



## مدل سازی میکرومکانیکی خواص موثر الاستیک نانو کامپوزیت های هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی حاوی نانولوله ی کربن

محمد کاظم حسن زاده اقدم<sup>1</sup>، محمد جواد محمودی<sup>2\*</sup>، هوشنگ بر خورداری<sup>3</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
 3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص)، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 167651719، mj\_mahmoudi@sbu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از مدل میکرومکانیکی بر مبنای سلول واحد اثرات اندازه ی نانولوله کربنی بر خواص موثر الاستیک نانو کامپوزیت های هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی بررسی می شود. این نوع نانو کامپوزیت هیبریدی از نانولوله کربنی، فیبر کربن، زمینه پلیمری و فاز میانی ناشی از برهمکنش غیرپیوندی و اندروالس بین زمینه و نانولوله کربنی تشکیل می شود. ویژگی ساختاری جدید نانو کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی به گونه ای است که نانولوله های کربنی همراستا به صورت شعاعی بر سطح فیبر کربن رشد داده شده اند. نانولوله ی کربنی و فیبر کربن به عنوان یک ماده ایزوتروپیک عرضی مدل می شوند در حالی که زمینه پلیمری و فاز میانی ایزوتروپ فرض می شوند. اثرات اندازه ی نانولوله کربنی بر رفتار کلی نانو کامپوزیت زمینه پلیمری، فیبر فازی کامپوزیتی و کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج نشان می دهد که اندازه ی نانولوله کربنی بر خواص موثر عرضی نانو کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی دارای اهمیت بیشتری می باشد. فهمیده شد که خواص موثر عرضی نانو کامپوزیت هیبریدی با افزایش اندازه ی شعاع نانولوله کربنی بهبود می یابد. همچنین این مدل میکرومکانیکی به منظور بررسی اثرات فاز میانی بر رفتار کلی نانو کامپوزیت زمینه پلیمری، فیبر فازی کامپوزیتی و کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی به کار گرفته می شود. نتایج خواص موثر الاستیک به دست آمده با مدل میکرومکانیکی حاضر برای کامپوزیت هیبریدی تطابق بسیار خوبی با دیگر تحقیقات نشان می دهد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 19 تیر 1396  
 پذیرش: 20 مرداد 1396  
 ارائه در سایت: 17 شهریور 1396  
 کلید واژگان:  
 نانو کامپوزیت  
 فیبر فازی  
 نانولوله کربنی  
 میکرومکانیک  
 خواص موثر الاستیک

## Micromechanical modeling of effective elastic properties of hybrid nanocomposites reinforced by fuzzy fiber containing carbon nanotubes

Mohammad Kazem Hassanzadeh-Aghdam<sup>1</sup>, Mohammad Javad Mahmoodi<sup>1\*</sup>, Hoshang Barkhordari<sup>2</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
 2- Faculty of Mechanical Engineering, Khatam al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 167651719, Tehran, Iran, mj\_mahmoudi@sbu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 10 July 2017  
 Accepted 11 August 2017  
 Available Online 08 September 2017

**Keywords:**  
 Nanocomposite  
 Fuzzy Fiber  
 Carbon Nanotube  
 Micromechanics  
 Effective Elastic Properties

### ABSTRACT

In this work, the effect of carbon nanotube (CNT) size on the effective elastic properties of a hybrid composite reinforced by fuzzy fiber is investigated using a unit cell-based micromechanical approach. This hybrid nanocomposite is composed of the CNT, carbon fiber, polymer matrix and interphase created due to the non-bonded van der Waals interactions between the CNTs and polymer. The novel constructional feature of this hybrid nanocomposite is that the uniformly aligned CNTs are radially grown on the surface of the horizontal carbon fibers. The CNT and carbon fiber are modeled as a transverse isotropic solid, while the interphase and polymer matrix are assumed to be isotropic. The influence of CNT size on the overall behavior of polymer matrix nanocomposite (PMNC), composite fuzzy fiber (CFF) and hybrid composite reinforced with fuzzy fiber is examined. Results show that size of CNT is more significant for the transverse effective properties of the hybrid nanocomposites reinforced with fuzzy fiber. It has been found that the transverse effective properties of hybrid nanocomposite are improved with increasing the CNT size. The micromechanical model is also used to examine the influence of interphase on the overall behavior of the PMNC, CFF and fuzzy fiber-reinforced composite (FFRC). The effective elastic properties of the hybrid composite obtained by the present micromechanical model demonstrate very good agreement with those predicted by the other researches.

### Please cite this article using:

M. K. Hassanzadeh-Aghdam, M. J. Mahmoodi, H. Barkhordari, Micromechanical modeling of effective elastic properties of hybrid nanocomposites reinforced by fuzzy fiber containing carbon nanotubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 261-272, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

کشف نانولوله‌های کربنی [1] موجب شده است که تحقیقات بسیار وسیعی جهت پیش‌بینی خواص الاستیک آن‌ها انجام بگیرد. شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به‌منظور پیش‌بینی مدول الاستیک نانولوله‌های کربنی توسط یاکوبسن و همکاران [2] انجام شده است. سالواتات و همکاران [3] خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی را با روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. شن و لی [4] گزارش کردند که می‌توان نانولوله‌های کربنی را به‌عنوان یک ماده ایزوتروپ عرضی در نظر گرفت. مدول الاستیک و نسبت پواسون نانولوله کربنی با استفاده از مدل مکانیک مولکولی در [5] استخراج شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص الاستیک نانولوله کربنی به قطر لوله بستگی دارد. تسای و همکاران [6] نیز نانولوله‌ی کربنی را به‌عنوان یک ماده ایزوتروپ عرضی در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، پنج ثابت الاستیک را برای نانولوله‌ی کربنی با شعاع‌های مختلف به‌دست آوردند. سرپ و پاپانیکوس [7] مدل‌های المان محدود سه‌بعدی را برای نانولوله‌های کربنی تک جداره آرمچیر، زیگزاگ و کایرال به‌منظور بررسی اثرات قطر و ضخامت دیواره بر مدول الاستیک نانولوله‌های کربنی ارائه کردند. رسی و متو [8] با به‌کارگیری تئوری مکانیک مولکولی مدلی المان محدود برای ارزیابی خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی ارائه کردند. انصاری و همکاران [9] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی خواص مکانیکی و رفتار کمانش نانولوله‌های کربنی را مطالعه کردند.

بدلیل خواص مکانیکی خارق‌العاده نانولوله‌های کربنی [10,11]، از آن‌ها بطور گسترده به‌عنوان فاز تقویت در مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود. در مطالعات قبلی محققین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را با مدل‌های میکرومکانیکی تحلیلی و المان محدود، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و مدل‌سازی چندمقیاسه مورد بررسی قرار داده‌اند. خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی با استفاده از تحلیل میکرومکانیکی توسط توسدنسون و چو [12] پیش‌بینی شد. هان و ایوت [13] اثرات کسر حجمی نانولوله‌های تک‌جداره را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه پلیمری مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که اگر برهم‌کنش بین نانولوله‌های کربنی و زمینه پلیمری قوی باشد، بایستی اثرات فاز میانی را در مدل‌سازی این مواد در نظر گرفت. شکریه و همکاران [14] با استفاده از مدل‌سازی میکرومکانیکی المان محدود، رفتار مکانیکی پلیمرهای تقویت شده با نانولوله کربنی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اثرات ابعاد المان حجمی نماینده را بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت بررسی کردند. چن و لیو [15] یک مدل المان محدود را براساس المان حجمی نماینده مربعی برای استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی ارائه کردند. گریبل و هاماکرز [16] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مدول الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلی‌اتیلن که با نانولوله‌های کربنی تک‌جداره تقویت شده، پیش‌بینی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای نانولوله‌های کربنی پیوسته، مدول الاستیک طولی نانوکامپوزیت در تطابق با نتایج به‌دست آمده براساس مدل میکرومکانیکی قانون اختلاط می‌باشد. فریدون و همکاران [17] با استفاده از المان تیر به‌عنوان نانولوله‌های کربنی و ایجاد المان حجمی نمونه از نانوکامپوزیت در مقیاس میکرو، چیدمان‌های مختلفی از نانولوله‌های کربنی را بر بستر اپوکسی ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی میکرومکانیکی اثر پارامترهای کسر حجمی، نسبت منظری و اثرات موجی بودن نانولوله‌های کربنی را بر مدول

الاستیک موثر نانوکامپوزیت بررسی کردند. گو و همکاران [18] با ترکیبی از روش‌های محاسباتی و تجربی اتصال لایه میانی را در کامپوزیت زمینه اپوکسی که با نانولوله‌های کربنی تک‌جداره تقویت شده، بررسی کردند. ژو و همکاران [19] با روش دینامیک مولکولی نشان دادند که تقویت پلیمر با نانولوله‌های کربنی بلند می‌تواند مدول الاستیک آن‌ها را بسیار بهبود ببخشد. ذاکری و همکاران [20] با روش شبیه‌سازی چندمقیاسه به بررسی اثرات ضخامت فاز میانی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی پرداختند. خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی خودسازگار و موری-تاناکا توسط سایدل و لاگوداس [21] استخراج شد. لنو و همکاران [22] با روش المان محدود اثرات توزیع و هندسه نانولوله‌های کربنی را بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت بررسی کردند. اثرات لایه میانی ضعیف بین نانولوله کربنی و زمینه پلیمری بر خواص موثر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی توسط استوا و اسپانوس [23] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها گزارش کردند که اتصال ناقص در لایه میانی تاثیر چندانی بر مدول یانگ طولی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی ندارد بلکه تاثیر عمده‌ی آن روی خواص عرضی می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی اتصال ناقص نانولوله کربنی/زمینه پلیمری، هامراند و همکاران [24] تحلیل میکرومکانیکی را بر نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی با اضافه کردن فاز میانی انجام دادند. شکریه و رافعی [25] یک تحلیل المان محدود چند مقیاسه را به‌منظور بررسی اثرات طول نانولوله کربنی بر بازدهی انتقال بار در کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی انجام دادند. آیت‌اللهی و همکاران [26] تحلیل چندمقیاسه را جهت بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی تحت بارگذاری کششی، خمشی و پیچشی انجام دادند. جوشی و همکاران [27] با استفاده از مدل‌سازی المان محدود در مقیاس میکرو اثرات جهت نانولوله کربنی را بر مدول الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری بررسی کردند.

