



تحلیل تجربی و عددی سازه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی تقویت شده با و بدون نانولوله‌های کربنی تحت نیروی محوری فشاری

علی داور^{1*}، رضا آذرآفزا²، وحید باقری³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
 3- فوق لیسانس، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، واحد گلپایگان، گلپایگان
 * تهران، صندوق پستی 83145-115، a_davar@mut.ac.ir

چکیده

در این مقاله رفتار فشاری سازه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی با و بدون نانولوله کربنی به عنوان تقویت کننده، به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی بدون نانولوله کربنی و تقویت شده با 2٪ وزنی نانولوله کربنی به روش پیش‌ساخته الیاف ساخته شد و مورد آزمایش نیروی محوری فشاری قرار گرفت. همچنین مدل‌سازی مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی و شبیه‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس انجام پذیرفت و نتایج نیروی فشاری-جابجایی محوری با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید و تطابق خوبی حاصل شد. در شبیه‌سازی عددی، برای اختصاص دادن خواص ماده نانوکامپوزیت، از مدل هالپین-سای اصلاح شده استفاده شد. تأثیر کسر حجمی نانولوله کربنی و همچنین ضرایب پراکندگی نانولوله‌ها در داخل رزین اپوکسی، به کمک تحلیل اجزاء محدود بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن 2٪ وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در حین ساخت، نیروی قابل تحمل بیشینه را حدود 44٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که با افزایش کسر حجمی نانولوله بالاتر از 2٪ وزنی، به دلیل کاهش کیفیت پراکندگی و کلوخه‌ای شدن و غیر یکنواختی توزیع نانولوله درون رزین اپوکسی، حداکثر نیروی قابل تحمل سازه کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/08/03
 پذیرش: 95/09/13

کلیدواژگان:

مخروط ناقص مشبک
 شیشه/اپوکسی
 نانوکامپوزیت
 آزمایش فشار محوری
 شبیه‌سازی عددی

DOI: 10.22068/jstc.2018.26375

Experimental and numerical analysis of composite lattice truncated conical structures with and without carbon nanotube reinforcements under axial compressive force

Ali Davar^{1*}, Reza Azarafza², Vahid Bagheri³

1- Composite Research Centre, Malek-e-Ashtar University, Tehran, Iran
 2- Department of Materials and Manufacturing, Malek-e-Ashtar University, Tehran, Iran
 3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Golpaygan, Iran
 * P.O.B. 83145-115, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir

Keywords

Lattice truncated cone
 Gass/epoxy
 Nanocomposite
 Axial compression test
 Numerical simulation

Abstract

In the present paper the compressive behavior of composite lattice truncated cone reinforced with and without carbon nanotube (CNT) is investigated using experimental and numerical simulation methods. Composite lattice truncated cone samples, made of glass/epoxy without CNT and reinforced with 2% wt. CNT are fabricated using filament winding process and tested under compressive axial force. Moreover, modeling of the structure is performed and numerical simulation is achieved using commercial finite element ABAQUS software and the results of compressive force vs. axial displacement are verified by the experimental data and good agreement is observed. Halpin-Tsai micromechanics model is also utilized in order to calculate the nanocomposite material properties and assigned in the numerical simulation. The effects of CNT weight percentage and coefficients of CNT dispersion within the epoxy resin matrix are investigated using numerical simulation method. The results showed that addition of CNT by 2% wt. to the epoxy resin of the composite lattice conical structure, enhanced the maximum carried compressive force by 44%. While addition of CNT more than 2% wt. causes the compressive strength to be decreased due to less dispersion quality and agglomeration and non-uniform dispersion of the CNTs within the epoxy resin.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Davar, A. Azarafza, R. and Bagheri, V., "Experimental and numerical analysis of composite lattice truncated conical structures with and without carbon nanotube reinforcements under axial compressive force", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 418-425, 2018.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر ذرات نانو و به‌طور خاص نانولوله‌های کربنی، برای تقویت خواص مکانیکی مختلف کامپوزیت‌ها در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این راستا برای شبیه‌سازی تأثیر نانوذرات بر خواص مکانیکی، از روش‌های مختلفی استفاده شده است. استفاده از خواص نانوکامپوزیت به دست آمده از روابط مایکرومکانیک در تحلیل اجزاء محدود یکی از این روش‌ها می‌باشد. در این حالت، ابتدا با توجه به ماهیت مسأله و نوع تقویت، رابطه‌ی مایکرومکانیک مناسب انتخاب شده و خواص مکانیکی معادل برای نانوکامپوزیت محاسبه می‌گردد. در این راستا اسلامی و همکاران [14] برای مدلسازی رفتار نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربن از روش اجزاء محدود استفاده نمودند. ایشان در ابتدا خواص معادل را برای نانولوله‌های کربن به دست آورده و سپس از این خواص برای مدلسازی کامپوزیت استفاده نمودند. فریدونی و همکاران [15] برای بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربن بر چقرمگی شکست نانوکامپوزیت، از روش اجزاء محدود و المان حجمی معرف استفاده نمودند. ایشان خواص معادل برای نانوکامپوزیت را با استفاده از المان حجمی معرف به دست آورده و سپس با استفاده از این خواص همگن، مدل اجزاء محدود قطعه‌ی ترک‌دار را شبیه‌سازی نمودند. شکره و رفیعی [16، 17] نیز از روش مایکرومکانیک و همچنین مدل اجزاء محدود، مدل الاستیسیته کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را پیش‌بینی نمودند. روش تحلیل ایشان بر پایه تغییرات تصادفی خواص مکانیکی و هندسی تقویت کننده می‌باشد.

