Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 613-616
DOI: 10.22060/mej.2020.18025.6716

Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study

H.R. Sabermanesh, M. Ghannad* , S.M. Hosseini Farrash

Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

ABSTRACT: In this research, buckling of polymer matrix composite plates containing unidirectional glass fibers under in-plane pressure load is investigated. Moreover, the effect of adding carbon nanotubes as reinforcement into the matrix material on the critical buckling load of composite plates is studied. Using hand lay-up method, rectangular glass/epoxy composite plates with and without carbon nanotubes were fabricated. 0.25, 0.5 and 1.0 weight percent of carbon nanotubes were added to the epoxy resin and composite plates were subjected to the longitudinal in-plane pressure load. The plates were tested under fix ended boundary conditions utilizing Instron hydraulic universal testing machine. Based on the results, adding 0.5 weight percent of carbon nanotubes has the most influence on the critical buckling load of the plates. Results show that adding 0.5 weight percent of carbon nanotubes into the matrix material increases the critical buckling load of the carbon nanotubes /glass/epoxy plate more than two times with respect to that of glass/epoxy composite plate. Furthermore, when the carbon nanotubes weight percent reaches 1 %, because of carbon nanotubes agglomeration, carbon nanotubes are not dispersed well into the epoxy resin and the critical buckling load of the composite plate decreases. To validate the results, buckling analysis of glass/epoxy composite plate was done in Abaqus finite element software. Finite element models confirm the experimental results obtained.

Review History:

Received: Mar. 02, 2020
Revised: May. 08, 2020
Accepted: Aug. 31, 2020
Available Online: Sep. 03, 2020

Keywords:

Composite plate
Carbon nanotube
Glass/epoxy fibers
Buckling analysis
Experimental study

1- Introduction

Sheets are one of the most important and widely used structures in various industries. These structures are utilized in industries such as aerospace, automotive, military and marine. One of the most important issues regarding sheets is the weight of these structures, which should be reduced as much as possible. To this end, the use of composites to replace metals is rapidly expanding. Polymer-based composites, including glass or carbon fibers, are extensively used in industry. These composites are employed in the construction of various types of flying robots, naval vessels, electric vehicles, oil and gas transmission pipes, wind turbine blades, artificial members and other similar applications. Another important issue in the design of composite structures is the stability of these structures against the loads. The buckling phenomenon causes instability of composites and much effort has been made to increase the critical buckling load of these light structures.

Since the discovery of Carbon Nanotubes (CNTs) by Iijima [1], mechanical, electrical and thermal properties of CNT reinforced composites have been investigated in several research studies. In hybrid or multi-scale composites, the matrix material is reinforced with both nano-fillers and micro fibers [2]. Medhoe and Subbarao [3] investigated the reinforcing effect of carbon nanotubes on polymer composite sheets under static loading. Azadi and Rostamiyan [4] employed the Taguchi method and studied the influence of three independent variables (carbon fiber orientation, nano clay and CNT weight percent) on the buckling force of hybrid laminated nanocomposites. Zamani et al. [5] demonstrated the influence of nano-clay on buckling behavior of glass fiber reinforced polymer grid-stiffened nanocomposite shells. Eslami-Farsani et al. [6] utilized an experimental method and investigated the effect of the Multi-Walled CNTs (MWCNTs) addition at various weight percentages with respect to the matrix on the flexural behavior of grid composite structures. Bozkurt et al. [7] produced S-glass fiber-reinforced composite laminates with epoxy resin and different weight contents of nano-clay particles. They analyzed critical buckling loads characteristics along with axial and lateral direction.

To the best knowledge of the authors, few studies have focused on the buckling behavior of hybrid composites. Moreover, using Scanning Electron Microscopy (SEM) images, the effect of CNT-reinforced matrix on the critical buckling force of hybrid composites is discussed in this work. Glass/epoxy and CNT/glass/epoxy with different weight percentages of CNTs are fabricated. Epoxy resin containing 0.25, 0.5 and 1.0 weight percent (wt. %) of CNTs is used to manufacture CNT included specimens. Employing uniaxial buckling test, the critical buckling load for different types of plates is experimentally obtained.

*Corresponding author's email: mghannadk@shahroodut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

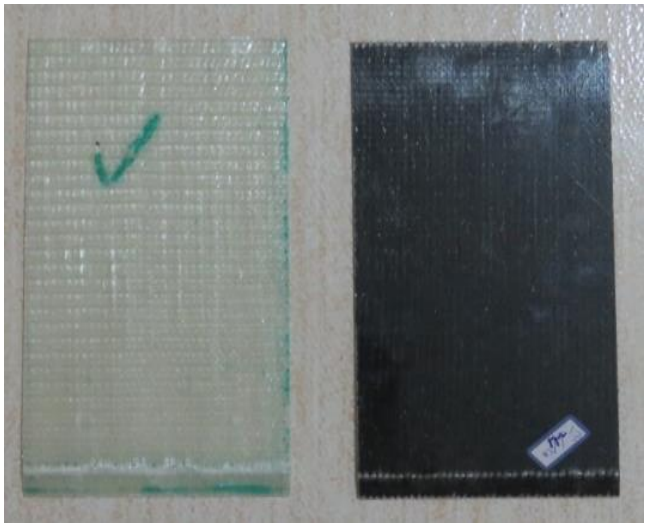


Fig. 1. Glass/epoxy composite plate sample (left) and CNT/glass/epoxy composite plate (right)

Fig. 2. Buckling of composite plate under pressure loading

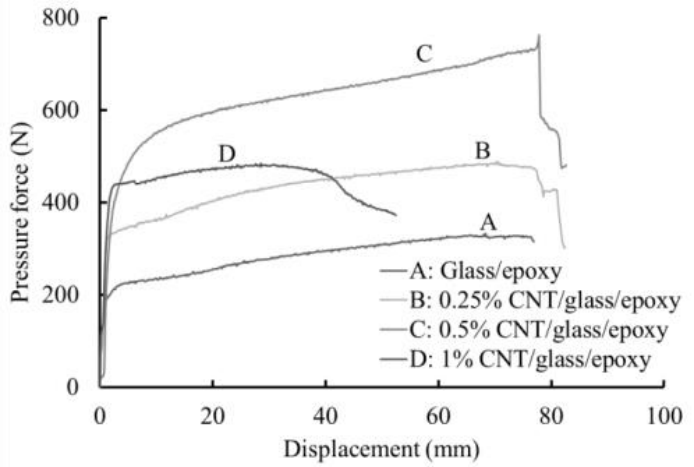


Fig. 3. Effect of adding CNTs with different weight percentages on the force-displacement graph of composite plates

2- Methodology

Unidirectional glass/epoxy and CNT/glass/epoxy hybrid composite plates are manufactured. The combination of mechanical steering and sonication method are used to disperse CNTs into the epoxy resin. The hand layup method is utilized to manufacture three-ply unidirectional composite plates. Plates with different materials are shown in Fig. 1.

A hydraulic universal testing machine (INSTRON STM-150) is used to perform the tensile and buckling tests (Fig. 2).

3- Discussion and Results

To investigate the effect of adding CNTs into the matrix material of glass/epoxy plate, the experimental buckling test was utilized. Three samples of each material were subjected to in-plane unidirectional pressure load. Pressure force-displacement diagrams for glass/epoxy, 0.25%CNT/glass/epoxy, 0.5%CNT/glass/epoxy and 1%CNT/glass/epoxy laminated plates are demonstrated in Fig. 3.

The critical buckling loads (P_{cr}) are extracted from these graphs and summarized in Table 1.

As Table 1 shows, the average critical buckling load for glass/epoxy plate is 191.14 N. Based on the Table, adding 0.5 wt. % of CNTs into the matrix material results in a noticeable improvement in the amount of critical buckling load. This number is 513.42 N for 0.5%CNT/glass/epoxy specimen which indicates 168% increase with respect to that of glass/epoxy specimen. Moreover, the SEM images are taken from the fracture surface of the specimens. Fig. 4 illustrates the proper dispersion of CNTs into the epoxy resin for 0.5%CNT/glass/epoxy specimen.

Fig. 5 represents that adding 1 wt. % of CNTs into the epoxy resin cause the agglomeration of CNTs in some regions of the matrix.