همان‌طور که گفته شد مطالعات بسیاری در خصوص توسعه کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله کربنی انجام شده است. اما ساخت کامپوزیت‌هایی با نانولوله‌های پیوسته‌ی تک‌جهته در مقیاس بزرگ سختی‌های چالش برانگیزی را بدنبال دارد. از جمله این مشکلات می‌توان به تجمع نانولوله‌ها، ناهمراستایی و سختی در ساخت نانولوله‌های بسیار بلند اشاره نمود. تحقیقات بیشتر در خصوص استفاده عملی از نانولوله‌ها و بهبود خواص موثر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده‌ی فیبری منجر به رشد نانولوله بر سطح فیبر پیشرفته شده است. باور و همکاران [28] نشان دادند که با به‌کارگیری فرآیند رسوبدهی بخار شیمیایی لایه نازک یکنواختی از نانولوله‌های کربنی همراستا بر سطح خارجی فیبر نوری می‌تواند رشد کند. متور و همکاران [29] بطور تجربی مشاهده کردند که استحکام خمشی و مدول کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر کربن می‌تواند با رشد نانولوله‌های کربنی بر سطح فیبر کربن بهبود یابد. گارسیا و همکاران [30] یک لایه هیبریدی که در آن فاز تقویت از پارچه بافته شده با فیبر آلومینا که نانولوله‌های کربنی بر سطح فیبر رشد داده شده بود، ساختند. آن‌ها نشان دادند که خواص مکانیکی و الکتریکی چنین لایه‌ای به‌دلیل رشد نانولوله کربنی بر سطح فیبر آلومینا بهبود می‌یابد. ژائو و همکاران [31] اثرات مورفولوژی سطح فیبر کربن و کاتالیست‌ها را بر رشد نانولوله‌های کربنی بر سطح فیبر کربن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که خواص مکانیکی و ضریب هدایت حرارتی

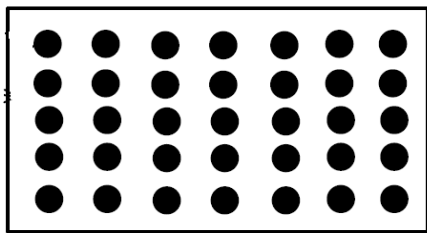


Fig. 1 Arrangement of reinforcement with repeating array

شکل 1 چیدمان فاز تقویت با آرایه تکراری

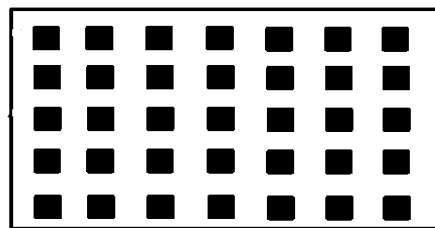


Fig. 2 Arrangement of reinforcement with repeating array in unit cell model

شکل 2 چیدمان فاز تقویت با آرایه تکراری در مدل سلول واحد

### 3- معادلات میکرومکانیکی

#### 3-1- بارگذاری عمودی

به منظور استخراج معادلات میکرومکانیکی سلول واحد ساده شده، مشابه مدل های سلول واحد [34-36,39]، فرض می شود که مولفه های جابجایی داخل هر سلول المان حجمی به صورت خطی تغییر کند. به علاوه فرض می شود که تنش عمودی وارده بر المان حجمی هیچ گونه تنش برشی درون میکرو داخل زیرسلول  $ij$  و  $S_i$  به عنوان تنش ماکرو وارده در جهت  $l$  که می تواند در جهت  $x$ ،  $y$  یا  $z$  باشد، می توان معادلات تعادل را به صورت زیر نوشت

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^c \sigma_y^{i1} a_i &= S_y L_c \\ \sum_{j=1}^r \sigma_x^{1j} b_j &= S_x L_r \\ \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^c b_j a_i \sigma_z^{ij} &= S_z L_r L_c \end{aligned} \quad (1)$$

رابطه زیر از تعادل تنش های عمودی در سطوح مشترک هر دو سلول مجاور به دست می آید:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{1j} &= \sigma_x^{ij} \quad (i > 1) \\ \sigma_y^{i1} &= \sigma_y^{ij} \quad (j > 1) \end{aligned} \quad (2)$$

با فرض اتصال کامل لایه میانی، سازگاری جابجایی داخل المان حجمی منجر به رابطه زیر می شود.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^c a_i \varepsilon_x^{i1} &= \sum_{i=1}^c a_i \varepsilon_x^{ij} = L_c \bar{\varepsilon}_x \quad (j > 1) \\ \sum_{j=1}^r b_j \varepsilon_y^{1j} &= \sum_{j=1}^r b_j \varepsilon_y^{ij} = L_r \bar{\varepsilon}_y \quad (i > 1) \\ \varepsilon_z^{11} &= \varepsilon_z^{ij} \quad (i > 1, j > 1) \end{aligned} \quad (3)$$

که کرنش میکرو در سلول  $ij$  و  $\bar{\varepsilon}_i$  کرنش ماکرو را نشان می دهد. معادله ساختاری الاستیسیته سه بعدی برای زیرسلول  $ij$  به صورت زیر

کامپوزیت تقویت شده فیبر کربنی که نانولوله های کربنی بر سطح فیبر کربن رشد داده شده است، به مقدار زیادی بهبود می یابد. ری و همکاران [32] تحلیل انتقال بار را بر کامپوزیت تقویت شده با فیبر کوتاه کربن که در آن نانولوله های کربنی همراستا به صورت شعاعی بر سطح فیبر کربن رشد داده شده اند، انجام دادند. نتایج تحلیل آن ها نشان داد که اگر نانولوله های کربنی همراستا بر سطح فیبر کربن به صورت شعاعی قرار بگیرند، بار محوری انتقال یافته به فیبر کاهش می یابد. در [33] یک کامپوزیت هوشمند هیبریدی جدید پیشنهاد شد که خواص مکانیکی و الکتریکی آن به دلیل رشد شعاعی نانولوله های کربنی بر سطح فیبر پیوسته تک جهته را می توان با رشد شعاعی نانولوله های کربنی بر سطح خارجی فیبر کربن تقویت نمود. این نوع فیبر می تواند بر خواص موثر عرضی کامپوزیت اثر بگذارد. چنین فیبری که سطح آن ها به صورت شعاعی نانولوله های کربنی رشد داده شده اند را اصطلاحاً فیبر فازی می نامند. کاندالوا و ری [34] با استفاده از مدل میکرومکانیکی المان محدود خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی را مورد بررسی قرار دادند. اثرات موجی بودن نانولوله های کربنی بر خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در [35] مورد مطالعه قرار گرفته است. کاندالوا و ری [36] با استفاده از روش سلولی اثرات موجی بودن نانولوله های کربنی را بر خواص ترمو-الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی بررسی کردند. همان طور که تحقیقات قبلی [5-7] نشان می دهد اندازه نانولوله های کربنی می تواند تاثیر زیادی بر خواص کامپوزیت بگذارد. با توجه به مطالعات انجام شده تحقیقی در خصوص تاثیر شعاع نانولوله کربنی بر خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی انجام نشده است.

در این پژوهش با استفاده از مدل میکرومکانیکی تحلیلی سلول واحد ساده شده [37,38] اثرات اندازه ی نانولوله کربنی بر خواص موثر الاستیک نانو کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش 2 المان حجمی نماینده کامپوزیت مورد نظر معرفی می شود. در بخش 3 معادلات میکرومکانیکی مدل سلول واحد ساده شده تحت بارگذاری عمودی و برشی ارائه می گردد. در بخش 4 روند مدل سازی نانو کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی تشریح می گردد. در بخش 5 مواد سازنده ی نانو کامپوزیت هیبریدی معرفی می شود. در بخش 6 نتایج پیش بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر با نتایج روش های دیگر مقایسه شده و اثرات شعاع نانولوله های کربنی بر خواص موثر الاستیک نانو کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی بیان می شود. در بخش 7 نیز نتیجه گیری پژوهش حاضر ارائه می گردد.

#### 2- المان حجمی نماینده

در اکثر مطالعات تحلیلی و عددی [6-14,15,20,34,36] فرض می شود که فاز تقویت در نانو کامپوزیت دارای یک چیدمان با آرایه ی تکراری باشد (شکل 1). در مدل های سلول واحد مانند روش سلولی [34,36] و مدل سلول واحد ساده شده [37,38] سطح مقطع فاز تقویت به صورت چهارگوش مدل می شود (شکل 2).

در این جا مطابق "شکل 3" المان حجمی نماینده کامپوزیت به  $r \times c$  سلول مستطیلی تقسیم می شود. المان حجمی نماینده دارای طول  $L_r$  و  $L_c$  به ترتیب در جهات  $x$  و  $y$  و طول واحد در جهت  $z$  می باشد. اگر  $i$  متغیر شمارنده در جهت  $x$  و  $j$  در جهت  $y$  باشد، هر سلول با نام  $ij$  شناخته می شود و طول هر سلول در جهت  $x$  با  $a_i$  و در جهت  $y$  با  $b_j$  مشخص می شود.

$$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^c b_j a_i \varepsilon_{xy}^{ij} = \bar{\varepsilon}_{xy} L_r L_c \quad (8)$$

همچنین مدول های برشی در سه صفحه  $x-y$ ,  $x-z$  و  $y-z$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$G_{yz} = \frac{\bar{\tau}_{yz}}{2\bar{\varepsilon}_{yz}}, \quad G_{xz} = \frac{\bar{\tau}_{xz}}{2\bar{\varepsilon}_{xz}}, \quad G_{xy} = \frac{\bar{\tau}_{xy}}{2\bar{\varepsilon}_{xy}} \quad (9)$$

جایگذاری معادلات (9) در معادلات (7) و جایگذاری نتایج در معادلات (6) با در نظر گرفتن معادلات (8) منجر به حل های فرم بسته برای سه مدول برشی به صورت زیر می شود.

$$\frac{L_r}{\bar{G}_{yz}} = \sum_{j=1}^r \frac{b_j}{\sum_{i=1}^c a_i G^{ij}}$$

$$\frac{L_c}{\bar{G}_{xz}} = \sum_{i=1}^c \frac{a_i}{\sum_{j=1}^r b_j G^{ij}}$$

$$\frac{L_r L_c}{\bar{G}_{xy}} = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^c \frac{a_i b_j}{G^{ij}} \quad (10)$$

که در این رابطه  $\bar{G}_{xy}$  مدول برشی عرضی و  $\bar{G}_{yz}$  و  $\bar{G}_{xz}$  مدول برشی طولی می باشند.

