

اثرات چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و زمینه بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

جواد ترکی سامانی

حسین گلستانی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

یکی از نواقص موجود در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهته، پایین بودن خواص الاستیک عرضی کامپوزیت در مقایسه با خواص الاستیک طولی آن می باشد. در یک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی این نقص با رشد دادن نانولوله های کربنی روی الیاف کربن تا حدودی برطرف شده است. ساختار این کامپوزیت جدید به گونه ای است که نانولوله های کربنی یکنواخت، به صورت شعاعی روی سطح الیاف کربن رشد داده شده اند. مشخص شده است که به دلیل رشد شعاعی نانولوله ها در سطح رشته ی کربن، خواص موثر عرضی این کامپوزیت ها به طور قابل توجهی بهبود یافته است. به دلیل وجود برخی پیوند های ایجاد نشده بین نانولوله ی کربنی و زمینه پلیمری، بین آن ها یک فاز میانی با خواص مکانیکی معین، در نظر گرفته می شود. در این پژوهش، برای کسرهای حجمی متفاوت الیاف کربن موجود در کامپوزیت الیاف فازی، اثر تغییر خواص مکانیکی فاز میانی موجود بین نانولوله و زمینه روی خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که میزان چسبندگی بین نانولوله ی کربنی و زمینه پلیمری تاثیر محسوسی روی خواص کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی دارد.

واژه های کلیدی: نانولوله کربن، الیاف فازی، روش المان محدود، کامپوزیت های پیشرفته، خواص الاستیک موثر.

Effects of the Adhesion Between Carbon Nanotube and the Matrix on the Elastic Properties of Fuzzy Fiber-reinforced Composites

J. Torki Samani

H. Golestanian

Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract

One of the drawbacks of conventional unidirectional fiber reinforced composites is their low transverse elastic properties compared to their longitudinal properties. In a fuzzy fiber-reinforced composite, this weakness is partly resolved by growing CNTs on the carbon fibers. The novel constructional feature of the fuzzy composite is that the uniformly aligned carbon nanotubes (CNTs) are radially grown on the surface of the horizontal carbon fibers. The radial growth of nanotubes on the carbon fiber improves the transverse effective properties of the composite. An interphase is considered between a CNT and the polymer matrix which characterizes the non-bonded van der Waals interaction between the CNT and the surrounding polymer matrix. In this investigation, mechanical properties of fuzzy composites are determined using finite element method. The effects of carbon fiber volume fraction and interphase strength on composite properties are investigated. The results indicate that the interphase strength has a significant effect on the composite transverse properties.

Keywords: Carbon nanotube, fuzzy fibers, finite element method, Advanced composites, effective elastic properties.

۱- مقدمه

از زمان کشف نانولوله های کربنی، توسط ایجیما [۱]، تاکنون حجم زیادی از تحقیقات برای پیش بینی خواص الاستیک آنها انجام شده است. به عنوان مثال یاکوبسن و همکاران [۲] با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی، مدول یانگ نانولوله ی کربنی را فراتر از $5/5 \text{ TPa}$ تخمین زدند. سالوت و همکاران [۳] خواص مکانیکی نانولوله ی کربنی را به صورت تجربی تعیین کردند. شن و لی [۴] گزارش دادند که می توان نانولوله کربنی را مانند یک ماده ی ایزوتروپیک عرضی شبیه سازی نمود. آنها مدل های مختلفی را برای محاسبه ی مقادیر پنج ثابت الاستیک نانولوله های ایزوتروپیک عرضی ارائه کردند. مدل های المان محدود سه بعدی برای نانولوله های آرمچر، زیگ زاگ و نانولوله های کربنی تک دیواره ی کایرال توسط سرب و پینیکاس [۵] ارائه شدند که اثر ضخامت دیواره، قطر و کایرالیته را بر مدول الاستیک نانولوله های در نظر می گرفتند. با استفاده از تئوری مکانیک مولکولی، رسی و مئو [۶] یک مدل المان محدود را برای محاسبه ی خواص

مکانیکی نانولوله های کربنی ارائه کردند. به منظور بهره برداری از خواص الاستیک بسیار عالی و جذاب نانولوله های کربنی و کاربرد آنها در کامپوزیت های زمینه پلیمری، تاکنون تلاش های زیادی انجام شده است. به عنوان مثال توسستن و چو [۷] خواص الاستیک یک کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی را از طریق آنالیز های میکرومکانیکی تخمین زدند. چن و لیو [۸] برای پیش بینی خواص مکانیکی موثر کامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی، مدل المان محدودی را بر اساس المان حجمی نمونه ی مربعی توسعه دادند. همچنین، گریبل و هماکرس [۹] مدول الاستیک کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله های کربنی را، با روش شبیه سازی دینامیک مولکولی، تخمین زدند. گائو و همکاران [۱۰] ترکیبی از روش های محاسباتی و تجربی را برای بررسی پیوندهای موجود بین نانولوله کربنی و زمینه اپوکسی در سطح میانی، مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از یک مدل برشی، چگونگی انتقال بار از نانولوله ی کربنی به زمینه در کامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربنی نا پیوسته، توسط گائو و لی [۱۱] بررسی شد. سایدل و لگودس [۱۲] خواص الاستیک موثر کامپوزیت های تقویت شده

با نانولوله‌ی کربنی را با استفاده از روش‌های خود سازگار^۱ و موری تاناکا برآورد کردند. اشرفی و هوپرت [۱۳] آنالیزهای المان محدود را برای پیش‌بینی خواص الاستیک نانولوله کربنی و کامپوزیت تقویت شده با آن، انجام دادند. جیانگ و همکاران [۱۴] حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی در یک کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی را تعیین و اثر آن را بر خواص الاستیک موثر کامپوزیت بررسی نمودند. شائو و همکاران [۱۵] اثر نانولوله‌های موجی و شرایط اتصال سطحی بین آنها و زمینه پلیمری را بر مدول موثر کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی بررسی کردند. استوا و اسپانوس [۱۶] اثر اتصال‌های ضعیف بین نانولوله‌ها و زمینه پلیمری را روی خواص موثر کامپوزیت زمینه پلیمریتقویت شده با نانولوله کربنی بررسی کردند. آنها گزارش کردند که پیوندهای ناقص ایجاد شده بین نانولوله‌های کربنی و زمینه روی مدول یانگ طولی کامپوزیت بی اثر و روی خواص عرضی آن، زمانی که کسرهای حجمی نانولوله‌های کربنی بیشتر از ۸۰٪ باشد، اثر محدودی ایجاد می‌کند. به منظور بررسی اثر طول نانولوله‌ی کربنی بر بازده انتقال بار در کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی، شکریه و رفیعی [۱۷] آنالیزهای المان محدود را در چند مقیاس متفاوت انجام دادند. سای و همکاران [۱۸]، با فرض وجود فاز میانی موثر بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری، خواص الاستیک نانو کامپوزیت زمینه پلیمری را تعیین کردند. آیت الهی و همکاران [۱۹] آنالیزهای مختلفی را برای بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی تحت شرایط بارگذاری کششی، خمشی و پیچشی انجام دادند.