در این مقاله اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی از جنس شیشه/پوکسی تحت نیروی فشاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت مدلسازی اجزاء محدود، در ابتدا با استفاده از روابط مایکرومکانیک، خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربن محاسبه می‌شوند. خواص به دست آمده در نرم افزار اجزاء محدود به عنوان ورودی برای تحلیل مسأله اعمال بار فشاری بر مخروط ناقص مشبک مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت بررسی صحت نتایج به دست آمده، نمونه‌های آزمایشگاهی مخروط ناقص مشبک تقویت شده با و بدون نانولوله‌های کربنی ساخته شده و تحت آزمایش فشار محوری قرار گرفتند. از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای صحت‌گذاری مدل اجزاء محدود در حالت‌های بدون تقویت کننده و همچنین تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی استفاده می‌شود.

2- ساخت نمونه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی

شکل 1 مدل هندسی مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی را نمایش می‌دهد. پارامترهای هندسی در جدول 1 ارائه شده‌اند.

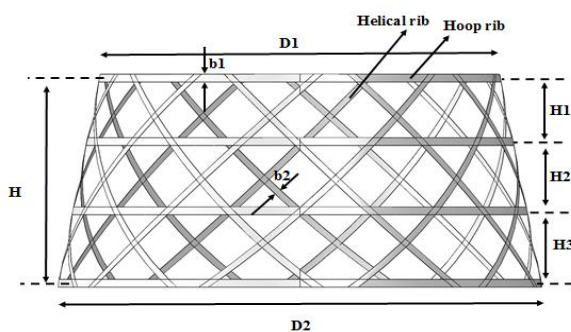


Fig. 1 Geometrical model for composite lattice truncated cone

شکل 1 مدل هندسی سازه مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی

نیازهای روز افزون علمی و صنعتی در سال‌های اخیر باعث شده است تا رویکرد جامعه به سمت استفاده از مواد و ساختارهای جدید که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند، متمایل شود. سازه‌های مشبک گروهی از این نوع ساختارها هستند که در کنار وزن کم، استحکام بالایی را برای سازه فراهم می‌کنند. علاوه بر نسبت استحکام به وزن بالا، سازه‌های مشبک مزایایی نظیر مقاومت به شرایط محیطی و توانایی تأخیر در تخریب کلی سازه را دارا هستند. مرور کاملی بر اصول ساخت و تحلیل سازه‌های مشبک و همچنین کاربردهای این سازه‌ها در صنایع هوافضا توسط واسلیف و همکاران [2، 1] ارائه شده است. بیسگانی و همکاران رفتار کمانشی سازه مشبک کامپوزیتی را به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند [3]. یافته‌های ایشان نشان داد که تخریب به وجود آمده در اثر کمانش ریب‌های سازه، به صورت ناگهانی بوده و باعث تخریب کل سازه می‌گردد. موروزوف و همکاران [4] کمانش پوسته‌های مشبک کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نقش پارامترهای هندسی سازه نظیر زاویه ریب‌ها را بر روی مقاومت سازه مخروطی بررسی نمودند. همچنین آمبر و همکاران [5] یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی رفتار کمانشی سازه مشبک ارائه نمودند. رحیمی و همکاران [6] اثر تغییر در سطح مقطع ریب‌های تقویت کننده را در کمانش سازه مشبک به روش اجزاء محدود بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که تقویت پوسته می‌تواند نیروی کمانش را تا 36% افزایش دهد، در حالی که نسبت نیروی کمانش به وزن سازه تا 56% دچار کاهش می‌شود. توتارو [7، 8] کمانش محلی سازه مشبک استوانه‌ای با ساختار شش ضلعی و همینطور سازه با ساختار مثلثی را به روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. ایشان از مقایسه این دو ساختار، تأثیر محل قرارگیری ریب‌های محیطی را بر کمانش سازه مطالعه نمودند. حل تحلیلی مسأله کمانش پنل مشبک استوانه‌ای توسط لپاتین و همکاران ارائه گردید [9]. ایشان از روش گلرکین برای حل معادلات کمانش استفاده کرده و نتایج به دست آمده را با حل اجزاء محدود صحت سنجی نمودند. مدل ارائه شده برای تعیین اثر پارامترهای مختلف هندسی و مکانیکی سازه‌های مشبک از سرعت و دقت خوبی برخوردار است. ژنگ و همکاران [10] نیز با استفاده از روش تئوری پوسته معادل، نیروی بحرانی کمانش را برای سازه مشبک استوانه‌ای پیش‌بینی نمودند. ایشان چهار مود خرابی مهم شامل کمانش عمومی، کمانش خارج صفحه، کمانش داخل صفحه و تخریب استحکامی را برای سازه مشبک بررسی نمودند. چهار مود تخریب ذکر شده توسط سوی و همکاران [11] نیز مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند تغییر در ابعاد هندسی ریب‌ها باعث تغییر در مود کمانش سازه مشبک می‌گردد. روش‌های ساخت سازه‌های کامپوزیتی مشبک، از موضوعات مهمی هستند که اخیراً توجه زیادی را به خود معطوف کرده‌اند. چن و همکاران [12] اثر وجود عیوب ایجاد شده در حین ساخت را بر خواص فشاری سازه مشبک مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که سازه‌های مشبک هرمی نسبت به هسته‌های لانه زنبوری و فوم‌های سلول باز، از نظر تحمل عیوب، عملکرد بهتری دارند. جیشی و همکاران نیز [13] یک روش نوین برای ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی به روش قالبگیری با ایجاد سوراخ‌های عبور الیاف ارائه دادند. ایشان خواص سازه‌های مشبک ساخته شده با این روش را به صورت آزمایشی مورد بررسی قرار دادند و برای کسرهای حجمی بزرگ از الیاف کربن تقویت کننده، بهبود خواص استحکامی و جذب انرژی را گزارش نمودند.