با داشتن مدول الاستیک، نسبت پواسون و مدول برشی در جهت طولی و عرضی، می توان ماتریس سختی الاستیک (C) را برای کامپوزیت به عنوان یک ماده ایزوتروپ عرضی، محاسبه نمود. ماتریس سختی الاستیک (C) معکوس ماتریس نرمی الاستیک (S) می باشد. بایستی توجه کرد که ماتریس نرمی (یا ماتریس سختی) الاستیک دارای پنج ثابت مستقل می باشد.

$$\{\varepsilon\}_{6 \times 1} = [S]_{6 \times 1} \{\sigma\}_{6 \times 1} \quad (11-الف)$$

$$\{\sigma\}_{6 \times 1} = [C]_{6 \times 1} \{\varepsilon\}_{6 \times 1} \quad (11-ب)$$

#### 4- مدل سازی نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

"شکل 4" یک لایه از نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی را نشان می دهد. ویژگی ساختاری این نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر کربنی پیوسته و تک جهته اینست که نانولوله های کربنی دارای طول مساوی به صورت هم راستا و شعاعی بر سطح فیبر کربن رشد داده شده اند. نانولوله های کربنی به صورت ایزوتروپ عرضی در نظر گرفته می شوند. محور ایزوتروپی عرضی نانولوله های کربنی عمود بر سطح فیبر می باشند. "شکل 5" یک فیبر فازی را نشان می دهد. با قرار دادن این فیبر فازی در زمینه پلیمری فضای خالی بین نانولوله های کربنی توسط پلیمر پر می شود. نانولوله های کربنی هم راستای شعاعی، زمینه پلیمری احاطه کننده فیبر کربن را در جهت عرضی فیبر کربن تقویت می کند. در یک فیبر فازی که بین نانولوله های کربنی را زمینه پلیمری پر کرده باشد، فیبر فازی کامپوزیتی می نامند [34] و می توان آن را این گونه مدل کرد که فیبر کربنی درون کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله های کربنی قرار گرفته است. "شکل 6" مقطع عرضی یک فیبر فازی کامپوزیتی را نشان می دهد.

"شکل 7" نحوه ی مدل سازی کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی را نشان می دهد. فرآیند تحلیل جهت استخراج خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی با پیش بینی خواص الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری آغاز می شود. در این مرحله اثرات فاز میانی بین نانولوله ی کربنی و زمینه پلیمری منظور می شود. با در نظر گرفتن نانوکامپوزیت زمینه پلیمری به عنوان فاز زمینه و فیبر کربن به عنوان فاز تقویت، خواص الاستیک فیبر فازی کامپوزیتی به دست می آید. سرانجام با در نظر گرفتن فیبر فازی

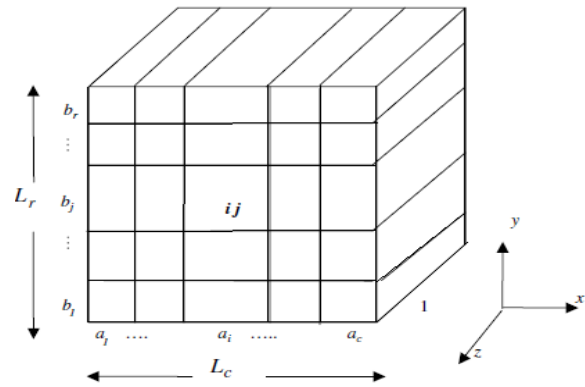


Fig. 3 Geometry of volume element in simplifies unit cell model

شکل 3 هندسه المان حجمی در مدل سلول واحد ساده شده

نوشته می شود:

$$\varepsilon^{ij} = S^{ij} \sigma^{ij} \quad (4)$$

که  $S^{ij}$  ماتریس نرمی الاستیک است. با جایگزینی معادله (4) در معادله (3) و با استفاده از معادلات (1) و (2)، یک سیستم دستگاه معادلات خطی با  $rc + r + c$  معادله با همین تعداد مجهول به دست می آید.

$$[A]_{m \times m} \{\sigma\}_{m \times 1} = \{F\}_{m \times 1} \quad (m = c + r + rc) \quad (5)$$

که  $[A]$  ماتریس ضرایب ناشی از هندسه و مواد تشکیل دهنده المان حجمی کامپوزیت،  $\{\sigma\}$  و  $\{F\}$  نیز به ترتیب بردار تنش و نیرو می باشند. با اعمال تنش ماکرو بر المان حجمی نماینده و با حل معادله (5) تنش های در هر سلول مشخص می شود. سپس با استفاده از معادله (4) کرنش های متناظر در هر زیر سلول به دست می آید. با استفاده از معادله (3) می توان کرنش ماکروی متناظر با تنش اعمالی را به دست آورد. با داشتن مقادیر تنش و کرنش ماکرو می توان مدول الاستیک و نسبت پواسون را برای کامپوزیت محاسبه نمود.

#### 3-2- بارگذاری برشی

مشابه رویه انجام شده در بارگذاری نرمال می تواند جهت حصول معادلات حاکم برای بارگذاری برشی انجام بگیرد. معادلات تعادل برای سه مولفه تنش برشی ماکروی وارده را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{i=1}^c \tau_{yz}^{ij} a_i = \bar{\tau}_{yz} L_c$$

$$\sum_{j=1}^r \tau_{xz}^{ij} b_j = \bar{\tau}_{xz} L_r$$

$$\tau_{xy}^{ij} = \bar{\tau}_{xy} \quad (6)$$

در این معادله به طور مثال،  $\tau_{xy}^{ij}$  و  $\bar{\tau}_{xy}^{ij}$  بترتیب تنش برشی میکرو در سلول  $ij$  و تنش برشی ماکروی وارده در صفحه  $x-y$  می باشد. سازگاری کرنش های برشی در هر سلول منجر به رابطه زیر می شود.

$$\varepsilon_{xz}^{i1} = \varepsilon_{xz}^{ij} \quad (j > 1)$$

$$\varepsilon_{yz}^{1j} = \varepsilon_{yz}^{ij} \quad (i > 1) \quad (7)$$

رابطه ی سازگاری بین کرنش های برشی ماکرو و کرنش های برشی در هر سلول را می توان به صورت زیر نوشت

$$\sum_{i=1}^c a_i \varepsilon_{xz}^{i1} = L_c \bar{\varepsilon}_{xz}$$

$$\sum_{j=1}^r b_j \varepsilon_{yz}^{1j} = L_r \bar{\varepsilon}_{yz}$$

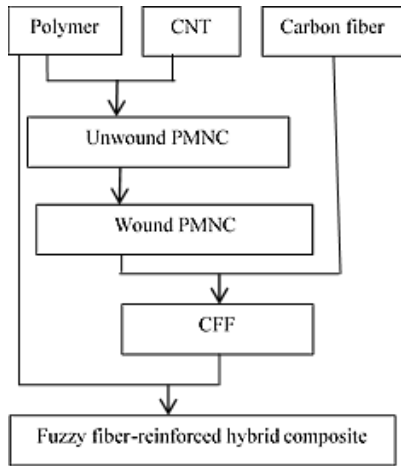


Fig. 7 Modeling of hybrid composite reinforced with fuzzy fiber

شکل 7 مدل سازی کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

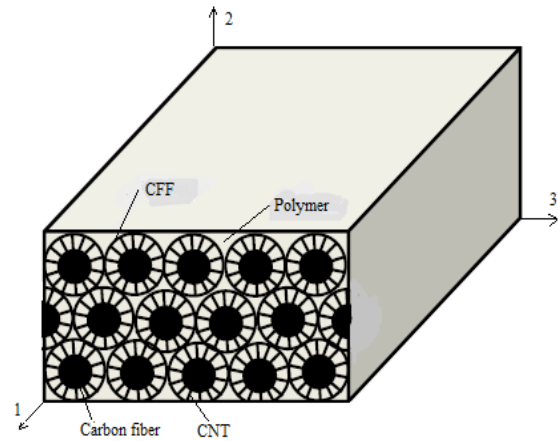


Fig. 4 A lamina of hybrid composite reinforced with fuzzy fiber

شکل 4 یک لایه از نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

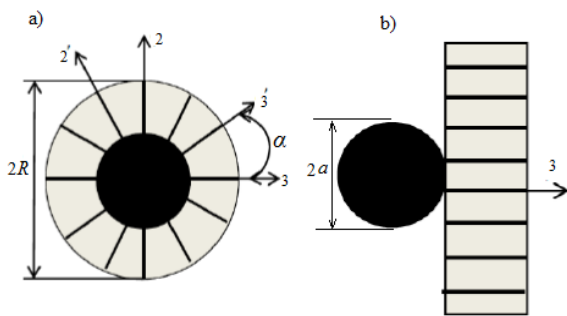


Fig. 8 Transverse cross-sections of the composite fuzzy fiber with a) unwound and b) wound polymer matrix nanocomposite

شکل 8 مقطع عرضی فیبر فازی کامپوزیتی شامل نانوکامپوزیت زمینه پلیمری الف) غیر رول شده و ب) رول شده

$a$  شعاع فیبر کربن و  $R$  مجموع شعاع فیبر کربن و طول نانولوله ی کربنی می باشد. ماتریس  $\bar{C}^{PMNC}$  نیز به صورت زیر تعریف می شود

$$\bar{C}^{PMNC} = [T]^{-T} [\bar{C}^{NC}] [T]^{-1} \quad (13)$$

که در این رابطه  $\bar{C}^{NC}$  ماتریس سختی الاستیک نانوکامپوزیت رول نشده و  $T$  ماتریس انتقال می باشد [35].

### 5- نوع مواد تشکیل دهنده ی کامپوزیت هیبریدی

کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی از نانولوله ی کربنی، فیبر کربن و زمینه پلی آمیدی تشکیل می شود. همچنین، فاز میانی نانولوله/زمینه به عنوان یک فاز جداگانه در نظر گرفته می شود. خواص مکانیکی فیبر کربن، زمینه پلی آمیدی در جدول 1 آمده است. خواص مکانیکی نانولوله ی کربنی با شعاع های مختلف و نیز خواص موثر فاز میانی بین نانولوله و زمینه پلی آمیدی بترتیب در جدول 2 و 3 آمده است. فیبر کربن و نانولوله کربنی به عنوان یک ماده ایزوتروپ عرضی مدل می شوند. قطر فیبر کربن 10 میکرومتر در نظر گرفته می شود.