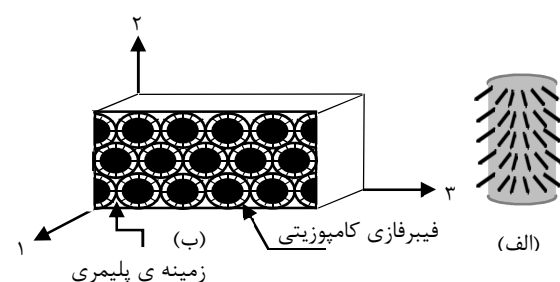
آنچه تاکنون بیان شد بخشی از تحقیقات صورت گرفته برای توسعه‌ی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بود. ساخت کامپوزیت‌های تک جهته‌ی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی ممتد، در مقیاس بزرگ مشکلات چالش برانگیزی را ایجاد نموده است. در این بین تراکم نانولوله‌ها، تنظیمات آنها و مشکل در ساخت نانولوله‌های کربنی در طول‌های بزرگ اهمیت بیشتری دارند. جهت بهبود خواص کامپوزیت‌ها با استفاده از نانولوله‌ها، محققین رشد آنها روی سطح الیاف پیشرفته را پیشنهاد کردند. به عنوان مثال باور و همکاران [۲۰] نشان دادند که با استفاده از فرایند رسوب بخار شیمیایی رشته‌های یکنواختی از نانولوله‌های کربنی بر روی سطح فیبر نوری رشد می‌کنند. افزایش مدول‌های کامپوزیت تقویت شده با رشته‌ی کربن به وسیله‌ی رشد نانولوله‌های کربنی بر روی سطح الیاف کربن توسط ماتور و همکاران [۲۱] مشاهده شد. یک ورقه‌ی هیبریدی توسط گارسیا و همکاران [۲۲] ساخته شد که در آن تقویت کننده‌ها به صورت پارچه‌ی بافته شده از الیاف آلومینا بودند و سطح الیاف آلومینا توسط نانولوله‌های کربنی پوشیده شده بود. ژائو و همکاران [۲۳] اثر مورفولوژی سطح الیاف کربن و کاتالیست‌ها را بر رشد نانولوله‌های کربنی روی سطوح الیاف کربن بررسی کردند. آنها نشان دادند که با رشد نانولوله‌های کربنی بر روی سطح الیاف آلومینا هر دو خواص مکانیکی و الکتریکی این ورقه را افزایش می‌دهد. ری و همکاران [۲۴] آنالیزهای انتقال بار را در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کوتاه کربنی انجام دادند. در این کامپوزیت، نانولوله‌های کربنی به صورت هم تراز و شعاعی روی سطح الیاف کربنی رشد یافته بودند. آنها دریافتند که اگر سطح الیاف کربن

توسط نانولوله‌های کربنی هم تراز، به صورت شعاعی پوشیده شود، بار محوری منتقل شده به الیاف کربنی کاهش می‌یابد. به منظور بهره‌مندی از خواص الاستیک منحصر به فرد نانولوله‌ها، توسط ری و بترا [۲۵]، یک کامپوزیت پیزوالکتریک هیبریدی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی و الیاف پیزوالکتریک ارائه شد. در این کامپوزیت، نانولوله‌های کربنی به صورت عمودی و هم تراز، به موازات الیاف پیزوالکتریک عمودی قرار دارند. اخیراً ری [۲۶] کامپوزیت هوشمند جدیدی را پیشنهاد کرد که در آن، به دلیل رشد شعاعی نانولوله‌های کربنی روی سطح الیاف پیزو الکتریک، خواص الکترو مکانیکی کامپوزیت بهبود یافته است. بنابراین ممکن است کامپوزیت‌های تک جهته‌ی تقویت شده با الیاف ممتد کربنی توسط رشد شعاعی نانولوله‌های کربنی روی سطح الیاف کربن، تقویت شوند و خواص عرضی آنها افزایش یابد. تار فازی کامپوزیتی از فاز رشته‌ی کربن و فاز نانو کامپوزیت پیچیده شده به دور آن تشکیل می‌شود. به دلیل پیوندهای واندرالس ایجاد نشده بین نانولوله و زمینه چسبندگی کامل بین این دو فاز ایجاد نمی‌شود. برای لحاظ نمودن این عیب، یک فاز میانی بین نانولوله کربنی و زمینه پلیمری در نظر گرفته می‌شود که به صورت یک جامد پیوسته رفتار می‌کند [۱۲ و ۱۸ و ۱۹]. کندلوال و ری [۲۷] خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی را با روش‌های میکرو مکانیک تحلیلی و المان محدود پیش بینی کردند. با توجه به پیشینه‌ی بیان شده تاکنون هیچ یک از محققین اثرات فاز میانی بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه را بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های فازی بررسی ننموده اند. بنابراین، در این پژوهش به بررسی اثر تغییر خواص مکانیکی فاز میانی موجود بین نانولوله و زمینه بر روی خواص موثر کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی پرداخته شده است. در این راستا، از روش اجزاء محدود و تئوری الاستیسیته استفاده شده است.

۲- خواص الاستیک موثر کامپوزیت تقویت شده با

الیاف فازی

شکل (۱-الف) رشته‌ی کربنی همراه با نانولوله شعاعی رشد کرده بر روی سطح آن را نشان می‌دهد که تار فازی نامیده می‌شود. هنگامی که تار فازی درون ماده پلیمری قرار می‌گیرد، فاصله‌ی بین نانولوله‌ها با پلیمر پر شده و تار فازی کامپوزیتی ایجاد می‌شود. در شکل (۱-ب) یک لایه از کامپوزیت جدید تقویت شده با الیاف فازی ممتد تک جهته نشان داده شده است که در آن نانولوله‌های کربنی به صورت شعاعی روی سطح الیاف کربن رشد یافته‌اند.



¹ self-consistent

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m^2 & n^2 & mn & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & m^2 & -mn & 0 & 0 \\ 0 & -2mn & 2mn & m^2 - n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m & -n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n & m \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این زمینه:

$$n = \sin \theta, m = \cos \theta$$

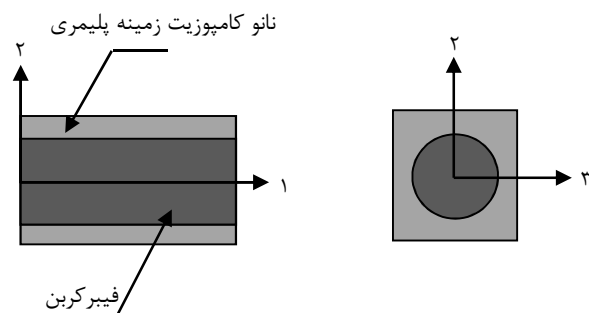
می‌باشد. بنابراین، خواص الاستیک موثر نانوکامپوزیت اطراف رشته‌ی کربن بر روی یک مقطع حلقوی با توجه به محورهای مختصات اصلی پیشنهاد شده برای تار فازی کامپوزیتی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$[C^{PMNC}] = \frac{1}{\pi(R^2 - a^2)} \int_0^{2\pi} \int_a^R [\bar{C}^{PMNC}] r dr d\theta \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳) زمینه $[\bar{C}^{PMNC}]$ بیانگر ضرایب الاستیک وابسته به موقعیت نانولوله‌ها، زمینه $[C^{PMNC}]$ معرف درایه‌های ماتریس سختی نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی فیبر کربن، a شعاع رشته‌ی کربن و R شعاع تار فازی کامپوزیتی می‌باشند. در نهایت، روابط ساختاری موثر برای ماده‌ی نانوکامپوزیتی با توجه به محورهای مختصات اصلی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۲۷]:

$$\{\sigma^{PMNC}\} = [C^{PMNC}]\{\varepsilon^{PMNC}\} \quad (4)$$

با تغییر مدول یانگ فاز میانی موجود بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری، از $3/2 \text{ GPa}$ تا 20 GPa خواص الاستیک نانو کامپوزیت زمینه پلیمری پیچیده شده به دور رشته‌ی کربن، برای هر مدول فاز میانی تعیین شد. در ادامه با در نظر گرفتن رشته‌ی کربنی به عنوان فاز تقویت کننده، و نانو کامپوزیت زمینه پلیمری به عنوان فاز زمینه، خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی تخمین زده می‌شوند، شکل ۳.



