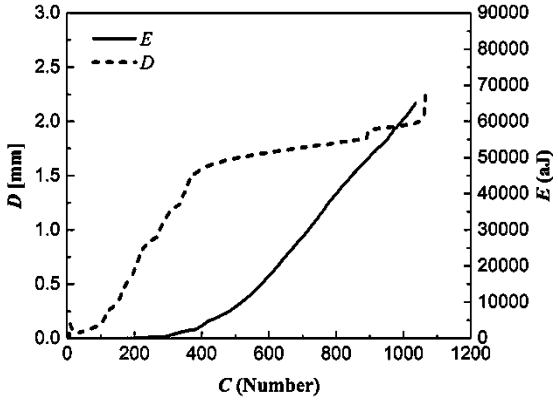

Fig. 10 Diagram of displacement and cumulative energy per cycle for specimen with 1 percent carbon nanotube

شکل 10 نمودار جابه‌جایی و انرژی تجمعی برحسب سیکل نمونه با 1 درصد نانو لوله کربن

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر مقدار نانولوله کربنی افزوده شده به نمونه‌های سوراخ‌دار از جنس کامپوزیت چندلایه شیشه/ اپوکسی، تحت بارگذاری خستگی، بررسی شد. برای این منظور، از سه نوع نمونه که دارای 0.1، 0.5 و 1 درصد وزنی رزین، نانولوله کربن بودند، استفاده شد. بر روی هر یک از نمونه‌ها توسط مته به قطر 5 mm، سوراخی تحت شرایط یکسان، ایجاد شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری خستگی کششی، کششی قرار داده شدند. به‌منظور تشخیص خرابی‌های ایجاد شده در نمونه، تحت بارگذاری خستگی و دریافت سیگنال خرابی‌های ایجاد شده نیز از سنسور آکوستیک امیش استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، نشان می‌دهد که، با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی افزوده شده، تعداد سیکلی که نمونه می‌تواند تحت بارگذاری خستگی تحمل کند نیز افزایش می‌یابد. این افزایش عمر با درصد وزنی نانولوله کربنی افزوده شده به نمونه، رابطه نسبتا خطی دارد و می‌توان عمر تقریبی نمونه‌ها را توسط رابطه (1)، محاسبه کرد که حداکثر خطای این معادله با نتایج تجربی به‌دست آمده، 2.5 درصد می‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای بارگذاری خستگی نمونه‌ها، می‌توان به این نتیجه رسید که، روش آکوستیک امیشن، به خوبی می‌تواند زمان شروع خرابی و همچنین خرابی‌های ایجاد شده در نمونه تحت بارگذاری را نشان دهد.

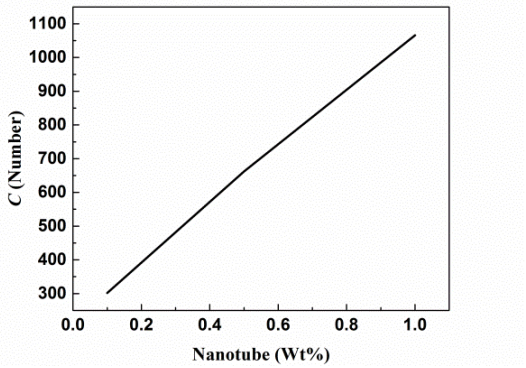

Fig. 11 Diagram of cycle by percentage of carbon nanotube

شکل 11 نمودار اثر مقدار نانولوله کربن افزوده شده بر روی تعداد سیکل قابل تحمل توسط نمونه

5- فهرست علایم

C	تعداد سیکل
D	جابه‌جایی در هر سیکل (mm)
D_S	جابه‌جایی در بارگذاری استاتیکی (mm)
E	انرژی آکوستیکی تجمعی (aJ)
F_{max}	حداکثر نیروی قابل تحمل در بارگذاری استاتیکی (kN)
L	مقدار نیرو در بارگذاری استاتیکی (kN)
P_{max}	حداکثر نیروی اعمالی در بارگذاری خستگی (kN)
P_{min}	حداقل میروی اعمالی در بارگذاری خستگی (kN)
R	مربع نسبت حداکثر نیروی اعمالی به حداقل نیروی اعمالی تحت بارگذاری خستگی

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولین آزمایشگاه تست‌های غیرمخرب دانشکده مکانیک و آزمایشگاه تست خستگی دانشکده هوا و فضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به خاطر در اختیار قرار دادن تجهیزات این آزمایش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

7- مراجع

[1] P. Camanho, *Application of Numerical Methods to the Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates*, PhD Thesis, Department of Aeronautics Centre for Composite Materials, Imperia College London, 1999.