جدول 1 پارامترهای هندسی مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی

پارامتر	تعریف	مقدار
D1	قطر خارجی قسمت فوقانی	280 mm
D2	قطر خارجی قسمت تحتانی	340 mm
H1	ارتفاع قسمت بالایی	43 mm
H2	ارتفاع قسمت میانی	47 mm
H3	ارتفاع قسمت پایینی	49 mm
H	ارتفاع کل	166 mm
b1	عرض ریب‌های محیطی	6 mm
b2	عرض ریب‌های مارپیچ	6 mm

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از رزین اپوکسی و الیاف شیشه استفاده گردید. ساخت نمونه مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی به روش پیچش الیاف انجام گرفت. در ابتدا قالب فلزی (مندرل) مورد نظر برای ساخت نمونه، با توجه به آرایش ریب‌ها، به صورت چند تکه و قابل برچیدن، طراحی و ساخته شد. شکل 2، مرحله ماشینکاری قالب آماده شده برای ساخت نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در مرحله بعد قالب بر روی دستگاه پیچش الیاف قرار گرفته و ساخت نمونه‌ها آغاز گردید. الیاف شیشه آغشته به رزین، در داخل شیارهای قالب قرار گرفته و با چرخش قالب، ساخت نمونه ادامه یافت. برای ساخت نمونه دارای نانولوله‌های کربنی، ابتدا نانولوله‌های کربن به مقدار 2 درصد وزنی در داخل رزین به روش مکانیکی پراکنده شده و سپس رزین تقویت شده با نانولوله کربنی، برای ساخت سازه مشبک مورد استفاده قرار گرفت. شکل 3 نمونه‌های ساخته شده را نمایش می‌دهد.



Fig. 2 Metallic mandrel for composite lattice truncated cone

شکل 2 ماشینکاری قالب فلزی برای ساخت نمونه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی

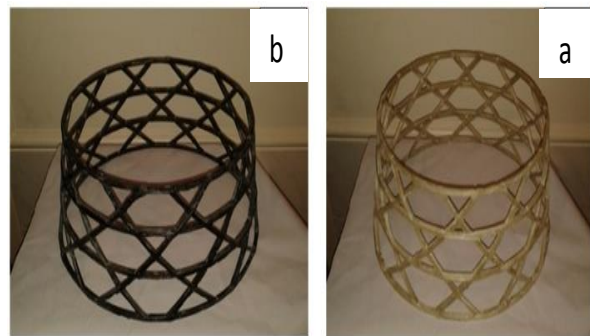


Fig. 3 Composite lattice truncated cones a) without CNT and b) with 2% wt. CNT.

شکل 3 نمونه‌های ساخته شده مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی الف) بدون تقویت ب) تقویت شده با 2٪ وزنی نانولوله کربنی

3- آزمایش بارمحوری فشاری

آزمایش فشار محوری بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایشگاهی ستنام انجام پذیرفت. به منظور اعمال فشار بر نمونه، از دو صفحه فلزی در بالا و پایین مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی استفاده گردید. شکل 4 نمونه بدون نانولوله تقویتی را در حال آزمایش نمایش می‌دهد. سرعت بارگذاری دستگاه 2 میلی‌متر بر دقیقه قرار داده شد. این سازه مخروطی مشبک، در لحظه تحمل بیشترین نیرو، متحمل 3.5 میلی‌متر جابجایی گردید. آزمایش فشار پس از رسیدن جابجایی عمودی سازه به 11.5 میلی‌متر و در زمانی در حدود 6 دقیقه متوقف گردید. حین آزمون صدهایی کم به گوش می‌رسید که مربوط به ایجاد ریزترک در ماتریس بود. پس از رسیدن به بیشترین نیرو، صدایی زیاد به گوش رسید که در این لحظه، شکست ریب‌های مایل در محل تقاطع آن‌ها با هم در ردیف پایین (بالای ریب حلقوی قاعده بزرگ) به صورت چشمی قابل ملاحظه بود. نمودارهای نیرو جابجایی به دست آمده از آزمایش و تصاویر شکست سازه، در بخش نتایج ارائه شده است.

4- مدلسازی میکرومکانیک

برای پیش‌بینی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت در این مقاله از مدل اصلاح شده هالپین-سای استفاده شده است. این مدل اصولاً در مقیاس میکرومکانیک تعریف شده و به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها، دارای خطای قابل توجهی است. چنانچه هدف پیش‌بینی رفتار نانوکامپوزیت‌ها بر اساس خواص رزین و نانولوله‌ها باشد، می‌بایست این معادله را اصلاح کرد. لذا منتظری و همکاران، معادله میکرومکانیکی هالپین-سای را به صورت رابطه (1) اصلاح کردند [18]:

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{1 + (\zeta) \left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right) (V_f)}{1 - \left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right) (V_f)} \zeta = \frac{2L}{D} e^{aV_f + b} \quad (1)$$

در رابطه (1) زیر نویس m بیانگر زمینه و زیر نویس f معرف الیاف است. V_f کسر حجمی نانولوله‌های کربنی و L و D طول و قطر نانولوله‌ها می‌باشند. E معرف مدول الاستیسیته می‌باشد. ضرایب a و b پارامترهای توزیع نانولوله‌های کربنی در داخل رزین هستند که با توجه به نوع نانولوله و کیفیت پراکنندگی به دست می‌آیند.