در مدل سازی نانوکامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی کسر حجمی اشغال شده توسط نانولوله ( $V_{CNT}$ ) به قطر نانولوله، قطر فیبر کربن و فاصله ی سطوح بین دو نانولوله بستگی دارد. بیشترین کسر حجمی نانولوله کربنی در این نوع کامپوزیت می تواند طبق رابطه زیر بیان شود [40].

$$(V_{CNT})_{max} = \frac{\pi d_n^2}{2(d_n + 1.7)^2} \left( \frac{\pi v_f}{2\sqrt{3}} - v_f \right) \quad (14)$$

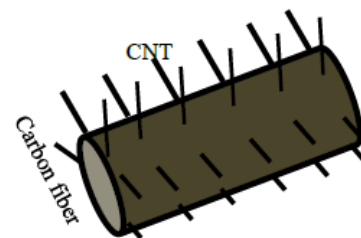


Fig. 5 Fuzzy fiber containing carbon nanotubes radially grown on carbon fiber surface

شکل 5 فیبر فازی شامل نانولوله های کربنی رشد یافته به صورت شعاعی بر سطح فیبر کربن

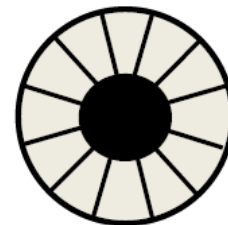


Fig. 6 Transverse cross-sections of the composite fuzzy fiber

شکل 6 مقطع عرضی فیبر فازی کامپوزیتی

کامپوزیتی به عنوان فاز تقویت و ماده پلیمری به عنوان زمینه می توان خواص موثر الاستیک کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی را استخراج نمود.

همان طور که "شکل 6" نشان می دهد در کامپوزیت فیبر فازی، فیبر کربن با مواد نانوکامپوزیت زمینه پلیمری پیچیده می شود. در واقع مدل میکرو مکانیکی خواص الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری غیر رول شده را به دست می دهد که نانولوله های کربنی همراستا با محور 3 می باشد (شکل 8-الف). "شکل 8 الف و ب" به ترتیب مقطع عرضی فیبر فازی کامپوزیتی که شامل نانوکامپوزیت غیر رول شده و رول شده می باشد، را نشان می دهد.

با استفاده از خواص موثر الاستیک به دست آمده برای نانوکامپوزیت زمینه پلیمری غیر رول شده و ماتریس انتقال می توان خواص موثر الاستیک نانوکامپوزیت رول شده در اطراف فیبر کربنی را تحت زاویه  $\theta$  به دست آورد.

$$C^{PMNC} = \frac{1}{\pi(R^2 - a^2)} \int_0^{2\pi} \int_a^R \bar{C}^{PMNC} r dr d\theta \quad (12)$$

در این رابطه  $C^{PMNC}$  ماتریس سختی الاستیک نانوکامپوزیت رول شده،

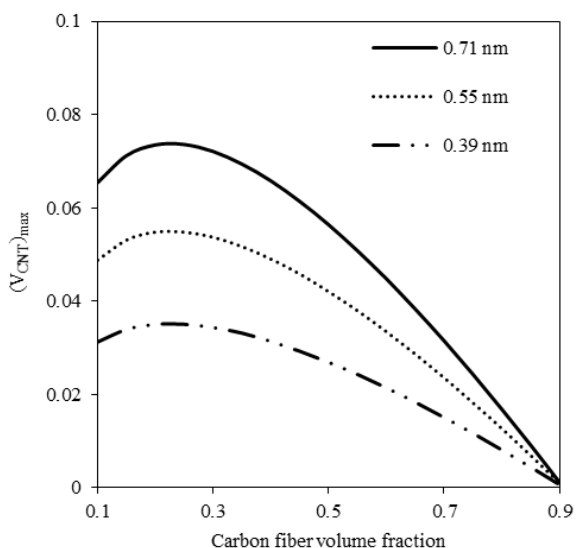


Fig. 9 Effect of carbon nanotube radius on the maximum carbon nanotube volume fraction versus carbon fiber volume fraction

شکل 9 اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ماکزیمم کسر حجمی نانولوله کربنی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن

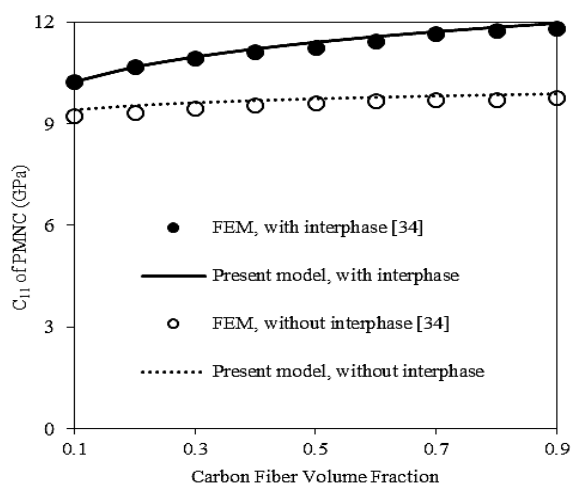


Fig. 10 Variation of  $C_{11}$  (transverse direction) nanocomposite versus carbon fiber volume fraction

شکل 10 تغییرات  $C_{11}$  (جهت عرضی) نانوکامپوزیت در مقابل کسر حجمی فیبر کربن

اثرات فاز میانی در این اشکال در نظر گرفته شده اند.

با توجه به "شکل های 12 تا 16" با افزایش شعاع نانولوله کربنی مقدار ضرایب ماتریس سختی الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری ( $C_{PMNC}^{PMNC}$ ) افزایش می یابد. "شکل 12" اثرات شعاع نانولوله را بر ضریب سختی  $C_{11}$  نانوکامپوزیت نشان می دهد. با توجه به "شکل 12"، با افزایش کسر حجمی فیبر کربن اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضریب سختی  $C_{11}$  نانوکامپوزیت بیشتر می باشد.

با توجه به "شکل 13" اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضریب سختی  $C_{22}$  بسیار بیشتر از سایر ضرایب سختی الاستیک می باشد. "شکل 13" نشان می دهد که با افزایش شعاع نانولوله کربنی، نتایج پیش بینی شده با مدل میکرومکانیکی حاضر بهم نزدیک می شوند. "شکل 14" اثرات شعاع نانولوله کربنی را بر ضریب سختی  $C_{12}$  نشان می دهد. با افزایش کسر حجمی فیبر

که در این رابطه  $V_f$  کسر حجمی فیبر کربن در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی و  $d_n$  قطر نانولوله می باشد. در "شکل 9" تغییرات مقدار ماکزیمم کسر حجمی نانولوله کربنی در کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن نشان داده شده است. اثرات شعاع نانولوله در "شکل 9" بر ماکزیمم کسر حجمی نانولوله کربنی مشاهده می شود. همان طور که "شکل 9" نشان می دهد با افزایش شعاع نانولوله کربنی مقدار ماکزیمم کسر حجمی نانولوله کربنی افزایش می یابد. بایستی توجه شود که نتایج پیش بینی شده در این پژوهش براساس مقدار ماکزیمم کسر حجمی نانولوله کربنی می باشد.

## 6- نتایج و بحث

### 1-6- خواص موثر الاستیک نانوکامپوزیت

ابتدا مقایسه ای بین نتایج پیش بینی شده برای خواص الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری با مدل حاضر و نتایج روش المان محدود [34] انجام می گیرد. "شکل های 10 و 11" به ترتیب ضرایب سختی الاستیک  $C_{11}$  و  $C_{22}$  را نشان می دهند. همچنین، اثرات فاز میانی در "شکل های 10 و 11" مشاهده می شود. تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل حاضر و روش المان محدود با در نظر گرفتن اثرات فاز میانی و بدون آن وجود دارد. همان طور که مشاهده می شود اثرات فاز میانی بر ضریب سختی الاستیک در جهت عرضی ( $C_{11}$ ) بیشتر می باشد. اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضرایب ماتریس سختی الاستیک نانوکامپوزیت زمینه پلیمری ( $C_{PMNC}^{PMNC}$ ) در مقابل کسر حجمی فیبر کربن در "شکل های 12 تا 16" نشان داده شده است. بایستی توجه شود که

جدول 1 خواص مکانیکی فیبر کربن و پلی آمید [34]

Table 1 mechanical properties of fiber carbon and polyimide [34]

نوع ماده	فیبر کربن	پلی آمید
مدول یانگ طولی (گیگاپاسکال)	230	4.2
مدول یانگ عرضی (گیگاپاسکال)	20	4.2
نسبت پواسون طولی	0.3	0.4
نسبت پواسون عرضی	0.42	0.4
مدول برشی طولی (گیگاپاسکال)	25	1.5

جدول 2 خواص مکانیکی نانولوله کربن [6]

Table 2 mechanical properties of carbon nanotube [6]

شعاع نانولوله (نانومتر)	0.71	0.55	0.39
مدول یانگ طولی (گیگاپاسکال)	759.9	981.5	1382.5
مدول یانگ عرضی (گیگاپاسکال)	425	504	645
نسبت پواسون طولی	0.27	0.27	0.272
نسبت پواسون عرضی	0.2	0.2	0.2
مدول برشی طولی (گیگاپاسکال)	596.3	779.2	1120

جدول 3 خواص مکانیکی و اندازه فاز میانی برای شعاع های مختلف نانولوله کربن [6]

Table 3 Mechanical properties and interphase size for different carbon nanotube radiuses [6]

شعاع نانولوله (نانومتر)	0.71	0.55	0.39
مدول یانگ طولی (گیگاپاسکال)	17.91	18.18	19.29
مدول یانگ عرضی (گیگاپاسکال)	17.91	18.18	19.29
نسبت پواسون طولی	0.4	0.4	0.4
نسبت پواسون عرضی	0.4	0.4	0.4
مدول برشی طولی (گیگاپاسکال)	6.68	6.8	7.2
ضخامت فاز میانی (نانومتر)	0.314	0.324	0.34