Table 1. Critical buckling loads for composite plates

Plate material	P_{cr} (N)	Improvement (%)
Glass/epoxy	191.14	0.00
0.25%CNT/glass/epoxy	321.16	68.02
0.5%CNT/glass/epoxy	513.42	168.61
1%CNT/glass/epoxy	424.87	122.28

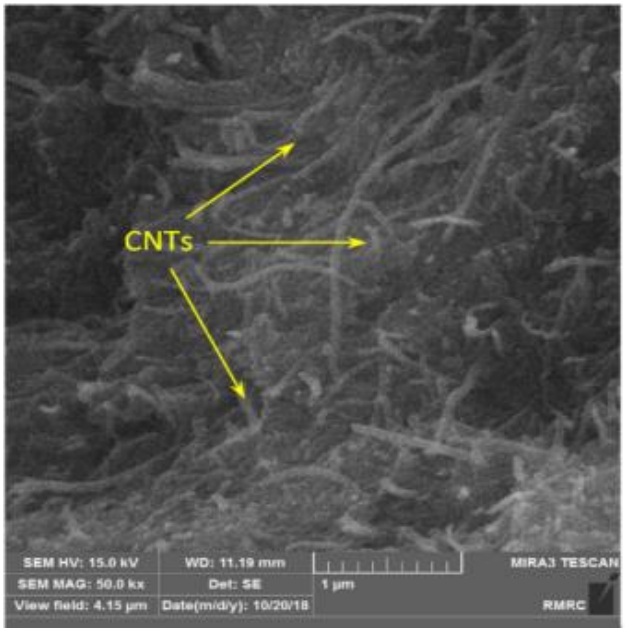


Fig. 4. Homogeneous dispersion of CNTs into the matrix material for 0.5%CNT/glass/epoxy composite plate

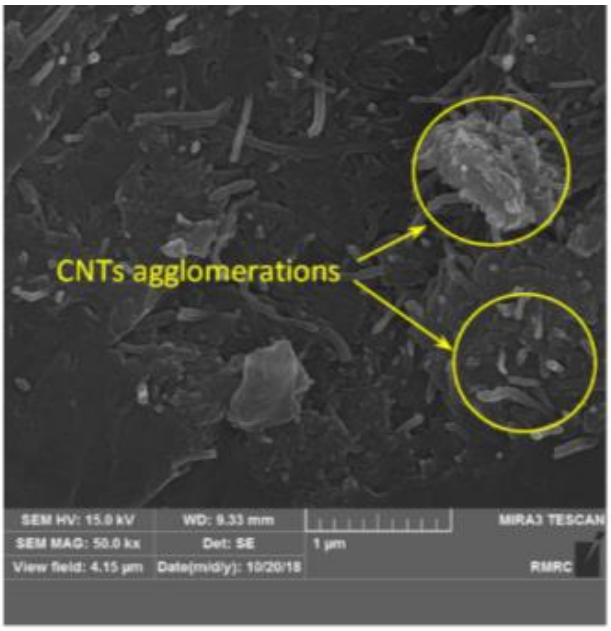


Fig. 5. Nonhomogeneous Dispersion of CNTs into the matrix material for 1%CNT/glass/epoxy composite plate and existence of CNTs agglomerations

4- Conclusions

In this study, the critical buckling load of glass/epoxy and CNT/glass/epoxy plate-shaped specimens are obtained experimentally. Based on the results, a remarkable increase in the amount of critical buckling load is observed when 0.5 wt. % of CNTs is added to the epoxy resin.

References

[1] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, 354(6348) (1991) 56-58.

[2] M. H. Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand, The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach, Composites Part B: Engineering, 122 (2017) 1-8.

[3] S. Madhu, V.V. Subbarao, Effect of carbon nanotube reinforcement in polymer composite plates under static loading, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 8(3) (2014) 200- 205.

[4] R. Azadi, Y. Rostamiyan, Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using taguchi method for optimization, Construction and Building Materials, 88 (2015) 212-224.

[5] R. Zamani, G.H. Rahimi, M.H. Pol, M. Hedayatian, Reinforcing effect of nanoclay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: Experimental investigation, Modares Mechanical Engineering, 15(3) (2015) 411-418, (in Persian).

[6] R. Eslami-Farsani, A. Shahrabi-Farahani, H. Khosravi, M.R. Zamani, A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes, Journal of Science and Technology of Composites, 4(1) (2017) 101-108, (in Persian).

[7] Ö.Y. Bozkurt, M. Bulut, A. Erkliğ, W.A. Faydh, Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/ epoxy composites containing nanoclay particles, Composites Part B: Engineering, 158 (2018) 82-91.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H.R. Sabermanesh, M. Ghannad , S.M. Hosseini Farrash, Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 613-616.

DOI: 10.22060/mej.2020.18025.6716

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۶۱۳ تا ۲۶۲۸
DOI: 10.22060/mej.2020.18025.6716

بررسی تجربی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه، بر رفتار کمانشی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی

حمیدرضا صابرمنش، مهدی قنّاد*، سیّد مهدی حسینی فرّاش

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

خلاصه: در این پژوهش، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده به مادّه‌ی زمینه‌ی پلیمری و دارای الیاف شیشه بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری، به روش تجربی بررسی شده است. ورق‌های کامپوزیتی، مستطیل شکل از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی و تقویت‌شده با ۰/۲۵، ۰/۵، و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. این ورق‌ها در شرایط دوسر گیردار به یک دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون بسته شد و بار به‌صورت فشاری درون‌صفحه‌ای و تک‌محوری در راستای طولی به آنها اعمال شد. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، بیشترین تأثیر را بر بار بحرانی کمانش این ورق‌ها دارد، به‌گونه‌ای که ورق‌های حاوی این مقدار نانولوله‌ی کربنی، بیشتر از دو برابر بار فشاری را نسبت به ورق مشابه بدون نانولوله‌ی کربنی تا رسیدن به آستانه‌ی کمانش، می‌توانند تحمّل کنند. با افزایش درصد وزنی نانولوله به یک درصد، به دلیل کلوخه‌ای‌شدن نانولوله‌ی کربنی درون رزین اپوکسی و کاهش کیفیت پراکندگی نانولوله‌ها، بیشینه نیروی قابل تحمّل سازه، کاهش می‌یابد. برای راستی‌آزمایی نتایج آزمایش، تحلیل کمانش ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد و بار بحرانی کمانش حاصل از نرم‌افزار با نتایج تجربی مقایسه شد و تطابق خوبی به‌دست آمد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

کلمات کلیدی:
ورق کامپوزیتی
نانولوله‌ی کربنی
الیاف شیشه/ اپوکسی
تحلیل کمانشی
بررسی تجربی

۱- مقدّمه

ورق‌ها از مهم‌ترین و پرکاربردی‌ترین سازه‌های مورد استفاده در صنایع مختلف هستند. این سازه‌ها در صنایعی هم‌چون: هوافضا، خودروسازی، نظامی و دریایی کاربرد فراوان دارند. یکی از مباحث مهم درخصوص ورق‌ها، وزن این سازه‌ها می‌باشد که باید تلاش شود تا حدّ امکان کم شوند. بدین منظور، استفاده از مواد مرکّب (کامپوزیت‌ها) برای جایگزینی با فلزات به‌سرعت درحال گسترش است. کامپوزیت‌ها با زمینه‌ی پلیمری، شامل الیاف شیشه و یا کربن، کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند. این کامپوزیت‌ها در ساخت بدنه‌ی انواع پهپادها، ربات‌های پرنده، شناورهای دریایی، خودروهای برقی، لوله‌های انتقال نفت و گاز، پره‌ی توربین‌های بادی، اعضای مصنوعی و بسیاری از موارد مشابه کاربرد دارند. از دیگر مباحث مهم در طراحی سازه‌های کامپوزیتی، بحث پایداری این سازه‌ها در برابر بارهای واردشده می‌باشد. پدیده‌ی کمانش، سبب ناپایداری و واماندگی این ساختارها می‌شود؛ بنابراین کوشش زیادی انجام شده که بتوان تا حدّ امکان بار بحرانی کمانش این سازه‌ها را افزایش داد.

در سال‌های اخیر مطالعه بر روی خواص مختلف مواد نانوساختار به موضوعی جذّاب برای پژوهشگران تبدیل شده است. نانومواد، موادی هستند که اندازه‌ی مشخصه‌ی آنها (مثلاً اندازه‌ی دانه، قطر استوانه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mghannadk@shahroodut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

یا ضخامت لایه) کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. گرچه هر نوعی از مادّه می‌تواند در شکل‌های مختلف در ابعاد نانو تولید و به‌کارگیری شود؛ امّا نانولوله‌ها و نانوورق‌های کربنی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. با کشف نانولوله‌های کربنی توسّط ایجیما [۲] در سال ۱۹۹۱، علاقه‌ی زیادی در عرصه‌ی علم و صنعت برای پژوهش‌های بیشتر در این زمینه پیدا شد. نانولوله‌های کربنی، خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی خوبی را دارا می‌باشند. این مزیت قابل توجه، نانولوله‌های کربنی را به مادّه‌ای مؤثر جهت تقویت مواد مرکّب پلیمری تبدیل کرده است. جهت تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها، پژوهش‌های زیادی به روش‌های نظری و آزمایشگاهی انجام شده است. سایدل و همکارش [۳]، خواص الاستیک مواد مرکّب تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی مختلفی به‌دست آوردند. هان و الیوت [۴]، نیز به کمک روش دینامیک مولکولی، مدول الاستیسیته مواد مرکّب تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را به‌دست آوردند و هم‌چنین تأثیر درصد حجمی نانولوله‌های تک‌جداره را بر خواص مکانیکی مادّه‌ی مرکّب مطالعه کردند. فرّاش و همکاران [۵]، به روش آزمایشگاهی، تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره‌ی عامل‌دار به زمینه‌ی اپوکسی را بر خواص ترمومکانیکی نانوکامپوزیت بررسی کردند. نتایج کار ایشان نشان داد که افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، مدول یانگ رزین را به میزان ۲۱ درصد افزایش و ضریب انبساط حرارتی را به مقدار ۱۸ درصد کاهش می‌دهد. به کمک روابط ارائه‌شده جهت تخمین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها، تحلیل‌های مکانیکی مختلفی نیز بر روی این مواد انجام شد.