شکل ۳- المان حجمی نمونه‌ی تعیین شده برای فیبر فازی کامپوزیتی

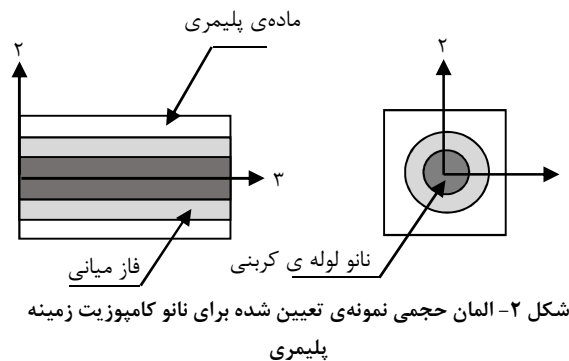
سر انجام با قراردادن خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی به عنوان خواص فاز تقویت کننده و خواص الاستیک ماده‌ی پلیمری به عنوان فاز زمینه، خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی محاسبه می‌شود، شکل ۴.

در تار فازی کامپوزیتی، نانولوله‌های کربنی شعاعی، زمینه‌ی پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن را در راستای محور عرضی رشته‌ی کربنی تقویت می‌کنند. بنابراین تار فازی کامپوزیتی از یک رشته‌ی کربنی احاطه شده با یک نوار نانوکامپوزیت تشکیل شده است. شعاع این منطقه با مجموع شعاع رشته‌ی کربنی و طول نانولوله‌ی کربنی برابر است.

المان حجمی نمونه‌ی پیشنهاد شده برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی همانند یک کامپوزیت دو فازی عمل می‌کند که در آن تار فازی کامپوزیتی (تشکیل شده از نانولوله‌های کربنی، رشته‌ی کربن و زمینه‌ی اطراف نانولوله‌ها) به عنوان فاز تقویت کننده و ماده‌ی پلیمری به عنوان زمینه محسوب می‌شود.

روش تحلیلی برای تخمین خواص الاستیک موثر کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی با برآورد خواص الاستیک موثر ماده‌ی نانوکامپوزیتی شروع می‌شود. سپس نانو کامپوزیت زمینه پلیمری به عنوان فاز زمینه و رشته‌ی کربنی به عنوان فاز تقویت کننده در نظر گرفته شده و خواص الاستیک موثر تار فازی کامپوزیتی تعیین می‌گردد. سرانجام، با استفاده از خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی و زمینه‌ی پلیمری، خواص کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی تخمین زده می‌شود.

همان طور که در شکل ۲ مشخص شده است، در نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن، نانولوله‌ی کربنی به عنوان تقویت کننده و ماده‌ی پلیمری یکنواخت به عنوان زمینه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین به دلیل پیوندهای واندروالس ایجاد نشده بین اتم‌های نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری، یک فاز میانی بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری وجود دارد که استحکام این فاز بستگی به میزان چسبندگی بین نانولوله‌ها و ماده‌ی زمینه دارد.



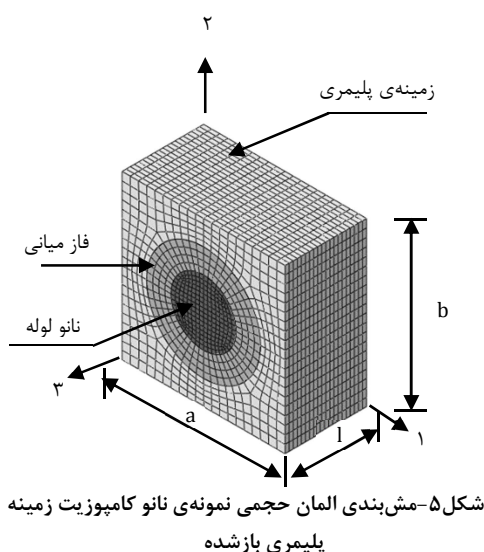
شکل ۲- المان حجمی نمونه‌ی تعیین شده برای نانو کامپوزیت زمینه پلیمری

برای بررسی اثر استحکام فاز میانی موجود بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری روی خواص کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، ابتدا المان حجمی نمونه‌ی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی و زمینه‌ی پلیمری مطابق شکل ۲ شبیه‌سازی شد. این مدل تحت دو مرحله بارگذاری طولی و عرضی و یک مرحله بارگذاری برشی قرار گرفت. در ادامه خواص الاستیک نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن، در موقعیتی که محور طولی نانولوله‌ی کربنی در راستای محور عرضی کامپوزیت قرار دارد، تعیین شد. برای نانولوله‌های دوران یافته نسبت به محور عرضی کامپوزیت، میانگین این خواص با تبدیل محور مختصات به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

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

در این رابطه، $[T]$ زمینه انتقال بوده و برابر است با:

این المان شامل سه فاز جامد نانولوله‌ی کربنی، فاز میانی و زمینه پلیمری می‌باشد. همچنین طول، عرض و ارتفاع المان حجمی نمونه به ترتیب l ، a و b نام گذاری شده اند و نانولوله‌ی کربنی احاطه شده توسط فاز میانی در راستای محور ۳ قرار دارد. از رابطه‌ی ۵ مشهود است که اگر در هر نقطه از المان حجمی نمونه فقط یک کرنش نرمال وجود داشته باشد، در حالی که سایر اجزاء موقعیت کرنش صفر هستند، سه تنش نرمال ایجاد خواهد شد و نسبت بین هریک از سه تنش نرمال و میدان کرنش نرمال بیانگر یک ضریب الاستیک موثر می باشد. بنابراین تنها با یک شبیه‌سازی عددی، سه ضریب الاستیک در نقطه‌ی مورد نظر برآورد خواهد شد. لذا برای تعیین یک ضریب الاستیک موثر خاص از مدل المان محدود، به بارگذاری و شرایط مرزی مناسب روی سطوح المان حجمی نمونه نیاز است.