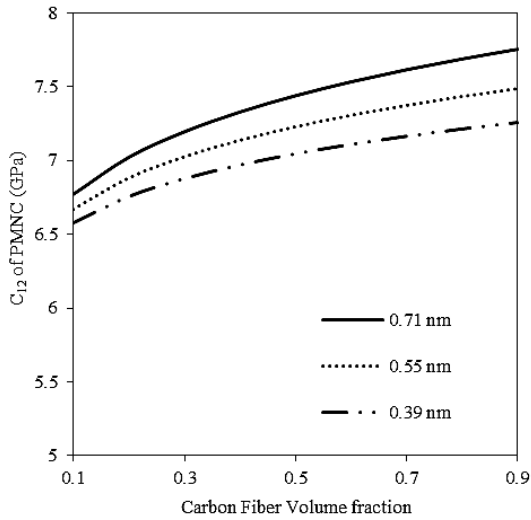


Fig. 14 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{12}$  of nanocomposite  
 شکل 14 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{12}$  نانوکامپوزیت

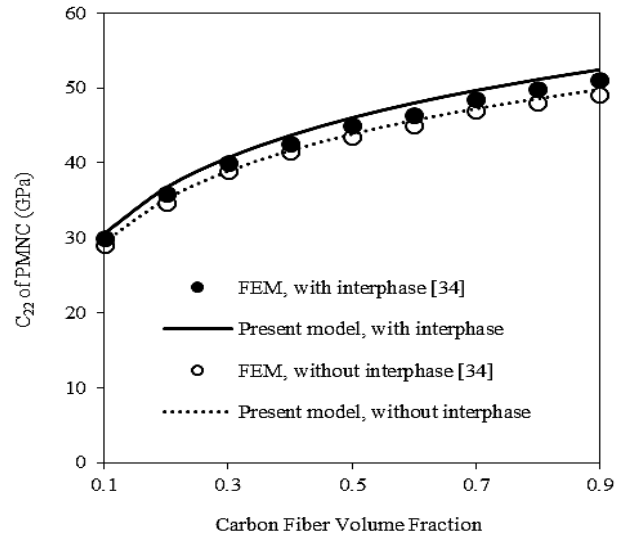


Fig. 11 Variation of  $C_{22}$  (longitudinal direction) nanocomposite versus carbon fiber volume fraction  
 شکل 11 تغییرات  $C_{22}$  (جهت طولی) نانوکامپوزیت در مقابل کسر حجمی فیبر کربن

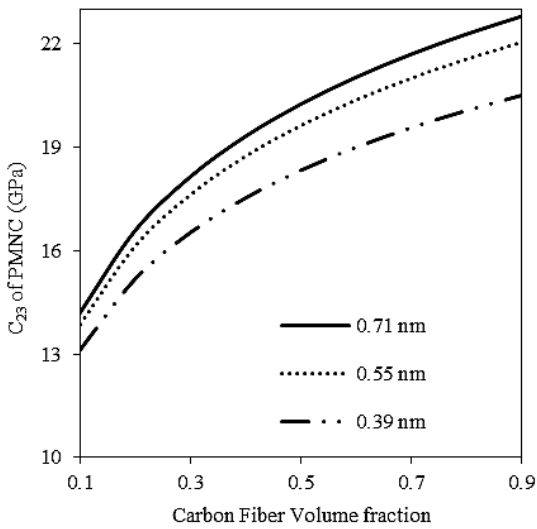


Fig. 15 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{23}$  of nanocomposite  
 شکل 15 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{23}$  نانوکامپوزیت

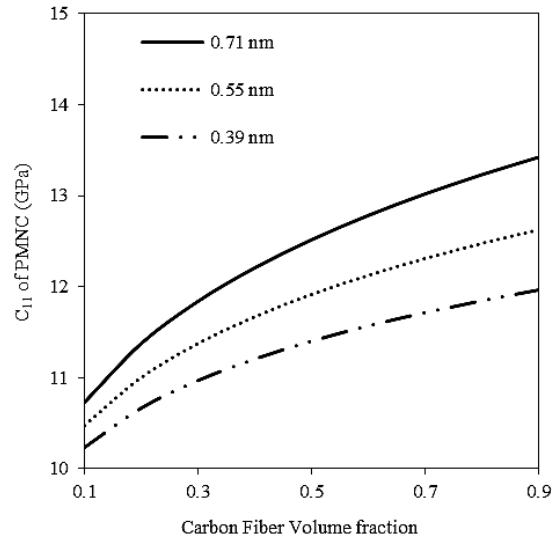


Fig. 12 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{11}$  of nanocomposite  
 شکل 12 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{11}$  نانوکامپوزیت

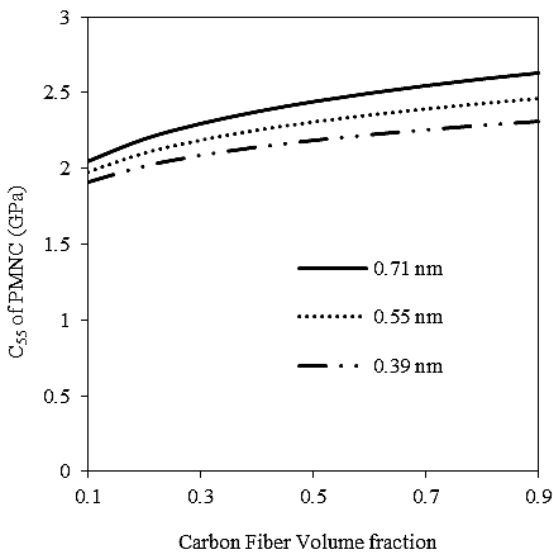


Fig. 16 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{55}$  of nanocomposite  
 شکل 16 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{55}$  نانوکامپوزیت

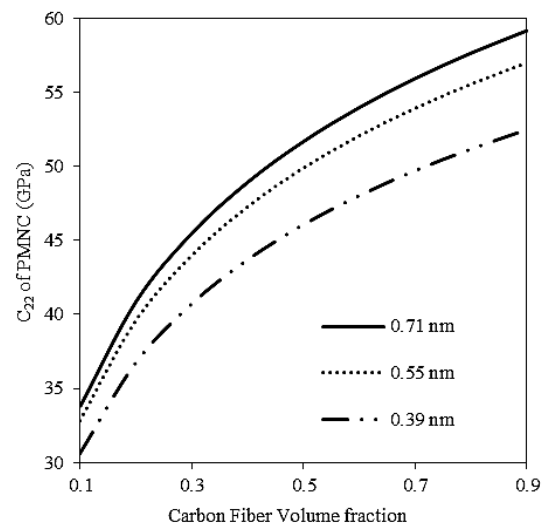


Fig. 13 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{22}$  of nanocomposite  
 شکل 13 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{22}$  نانوکامپوزیت

الاستیک  $C_{11}$  و  $C_{22}$  را نشان می‌دهند. اثرات فاز میانی نیز در "شکل‌های 17 و 18" مشاهده می‌شود. تطابق خوبی بین نتایج مدل حاضر و روش المان محدود وجود دارد.

اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضرایب  $C_{11}$  و  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن به ترتیب در "شکل‌های 19 و 20" نشان داده شده است. بایستی توجه شود که اثرات فاز میانی در این اشکال در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به "شکل 19" اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضریب سختی  $C_{11}$  فیبر فازی کامپوزیتی قابل صرفه نظر کردن می‌باشد. در "شکل 20" اثرات شعاع نانولوله بر ضریب سختی  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی نشان داده شده است. مطابق "شکل 20"، با افزایش شعاع نانولوله کربنی ضریب سختی  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی نیز افزایش می‌یابد. به ازای کسر حجمی فیبر کربن برابر 0.24 و 0.9 شعاع نانولوله کربنی بترتیب بیشترین و کمترین

کربن اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضریب سختی  $C_{12}$  نانوکامپوزیت بیشتر می‌باشد. در "شکل 15" اثرات شعاع نانولوله کربنی بر ضریب سختی  $C_{23}$  نشان داده شده است. با توجه به "شکل 15"، اثرات نانولوله کربنی با افزایش شعاع آن بر ضریب سختی  $C_{23}$  کاهش می‌یابد. همان‌طور که "شکل 16" نشان می‌دهد، شعاع نانولوله کربنی کمترین اثر را بر ضریب سختی  $C_{55}$  دارد.

### 6-2- خواص موثر الاستیک فیبر فازی کامپوزیت

با استفاده از مقادیر محاسبه شده در بخش قبل، خواص موثر الاستیک فیبر فازی کامپوزیتی استخراج می‌شود. جهت مدل‌سازی کامپوزیت فیبر فازی، نانوکامپوزیت زمینه پلیمری به‌عنوان فاز زمینه و فیبر کربن به‌عنوان فاز تقویت در نظر گرفته می‌شود. ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج پیش‌بینی شده برای خواص موثر الاستیک فیبر فازی کامپوزیتی با مدل حاضر و نتایج روش المان محدود [34] انجام می‌گیرد. "شکل‌های 17 و 18" به ترتیب ضرایب سختی

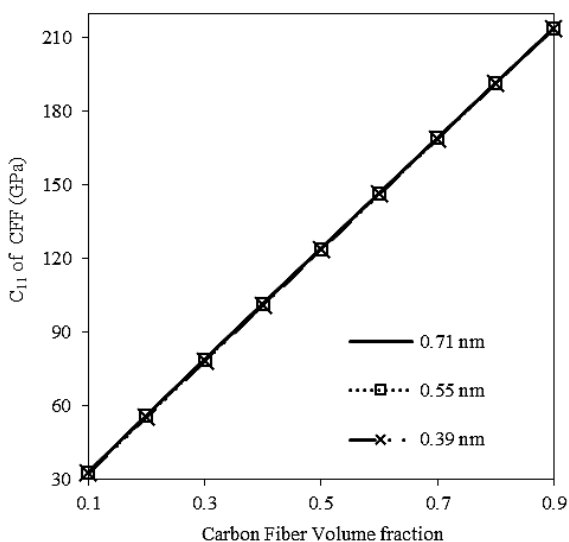


Fig. 19 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{11}$  of composite fuzzy fiber

شکل 19 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{11}$  فیبر فازی کامپوزیتی