شن و همکارش [۶]، کمانش و پس‌کمانش حرارتی ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را به روش تحلیلی بررسی کردند. فروغی و همکاران [۷]، به بررسی کمانش مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی ضخیم تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی به روش نوار محدود[1] پرداختند. هم‌چنین مدهو و همکارش [۸]، تأثیر تقویت‌کنندگی نانولوله‌های کربنی را در ورق‌های کامپوزیتی پلیمری تحت بارگذاری استاتیک بررسی کردند. زمانی و همکاران [۹]، به روش تجربی به بررسی تأثیر افزودن نانوذرّات رسی بر رفتار کمانشی پوسته‌های مشبّک نانوکامپوزیتی پرداختند. ایشان بیشینه بهبود بار کمانشی را به مقدار ۱۰ درصد، مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرّات رسی گزارش کردند. آزادی و رستمیان [۱۰]، کمانش ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوذرّات را به‌گونه‌ی تجربی به روش تاگوچی بررسی کردند. ایشان اثر سه متغیّر شامل: جهت الیاف کربن، درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی و درصد وزنی نانوذرّات رس را بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده بررسی کردند و بیان داشتند که جهت الیاف کربن و درصد وزنی نانوذرّات رس به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را بر بار بحرانی کمانش این ورق‌ها دارا می‌باشد. لی و همکاران [۱۱]، تحلیل کمانشی ورق‌های ناهمگن تابعی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مطالعه کردند.

شکریه و زین‌الدّینی [۱۲]، اثر نانولوله‌های کربنی بر مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی در شروع ترک در نانوکامپوزیت‌های پایه‌ی اپوکسی را به‌صورت تحلیلی مطالعه کردند و به کمک یک مدل پیوسته معادل، خواص الاستیک مواد مرکّب تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را تعیین کردند. هم‌چنین مدل اجزای محدود جهت تعیین خواص مکانیکی این مواد توسط ایشان ارائه شد. فتّاحی و صفایی [۱۳]، تحلیل کمانشی تیر تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی با شرایط مرزی دلخواه را به روش تحلیلی انجام دادند. خسروی و همکاران [۱۴]، براساس تئوری تیر تیموشنکو، کمانش حرارتی یک تیر کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را مطالعه کردند. ایشان خواص مادّه‌ی کامپوزیتی را به‌صورت وابسته به دما درنظر گرفتند و تأثیر درصد حجمی نانولوله‌های کربنی و نوع توزیع آنها را در راستای ضخامت تیر بر دما و سرعت بحرانی کمانش تعیین نمودند. سونگ و همکاران [۱۵]، خمش و کمانش ورق‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با نانوورق‌های گرافن را به کمک نظریه‌ی تغییر شکل برشی مرتبه‌ی یک تحلیل کردند.

درصورتی که پلیمر تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی، به‌عنوان یک مادّه‌ی زمینه‌ی جدید، به‌کارگیری شود و دوباره توسّط الیافی نظیر الیاف کربن تقویت شود، یک مادّه‌ی مرکب چندمقیاسی یا هیبریدی[2] حاصل خواهد شد [۱۶]. کلاه‌چی و همکاران [۱۷]، کمانش دینامیکی یک پوسته‌ی نانوکامپوزیتی هیبریدی با زمینه‌ی پلیمری، حاوی الیاف کربن و تقویت‌شده با نانولوله‌ی کربنی را به کمک مدل‌های میکرومکانیکی بررسی و بهینه‌سازی نمودند. سازه‌ی مورد بررسی

1 Finite strip method

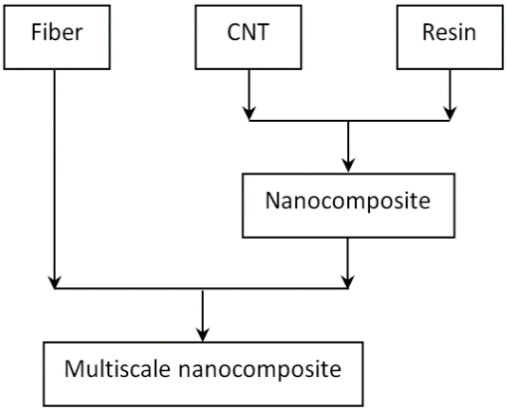
2 Hybrid or multiscale composite

توسّط ایشان که در صنعت هوافضا کاربرد دارد، به شکل یک مخروط ناقص کامپوزیتی بود و در معرض حرارت، رطوبت و امواج مغناطیسی قرار داشت. ابراهیمی و حبیبی [۱۸]، با درنظرگرفتن توزیع تصادفی و نامنظم نانولوله‌های کربنی در مادّه‌ی زمینه، پاسخ دینامیکی غیرخطی ورق کامپوزیتی چندلایه تقویت‌شده با الیاف کربن را تحت بارگذاری‌های مختلف و گرادیان حرارتی بر روی بستر الاستیک مطالعه کردند. نتایج عددی تحقیق ایشان، نشان می‌داد که در محیط حرارتی، افزایش درصد نانولوله‌های کربنی تا یک درصد وزنی، می‌تواند خیز مرکز ورق را کاهش دهد و پس از آن افزایش نانولوله، تغییر قابل ملاحظه‌ای بر خیز ورق ندارد. آقامحمدی و اسلامی [۱۹] تأثیر نانولوله‌های کربنی چندجداره بر خواص خمشی کامپوزیت‌های الیاف/ فلز متشکّل از لایه‌های متناوب آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به همراه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت را بررسی کردند. نتایج کار ایشان نشان داد که در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، مقادیر استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها روند افزایشی دارند.

اسلامی و همکاران [۲۰]، تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چندجداره در درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۴ درصد) بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های لایه‌ای مشبّک تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی را به روش آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج تجربی کار ایشان نشان داد که بهترین رفتار خمشی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی حاصل می‌شود که در این حالت، میزان بیشینه بار خمشی، سفتی خمشی و میزان جذب انرژی ورق‌های مشبّک کامپوزیتی به‌ترتیب به مقدار ۲۴، ۳۵ و ۲۵ درصد نسبت به نمونه مشبّک فاقد نانولوله‌کربنی، افزایش می‌یابد. چاندرا و همکاران [۲۱]، کمانش کامپوزیت هیبریدی تقویت‌شده با گرافن و نانولوله‌ی کربنی را بررسی کردند. رحیمی شعرباف و همکاران [۲۲]، اثر افزودن نانوذرّات سیلیکا را درون رزین بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی لاینردار رشته‌پیچی‌شده با الیاف شیشه تحت بار ضربه محلّی مطالعه کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که بیش‌ترین مقدار افزایش مدول الاستیک، تنش بیشینه و انرژی جذب‌شده وقتی حاصل می‌شود که ۳ درصد وزنی نانوذرّات سیلیکا به رزین افزوده شود. فرّاش و همکاران [۲۳]، به روش آزمایشگاهی اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی را بر فرکانس‌های طبیعی و ضریب میرایی تیرها و ورق‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی بررسی کردند. آنها اپوکسی تقویت‌شده با ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی را به‌عنوان مادّه‌ی زمینه با الیاف شیشه و کربن تقویت نمودند. نتایج مطالعات ایشان نشان می‌داد که افزودن این مقدار نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، ضریب میرایی نانوکامپوزیتی هیبریدی شامل الیاف کربن را به مقدار ۳۱/۵ درصد افزایش می‌دهد. بزکرت و همکاران [۲۴]، به روش تجربی، کمانش محوری و جانبی تیرهای کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرّات رس (۱، ۱/۵، ۲ و ۳ درصد وزنی) را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان داشتند که در بهترین حالت، افزودن یک درصد وزنی نانوذرّات رس، می‌تواند بار بحرانی تیر کامپوزیتی را به مقدار ۸/۵۶ درصد بهبود دهد. نجفی و همکاران [۲۵] استحکام ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی فلزی تقویت‌شده با نانورس، پس از قرارگیری در معرض شوک حرارتی با دمای بالا را مورد آزمون قرار دادند. نتایج کار ایشان حاکی از آن بود که افزودن ۳ درصد وزنی نانورس منجر به بهبود استحکام ضربه‌ای کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی به مقدار ۸ درصد قبل از قرارگیری در معرض شوک حرارتی می‌شود و از افت خواص ضربه‌ای کامپوزیت پس از قرارگیری در معرض شوک حرارتی جلوگیری می‌کند.