Fig. 4 Axial compression test on the composite lattice truncated cone

شکل 4 نمونه مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی در حین آزمایش فشار محوری

5- شبیه‌سازی عددی آزمایش بار محوری فشاری

مدلسازی اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS 6.13 انجام پذیرفت. مدل هندسی ساخته شده در نرم افزار، از نوع مدل پوسته‌ای (Shell) می‌باشد. دلیل انتخاب المان پوسته‌ای این است که علاوه بر سرعت بالاتر در تحلیل، با انتخاب این نوع المان، امکان استفاده از تئوری تخریب کامپوزیت هاشین توسط نرم‌افزار میسر می‌شود. از آنجا که ماهیت ماده کامپوزیتی به صورت ایزوتروپیک عرضی است، لازم است تا در ریب‌ها، جهت‌گیری مناسب برای سازه تعریف گردد؛ به طوری‌که که راستای 1 محور مادی کامپوزیت (جهت الیاف) در راستای ریب قرار گیرد. در ابتدا مدل هندسی مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی در نرم افزار ساخته شد. در مرحله بعد، ورود خواص مواد به نرم‌افزار انجام گرفت. خواص الاستیک کامپوزیت شیشه/اپوکسی نیز در جدول 2 ارائه شده است. برای مش‌بندی سازه، در مجموع 13460 المان پوسته‌ای S4R به کار گرفته شد. با توجه به نمودار همگرایی مش (شکل 5) این تعداد المان از نظر دقت نتایج و همچنین زمان انجام تحلیل مناسب می‌باشد.

برای شبیه‌سازی آزمون فشار محوری سازه، نوع تحلیل به صورت دینامیکی صریح انتخاب شده است. زمان مورد نیاز برای تحلیل باید به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر جلوگیری از صرف زمان‌های بسیار طولانی برای انجام تحلیل توسط نرم‌افزار، به اندازه‌ای بزرگ باشد که انرژی جنبشی در مقایسه با انرژی ذخیره شده در کل سازه دارای مقادیر بسیار کوچک شود. شرایط مرزی و بارگذاری سازه، مشابه شرایط آزمایشگاهی تعریف شده است. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی آزمایش اعمال نیروی فشاری بر روی سازه، تمامی نقاط قسمت بالایی سازه مخروطی با یکدیگر کوپل شده‌اند. در این حالت، درجات آزادی این گره‌ها به یکدیگر متصل شده و تمامی نقاط با

جدول 2 خواص الاستیک کامپوزیت شیشه/اپوکسی

Table 2 Elastic properties for glass/epoxy composites

مقدار	مشخصه
18 GPa	مدول در راستای 1 (ریب)
3.5 GPa	مدول در راستای 2
0.3	ضریب پواسون اصلی
1.4 GPa	مدول برشی در راستای 12
1.4 GPa	مدول برشی در راستای 13
1 GPa	مدول برشی در راستای 23

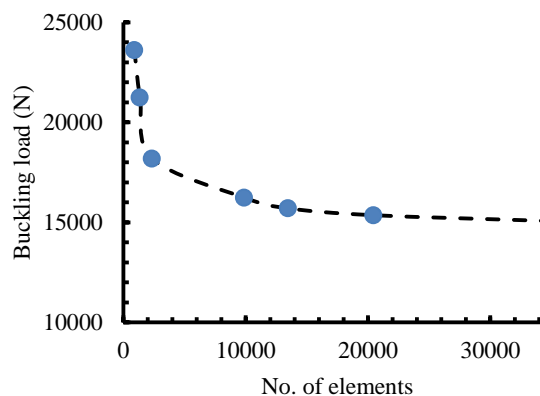


Fig. 5 Mesh convergence diagram

شکل 5 نمودار همگرایی مش

هم، به سمت پایین حرکت می‌نمایند. گره‌های قسمت پایینی مخروط، کاملاً مقید شده و بر روی گره‌های قسمت بالایی (که قبلاً به یکدیگر کوپل شده‌اند)، جابجایی به سمت پایین (فشاری) اعمال شده است. برای اجتناب از ورود مؤلفه‌های تماسی غیرخطی و افزایش سرعت حل مسأله، از اصطکاک بین تکیه‌گاه و سازه، صرف نظر شده است. برای شبیه‌سازی مخروط مشبک کامپوزیتی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، ابتدا خواص مواد به ازای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی، با استفاده از رابطه میکرومکانیک (1) محاسبه شده و سپس در فرایند شبیه‌سازی وارد شده‌اند.

6- نتایج و بحث

6-1- اعتبار سنجی نتایج

برای صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود، نمودار نیرو-جابجایی مدل شبیه‌سازی شده با نتایج مدل آزمایشگاهی سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی بدون نانولوله کربنی در شکل 6 مقایسه شده‌اند. با توجه به این شکل، مشخص است که نتایج (بیشینه نیروی کماتش و جابجایی متناظر با آن) از انطباق خوبی برخوردار هستند. جدول 3 مقایسه مقادیر مورد نظر را نمایش می‌دهد.

شکل 7 تغییر شکل سازه را در آخرین گام بارگذاری نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل 7 مشخص است، کماتش در ریب‌های پایینی سازه اتفاق افتاده است. با توجه به وجود تقارن، هم در شکل هندسی و خواص مکانیکی سازه و هم در نحوه بارگذاری، تغییر فرم به صورت متقارن اتفاق افتاده است.

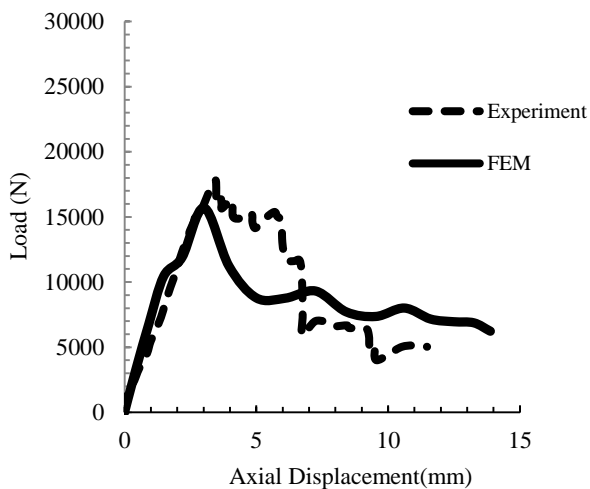


Fig. 6 Force-displacement diagram obtained from experimental and finite element methods for composite lattice cone without CNT