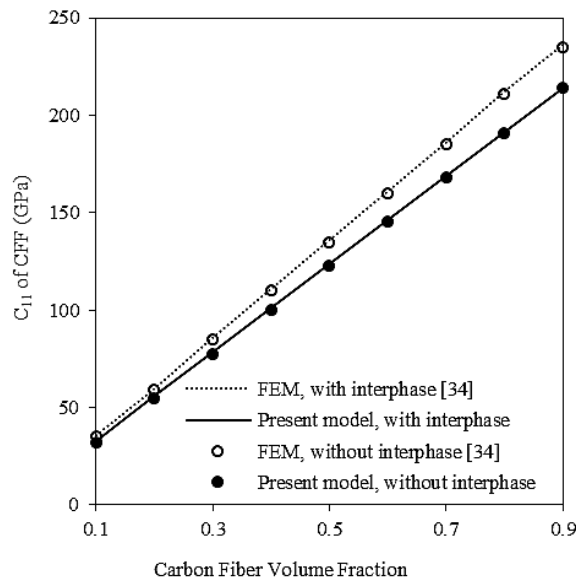


Fig. 17 Variation of  $C_{11}$  composite fuzzy fiber versus carbon fiber volume fraction

شکل 17 تغییرات  $C_{11}$  فیبر فازی کامپوزیتی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن

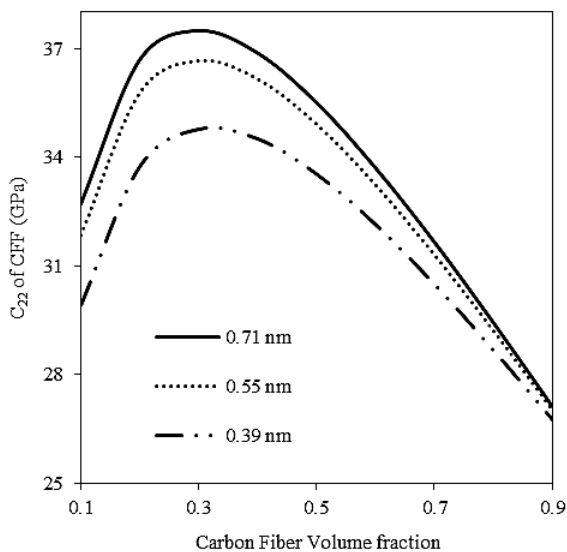


Fig. 20 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{22}$  of composite fuzzy fiber

شکل 20 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی

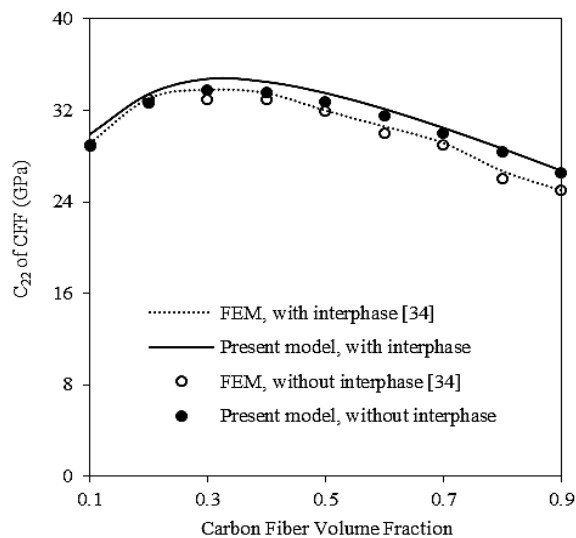
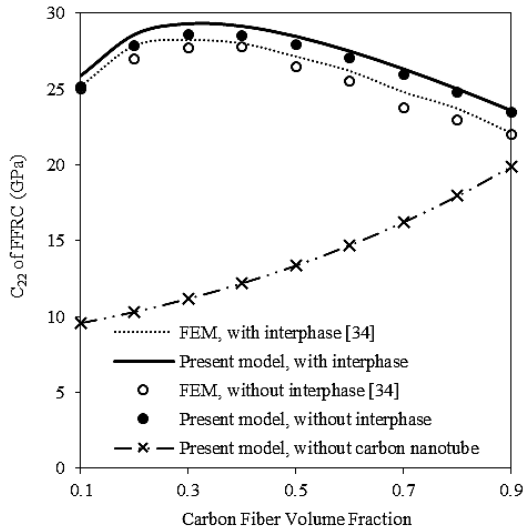


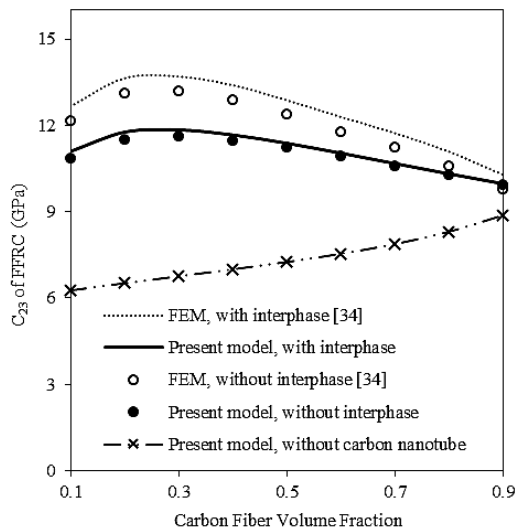
Fig. 18 Variation of  $C_{22}$  composite fuzzy fiber versus carbon fiber volume fraction

شکل 18 تغییرات  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن

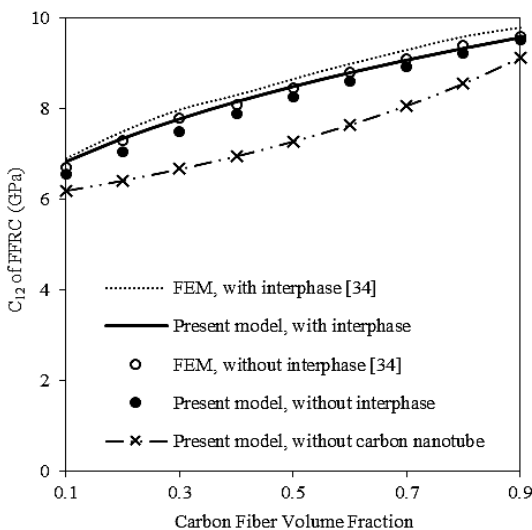




**Fig. 22** Variation of  $C_{22}$  of FFRC versus carbon fiber volume fraction  
 شکل 22 تغییرات  $C_{22}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن



**Fig. 23** Variation of  $C_{23}$  of FFRC versus carbon fiber volume fraction  
 شکل 23 تغییرات  $C_{23}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن



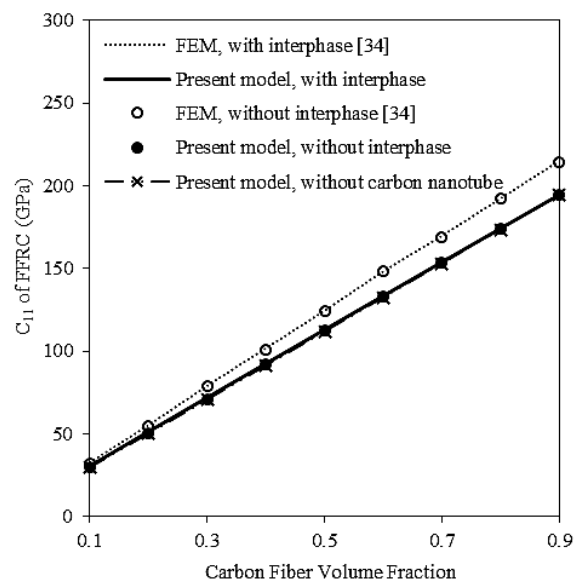
**Fig. 24** Variation of  $C_{12}$  of FFRC versus carbon fiber volume fraction  
 شکل 24 تغییرات  $C_{12}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن

تاثیر را بر ضریب سختی  $C_{22}$  فیبر فازی کامپوزیتی دارد.

### 3-6- خواص موثر الاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

با استفاده از مقادیر محاسبه شده در بخش 2-6، خواص موثر الاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی (FFRC) استخراج می شود. جهت مدل سازی این کامپوزیت، پلی آمید به عنوان فاز زمینه و کامپوزیت فیبر فازی به عنوان فاز تقویت در نظر گرفته می شود.

در "شکل های 21 تا 26" مقایسه های بین نتایج پیش بینی شده برای خواص موثر الاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی با مدل حاضر و نتایج روش المان محدود [34] انجام می گیرد. اثرات فاز میانی و نانولوله کربنی نیز در "شکل های 21 تا 26" مشاهده می شود. تطابق خوبی بین نتایج مدل حاضر و روش المان محدود وجود دارد. "شکل 21" تغییرات ضریب سختی  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی را در مقابل کسر حجمی فیبر کربن نشان می دهد. با توجه به "شکل 21" رشد شعاعی نانولوله های کربنی هم راستا بر سطح فیبر کربن تاثیری بر مقدار ضریب سختی  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی ندارد. همچنین نتایج ضریب سختی  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی با در نظر گرفتن فاز میانی و بدون آن یکسان می باشد. در "شکل 22" تغییرات ضریب سختی  $C_{22}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن نشان داده شده است. همان طور که "شکل 22" نشان می دهد برای کسر حجمی فیبر کربن که به صورت کاربردی استفاده می شود، نتایج پیش بینی شده برای ضریب سختی  $C_{22}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی بسیار بیشتر از ضریب سختی  $C_{22}$  آن کامپوزیت بدون نانولوله کربنی می باشد. بنابراین رشد شعاعی نانولوله های کربنی سختی خارج از صفحه های زمینه ای احاطه کننده فیبر کربن را افزایش می دهد. با توجه به "شکل 23"، چنین رفتاری برای ضریب سختی  $C_{23}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی نیز مشاهده می شود. در "شکل 24" تغییرات ضریب سختی  $C_{12}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن نشان داده شده است. همان طور که از "شکل 24" مشخص است رشد شعاعی نانولوله ی کربنی باعث بهبود ضریب سختی  $C_{12}$



**Fig. 21** Variation of  $C_{11}$  of FFRC versus carbon fiber volume fraction  
 شکل 21 تغییرات  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن

میانی در این اشکال در نظر گرفته شده‌اند. اثرات شعاع نانولوله‌ی کربنی بر ضریب سختی  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در "شکل 27" نشان داده شده است. شعاع نانولوله کربنی تأثیری بر مقدار ضریب سختی  $C_{11}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی ندارد. "شکل 28" تأثیر شعاع نانولوله کربنی را بر ضریب سختی  $C_{22}$  (یا  $C_{33}$ ) کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن نشان می‌دهد. با توجه به "شکل 28" با افزایش شعاع نانولوله کربنی ضریب سختی الاستیک  $C_{22}$  (یا  $C_{33}$ ) کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی افزایش می‌یابد. با توجه به "شکل 29" رفتار مشابهی برای ضریب سختی الاستیک  $C_{23}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی مشاهده می‌شود. با توجه به "اشکال 30 و 31" اثرات تغییر شعاع نانولوله‌ی کربنی بر ضرایب سختی الاستیک  $C_{12}$  و  $C_{55}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی بسیار کم می‌باشد.