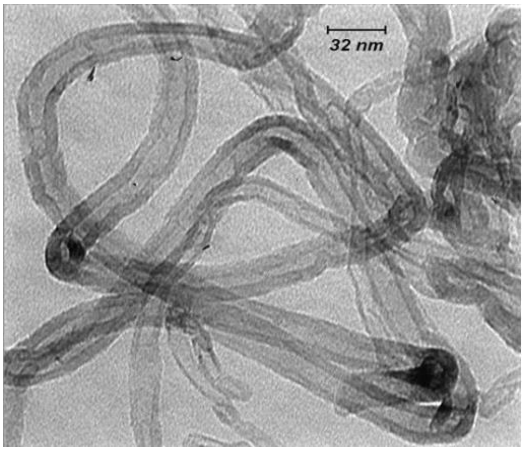
مرور مقاله‌ها نشان می‌دهد که گزارش‌های اندکی به‌صورت تجربی در زمینه‌ی تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی درون مادّه‌ی زمینه‌ی کامپوزیت‌های دارای الیاف بر محدوده‌ی پایداری آن‌ها انجام شده است. اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی کمانش نانوکامپوزیت‌ها، بر مبنای مدل‌های تئوری و ایده‌آل ارائه شده، جهت تخمین خواص مکانیکی این مواد بوده است. شایان یادآوری است که در عمل به دلیل پدیده‌هایی از قبیل انباشتگی نانولوله‌های کربنی، امکان به‌کارگیری آنها در درصدهای وزنی بالا وجود ندارد. هم‌چنین در اکثر موارد، نانولوله‌ها، به‌صورت اتفاقی و با جهت‌گیری‌های مختلف در مادّه‌ی زمینه توزیع می‌شوند. ازطرفی استفاده از نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه، می‌تواند بر نحوه‌ی چسبندگی بین ماتریس و الیاف اثر داشته باشد و مدول الاستیک مادّه را تحت تأثیر قرار دهد. در مقاله‌ی حاضر، ورق‌های کامپوزیتی سه‌لایه مستطیل شکل از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی بدون نانولوله‌ی کربنی و تقویت‌شده با ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی ساخته‌شده به روش لایه‌گذاری دستی در شرایط مرزی دوسر گیردار به دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون[1] بسته شد و تحت اثر نیروی درون‌صفحه‌ای تک‌محوری فشاری در راستای طولی قرار گرفت. هم‌چنین تأثیر افزودن درصدهای

1 Instron hydraulic universal testing machine



شکل ۱. نحوه‌ی تولید یک مادّه‌ی نانوکامپوزیت هیبریدی [۲۷]

Fig. 1. Hybrid nanocomposite production method [27]



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانولوله‌های کربنی [۵]

Fig. 2. Transmission electron microscopy image of CNTs[5]

مختلف نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمانش ورق‌ها ساخته‌شده، نیز بررسی شده است.

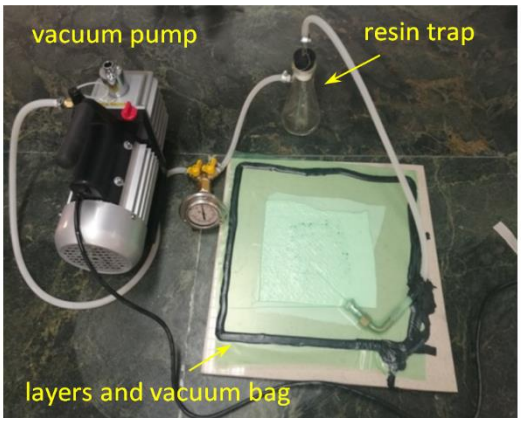
۲- ساخت مواد مرکّب هیبریدی

استفاده از خواص منحصر به‌فرد نانولوله‌ی کربنی[1] در مادّه‌ی مرکّب هیبریدی، به‌شدّت به نحوه‌ی شرکت‌دادن نانولوله در مادّه‌ی مرکّب وابسته است. دو روش عمده جهت واردکردن نانولوله‌ها در مادّه وجود دارد. یکم، توزیع نانولوله‌های کربنی داخل رزین و دوم، رشددادن نانولوله‌های کربنی بر روی الیاف کربن. در روش یکم، نانولوله‌های کربنی داخل مادّه‌ی زمینه به‌خوبی توزیع شده و مادّه‌ی حاصل به‌عنوان یک مادّه‌ی زمینه جدید به روش‌های مرسوم، با الیاف کربن و یا دیگر الیاف تقویت می‌شوند. این روش، روشی معمول‌تر، ساده‌تر و سازگارتر با صنعت است. در شکل ۱ نحوه‌ی تولید این مواد آورده شده است. در روش دوم، نانولوله‌های کربنی بر روی الیاف کربن رشد داده می‌شوند. توستنسون و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۰۲ نخستین گروهی بودند که توانستند نانولوله‌های کربنی را به روش رسوب‌زایی بخار شیمیایی[2] بر روی الیاف کربن رشد دهند و یک مادّه‌ی مرکّب زمینه‌ی پلیمری هیبریدی تولید کنند.

در پژوهش حاضر، مواد مرکّب چندمقیاسی به روش یکم تولید شده‌اند.

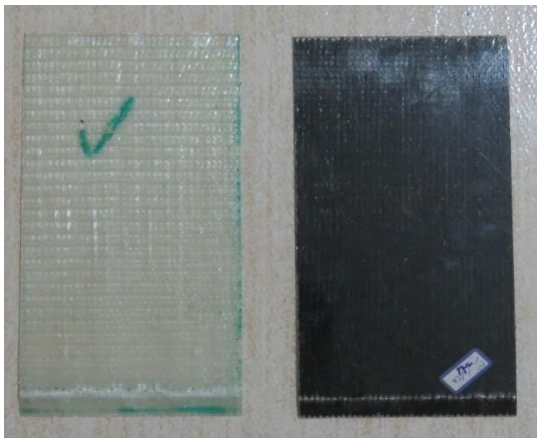
1 Carbon NanoTubes (CNTs)

2 Chemical vapor deposition



شکل ۳. ساخت ورق الیاف شیشه/ اپوکسی به کمک لایه‌چینی دستی تحت فشار خلأ

Fig. 3. Manufacturing of glass/epoxy plate using hand layup method under vacuum pressure



شکل ۴. نمونه‌ی ورق کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه (چپ) و نانولوله‌ی کربنی/ اپوکسی/ الیاف شیشه (راست)

Fig. 4. Glass/epoxy composite plate sample (left) and CNT/glass/epoxy composite plate (right)

۳- ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت

مراحل ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیت و نانوکامپوزیت به شرح زیر توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مواد نخستین

نانولوله‌های چندجداره، محصول شرکت یو-اس نانو[1] ساخت کشور آمریکا با درصد خلوص بالای ۹۵ درصد تهیه شد. اپوکسی آر-ال-۶۲۰[2] به همراه سخت‌کننده‌ی ۵۲۰[3] و الیاف تک‌جهتی ۴۰۰ گرمی شیشه مورد استفاده قرار گرفت. جهت اطمینان از ساختار میکروسکوپی نانولوله‌ها، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[4] از آنها گرفته شد که در شکل ۲ آورده شده است. ساختار لوله‌ای، قطر داخلی، قطر خارجی و ضخامت جداره‌های نانولوله‌های کربنی، در این شکل مشاهده می‌شود. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، نانولوله‌های کربنی مورد استفاده دارای قطرهای مختلفی می‌باشند.

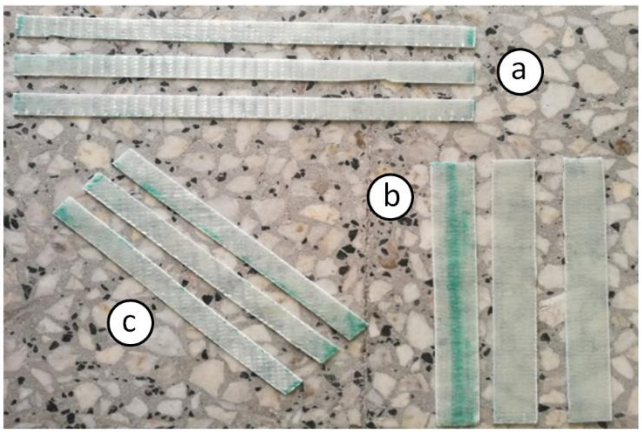
۳-۲- روش آماده‌سازی مادّه‌ی زمینه

مادّه‌ی سخت‌کننده به رزین اپوکسی اضافه شده و جهت توزیع همگن

1 US-Nano
2 RL 620
3 Hardener 520
4 Transmission electron microscopy

شکل ۵. کمانش ورق کامپوزیتی تحت بارگذاری فشاری

Fig. 5. Buckling of composite plate under pressure loading



شکل ۶. نمونه‌های آزمایش کشش، الف: زاویه‌ی الیاف صفر درجه به طول ۲۵۰ و عرض ۱۵ میلی‌متر، ب: زاویه‌ی الیاف نود درجه به طول ۱۷۵ و عرض ۲۵ میلی‌متر ، ج: زاویه‌ی الیاف ۴۵ درجه به طول ۱۸۰ و عرض ۲۵ میلی‌متر