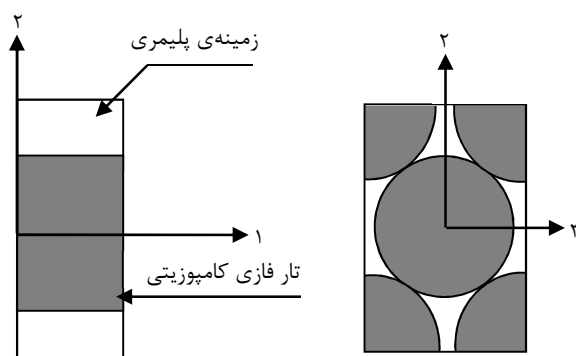


۳-۱- محاسبه‌ی ثوابت الاستیک موثر C_{23}^{nc} و C_{33}^{nc} :

برای بدست آوردن خواص الاستیک موثر C_{33}^{nc} و C_{23}^{nc} نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده، المان حجمی نمونه‌ی نشان داده شده در شکل ۵ باید به گونه ای تغییر شکل یابد که در آن فقط کرنش نرمال ϵ_{33}^{nc} ایجاد شود و سایر اجزاء کرنش صفر باشند. بنابراین برای دست یابی به این کرنش، ابتدا باید شرایط مرزی زیر ارضا شوند:

$$\begin{cases} u_1 = 0 \text{ at } x_1 = 0, x_1 = a \\ u_2 = 0 \text{ at } x_2 = 0, x_2 = b \\ u_3 = 0 \text{ at } x_3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

که X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب بیانگر مختصات در راستای محورهای ۱، ۲ و ۳ بوده و u_1 و u_2 و u_3 جابه جایی در راستای این سه محور را نشان می‌دهند. بنابر این سطح ابتدایی المان حجمی نمونه در $X_3 = 0$ ثابت شده و یک تغییر مکان یکنواخت روی سطح $X_3 = l$ وارد می‌شود. این نوع شرایط مرزی و بارگذاری منجر به ایجاد سه تنش نرمال σ_{11}^{nc} ، σ_{22}^{nc} و σ_{33}^{nc} در المان حجمی نمونه می‌گردد. سپس با توجه به رابطه‌ی ۶، کرنش و تنش‌های میانگین $\bar{\epsilon}_{33}^{nc}$ و $\bar{\sigma}_{33}^{nc}$ محاسبه می‌شوند. با محاسبه‌ی کرنش و تنش‌های میانگین، مقادیر C_{33}^{nc} و C_{23}^{nc} به صورت زیر محاسبه می‌شوند:



شکل ۴- المان حجمی در نظر گرفته شده برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

۳-۲- مدل المان محدود کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

باتوجه به ویژگی های ساختاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، می‌توان آن را همانند مواد ایزوتروپیک عرضی همگن در نظر گرفت. زیرا نانو کامپوزیت زمینه پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن، همانند نانو کامپوزیت باز شده‌ای است که، از نانولوله‌های کربنی یکنواخت تشکیل شده، و به دور رشته‌ی کربن پیچیده شده است. بنابراین تار فازی کامپوزیتی به صورت یک ماده‌ی ایزوتروپیک همگن عرضی رفتار می‌کند. در نتیجه، برای ارزیابی پنج ثابت الاستیک مستقل نانو کامپوزیت زمینه پلیمری و تار فازی کامپوزیتی و کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، از سه مدل المان محدود استفاده می‌شود. هنگامی که محور ۱ محور تقارن باشد، پنج ثابت الاستیک مستقل C_{33} ، C_{12} ، C_{11} ، C_{23} و C_{66} هستند. که این ثوابت الاستیک را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی و بارگذاری مناسب برای المان حجمی نمونه تعیین کرد. با استفاده از خواص نانولوله‌ی کربنی و فاز میانی و زمینه پلیمری، خواص نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده توسط مدل المان محدود محاسبه می‌شود. بنابراین براساس سیستم مختصات اصلی نشان داده شده در شکل (۱-ب)، روابط ساختاری نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده به صورت زیر است [۲۷]:

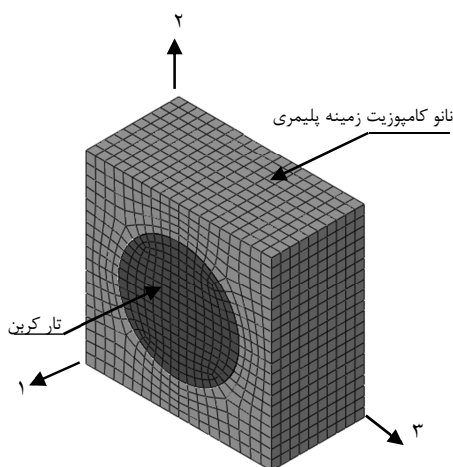
$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_{11}^{nc} \\ \bar{\sigma}_{22}^{nc} \\ \bar{\sigma}_{33}^{nc} \\ \bar{\sigma}_{23}^{nc} \\ \bar{\sigma}_{13}^{nc} \\ \bar{\sigma}_{12}^{nc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{nc} & C_{12}^{nc} & C_{13}^{nc} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^{nc} & C_{22}^{nc} & C_{23}^{nc} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}^{nc} & C_{23}^{nc} & C_{33}^{nc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^{nc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}^{nc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^{nc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\epsilon}_{11}^{nc} \\ \bar{\epsilon}_{22}^{nc} \\ \bar{\epsilon}_{33}^{nc} \\ \bar{\epsilon}_{23}^{nc} \\ \bar{\epsilon}_{13}^{nc} \\ \bar{\epsilon}_{12}^{nc} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

که nc بیانگر نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده می‌باشد. همچنین، تحت شرایط تنش و یا میدان تغییر شکل وارد شده بر المان حجمی نمونه‌ی نانو کامپوزیت زمینه پلیمری، تنش و کرنش میانگین به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۷]:

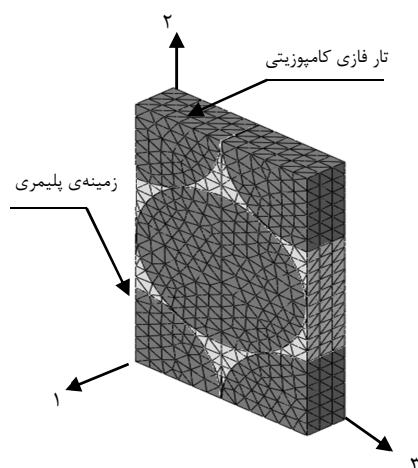
$$\{\bar{\sigma}^{nc}\} = \frac{1}{V} \int \{\sigma^{nc}\} dV, \quad \{\bar{\epsilon}^{nc}\} = \frac{1}{V} \int \{\epsilon^{nc}\} dV \quad (9)$$

که V حجم المان حجمی نمونه‌ی نانو کامپوزیت زمینه پلیمری است. شکل ۵ المان حجمی نماینده مربعی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی المان محدود نانو کامپوزیت زمینه پلیمری را نشان می‌دهد.

کننده و فاز زمینه جایگزین می‌شوند و به این ترتیب خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی با استفاده از روش اجزاء محدود محاسبه می‌گردد [۲۷].