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمایش تجربی و تحلیل اجزاء محدود برای مخروط مشبک کامپوزیتی بدون نانولوله کربنی

جدول 3 مقایسه نتایج به دست آمده به روش آزمایش تجربی و روش اجزاء محدود

Table 3 Comparison between the results obtained from experimental and finite element methods

درصد	جابجایی محوری	جابجایی محوری	درصد	نیروی بیشینه	نیروی بیشینه	درصد
خطای	اجزاء	تجربی	خطای	اجزاء	تجربی	نانولوله
جابجایی	محدود	(mm)	نیرو	محدود	(N)	(N)
(mm)	(mm)					
9	3.01	3.31	9.7	15700	17400	0%
9.3	3.9	4.3	0.1	25176	25152	2%

مود شکست سازه در شبیه‌سازی المان محدود و آزمون تجربی، دوباره احراز شده است.



Fig. 8 Local failure mode for composite lattice cone specimen without CNT close to a critical node after axial compressive test

شکل 8 مود تخریب موضعی نمونه مخروط مشبک کامپوزیتی بدون نانولوله در ناحیه اطراف یک گره بحرانی پس از آزمایش فشار محوری

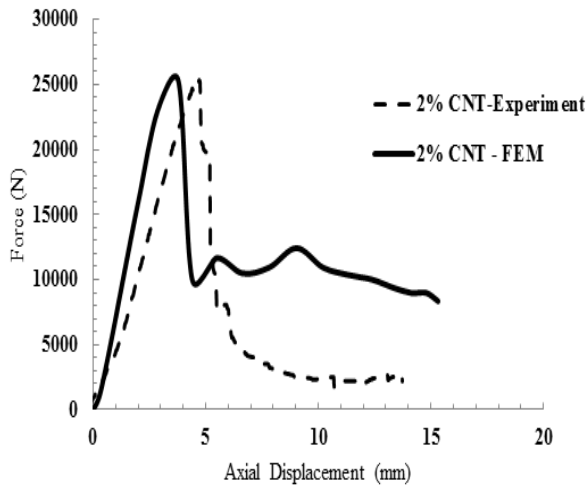


Fig. 9 Force-displacement diagram for composite lattice cone specimen with 2% wt. CNT obtained from experiments and finite element method

شکل 9 نمودار نیرو- جابجایی به دست آمده از آزمایش تجربی و تحلیل اجزاء محدود برای نمونه مخروط مشبک کامپوزیتی تقویت شده با 2٪ وزنی نانولوله کربنی

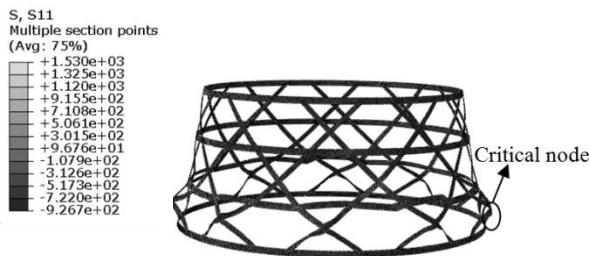


Fig. 10 Stress distribution in the fibers direction at the last deformation step (deformation scale ratio=1:1)

شکل 10 توزیع تنش در راستای الیاف در سازه تغییر شکل یافته نهایی (مقیاس تغییر شکل 1:1)

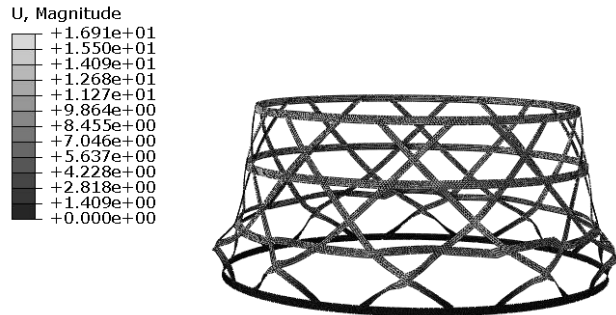


Fig. 7 Deformation of the structure at the last load step (deformation scale ratio=1:1)

شکل 7 تغییر شکل سازه تخریب شده در انتهای بارگذاری (مقیاس تغییر شکل 1:1)

شکل 8، مود تخریب موضعی نمونه بدون نانولوله را پس از آزمایش فشار نمایش می‌دهد. شکست ریب مایل در گره محل تقاطع آن‌ها (گره بحرانی)، در پایین‌ترین ردیف نزدیک قاعده پایین مخروط اتفاق می‌افتد. با مقایسه شکل‌های 7 با 8، مشابهت مود شکست سازه در شبیه‌سازی المان محدود و آزمون تجربی در این ناحیه از سازه مشخص می‌شود.