Fig. 6. Tensile test specimens, a: $[0_3]$, length=250 mm & width=15 mm, b: $[90_3]$, length=175 mm & width=25 mm, c: $[45_3]$, length=180 mm & width=25 mm

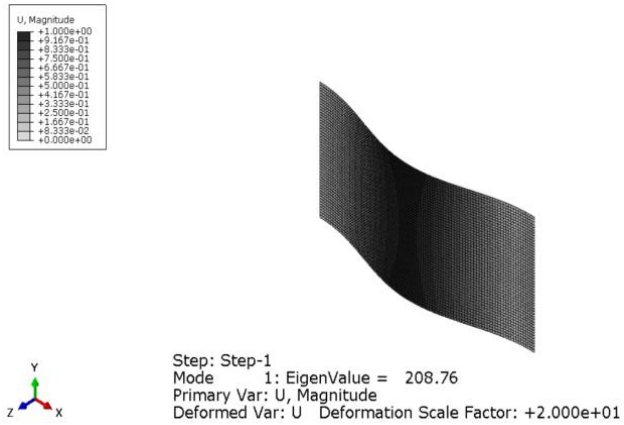
مادّه‌ی سخت‌کننده درون رزین اپوکسی، مخلوط حاصل به مدّت ۵ دقیقه توسّط همزن مکانیکی، درهم آمیخته و این مخلوط جهت ساخت نمونه‌ی ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی استفاده شد. نسبت وزنی رزین به مادّه‌ی سخت‌کننده‌ی درون مخلوط، ۱۰۰ به ۱۵ درنظر گرفته شد. جهت ساخت نمونه‌های نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی، در ابتدا نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱،۰ به رزین اپوکسی اضافه شد و سپس ده دقیقه به وسیله‌ی همزن مکانیکی با سرعت چرخش ۱۵۰ دور در دقیقه مخلوط گردید. مخلوط اپوکسی و نانولوله‌های کربنی به مدّت ۲۲ دقیقه در حمّام آلتراسونیک مدل پارسونیک ۲۶۰۰-اس[1] ساخت ایران (توان ۷۰ وات و فرکانس ۲۸ کیلوهرتز) قرار گرفت. فرایندهای همزدن مکانیکی و حمّام آلتراسونیک، هرکدام سه نوبت تکرار شد. درنهایت مادّه‌ی سخت‌کننده به مخلوط اضافه و پنج دقیقه توسّط همزن مکانیکی با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه همزده شد.

1 Parsonic 2600 S

جدول ۱. خواص مکانیکی نمونه های آزمایش کشش

Table 1. Mechanical properties of tensile test specimens

υ_{12}	G_{12} [MPa]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_x [MPa]
۰/۲۷	۴/۲	۲۷/۳	۱/۵	۳/۶



شکل ۷. شبیه‌سازی کمانش ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی

Fig. 7. Buckling simulation of glass/epoxy composite plate

جدول ۲. بار بحرانی کمانشی به‌دست آمده از دو روش آزمایشگاهی و عددی برای ورق الیاف شیشه/ اپوکسی

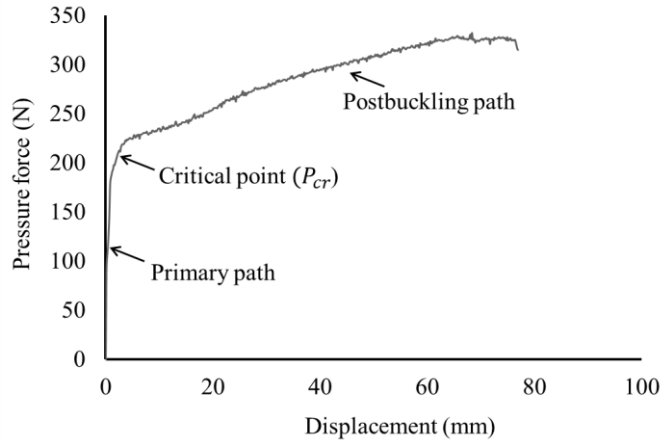
Table 2. Numerical and experimental critical buckling load for glass/epoxy plate

P_{cr} [N] روش تجربی	P_{cr} [N] روش عددی	درصد اختلاف
۱۹۱/۱	۲۰۸/۸	۹/۲۶

۳-۳- ساخت نمونه‌ی ورق‌ها

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از رزین اپوکسی و الیاف شیشه استفاده شد. ساخت نمونه‌ی ورق‌های کامپوزیتی به روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت. هر ورق درمجموع شامل سه لایه‌ی الیاف تک‌جهت ۴۰۰ گرمی شیشه بود که تمامی این لایه‌ها با زاویه‌ی صفر درجه بر روی یکدیگر قرار گرفتند. به‌عبارت بهتر تمامی الیاف در راستای طول (ضلع بزرگتر) ورق‌ها قرار دارند. برای یکنواختی و صافی سطح زیرین و جدا شدن آسان کامپوزیت بعد از فرایند پخت، از شیشه به‌عنوان سطح زیرین آن استفاده شد. برای جدایش راحت‌تر، شیشه به واکس مخصوص آغشته و سپس لایه‌گذاری الیاف انجام شد. پس از چیدن هر لایه از الیاف، آن لایه به رزین آغشته شد و این کار تا سه لایه ادامه یافت. سپس روی آنها، یک لایه‌ی آستری مخصوص جهت جداسازی بعد از ساخت و یک لایه‌ی نمد جهت جذب رزین اضافی قرار گرفت. درنهایت نوار آب‌بند دور الیاف کشیده و کیسه‌ی خلأ بر روی کل مجموعه نصب شد. برای خروج رزین اضافه و درنتیجه افزایش نسبت الیاف به رزین و نیز بهبود خواص مکانیکی، مجموعه تحت خلأ قرار گرفت. تجهیزات ساخت نمونه در شکل ۳ آورده شده است.

پس از قرارگرفتن نمونه به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار خلأ، پلاستیک و آستری از نمونه جدا شد و قسمت‌های دور نمونه برای



شکل ۸. نمودار نیرو- جابه‌جایی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی تحت بارگذاری درون‌صفحه‌ای در راستای طولی

Fig. 8. Force-displacement graph of glass/epoxy composite plate under longitudinal in-plane pressure load

رسیدن به نمونه‌ای با ضخامت یکنواخت برش خورد. ضخامت نهایی نمونه‌ها ۱/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌های ساخته‌شده در شکل ۴ آورده شده است. این نمونه‌ها جهت پخت نهایی و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب به مدت دو روز در دمای محیط قرار گرفت.

۴- آزمایش بار محوری فشاری

آزمایش بار فشاری درون‌صفحه‌ای بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون (مدل اس-تی-ام ۱۵۰[1] و با قابلیت اعمال نیرو تا ۱۵۰ کیلونیوتن) انجام گرفت. به‌منظور اعمال فشار بر نمونه‌ها، ورق‌ها تحت شرایط مرزی دوسر گیردار قرار گرفتند. شکل ۵ نمونه‌ی ورق کامپوزیتی را در زمان آزمایش نشان می‌دهد. نمودارهای نیرو- جابه‌جایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، در بخش نتایج ارائه می‌شود.

۵- تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت

برای انجام آزمایش کشش ساده، باریکه‌هایی از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی با لایه‌چینی $[0_3]$، $[90_3]$ و $[45_3]$ و از هر نمونه، سه عدد ساخته شد و تحت آزمایش کشش قرار گرفت. به کمک نمودارهای تنش-کرنش حاصل از آزمایش کشش، مدول یانگ مربوط به این نمونه‌ها که به‌ترتیب E_1، E_2 و E_x نام‌گذاری می‌شوند، محاسبه شد. شکل ۶ تصویر نمونه‌های آزمایش کشش را نشان می‌دهد. ابعاد نمونه‌ها مطابق تست کشش استاندارد ASTM D 3039 تعیین شده است [۲۸].

$$E_x = \frac{E_1}{m^4 + m^2 n^2 \left(-2\upsilon_{12} + \frac{E_1}{G_{12}}\right) + n^4 \frac{E_1}{E_2}} \qquad (۱)$$

υ_{12} نسبت پواسون و G_{12} مدول برشی کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی می‌باشد. این رابطه به کمک روابط انتقال بین ماتریس‌های نرمی در مواد کامپوزیتی در جهت‌های اصلی (جهت‌های قرارگیری الیاف و عمود بر آن) و جهت‌های غیر اصلی در یک مادّه‌ی کامپوزیتی حاصل می‌شود [۲۸]. هم‌چنین $m = \cos\theta$ و $n = \sin\theta$ است که در این‌جا θ برابر با ۴۵ درجه است. نسبت پواسون نانولوله‌ی کربنی/ اپوکسی برابر با ۰/۲۷ درنظر گرفته شده است [۲۹]. درنهایت مقادیر خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده، پس از میانگین‌گیری در جدول ۱ آمده است.