شکل ۶- مش بندی المان حجمی نمونه‌ی تار فازی کامپوزیتی



شکل ۷- مش بندی المان حجمی نمونه‌ی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

۴- اعتبار سنجی پژوهش حاضر

جهت اعتبار سنجی نتایج مدل‌های ارائه شده، ابتدا خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به دست آمد و با مقادیر برآورد شده توسط کندلوال و ری مقایسه گردید که برخی از این نتایج در جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- ضریب الاستیک موثر C_{11} (GPa) در کامپوزیت تقویت شده با

الیاف فازی

کسر حجمی الیاف کربن	کندلوال و ری	پژوهش کنونی	خطا %
۰/۳	۷۸	۷۷/۸	۰/۲۶
۰/۵	۱۲۵	۱۲۲/۱۲	۲/۳
۰/۷	۱۷۰	۱۶۶/۳۳	۲/۲

$$C_{33}^{nc} = \frac{\bar{\sigma}_{33}^{nc}}{\bar{\epsilon}_{33}^{nc}}, C_{23}^{nc} = \frac{\bar{\sigma}_{11}^{nc}}{\bar{\epsilon}_{33}^{nc}} \quad (۸)$$

۳-۲- محاسبه‌ی ثوابت الاستیک موثر C_{11}^{nc} و C_{12}^{nc} :

جهت پیش بینی خواص الاستیک موثر C_{11}^{nc} و C_{12}^{nc} برای نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده، المان حجمی نمونه باید در موقعیتی قرار گیرد که فقط کرنش نرمال ϵ_{11}^{nc} در آن ایجاد گردد و سایر اجزاء کرنش برابر صفر باشند. لذا ابتدا باید شرایط مرزی زیر برقرار باشند:

$$\begin{cases} u_1 = 0 \text{ at } x_1 = 0 \\ u_2 = 0 \text{ at } x_2 = 0, x_2 = b \\ u_3 = 0 \text{ at } x_3 = 0, x_3 = l \end{cases} \quad (۹)$$

در این بارگذاری، سطح ابتدایی المان حجمی نمونه در $x_1 = 0$ ثابت شده و روی سطح $x_1 = a$ ، میدان تغییر مکان یکنواختی اعمال می‌گردد. بنابراین کرنش و تنش‌های میانگین $\bar{\epsilon}_{11}^{nc}$ و $\bar{\sigma}_{11}^{nc}$ و $\bar{\sigma}_{22}^{nc}$ مانند روش یاد شده در مرحله‌ی قبلی محاسبه شده و ثوابت الاستیک موثر C_{11}^{nc} و C_{12}^{nc} به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$C_{11}^{nc} = \frac{\bar{\sigma}_{11}^{nc}}{\bar{\epsilon}_{11}^{nc}}, C_{12}^{nc} = \frac{\bar{\sigma}_{22}^{nc}}{\bar{\epsilon}_{11}^{nc}} \quad (۱۰)$$

۳-۳- محاسبه‌ی ثابت الاستیک C_{44}^{nc} :

برای محاسبه‌ی ضریب الاستیک موثر C_{44}^{nc} نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده، المان حجمی نمونه باید تحت برش خالص قرار گرفته و در آن فقط کرنش برشی ϵ_{23}^{nc} ایجاد شود. این حالت کرنش با محدود کردن سطح $x_3 = 0$ و وارد نمودن نیروی مماسی روی سطح $x_3 = l$ در المان حجمی نمونه، ایجاد می‌شود. بر اثر این نوع بارگذاری و شرایط مرزی، کرنش برشی میانگین $\bar{\epsilon}_{23}^{nc}$ و تنش برشی میانگین $\bar{\sigma}_{23}^{nc}$ در المان حجمی نمونه به وجود می‌آیند. در نهایت ضریب الاستیک C_{44}^{nc} به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$C_{44}^{nc} = \frac{\bar{\sigma}_{23}^{nc}}{\bar{\epsilon}_{23}^{nc}} \quad (۱۱)$$

همچنین، باید توجه داشت که ثابت الاستیک C_{66}^{nc} یک ضریب الاستیک مستقل نیست و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{66}^{nc} = \frac{C_{11}^{nc} - C_{12}^{nc}}{2} \quad (۱۲)$$

بنابراین تمامی ثوابت الاستیک نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده پیش‌بینی شدند [۲۷]. در ادامه با استفاده از روابط ۱ و ۳، ماتریس ضرایب الاستیک موثر $[C^{PMNC}]$ برای نانو کامپوزیت زمینه پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن، به دست می‌آید. در ادامه از روش المان محدود یاد شده برای محاسبه‌ی خواص موثر نانو کامپوزیت زمینه پلیمری باز شده، جهت تخمین خواص موثر تار فازی کامپوزیتی و کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی استفاده می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ مش‌بندی مدل المان محدود را برای المان حجمی نماینده‌ی تار فازی کامپوزیتی و المان حجمی نمونه‌ی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی نشان می‌دهند.

در مدل المان محدود مشخص شده برای المان حجمی نمونه‌ی تار فازی کامپوزیتی، خواص الاستیک نانو کامپوزیت زمینه پلیمری ($[C^{PMNC}]$) به عنوان فاز زمینه و خواص الاستیک رشته‌ی کربن به عنوان فاز تقویت کننده، در نظر گرفته می‌شوند و خواص الاستیک موثر تار فازی کامپوزیتی تعیین می‌شود. سرانجام در المان حجمی نمونه‌ی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، خواص الاستیک موثر محاسبه شده برای تار فازی کامپوزیتی و خواص ماده‌ی پلیمری به ترتیب برای فاز تقویت

جدول ۲- ضریب الاستیک موثر C_{22} (GPa) در کامپوزیت تقویت شده با

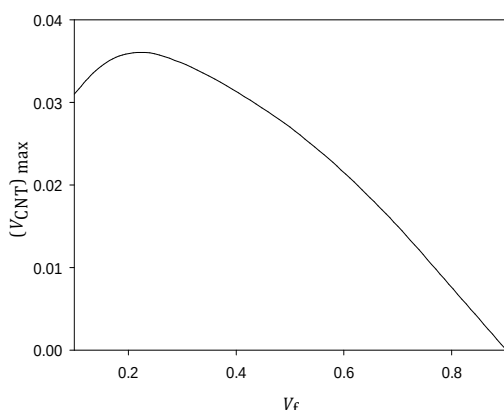
الیاف فازی

کسر حجمی الیاف کربن	کندلوال و ری	پژوهش کنونی	خطا %
۰/۳	۲۸	۲۶/۱۶	۷/۰۳
۰/۵	۲۷	۲۶/۲	۳/۰۵
۰/۷	۲۴/۵	۲۴/۰۶	۱/۸۲

جدول ۳- ضریب الاستیک موثر C_{12} (GPa) در کامپوزیت تقویت شده با

الیاف فازی

کسر حجمی الیاف کربن	کندلوال و ری	پژوهش کنونی	خطا %
۰/۳	۸	۷/۹۳	۰/۸۸
۰/۵	۸/۷	۸/۶۵	۰/۵۷
۰/۷	۹/۸	۹/۲۴	۶/۰۶



شکل ۹- تغییرات کسر حجمی نانولوله‌های کربنی بر حسب کسر حجمی فیبر کربن موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی [۲۷]

تعیین کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی یک مسئله‌ی مهم است. واضح است که ویژگی‌های ساختاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، روی حداکثر مقدار کسر حجمی نانولوله‌های کربنی، محدودیت ایجاد می‌کند. حداکثر تعداد نانولوله‌های کربنی رشد یافته روی سطح رشته‌ی کربن براساس فاصله سطح به سطح موجود بین دو رشته‌ی نانولوله‌های کربنی مجاور و قطر نانولوله‌ی کربنی قابل محاسبه است. بنابراین حداکثر مقدار کسر حجمی نانولوله‌های کربنی بر اساس کسر حجمی الیاف کربن موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به صورت زیر محاسبه می‌شود که در آن d_n بیانگر قطر نانولوله‌ی کربنی، V_f برابر کسر حجمی رشته‌ی کربنی و V_{CNT} نشان دهنده‌ی کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در کامپوزیت می‌باشند.