پس از اعتبارسنجی نتایج سازه مشبک مخروطی کامپوزیتی در حالت بدون نانولوله‌های کربنی، نتایج اجزاء محدود و تجربی برای سازه مشبک مخروطی کامپوزیتی تقویت شده با 2٪ وزنی نانولوله کربنی نیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند. ورودی‌های خواص ماده برای تحلیل اجزاء محدود، از کد مایکرومکانیک محاسبه شده‌اند. در تحقیقات گذشته، بسته به کیفیت روش توزیع نانولوله‌های کربنی در داخل زمینه، ضرایب توزیع a و b مشخص شده‌اند. برای تعیین ضرایب توزیع، نیاز است تا نمونه‌های آزمایش خواص مکانیکی نظیر آزمایش‌های کشش و فشار برای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گیرند. پس از انجام آزمایش با استفاده از روش برآزش منحنی بر نتایج به دست آمده (نمودار خواص مکانیکی بر حسب درصد وزنی نانولوله کربنی) ضرایب مجهول برای روش پراکنده‌سازی مورد استفاده به دست آورده می‌شوند. بدیهی است که در صورت تغییر جنس مواد مورد استفاده و یا تغییر پارامترهای پراکنده سازی، ضرایب توزیع نیز تغییر می‌کنند. در تحقیق حاضر، جهت تعیین این ضرایب، ابتدا محدوده ضرایب توزیع نانولوله‌ها با توجه به نتایج مرجع [18] مشخص شده و سپس به کمک سعی و خطا جهت انطباق با نتایج آزمایشگاهی، این ضرایب به صورت $a=-150$ و $b=-2.5$ تعیین شده‌اند. همچنین به منظور تعیین اثر تغییر این ثوابت بر نتایج کمانش سازه مخروطی مشبک، تحلیل پارامتری ضرایب در بخش 6-3 انجام شده است. شکل 9 نشان می‌دهد که بیشینه نیروی کمانش و جابجایی متناظر به دست آمده از روش اجزاء محدود و مدل تجربی، در این حالت نیز انطباق خوبی با یکدیگر دارند. مقایسه این مقادیر در جدول 3 ارائه شده‌اند.

توزیع تنش در راستای الیاف در سازه مخروطی در شکل 10 نشان داده شده است. گره‌های بحرانی ردیف پایین که در شکل 10 مشخص شده است، محل آغاز تخریب سازه می‌باشند.

شکل 11، مود تخریب موضعی نمونه تقویت شده با نانولوله را پس از آزمایش فشار نمایش می‌دهد. شکست ریب‌های مایل در موضعی مشابه با موضع نشان داده شده در شکل 8 اتفاق می‌افتد. با مقایسه شکل‌های 10 و 11، مشابهت

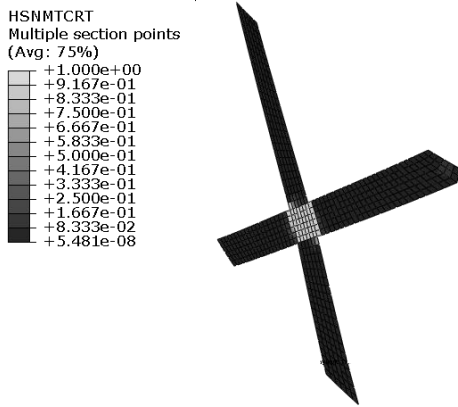


Fig. 12 Hashin failure criteria in the matrix tensile mode for the submodel of the critical node

شکل 12 معیار تخریب هاشین در مود شکست کشش ماتریس برای زیرمدل گره بحرانی و پارامترهای پراکندگی و همچنین درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی بر نتایج کمانش در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به انطباق خوب نتایج حداکثر نیروی قابل تحمل و جابجایی متناظر با آن، حاصل از شبیه‌سازی المان محدود در مقایسه با نتایج حاصل از آزمون تجربی، در ادامه تحقیق حاضر، با استفاده از روش شبیه‌سازی المان محدود، بررسی میزان تأثیر درصد وزنی نانولوله کربنی و تأثیر نحوه توزیع یا پراکندگی نانولوله‌های کربنی بر نمودار نیرو-جابجایی مخروط‌های مشبک کامپوزیتی تحت نیروی محوری فشاری، به ترتیب در بخش‌های 2-6 و 3-6 انجام شده است.

6-2- تأثیر درصد وزنی نانولوله کربن

به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر رفتار فشاری سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی، تحلیل مدل مایکرومکانیک و مدل اجزاء محدود برای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی انجام شده است. در شکل 13، نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از تحلیل به ازای درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی نمایش داده شده است. مقادیر ضرایب توزیع نانولوله مورد استفاده در شکل 13، $a=-150$ و $b=-2.5$ هستند. این مقادیر، همان مقادیری هستند که در شکل 9 برای مقایسه با نتایج آزمایش تجربی، با انطباق خوب مورد استفاده قرار گرفتند.

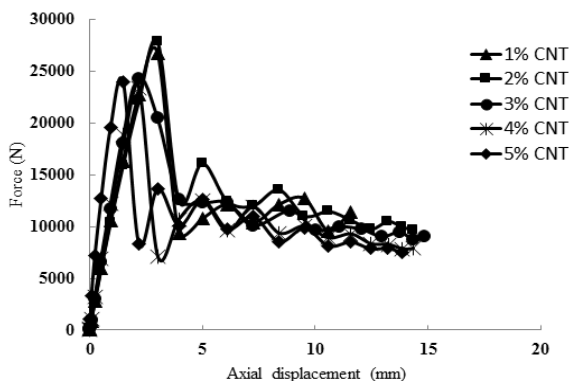


Fig. 13 Force-displacement diagram for the composite lattice cones reinforced with different % wt. of CNT (for dispersion coefficients $a=-150$ and $b=-2.5$)

شکل 13 نمودار نیرو-جابجایی مخروط مشبک کامپوزیتی تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله کربنی (به ازای ضرایب توزیع $a=-150$ و $b=-2.5$)



Fig. 11 Local failure mode for composite lattice cone specimen with 2% wt. CNT close to a critical node after axial compressive test