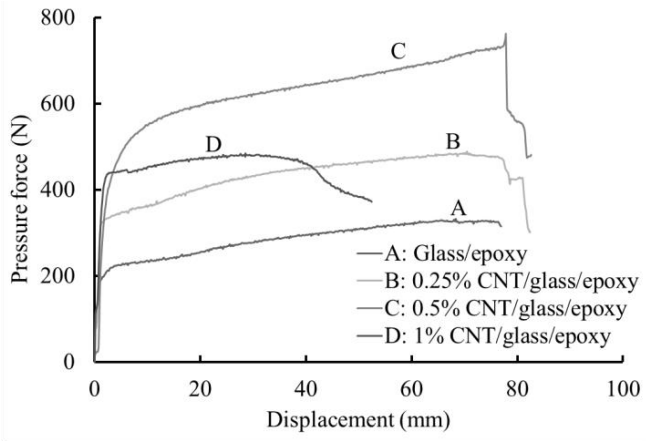
۶- نتایج و بحث

در ادامه، نتایج آزمایشگاهی اعمال نیروی فشاری بر روی نمونه‌های ساخته‌شده و تعیین بار بحرانی کمانش آورده می‌شود.

۶-۱ راستی‌آزمایی نتایج

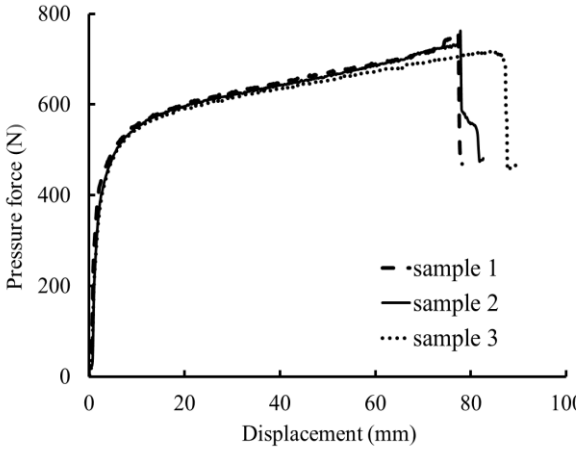
برای راستی‌آزمایی نتایج به‌دست‌آمده از روش آزمایشگاهی،

1 Instron STM-150



شکل ۹. اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی مختلف بر نمودار نیرو- جابه‌جایی ورق‌های کامپوزیتی

Fig. 9. Effect of adding CNTs with different weight percentages on the force-displacement graph of composite plates



شکل ۱۰. نمودار نیرو- جابه‌جایی برای سه نمونه‌ی ورق کامپوزیتی ۰/۵٪ CNT الیاف شیشه/ اپوکسی

Fig. 10. Force-displacement graph for three specimen of 0.5% CNT/glass/epoxy composite plates

مدل‌سازی عددی اجزای محدود ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. مدل هندسی ساخته‌شده در نرم‌افزار، از نوع مدل پوسته‌ای[1] می‌باشد. نخست مدل هندسی ورق کامپوزیتی در نرم‌افزار مدل شد. پس از مدل‌سازی هندسه‌ی ورق، خواص مادّه‌ی آن، حاصل از آزمایش کشش، محاسبه‌شده در جدول ۱، در قسمت ثابت‌های مهندسی نرم‌افزار وارد و به مدل ایجادشده، اختصاص داده شد. برای شبکه‌بندی ورق، از المان پوسته‌ای چهارگره‌ای خطی از نوع S4R استفاده شده است. در مرحله‌ی بعدی، شرایط مرزی به صورت دولبه گیردار (لبه‌های عرضی) و دولبه آزاد (لبه‌های طولی) تعریف شدند و بار واحدی در راستای الیاف به ورق مستطیلی اعمال شد. درنهایت به کمک تحلیل در ماژول کمانش[2]، بار بحرانی کمانش و شکل مودهای مربوط به آن تعیین شدند. در شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهند که بیشینه نیروی کمانش به‌دست‌آمده از روش اجزای محدود و مدل تجربی، در این حالت انطباق خوبی با یکدیگر دارند.

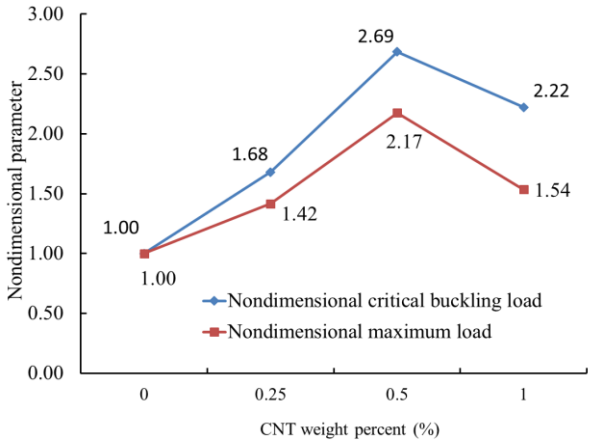
1 Shell model

2 Buckle

جدول ۳. نتایج آزمایش بارگذاری فشاری برای ورق‌های کامپوزیتی

Table 3. Results of pressure loading test for composite plates

E_s [kJ/kg]	E_{abc} [kJ]	P_{max} [kPa]	P_{cr} [N]	نام نمونه
۶۰۵/۴±۷	۲۰/۹±۱/۳	۳۱۵/۵±۴۱	۱۹۱/۱±۴۲	glass/epoxy
۷۹۰/۹±۹۶	۳۰/۳±۴/۷	۴۴۴/۶±۵۰	۳۲۱/۲±۴۲	0.25% CNT/glass/epoxy
۱۱۸۲/۸±۷۸	۵۱/۹±۲۳/۴	۷۴۳/۷±۲۳	۵۱۳/۴±۱۳	0.5% CNT/glass/epoxy
۵۸۵/۵±۱۹	۲۳/۷±۰/۹	۴۹۹/۷±۱۸	۴۲۴/۹±۵۴	1.0% CNT/glass/epoxy



شکل۱۱. بار بحرانی کمانش و نیروی بیشینه برحسب درصد ن نانولوله‌ی افزوده‌شده به مادّه‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی

Fig. 11. Effect of adding CNTs on the critical buckling load and maximum load of CNT/glass/epoxy composite plates

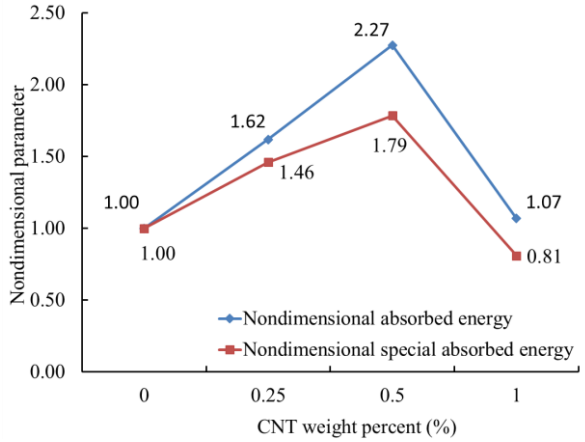
مقایسه نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی اجزای محدود در جدول ۲ آمده است.

۶-۲- نتایج حاصل از آزمون بارگذاری فشاری

به‌منظور بررسی تأثیر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی افزوده‌شده به مادّه‌ی زمینه، بر رفتار فشاری ورق کامپوزیتی، آزمایش بارگذاری فشاری درون‌صفحه‌ای برای ورق‌های مستطیل شکل الیاف شیشه/ اپوکسی و نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی با درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌ی کربنی انجام شده است. در شکل ۸، نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌دست‌آمده از آزمایش برای نمونه‌ی الیاف شیشه/ اپوکسی آورده شده است.

همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، در ابتدای بارگذاری با افزایش بار، میزان جابه‌جایی ورق در راستای اعمال بار، تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد. این قسمت از نمودار، مسیر اوّلیه[1] نامیده می‌شود. مسیر اوّلیه تا رسیدن بار به بار بحرانی کمانش (P_{cr}) ادامه می‌یابد. در نقطه‌ی بحرانی، رفتار نمودار تغییر می‌کند و با افزایش بار، میزان جابه‌جایی تغییر زیادی را نشان می‌دهد. این قسمت از نمودار که تا نقطه‌ی شکست نمونه ادامه پیدا می‌کند، مسیر پس‌کمانش[2] نامیده می‌شود. با استفاده از نمودار نیرو- جابه‌جایی، پارامترهای: بار بحرانی کمانش، بیشینه فشار قابل تحمل پیش از شکست (P_{max})، انرژی جذب شده‌ی شکست (E_{abc}) و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه (E_s) -که نسبت انرژی جذب‌شده‌ی شکست به جرم نمونه است- به‌دست آمد [۳۰]. شایان توجه است که از هر جنس ورق، تعداد سه نمونه

1 Primary or fundamental path
2 Postbuckling path



شکل ۱۲. انرژی جذب‌شده و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه برحسب درصد نانولوله‌ی افزوده‌شده به مادّه‌ی زمینه‌ی ورق‌های کامپوزیتی نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی

Fig. 12. Effect of adding CNTs on the absorbed energy and special absorbed energy of glass/epoxy com

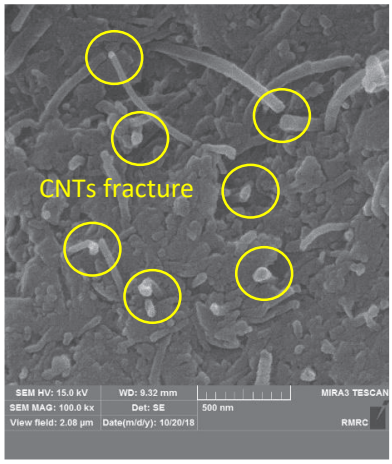
ساخته شده و آزمایش فشار بر روی آنها انجام شده است.