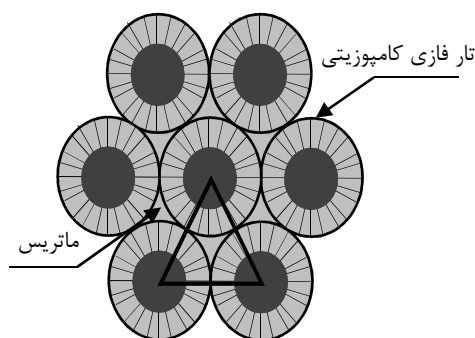
$$(V_{CNT})_{\max} = \frac{\pi d_n^2}{2(d_n + 1.7)^2} \left(\sqrt{\frac{\pi V_f}{2\sqrt{3}}} - V_f \right) \quad (13)$$

همچنین روش محاسبه‌ی رابطه‌ی ۱۳ در بخش پیوست بیان شده است. از رابطه‌ی ۱۳ مشهود است که اگر کسر حجمی رشته‌ی کربن صفر باشد، حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی نیز برابر صفر می‌شود. هنگامی که $V_f = \pi / (2\sqrt{3})$ باشد $V_{CNT} = 0$ است. بنابراین حداکثر در یک مقدار خاص از V_f به حداکثر می‌رسد. شکل ۹ تغییرات حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی را نسبت به کسر حجمی رشته‌ی کربنی نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، حداکثر مقدار V_{CNT} برای $V_f = 0.24$ ایجاد می‌شود. همچنین افزایش کسر حجمی رشته‌ی کربن با افزایش قطر الیاف کربن یا تعداد آن‌ها صورت می‌پذیرد و باعث کاهش طول نانولوله‌های کربنی می‌گردد. در کسرهای حجمی فراتر از $V_f = 0.24$ ، افزایش کسر حجمی رشته‌ی کربن موجب کاهش کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در الیاف فازی کامپوزیتی و کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی می‌گردد. در این پژوهش نتایج مربوط به بررسی اثرات چسبندگی بین نانولوله‌های کربنی و ماتریس بر خواص الاستیک نانوکامپوزیت احاطه کننده‌ی فیبر کربنی ارائه می‌شود. این محاسبات برای سه کسر حجمی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد از الیاف کربنی

۵- بحث و نتیجه گیری

کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، به قطر نانولوله‌ی کربنی، قطر رشته‌ی کربن و فاصله سطح به سطح موجود بین دو رشته‌ی نانولوله‌های کربنی مجاور، وابسته است. برای برقراری تعادل نیروی واندروالس موجود بین دو رشته‌ی نانولوله‌ی کربنی، حداقل فاصله‌ی مورد نیاز برابر 0.34 nm می‌باشد [۱۴]. در نانوکامپوزیت، زمینه پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن، شکاف بین نانولوله‌های کربنی توسط مولکول‌های پلیمر پلی آمید پر شده و تشکیل فاز میانی نیز در نظر گرفته می‌شود، فاصله سطح به سطح موجود بین دو رشته‌ی نانولوله‌های کربنی مجاور برابر $1/7 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است [۲۷]. لازم به یادآوری است که یک لایه از کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، از تار فازی کامپوزیتی و زمینه پلی آمید تشکیل می‌شود و اینکه در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف دارای مقطع دایره‌ای، بسته‌ی شش وجهی از این الیاف، مطلوب‌ترین دسته‌ی الیاف محسوب می‌شود. در این حالت، حداکثر کسر حجمی الیاف 0.9069 می‌باشد [۲۷]. لذا برای ارزیابی نتایج عددی در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، یک دسته‌ی شش وجهی از الیاف فازی کامپوزیتی در نظر گرفته می‌شود که در شکل ۸ نشان داده شده است. همین طور فرض شده است که نانولوله‌های کربنی به طور یکنواخت و شعاعی بر روی سطح رشته‌ی کربن رشد یافته‌اند. همچنین توجه شود که اگر چه کسر حجمی الیاف فازی کامپوزیتی 0.9069 است، ولی کسر حجمی رشته‌ی کربن در کامپوزیت بسیار کمتر از 0.9069 است.



شکل ۸- بسته‌ی شش وجهی الیاف فازی کامپوزیتی

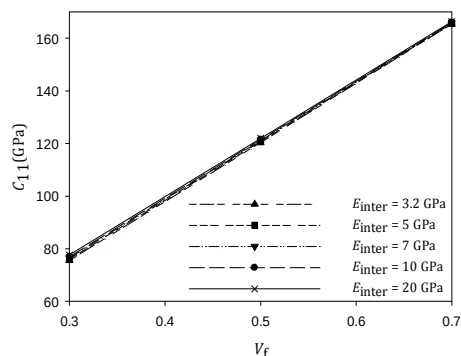
با توجه به مقادیر عددی ارائه شده در جداول ۷ تا ۹، تقویت پیوندهای موجود بین نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری اثر قابل توجهی بر افزایش ضریب الاستیک C_{11} ندارد. زیرا خواص الاستیک نانولوله‌های کربنی در راستای محور عرضی (محور ۱) بسیار کوچکتر از خواص الاستیک آن‌ها در امتداد محور طولی (محور ۳) می‌باشد.

جدول ۷- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری بر خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی ($V_f=30\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۸۳/۲۶	۶/۷۹	۳۰/۴۱	۱۲/۱۱
۵	۸۳/۸۹	۷/۲۳	۳۰/۸۵	۱۲/۲۹
۷	۸۴/۳۷	۷/۵۵	۳۱/۲۰	۱۲/۴۲
۱۰	۸۴/۸۶	۷/۸۵	۳۱/۵۷	۱۲/۵۶
۲۰	۸۵/۶۶	۸/۳۰	۳۲/۳۵	۱۲/۸۰

جدول ۸- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری بر خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی ($V_f=50\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۱۳۳/۳۹	۸/۲۲	۳۱/۰۴	۱۱/۳۹
۵	۱۳۳/۸۶	۸/۵۲	۳۱/۳۴	۱۱/۴۵
۷	۱۳۴/۲۳	۸/۷۳	۳۱/۵۸	۱۱/۴۹
۱۰	۱۳۴/۶۰	۸/۹۳	۳۱/۸۵	۱۱/۵۴
۲۰	۱۳۵/۲۲	۹/۲۴	۴۱/۳۲	۱۱/۶۱



شکل ۱۰- تغییرات ضریب الاستیک موثر C_{11} کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی بر حسب کسر حجمی الیاف کربن

جدول ۹- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری بر خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی ($V_f=70\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۱۸۳/۷۴	۹/۴۸	۲۹/۲۷	۹/۶۲
۵	۱۸۴/۰۰	۹/۶۳	۲۹/۴۷	۹/۵۹
۷	۱۸۴/۲۱	۹/۷۳	۲۹/۶۲	۹/۵۶
۱۰	۱۸۴/۴۲	۹/۸۳	۲۹/۸۰	۹/۵۴
۲۰	۱۸۴/۷۷	۱۰/۰۰	۳۰/۱۹	۹/۴۹

انجام شد. بعلاوه، مدول ینگ فاز میانی از $3/2$ GPa تا 20 GPa متغیر در نظر گرفته شد تا چسبندگی‌های متفاوتی شبیه سازی گردد. در مرحله‌ی بعد، المان حجمی نمونه‌ی تقویت شده با رشته‌ی کربن، که در آن نانوکامپوزیت زمینه پلیمری به عنوان فاز ماتریس در نظر گرفته شده، مطابق شکل ۶ شبیه سازی گردید. این المان حجمی نیز تحت دو مرحله بارگذاری طولی و عرضی و یک مرحله بارگذاری برشی قرار گرفت و خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی، مشخص شد. در نهایت المان حجمی نمونه‌ی تقویت شده با الیاف فازی کامپوزیتی و زمینه‌ی پلیمری مانند شکل ۷ شبیه سازی گردید و تحت سه نوع شرایط بارگذاری محوری و برشی، قرار گرفت و خواص الاستیک موثر کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی برای فازهای میانی یاد شده بدست آمد. برخی از نتایج این بررسی‌ها در جداول زیر ارائه شده اند.