شکل 11 مود تخریب موضعی نمونه مخروط مشبک کامپوزیتی تقویت شده با 2% وزنی نانولوله کربنی در ناحیه اطراف یک گره بحرانی پس از آزمایش فشار محوری برای مطالعه دقیق‌تر توزیع تنش در محل گره بحرانی که اولین محل شروع تخریب سازه به حساب می‌آید، با استفاده از تکنیک زیرمدلسازی روش اجزاء محدود، در نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفته است. به این ترتیب که با استفاده از حل اجزاء محدود انجام گرفته بر روی مدل کامل در مرحله‌ی قبلی، ناحیه‌ای در همسایگی یکی از گره‌های بحرانی انتخاب شده و با استفاده از تکنیک زیرمدلسازی تحلیل تنش، فقط بر روی زیرمدل مربوط به این ناحیه انجام پذیرفته است. میدان جابجایی بر روی گره‌های مرزی زیرمدل، از نتایج حل مدل اصلی محاسبه شده و بر مرزهای زیرمدل اعمال شده‌اند. استفاده از روش زیرمدل، به دلیل ایجاد قابلیت استفاده از مش‌بندی ریزتر و زمان حل کوتاه‌تر، برای بررسی دقیق مود تخریب در ناحیه گره بحرانی سازه می‌باشد. شکل 12 مود تخریب در یک گره بحرانی، در اثر تنش کششی در راستای عمود بر الیاف (ماتریس) را بر اساس معیار هاشین نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل 12 مشخص است، مود تخریب در این گره بحرانی در شبیه‌سازی زیرمدل با مود تخریب غالب در گره بحرانی نمونه آزمایشگاهی (شکل‌های 8 و 11) مطابقت دارد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل اجزاء محدود و محاسبه خطا در جدول 3 ارائه شده است. بیشترین خطای موجود بین آزمایش و تحلیل اجزاء محدود 9.7% می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج آزمایشگاهی برای سازه بدون نانولوله کربنی و با سازه دارای نانولوله کربنی نشان می‌دهد که افزودن تنها 2% نانولوله کربنی به سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی، حداکثر نیروی قابل تحمل توسط سازه را به مقدار 44% افزایش می‌دهد. افزایش نیروی کمانش به دلیل بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی در سازه مشبک در اثر افزودن نانولوله‌های کربنی اتفاق می‌افتد. در تحقیقی مشابه، ژانگ و همکاران [19] نشان دادند که افزودن 2% وزنی نانولوله‌های کربنی به پلی‌کربنات، باعث 51.2% افزایش در نیروی کمانش ستون کامپوزیتی می‌شود. شکریه و همکاران [20] نیز نشان دادند که در صورت انتخاب مناسب شرایط توزیع نانولوله‌های کربنی نظیر توان و زمان عملیات پراکندگی فراصوت، افزودن تنها 0.3% وزنی نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت شیشه/پلی‌استر، مدول فشاری این کامپوزیت را 31% بهبود می‌بخشد. میزان درصد وزنی مناسب نانولوله کربنی برای دستیابی به بیشترین میزان تقویت، وابسته به کیفیت توزیع نانولوله‌ها در زمینه، که خود تابعی از جنس نانولوله و روش توزیع است، می‌باشد. در این مقاله، تأثیر

همچنین مقایسه درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی نشان داد که حداکثر تقویت‌کنندگی نانولوله کربنی در درصد وزنی 2% اتفاق می‌افتد. این در حالی است که نتایج برای درصد وزنی 1% نیز بسیار نزدیک به 2% هستند و بنابراین استفاده از 1% وزنی نانولوله کربنی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه-تر است. در درصدهای وزنی بالاتر از 2%، کیفیت پراکندگی نانولوله کربنی کمتر شده و تحمل نیرو توسط سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی نیز کاهش می‌یابد. انتظار می‌رود با افزایش کیفیت ساخت و حصول یکنواختی بیشتر در نحوه پراکندگی نانولوله‌های کربنی (مانند استفاده از روش آلتراسونیک) و لذا دستیابی به ضرایب توزیع a و b بهتر، بتوان در درصدهای وزنی بالاتر از 2% نانولوله کربنی، به حداکثر نیروی قابل تحمل بالاتری دست یافت.

8- مراجع

- [1] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A. and Rasin, A. F., "Anisogrid Lattice Structures—Survey of Development and Application," Composite structures, Vol. 54, No. 2, pp. 361-370, 2001.
- [2] Vasiliev, V. V., "Anisogrid Composite Lattice Structure for Spacecraft and Aircraft Application," Composite Structures, Vol. 76, No. 4, pp. 182-189, 2006.
- [3] Bisagni, C. and Cordisco, P., "Post-Buckling and Collapse Experiments of Stiffened Composite Cylindrical Shells Subjected to Axial Loading and Torque," Composite structures, Vol. 73, No. 2, pp. 138-149, 2006.
- [4] Morozov, E. V., Lopatin, A. V. and Nesterov, V. A., "Buckling Analysis and Design of Anisogrid Composite Lattice Conical Shells," Composite Structures, Vol. 93, No. 12, pp. 3150-3162, 2011.
- [5] Ambur, D. R. and Jaunky, N., "Optimal Design of Grid-Stiffened Panels and Shells with Variable Curvature," Composite Structures, Vol. 52, No. 2, pp. 173-180, 2001.
- [6] Rahimi, G. H., M. Zandi, and S. F. Rasouli., "Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading," Aerospace science and technology, Vol. 24, No.1, pp. 198-203, 2013.
- [7] Totaro, G., "Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with triangular cells," Composite structures, Vol. 94, No. 2, pp. 446-452, 2012.
- [8] Totaro, G., "Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with hexagonal cells," Composite Structures, Vol. 95, No. 1, pp. 403-410, 2013.
- [9] Lopatin, A. V., Morozov, E. V. and Shatov, A. V. , "Buckling of uniaxially compressed composite anisogrid lattice plate with clamped edges," Composite Structures, Vol. 157, No. 1, pp. 187-196, 2016.
- [10] Zheng, Q., Jiang, D., Huang, C., Shang, X. and Ju, S., "Analysis of failure loads and optimal design of composite lattice cylinder under axial compression," Composite Structures, Vol. 131, No. 1, pp. 885-894, 2015.
- [11] Sui, Q., Hualin, F. and Changliang, L., "Failure analysis of 1D lattice truss composite structure in uniaxial compression," Composites Science and Technology, Vol. 118, No. 1, pp. 207-216, 2015.
- [12] Chen, M., Zhu, X., Lei, H., Chen, H., & Fang, D., "Effect of defect on the compressive response of sandwich structures with carbon fiber pyramidal truss cores," International Journal of Applied Mechanics, Vol. 7, No. 1, 1550004, 2015.
- [13] Jishi, H. Z., Umer, R. and Cantwell, W. j., "The fabrication and mechanical properties of novel composite lattice structures," Materials & Design, Vol. 91, No. 1, pp. 286-293, 2016.
- [14] Afrooz, I. E., Öchsner, A. and Rahmandoust, M., "Effects of The Carbon Nanotube Distribution On The Macroscopic Stiffness of Composite Materials," Computational Materials Science, Vol. 51, No. 1, pp. 422-429, 2012.
- [15] Fereidoon, A., Rajabpour, M. and Hemmatian, H., "Fracture Analysis of Epoxy/SWCNT Nanocomposite Based on Global-Local Finite Element Model," Composites Part B: Engineering, Vol. 54, No. 1, pp. 400-408, 2013.