[2] L. J. Hart-Smith, *Design and Analysis of Bolted and Riveted Joints in Fibrous Composite Structures*, pp. 211-254, Netherlands: Springer, 2003.

[3] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, T. Soundarapandian, Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite, *International Journal of Machine Tools and Manufactur*, Vol. 45, No. 5, pp. 399-406, 2005.

[4] D. Liu,Y. Tang, W. L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 4, pp. 1265-1279, 2012.

[5] J. P. Davim, P. Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures*, Vol. 59, No. 4, pp. 481-487, 2003.

[6] M. B. Lazar, P. Xirouchakis, Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 12, pp. 937-946, 2011.

[7] N. S. Mohan, S. M. Kulkarni, A. Ramachandra, Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1–3, pp. 265-271, 2007.

[8] V. N. Popov, Carbon Nanotubes, Properties and application, *Materials Science and Engineering* Vol. 43, No. 3, pp. 61–102, 2004.

[9] M. F. L. Volder, S. H. Tawfick, R. H. Baughman, A. J. Hart, Carbon nanotubes: Present and future commercial applications, *Science*, **Vol.** 339, No. 6119, pp. 535-539, 2013.

[10] N. Li, Y. Li, J. Zhou, Y. He, X. Hao, Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 97, pp. 11-17, 2015.

[11] N. Z. Karimi, H. Heidary, G. Minak, M. Fotouhi, Experimental analysis of GFRP laminates subjected to compression after drilling, *Composite Structures*, 2017.

[12] A. Sabry, *Experimental Investigation on the Flexural Fatigue Behavior of Pultruded Composite Materials*, Ph.D.Thesis, University of Mississippi, United states, 1997.

[13] M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, R. Mohammadi, Investigation of initiation and evolution of delamination in glass/epoxy laminated composites using acoustic

[19] N. Akbari Shah Khosravi, A. Gholizade, R. Mohammadi, M. Saeedifar, M. Ahmadi Najafabadi, Quantification of damage mechanisms in holed composite laminates by acoustic emission and finite element methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 345-352, 2016. (in Persianفارسی)

[20] M. M. Mousavi Nasab, M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, H. Hosseini Toudeshky, Investigation of delamination in laminated composites under quasi-static and fatigue loading conditions by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 85-92, 2015. (In Persian فارسی)

[21] R. Abasi, H. Heidary, M. H. Pol, Experimental investigation of carbon nanotube addition on delamination induced drilling of glass-epoxy composites, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 225-232, 2016. (In Persian فارسی)

[22] O. J. Nixon-Pearson, S. R. Hallett, P. J. Withers, J. Rouse, Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental investigation, *Composite Structures*,Vol. 106, pp. 882-889, 2013.

[23] K.C. Shekar, B.A. Prasad, N. E. Prasad, Interlaminar shear strength of multi-walled carbon nanotube and carbon fiber reinforced, epoxy matrix hybrid composite, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 1336-1343, 2014.

emission method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 411– 422, 2017.

[14] M. Nazmdar Shahri, J. Yousefi, M. Fotouhi, M. Ahmadi, Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform, *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No. 14, pp. 1897-1907, 2016.

[15] A. Calabro, C. Esposito, A. Lizza, M. Giordano, A. D'Amore, L. Nicolais, Analysis of the acoustic emission signals associated to failure modes in CFRP laminates, *European Conference on Composite Materials (ECCM-8)*, Naples, Italy, June 3-6, 1998.

[16] V. Arumugam, B. Kumar, C. Santulli, A. J. Stanley, Effect of fiber orientation in unidirectional glass epoxy laminate using acoustic emission monitoring, *Acta Metallurgica*, Vol. 24, No. 5, pp.351-364, 2011.

[17] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. Ahmadi Najafabadi, H. hoseine Toudeshki, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No.4, pp.1–11, 2014. (in Persianفارسی)

[18] R. E. Guerjouma, J. C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission *Advance Engineering Materials*, Vol. 3, No. 8, pp. 601–608, 2001.