در شکل ۹، نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌دست‌آمده از آزمایش برای نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای مختلف نانولوله‌ی کربنی آورده شده و با نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌ی الیاف شیشه/ اپوکسی مقایسه شده است. در این شکل برای هر جنس ورق، تنها یک نمودار به‌عنوان نماینده، جهت بیان رفتار آن مادّه آورده می‌شود. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، بار بحرانی کمانش را به‌مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. نمودار نیرو- جابه‌جایی برای هر سه نمونه‌ی ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی به همراه ۰/۵ درصد نانولوله‌ی کربنی در شکل ۱۰ آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، این نمودارها با دقّت خوبی بر یکدیگر منطبق هستند که حاکی از افزایش بار بحرانی کمانش هر سه نمونه حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی نسبت به نمونه‌های دیگر است.

میانگین پارامترهای استخراج‌شده برای هر جنس ورق، به همراه مقدار انحراف از استاندارد، که بیانگر پراکندگی اطلاعات استخراج‌شده از سه نمونه با جنس مشابه نسبت به مقدار میانگین است، در جدول ۳ آورده شده است. برای درک صحیح‌تر تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی با درصدهای وزنی مختلف درون رزین اپوکسی، پارامترهای بررسی‌شده بدون بعد شدند. برای بدون‌بعدکردن هر پارامتر، مقدار آن بر مقدار پارامتر مشابه، حاصل از آزمایش فشار برای ورق الیاف شیشه/ اپوکسی تقسیم شد. بنابراین برای ورق الیاف شیشه/ اپوکسی، مقادیر تمامی پارامترهای بدون بعد، برابر با یک است.

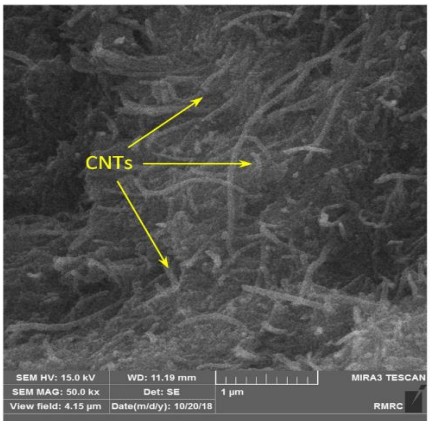
مقادیر بدون بعد بار بحرانی کمانش و بیش‌ترین نیروی قابل تحمّل برحسب درصد وزنی نانولوله‌ی افزوده‌شده به مادّه‌ی زمینه‌ی ورق‌های نانولوله‌ی کربنی/ الیاف شیشه/ اپوکسی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل، افزودن ۰/۲۵ درصد نانولوله‌ی کربنی به رزین اپوکسی، بار بحرانی کمانش را نسبت به ورق الیاف شیشه/ اپوکسی، حدود ۶۸ درصد افزایش می‌دهد. با رسیدن میزان نانولوله‌ی کربنی به ۰/۵ درصد وزنی، میزان بار بحرانی کمانش، ۱۶۹ درصد افزایش را نسبت به مقدار بار بحرانی کمانش ورق فاقد نانولوله‌ی کربنی نشان می‌دهد.

در شکل ۱۲ مقادیر بدون بعد انرژی جذب‌شده و انرژی جذب‌شده‌ی ویژه نشان داده شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، افزودن مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین/ اپوکسی، مقدار انرژی جذب‌شده تا لحظه‌ی شکست را نسبت به ورق الیاف شیشه/ اپوکسی به‌ترتیب ۴۵، ۱۴۸ و ۱۴ درصد افزایش می‌دهد. مقدار این آثار بر انرژی جذب‌شده‌ی ویژه نیز در شکل آمده است. با توجه به این شکل و اعداد ذکر شده در جدول ۳، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده‌ی ویژه متعلّق به



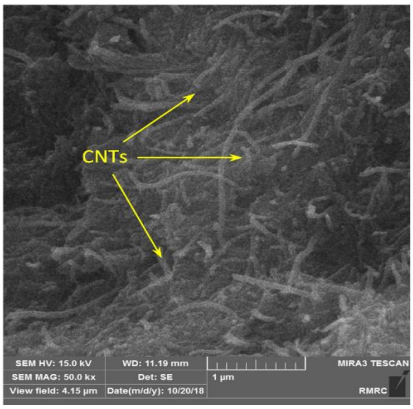
شکل ۱۳. توزیع نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه ورق کامپوزیتی
۰/۲۵٪ CNT/ الیاف شیشه/ اپوکسی و شکست آنها

Fig. 13. Dispersion of CNTs into the matrix material for 0.25%CNT/glass/epoxy composite plate and their fracture



شکل ۱۴. توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه‌ی ورق کامپوزیتی
۰/۵٪ CNT/ الیاف شیشه/ اپوکسی

Fig. 14. Homogeneous dispersion of CNTs into the matrix material for 0.5%CNT/glass/epoxy composite plate



شکل ۱۵. توزیع ناهمگن نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه‌ی ورق کامپوزیتی
۱٪ CNT/ الیاف شیشه/ اپوکسی و وجود کلوخه‌های نانولوله کربنی

Fig. 15. Nonhomogeneous dispersion of CNTs into the matrix material for 1%CNT/glass/epoxy composite plate and existence of CNTs agglomerations

نمونه با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به میزان kJ/kg ۱۱۸۲/۸ می‌باشد. انرژی جذب‌شده‌ی ویژه درحالت بدون نانولوله‌ی کربنی kJ/kg ۶۰۵/۴ می‌باشد و کمترین آن به ورق‌های با ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی، kJ/kg ۵۳۸/۵ می‌باشد.

کاهش انرژی جذب‌شده‌ی ویژه در ورق‌های کامپوزیت با ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی در مقایسه با ورق‌های فاقد نانولوله، به دلیل افزایش وزن آنها و هم‌چنین شکنندگی حاصل از کلوخه شدن نانولوله‌های کربنی می‌باشد. نتیجه‌ی حاصل بیانگر این است که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به ورق‌های کامپوزیت، انرژی جذب‌شده‌ی ویژه‌ی آنها را حدود ۹۵ درصد نسبت به حالت بدون نانولوله، افزایش می‌دهد.

۶-۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت بررسی نحوه‌ی توزیع نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه، از ناحیه‌ی شکست نمونه‌ها توسّط میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس‌برداری شد. تصویر میکروسکوپی نشان داده شده در شکل ۱۳ مربوط به نمونه‌ی تقویت‌شده با ۰/۲۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی است. در این تصویر که با خط مقیاس ۵۰۰ نانومتر گرفته شده است، نانولوله‌های کربنی به‌خوبی در بستر رزین/ اپوکسی دیده می‌شوند. در بسیاری از نواحی که در شکل نشان داده شده است، مقطع شکست نانولوله‌های کربنی نیز مشاهده می‌شوند. شکست نانولوله‌های کربنی حاکی از تحمّل بار توسّط نانولوله‌ها و چسبندگی مناسب آنها با مادّه‌ی زمینه می‌باشد. در واقع همین چسبندگی خوب است که نیرو را از مادّه‌ی زمینه به نانولوله انتقال داده و باعث افزایش استحکام مادّه می‌شود.

هم‌چنین این تصاویر برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۰/۵ و ۱/۰ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به‌ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴ وقتی که ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین/ اپوکسی افزوده شود، نانولوله‌های کربنی به‌خوبی از یکدیگر جدا شده و درون مادّه‌ی زمینه توزیع می‌شوند. این پراکندگی مناسب به همراه استحکام بالای نانولوله‌های کربنی باعث افزایش مقاومت مادّه‌ی زمینه به میزان قابل توجهی می‌شود. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که با افزودن یک درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به بستر پلیمری، نانولوله‌های کربنی درون مادّه‌ی زمینه، توزیع مناسبی نداشته؛ به‌گونه‌ای که در برخی قسمت‌های نشان‌داده در شکل نانولوله‌های کربنی دچار انباشتگی می‌شوند. این قسمت‌ها به‌صورت مناطق ناهمگن در مادّه ظاهر شده و در هنگام بارگذاری می‌توانند باعث تمرکز تنش و کاهش استحکام شکست مادّه شود.