### 7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات اندازه‌ی نانولوله کربنی بر خواص موثر الاستیک

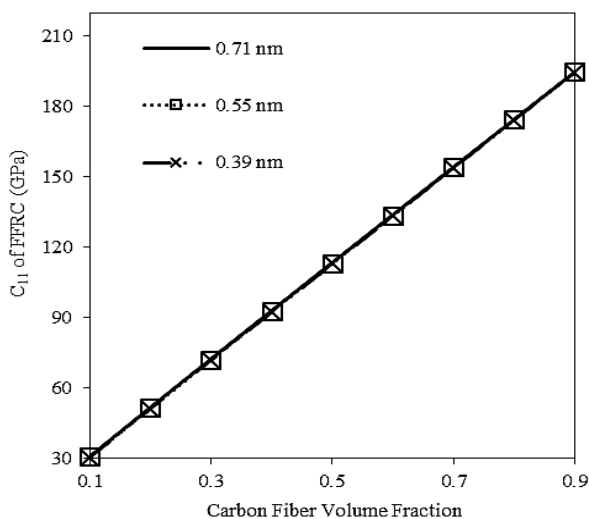


Fig. 27 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{11}$  of FFRC

شکل 27 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{11}$  کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

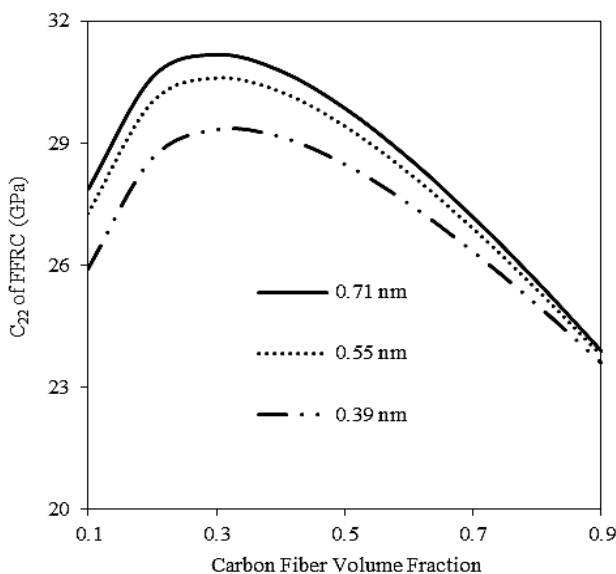


Fig. 28 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{22}$  of FFRC

شکل 28 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{22}$  کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

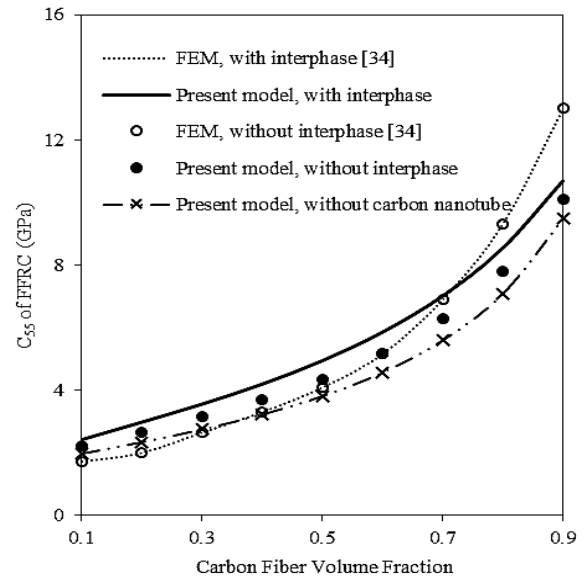


Fig. 25 Variation of  $C_{55}$  of FFRC with fuzzy fiber versus carbon fiber volume fraction

شکل 25 تغییرات  $C_{55}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن

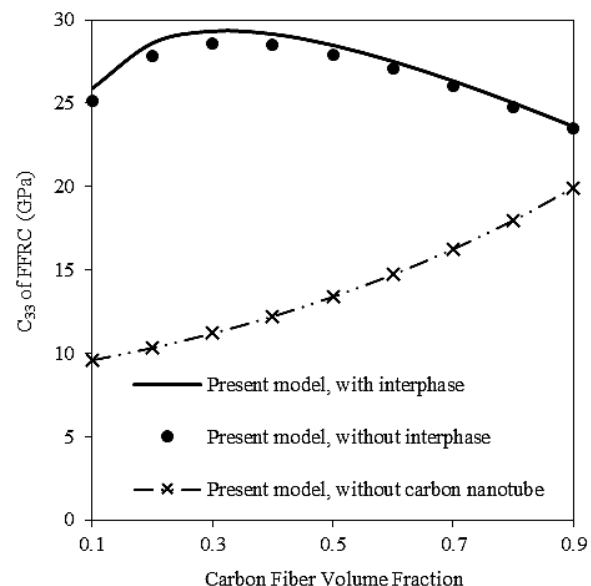


Fig. 26 Variation of  $C_{33}$  of FFRC versus carbon fiber volume fraction

شکل 26 تغییرات  $C_{33}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر فیبر کربن

می‌شود.

مطابق "شکل 25"، رشد نانولوله‌های کربنی بر سطح فیبر کربن تأثیر بسیار جزئی (قابل صرفه نظر کردن) بر ضریب سختی  $C_{55}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی دارد. با توجه به "اشکال 22 تا 26" بایستی به این نکته توجه شود که نتایج یکسانی برای ضریب سختی الاستیک  $C_{22}$  و  $C_{33}$  کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی به دست می‌آید. این موضوع نشان می‌دهد که کامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی یک ماده ایزوتروپ عرضی می‌باشد. با توجه به این نکته ضریب سختی الاستیک  $C_{12}$  و  $C_{13}$  نیز با هم برابر می‌باشند.

اثرات تغییر شعاع نانولوله کربنی بر ضرایب سختی الاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی در مقابل کسر حجمی فیبر کربن در "شکل‌های 27 تا 31" نشان داده شده است. بایستی توجه شود که اثرات فاز

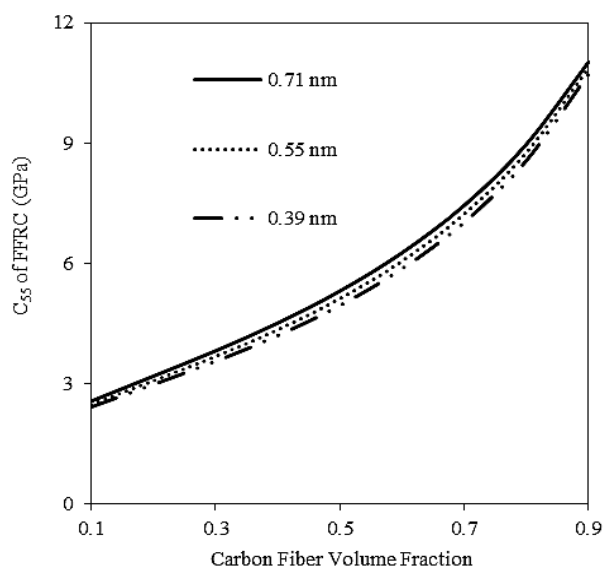


Fig. 31 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{55}$  of FFRC

شکل 31 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{55}$  کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

در نظر گرفتن اثرات فاز میانی و بدون آن بسیار نزدیک به نتایج روش المان محدود شد. نتایج نشان داد که شعاع نانولوله‌های کربنی تأثیری بر ضریب سختی  $C_{11}$  (جهت طولی) نانوکامپوزیت تقویت شده با فیبر فازی ندارند. در حالی که با افزایش شعاع نانولوله‌های کربنی خواص موثر الاستیک عرضی شامل ضریب سختی  $C_{22}$ ،  $C_{33}$  و  $C_{23}$  بهبود می‌یابند. همچنین، اثرات تغییر شعاع نانولوله‌ی کربنی بر ضرایب سختی الاستیک  $C_{12}$  و  $C_{55}$  نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی بسیار کم می‌باشد. از نتایج به‌دست آمده می‌توان جهت طراحی و تولید بهینه کامپوزیت‌ها بهره برد.

## 8- مراجع

- [1] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [2] B. I. Yakobson, C. J. Brabec, J. Bernholc, Nanomechanics of carbon tubes: Instabilities beyond linear response, *Physical Review Letters*, Vol. 76, No. 14, pp. 2511-2514, 1996.
- [3] J. P. Salvetat, J. M. Bonard, N. H. Thomson, A. J. Kulik, L. For'ro, W. Benoit, L. Zuppiroli, Mechanical properties of carbon nanotubes, *Applied Physics A*, Vol. 69, No. 3, pp. 255-260, 1999.
- [4] L. Shen, J. Li, Transversely isotropic elastic properties of single-walled carbon nanotubes, *Physics Review B*, Vol. 69, No. 4, pp. 1-10, 2004.
- [5] J. R. Xiao, B. A. Gama, J. W. Gillespie, An analytical molecular structural mechanics model for the mechanical properties of carbon nanotubes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 11, pp. 3075-3092, 2005.
- [6] J. L. Tsai, S. H. Tzeng, Y. T. Chiu, Characterizing elastic properties of carbon nanotubes/polyimide nanocomposites using multi-scale simulation, *Composites Part B*, Vol. 41, No. 1, pp. 106-115, 2010.
- [7] K. I. Tserpes, P. Papanikos, Finite element modeling of single-walled carbon nanotubes, *Composites Part B*, Vol. 36, No. 5, pp. 468-477, 2005.
- [8] M. Rossi, M. Meo, On the estimation of mechanical properties of single-walled carbon nanotubes by using a molecular-mechanics based fe approach, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 9, pp. 1394-1398, 2009.
- [9] R. Ansari, S. Ajori, A. Ameri, Elastic and structural properties and buckling behavior of single-walled carbon nanotubes under chemical adsorption of atomic oxygen and hydroxyl, *Chemical Physics Letters*, Vol. 616-617, No. 6, pp. 120-125, 2014.
- [10] M. Mondali, M. R. Yousefi, Prediction a range for elastic modulus of cnt reinforced polymer composites using analytical method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 52-60, 2014. (in Persian فارسی)
- [11] A. Nikfarjam, R. Rafiee, M. H. Sabour, M. Taheri, Characterization of the electrical and electromagnetic properties of CNT-based composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 88-100, 2014. (in Persian فارسی)
- [12] E. T. Thostenson, T. W. Chow, On the elastic properties of carbon nanotube based composites: Modelling and characterization, *Journal of Physics D*, Vol. 36, No. 5, pp. 573-582, 2003.