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان تحمل نیروی فشاری در درصدهای وزنی 1% و 2% اتفاق می‌افتد. با توجه به اختلاف اندک مقادیر به دست آمده برای این دو درصد وزنی، استفاده از 1% نانولوله کربنی برای تقویت سازه مشبک کامپوزیتی از نظر هزینه، به صرفه‌تر می‌باشد. باید توجه داشت که به دلیل افزایش دشواری ساخت کامپوزیت در درصدهای وزنی بالاتر به دلیل افزایش لزجت رزین و همچنین کیفیت پراکندگی کمتر در این حالت (با توجه به ضرایب توزیع انتخاب شده منطبق با نمونه ساخته شده)، قابلیت تحمل نیرو توسط سازه کامپوزیتی کاهش می‌یابد. لذا در صورت استفاده از روش‌های مناسب‌تر پراکندگی نانولوله کربنی درون رزین نسبت به روش مکانیکی حاضر (مانند آلتراسونیک)، انتظار می‌رود درصدهای بالاتر نانولوله‌های کربنی نیز پاسخ بهتری از خود نشان دهند.

6-3- تأثیر نحوه توزیع یا پراکندگی نانولوله‌های کربنی

در این بخش، تأثیر ضرایب توزیع مختلف برای نانولوله‌های کربنی بر رفتار فشاری سازه مخروطی مشبک مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 14، نمودار نیرو-جابجایی محوری برای سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی تقویت شده با 2% وزنی نانولوله‌های کربنی، به ازای ضرایب توزیع مختلف نانولوله نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، در حالتی از توزیع نانولوله‌ها که تجمع یا کلوخه‌ای شدن آنها در نظر گرفته نشود (حالت ایده‌آل پراکندگی یکنواخت بدون تجمع $a=b=0$) نیروی فشاری ماکزیمم، بسیار بیشتر از حالات غیر ایده‌آل خواهد بود. با توجه به شکل 14، حداکثر نیروی قابل تحمل در حالت ضرایب توزیع $a=b=0$ ، از حداکثر نیروی قابل تحمل به دست آمده در حالت ضرایب توزیع $a=-150$ و $b=-2.5$ (مورد استفاده در شکل 9)، در حدود 40% بیشتر است.

7- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن 2% وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی، باعث افزایش نیروی بیشینه قابل تحمل برای سازه به میزان 44% شد. پس از تعیین ضرایب توزیع متناسب با نحوه پراکندگی نانولوله‌ها، مدل اجزاء محدود ساخته شده از سازه مخروطی مشبک کامپوزیتی، تطابق خوبی را با نتایج به دست آمده از آزمایش تجربی در دو حالت با و بدون نانولوله کربنی نشان داد.

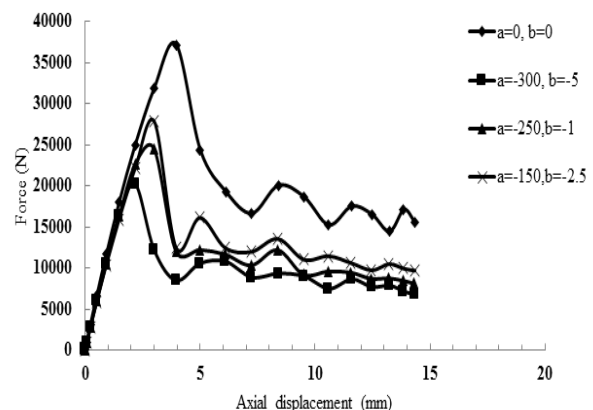


Fig. 14 The effect of CNT dispersion coefficients on the compressive force-axial displacement behavior of the composite lattice cones

شکل 14 تأثیر پارامترهای توزیع نانولوله کربنی بر رفتار نیروی فشاری-جابجایی محوری پوسته مخروطی مشبک کامپوزیتی

- [16] Shokrieh, M. M. and Rafiee, R., "Prediction of Mechanical Properties of An Embedded Carbon Nanotube in Polymer Matrix Based on Developing An Equivalent Long Fiber," *Mechanics Research Communications*, Vol. 37, No. 2, pp. 235-240, 2010.
- [17] Shokrieh, M. M. and Rafiee, R., "Stochastic Multi-Scale Modeling of CNT/Polymer Composites," *Computational Materials Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 437-446, 2010.
- [18] Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A. and Mohajeri, A., "Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Composites," *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4202-4208, 2010.
- [19] Zhang, W., Suhr, J. and Koratkar, N. A., "Observation of high buckling stability in carbon nanotube polymer composites," *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 4, pp. 452-456, 2006.
- [20] 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, No. 1, pp. 274-279, 2014.