هم‌چنین افزایش درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی درون رزین، باعث افزایش غلظت رزین می‌شود. این امر خروج حباب‌های هوای ایجاد شده در مادّه‌ی کامپوزیتی را تحت فرایند خلأ، بسیار دشوار می‌کند و باعث می‌شود مقداری حباب درون بستر پلیمری باقی بماند. وجود این حباب‌ها نیز عامل دیگر کاهش خواص استحکامی نانوکامپوزیت حاوی درصدهای وزنی بالا از نانولوله‌ی کربنی است.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهند که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی به رزین/ اپوکسی ورق کامپوزیتی، از جنس الیاف شیشه /اپوکسی، میزان بار بحرانی کمانش را به بیشتر از ۲/۵ برابر افزایش می‌دهد. هم‌چنین افزودن این مقدار نانولوله‌ی کربنی به مادّه‌ی زمینه، تأثیر قابل توجهی بر فشار بیشینه‌ی قابل تحمّل برای سازه و انرژی جذب‌شده‌ی شکست آن دارد. به‌علاوه مقایسه‌ی درصدهای وزنی مختلف نانولوله‌ی کربنی نشان داد که بیشینه تقویت‌کنندگی نانولوله‌ی کربنی، در ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی اتفاق می‌افتد؛ درحالی که در درصدهای وزنی بالاتر، به دلیل افزایش غلظت رزین و انباشتگی نانولوله‌های کربنی، کیفیت پراکندگی نانولوله‌ها، کمتر شده و تحمّل نیرو توسّط ورق کامپوزیتی نیز کاهش می‌یابد. جمع‌بندی نتایج حاکی از آن است که به‌کارگیری درصد وزنی اندکی از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده‌ی ثانوی، در ساختار یک کامپوزیت دارای الیاف، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی گذاشته و در کاربردهایی که این ورق‌ها در معرض تنش‌های فشاری ناشی از اعمال بارهای مکانیکی یا تغییرات حرارتی و رطوبتی قرار می‌گیرند، محدوده‌ی پایداری آنها را افزایش دهد.

تشکّر و قدردانی

از دکتر مجتبی قطعی، بابت دراختیارگذاشتن فضای آزمایشگاهی جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی و نیز از دکتر محمّدباقر نظری،

بابت همکاری در انجام آزمایش‌های کشش و فشار، تشکّر و قدردانی می‌شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

E_1, E_2, E_x	مدول کشسانی، N/m^2
P_{cr}	بار بحرانی کمانش، N
P_{max}	بیشینه فشار قابل تحمّل، kPa
E_s	انرژی جذب‌شده‌ی ویژه، kJ/kg
E_{abc}	انرژی جذب‌شده‌ی شکست، kJ
G_{12}	مدول برشی کامپوزیت، N/m^2

علائم یونانی

υ_{12}	نسبت پواسون کامپوزیت، بی‌بعد

مراجع

[1] H. Hu, L. Onyebueke, A. Abatan, Characterizing and modeling mechanical properties of nanocomposites: Review and evaluation, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 319-275 (2010) (4)9.

[2] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature, 58-56 (1991) (6348)354.

[3] G.D. Seidel, D.C. Lagoudas, Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites, Mechanics of Materials, (10–8)38 907-884 (2006).

[4] Y. Han, J. Elliott, Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites," Computational Materials Science, (2)39 323-315 (2007).

[5] M. H. Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand, Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of CNT/epoxy nanocomposites, Mechanics of Advanced Composite Structures, 2010 ,48-41 (2010) (1)5, (in Persian).

[6] H.S. Shen, C.L. Zhang, Thermal buckling and postbuckling behavior of functionally graded carbon nanotube reinforced composite plates, Materials and Design, 3411-3403 (2010) (7)31.

[7] H. Foroughi, H. Askariyeh, M. Azhari, Mechanical buckling of thick composite plates reinforced with randomly oriented, straight, single-walled carbon nanotubes resting on an elastic foundation using the finite strip method, Journal of Nanomechanics and Micromechanics, 58-49 (2013) (3)3.

[8] S. Madhu, V.V. Subbarao, Effect of carbon nanotube reinforcement in polymer composite plates under static loading, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, (3)8 205 -200 (2014).

[9] R. Zamani, G.H. Rahimi, M.H. Pol, M. Hedayatian, Reinforcing effect of nanoclay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: Experimental investigation, Modares Mechanical Engineering, 418-411 (2015) (3)15, (in Persian).

[10] R. Azadi, Y. Rostamiyan, Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using taguchi method for optimization, Construction and Building Materials, 224-212 (2015) 88.

[11] Z.X. Lei, L.W. Zhang, K.M. Liew, Buckling analysis of CNT reinforced functionally graded laminated composite plates, Composite Structures, 73-62 (2016) 152.

[12] M.M. Shokrieh, A. Zeinedini, Analytical prediction of mode I strain energy release rate at crack growth initiation of polymeric nanocomposites, Journal of Science and Technology of Composites, 10-1 (2016) (1)3, (in Persian).

[13] A.M. Fattahi, B. Safaei, Buckling analysis of CNT reinforced beams with arbitrary boundary conditions, Microsystem Technologies, 5091-5079 (2017) (10)23.

[14] S. Khosravi, H. Arvin, Y. Kiani, Interactive thermal and inertial buckling of rotating temperature-dependent FG-CNT reinforced composite beams, Composites Part B: Engineering, 107178 (2019) 175.

[15] M. Song, J. Yang, S. Kitipornchai, Bending and buckling

analyses of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphene nanoplatelets, Composites Part B: Engineering, 113-106 (2018) 134.

[16] A.M.K. Esawi, M.M. Farag, Carbon nanotube reinforced composites: Potential and current challenges, Materials & Design, 2401-2394 (2007) (9)28.

[17] R. Kolahchi, S. P. Zhu, B. Keshtegar, N.T. Trung, Dynamic buckling optimization of laminated aircraft conical shells with hybrid nanocomposite martial, Aerospace Science and Technoloy, 105656 (2020) 98.

[18] F. Ebrahimi, S. Habibi, Nonlinear dynamic response analysis of carbon fiber reinforced polymer enhanced with carbon nanotubes on elastic foundations in thermal environments, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 90-73 (2018) (1)50, (in Persian).

[19] H. Aghamohammadi, R. Eslami-Farsani, Improvement in the flexural properties of basalt fibers/epoxy-aluminum laminate composites using multi-walled carbon nanotubes, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering , 90-81 (2019) (3)51, (In Persian).

[20] R. Eslami-Farsani, A. Shahrabi-Farahani, H. Khosravi, M.R. Zamani, A study on the flexural response of grid composites containing multi-walled carbon nanotubes, Journal of Science and Technology of Composites, (1)4 108-101 (2017), (in Persian).

[21] Y. Chandra, E.I.S. Flores, F. Scarpa, S. Adhikari, Buckling of hybrid nanocomposites with embedded graphene and carbon nanotubes, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 441-434 (2016) 83.

[22] H. Rahimi-Sharbaf, G.H. Rahimi, G.H. Liaghat, Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading, Journal of Science and Technology of Composites, 320-311 (2017) (4)3, (in Persian).

[23] M. H. Farrash, M. Shariati, J. Rezaeepazhand, The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach, Composites Part B: Engineering, 8-1 (2017) 122.

[24] Ö.Y. Bozkurt, M. Bulut, A. Erkliğ, W.A. Faydh, Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nanoclay particles, Composites Part B: Engineering, 91-82 (2018) 158.

[25] M. Najafi, A. Darvizeh, R. Ansari, Evaluation of impact strength of composites and fiber metal laminates hybridized with nanoclay after exposure to high temperature thermal shock, Journal of Science and Technology of Composites, 274-263 (2017) (3)4, (in Persian).

[26] E.T. Thostenson, W.Z. Li, D.Z. Wang, Z.F. Ren, T.W. Chou, Carbon nanotube/carbon fiber hybrid multiscale composites, Journal of Applied Physics, (2002) (9)91 7-6034.

[27] S.M .Hosseini Farrash, J. Rezaeepazhand, M. Shariati, S.M.A. Amin Yazdi, Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the aero- thermo-elastic stability region of fibrous laminates, Modares Mechanical Engineering, 796-787 (2020) (3)20, (in Persian).

[28] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D30.04, D3039/D3039M, 2000.

[29] C.T. Heracovich, Mechanics of fibrous composites, John Wiley, New York, 1998.

[30] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.P. Papapostolou, On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: Experimental, Composite Structures, -246 (2005) (2)71 257.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H.R. Sabermanesh, M. Ghannad , S.M. Hosseini Farrash, Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2613-2628.

DOI: 10.22060/mej.2020.18025.6716

این صفحه عمداً خالی است