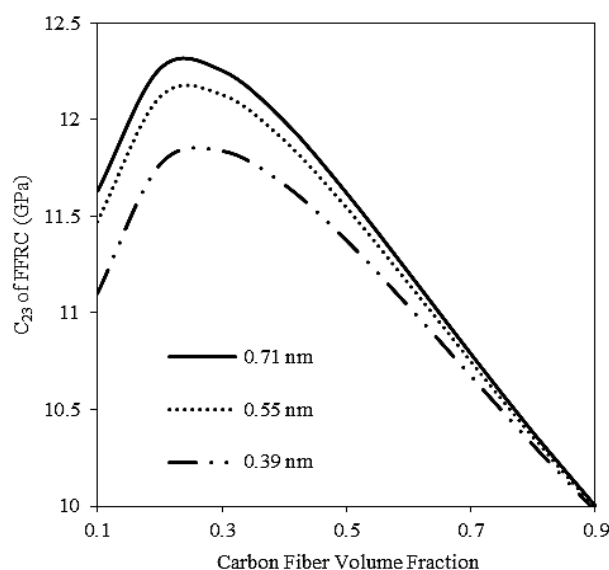


Fig. 29 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{23}$  of FFRC

شکل 29 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{23}$  کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

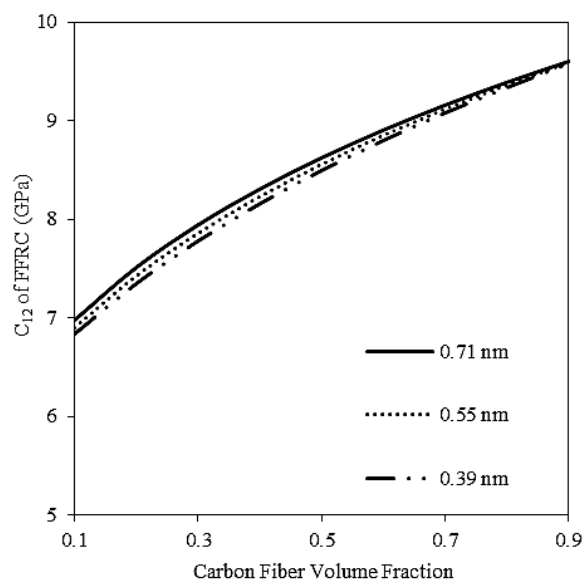


Fig. 30 Effect of carbon nanotube radius on  $C_{12}$  of FFRC

شکل 30 اثر شعاع نانولوله بر  $C_{12}$  کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی

نانوکامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی بررسی شد. این کامپوزیت جدید از فیبر کربن، نانولوله‌ی کربنی تک‌جداره و زمینه پلیمری تشکیل شد. رشد شعاعی نانولوله‌های کربنی هم‌راستا بر سطح خارجی فیبر کربن ویژگی ساختاری این کامپوزیت جدید است. به‌دلیل ویژگی ساختاری این نانوکامپوزیت جدید، به ازای شعاع‌های مختلف نانولوله، مقدار ماکزیمم از کسر حجمی نانولوله کربنی برای یک مقدار معینی از کسر حجمی فیبر کربن وجود دارد. مدل میکرومکانیکی تحلیلی براساس روش سلول واحد جهت استخراج خواص موثر الاستیک کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با فیبر فازی به‌کار گرفته شد. فاز میانی ناشی از واکنش بین اتم‌های نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری به‌عنوان یک فاز جداگانه با ضخامت و خواص الاستیک معین در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. اثرات فاز میانی نانولوله کربنی/زمینه پلیمری و همچنین وجود نانولوله‌ی کربن بر خواص موثر الاستیک این نانوکامپوزیت هیبریدی جدید مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی با مدل ارائه شده با

- [27] U. A. Joshi, S. C. Sharma, S. P. Harsha, Effect of carbon nanotube orientation on the mechanical properties of nanocomposites, *Composites B*, Vol. 43, No. 4, pp. 2063–2071, 2012.
- [28] C. Bower, W. Zhu, S. Jin, O. Zhou, Plasma-Induced alignment of carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 6, pp. 830-832, 2000.
- [29] R. B. Mathur, S. Chatterjee, B. P. Singh, Growth of carbon nanotubes on carbon fiber substrates to produce hybrid/phenolic composites with improved mechanical properties, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 7, pp. 1608-1615, 2008.
- [30] E. J. Garcia, B. L. Wardle, A. J. Hart, N. Yamamoto, Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown in situ, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2034-2041, 2008.
- [31] J. Zhao, L. Liu, Q. Guo, J. Shi, G. Zhai, J. Song, Z. Liu, Growth of carbon nanotubes on the surface of carbon fibers, *Carbon*, Vol. 46, No. 2, pp. 380-383, 2008.
- [32] M. C. Ray, R. Guzman de Villoria, B. L. Wardle, Load transfer analysis in short carbon fibers with radially-aligned carbon nanotubes embedded in a polymer matrix, *Journal of Advanced Materials*, Vol. 41, No. 4, pp. 82-94, 2009.
- [33] M. C. Ray, Concept for a novel hybrid smart composite reinforced with radially aligned zigzag carbon nanotubes on piezoelectric fibers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 3, pp. 1-8, 2010.
- [34] S. I. Kundalwal, M. C. Ray, Effective properties of a novel continuous fuzzy-fiber reinforced composite using the method of cells and the finite element method, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 36, pp. 191-203, 2012.
- [35] S. I. Kundalwal, M. C. Ray, Effect of carbon nanotube waviness on the elastic properties of the fuzzy fiber reinforced composites, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, No. 2, pp. 101-113, 2013.
- [36] S. I. Kundalwal, M. C. Ray, Effect of carbon nanotube waviness on the effective thermoelastic properties of a novel continuous fuzzy fiber reinforced composite, *Composites Part B*, Vol. 57, pp. 199-209, 2014.
- [37] M. K. Hassanzadeh Aghdam, M. J. Mahmoodi, Micromechanical damage analysis of short fiber titanium matrix composites under combined axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 86-97, 2013. (in Persian فارسی)
- [38] M. J. Mahmoodi, M. K. Hassanzadeh Aghdam, R. Ansari, Effects of interphase damage on the elastoviscoplastic behavior of general unidirectional metal matrix composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 95-105, 2015. (in Persian فارسی)
- [39] J. S. Snipes, C. T. Robinson, S. C. Baxter, Effects of scale and interface on the three-dimensional micromechanics of polymer nanocomposites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 24, pp. 2537-2546, 2011.
- [40] S. I. Kundalwal, M. C. Ray, Estimation of thermal conductivities of a novel fuzzy fiber reinforced composite, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 76, pp. 90-100, 2014.
- [13] Y. Han, J. Elliott, Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites, *Computational Materials Science*, Vol. 39, No. 2, pp. 315–323, 2007.
- [14] M. M. Shokrieh, R. Mosalmani, S. Soveity, An investigation on effects of aspect ratio of representative volume element on elastic modulus of a carbon nanotubes reinforced polymer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 107-116, 2014. (in Persian فارسی)
- [15] X. L. Chen, Y. J. Liu, Square representative volume elements for evaluating the effective material properties of carbon nanotube-based composites, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-11, 2004.
- [16] M. Griebel, J. Hamaekers, Molecular dynamics simulations of the elastic moduli of polymer-carbon nanotube composites, *Computational Methods in Applied Mechanics Engineering*, Vol. 193, No. 17, pp. 1773–1788, 2004.
- [17] A. Fereidoon, E. Saedi, H. Hemmatian, Prediction of nanocomposite effective elastic moduli by finite element modeling in micro scale, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 91-101, 2013. (in Persian فارسی)
- [18] J. Gou, B. Minaie, B. Wang, Z. Liang, C. Zhang, Computational and experimental study of interfacial bonding of single-walled nanotube reinforced composites, *Computational Materials Science*, Vol. 31, No. 3, pp. 225-236, 2004.
- [19] R. Zhu, E. Pan, A. K. Roy, Molecular dynamics study of the stress-strain behavior of carbon-nanotube reinforced Epon 862 composites, *Materials Science Engineering A*, Vol. 447, No. 1, pp. 51–57, 2007.
- [20] M. Zakeri, M. Shayanfar, M. M. Shokrieh, Interface modeling of nanotube reinforced nanocomposites by using multi-scale modeling method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 1-11, 2013. (in Persian فارسی)
- [21] G. D. Seidel, D. C. Lagoudas, Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites, *Mechanics of Materials*, Vol. 38, No. 8, pp. 884-907, 2006.
- [22] D. Luo, W. X. Wang, Y. Takao, Effects of the distribution and geometry of carbon nanotubes on the macroscopic stiffness and microscopic stresses of nanocomposites, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 14, pp. 2947–2958, 2007.
- [23] M. Esteva, P. D. Spanos, Effective elastic properties of nanotube reinforced composites with slightly weakened interfaces, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 4, No. 5, pp. 887-900, 2009.
- [24] D. C. Hammerand, G. D. Seidel, D. C. Lagoudas, Computational micromechanics of clustering and interphase effects in carbon nanotube composites, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 277–294, 2004.
- [25] M. M. Shokrieh, R. Rafiee, On the tensile behavior of an embedded carbon nanotube in polymer matrix, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, pp. 647-652, 2010.
- [26] M. R. Ayatollahi, S. Shadlou, M. M. Shokrieh, Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2250-2259, 2011.