جدول ۴- بررسی اثر چسبندگی نانو لوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی تار کربن ($V_f=30\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۷/۶۳	۴/۵۲	۳۳/۶۶	۱۳/۵۱
۵	۸/۴۸	۵/۱۸	۳۴/۴۶	۱۴/۰۴
۷	۹/۱۴	۵/۶۷	۳۵/۰۷	۱۴/۴۲
۱۰	۹/۸۲	۶/۱۳	۳۵/۷۴	۱۴/۸۱
۲۰	۱۰/۹۵	۶/۸۳	۳۷/۰۹	۱۵/۵۲

جدول ۵- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی تار کربن ($V_f=50\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۷/۶۶	۴/۵۰	۳۹/۸۴	۱۵/۵۵
۵	۸/۵۹	۵/۲۰	۴۰/۷۰	۱۶/۱۰
۷	۹/۳۱	۵/۷۱	۴۱/۳۷	۱۶/۵۲
۱۰	۱۰/۰۶	۶/۲۱	۴۲/۰۹	۱۶/۹۴
۲۰	۱۱/۳۴	۶/۹۸	۴۳/۵۸	۱۷/۶۹

جدول ۶- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک نانو کامپوزیت احاطه کننده‌ی تار کربن ($V_f=70\%$)

مدول الاستیک فازمیان (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۷/۷۰	۴/۴۸	۴۴/۳۷	۱۷/۰۳
۵	۸/۶۷	۵/۲۱	۴۵/۲۷	۱۷/۶۱
۷	۹/۴۴	۵/۷۵	۴۵/۹۸	۱۸/۰۵
۱۰	۱۰/۲۵	۶/۲۸	۴۶/۷۵	۱۸/۵۰
۲۰	۱۱/۶۵	۷/۱۰	۴۸/۳۴	۱۹/۳۰

همان گونه که از جداول ۴ تا ۶ مشخص است، با افزایش چسبندگی بین نانو لوله‌ی کربنی صاف و ماتریس پلیمری در هر سه کسر حجمی یاد شده، خواص الاستیک موثر نانو کامپوزیت ماتریس پلیمری احاطه کننده‌ی تار کربن افزایش می‌یابد.

بنابراین اثر تقویت چسبندگی فاز میانی بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی در جدول ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است. در ادامه شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تفسیر بهتری از اثر افزایش چسبندگی نانولوله و ماتریس بر خواص الاستیک تار فازی کامپوزیتی ارائه می‌کنند.

جدول ۱۰- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی ($V_f=30\%$)

مدول الاستیک فاز میانی (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۷۵/۵۱	۶/۶۳	۲۴/۹۶	۱۱/۳۶
۵	۷۶/۰۸	۶/۹۸	۲۵/۲۳	۱۱/۴۷
۷	۷۶/۵۰	۷/۲۳	۲۵/۴۳	۱۱/۵۵
۱۰	۷۶/۹۳	۷/۴۷	۲۵/۶۶	۱۱/۶۴
۲۰	۷۷/۶۴	۷/۸۲	۲۶/۱۱	۱۱/۷۹

جدول ۱۱- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی ($V_f=50\%$)

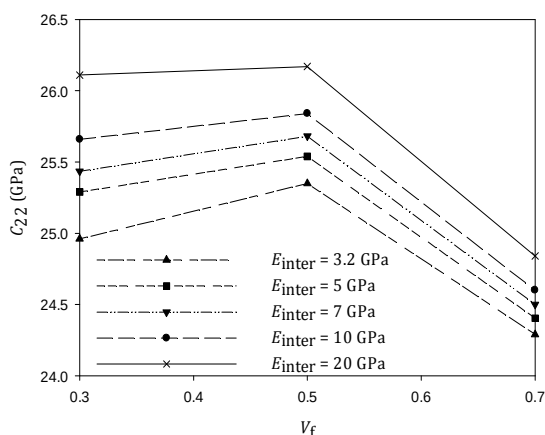
مدول الاستیک فاز میانی (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۱۶۵/۴۴	۸/۸۳	۲۴/۲۹	۱۰/۰۲
۵	۱۶۵/۶۷	۸/۹۵	۲۴/۴۱	۱۰/۰۱
۷	۱۶۵/۸۵	۹/۰۳	۲۴/۵۰	۱۰/۰۱
۱۰	۱۶۶/۰۳	۹/۱۱	۲۴/۶۰	۱۰/۰۱
۲۰	۱۶۶/۳۴	۹/۲۴	۲۴/۸۴	۱۰/۰۱

جدول ۱۲- بررسی اثر چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی ($V_f=70\%$)

مدول الاستیک فاز میانی (گیگاپاسکال)	C_{11} (GPa)	C_{12} (GPa)	C_{22} (GPa)	C_{23} (GPa)
۳/۲	۱۲۰/۳۹	۷/۷۸	۲۵/۳۵	۱۱/۰۳
۵	۱۲۰/۸۰	۸/۰۲	۲۵/۵۴	۱۱/۰۷
۷	۱۲۱/۱۳	۸/۱۸	۲۵/۶۸	۱۱/۱۰
۱۰	۱۲۱/۴۵	۸/۳۴	۲۵/۸۴	۱۱/۱۵
۲۰	۱۲۲/۰۰	۸/۵۸	۲۶/۱۷	۱۱/۲۱

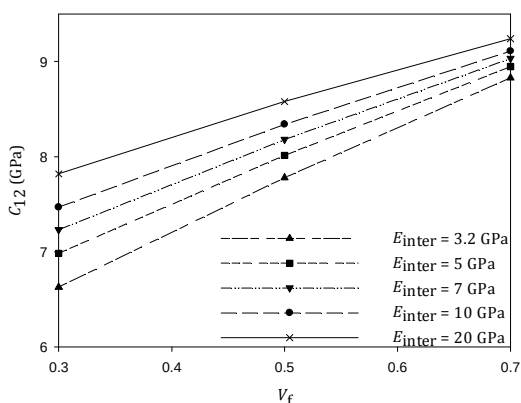
همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، به دلیل اینکه خاصیت الاستیک عرضی نانو لوله‌های کربنی در راستای محورها بسیار کمتر از خاصیت الاستیک طولی آن‌ها می‌باشد، تقویت فاز میانی موجود بین نانو لوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری، اثر قابل توجهی بر مقدار ضریب الاستیک C_{11} ندارد. از طرفی، مقدار پیش بینی شده‌ی C_{22} در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی، به طور قابل توجهی بزرگتر از مقدار C_{22} در کامپوزیت تک جهته‌ی تقویت شده با الیاف کربنی است. دلیل این امر رشد نانو لوله‌های کربنی شعاعی روی سطح تار کربنی است که باعث افزایش استحکام ماتریس احاطه کننده‌ی تار کربن در جهت عرضی می‌گردد. شکل ۱۱ اثر تغییر خواص الاستیک فاز میانی موجود بین

نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری بر مقدار ضریب الاستیک C_{22} را به خوبی نمایش می‌دهد. در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که با افزایش چسبندگی بین نانولوله کربنی و زمینه‌ی پلیمری، سفتی عرضی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی افزایش می‌یابد. این نتایج نشان دهنده‌ی این مطلب است که افزایش چسبندگی بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری باعث افزایش میزان انتقال تنش بین این دو فاز می‌گردد. بنابراین، اثر تقویت کنندگی نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل اینکه کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی همانند یک ماده‌ی ایزوتروپیک عرضی رفتار می‌کند، ضریب الاستیک C_{33} برابر با C_{22} بدست می‌آید. در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف فازی، رشد نانولوله‌های کربنی روی سطح رشته‌ی کربن موجب بهبود مقدار ضریب الاستیک C_{12} می‌گردد. با توجه به شکل ۱۲، تقویت فاز میانی موجود بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه پلیمری باعث افزایش ضریب الاستیک C_{12} کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی خواهد شد.

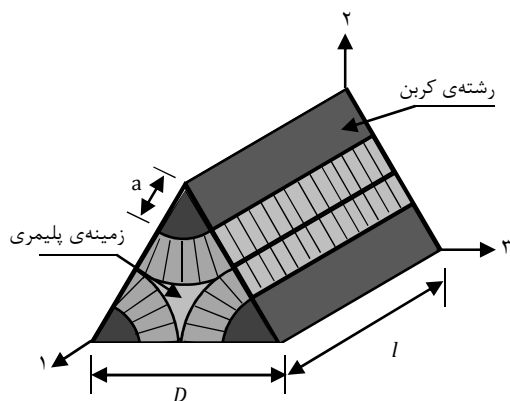


شکل ۱۱- تغییرات ضریب الاستیک موثر C_{22} کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی بر حسب تغییر کسر حجمی الیاف کربن

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، افزایش چسبندگی نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری در مقدار ضریب الاستیک C_{23} تغییر محسوسی ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب الاستیک موثر C_{12} کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی بر حسب کسر حجمی الیاف کربن



شکل ۱۴- نوع دیگری از المان حجمی نمونه‌ی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

$$v_f = \frac{V^f}{V_{FFRC}} = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3} D^2} \quad (16)$$

کسر حجمی رشته‌ی کربن موجود در تار فازی کامپوزیتی نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\bar{v}_f = \frac{\pi d^2 l}{8 D^2 l} \quad (17)$$

حداکثر تعداد نانولوله‌های کربنی رشد یافته روی سطح رشته‌ی کربن نیز از رابطه‌ی زیر برآورد می‌شود:

$$(N_{CNT})_{max} = \frac{\pi d l}{2(d_n + 1.7)^2} \quad (18)$$

که d_n معرف قطر نانولوله‌ی کربنی است. در ادامه حجم نانولوله‌های کربنی رشد یافته روی سطح رشته‌ی کربن توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_{CNT} = \frac{\pi}{4} d_n^2 (R - a) (N_{CNT})_{max} \quad (19)$$

بنابراین حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$(v_{CNT})_{max} = \frac{V_{CNT}}{V_{FFRC}} = \frac{\pi d_n^2}{2(d_n + 1.7)^2} \left(\sqrt{\frac{\pi v_f}{2\sqrt{3}}} - v_f \right) \quad (20)$$

حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در تار فازی کامپوزیتی نیز از رابطه‌ی زیر تخمین زده می‌شود:

$$(v_{nt})_{max} = \frac{V_{CNT}}{V_{CFF}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} (v_{CNT})_{max} \quad (21)$$

که در این رابطه، حجم تار فازی کامپوزیتی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{CFF} = \frac{\pi}{8} D^2 l \quad (22)$$

سرانجام حداکثر کسر حجمی نانولوله‌های کربنی موجود در نانوکامپوزیت زمینه پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربنی با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

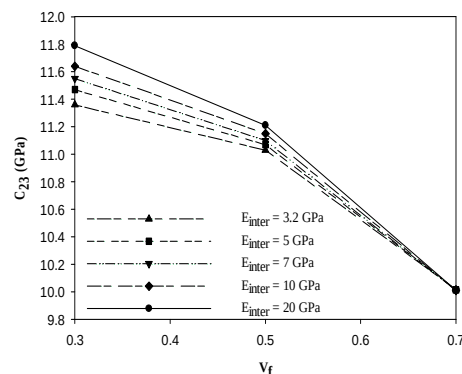
$$((\bar{v}_{nt})_{max} = \frac{V_{CNT}}{V_{PMNC}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{D^2}{(D^2 - d^2)} (v_{CNT})_{max} \quad (23)$$

که حجم نانو کامپوزیت زمینه پلیمری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{PMNC} = \frac{\pi}{8} (D^2 - d^2) l \quad (24)$$

۵- نمادها

a	شعاع رشته‌ی کربن، μm
R	شعاع تار فازی کامپوزیتی، μm



شکل ۱۳- تغییرات ضریب الاستیک C_{23} در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی برحسب کسر حجمی الیاف کربن

۶- نتیجه گیری

این پژوهش به منظور تعیین اثر میزان چسبندگی بین نانو لوله‌ی کربنی و ماتریس پلیمری بر خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی ممتد انجام پذیرفت. ابتدا نتایج بدست آمده با نتایج مدل‌های ایجاد شده با نتایج کندلوال و ری مقایسه شد. نتایج تطابق خوبی داشت. در ادامه مشخص شد که با افزایش چسبندگی بین نانولوله‌ی کربنی و زمینه‌ی پلیمری، خواص الاستیک کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به خصوص ضریب الاستیک عرضی آن افزایش می‌یابد. در مرحله‌ی اول شبیه سازی دیده شده که ماکزیم تنش، در نانولوله‌ی کربنی صاف رخ می‌دهد و این بدان معناست که بخش اعظمی از نیروهای وارد شده بر نانوکامپوزیت توسط الیاف تحمل می‌شود. در مرحله‌ی دوم شبیه سازی ماکزیم تنش در تار کربن ایجاد می‌گردد و مقدار زیادی از نیروهای وارد شده به تار فازی کامپوزیتی توسط تار کربنی تحمل می‌شود. در مرحله‌ی آخر از شبیه سازی نیز مشخص شد که اکثر نیروهای وارد شده به کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به تار فازی کامپوزیتی انتقال می‌یابد.

۷- پیوست

با توجه به شکل ۸، المان نماینده‌ی حجمی کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی می‌تواند به صورت مثلث متساوی الاضلاع نیز انتخاب شود. این المان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این شکل، a و D به ترتیب بیانگر شعاع رشته‌ی کربن و قطر تار فازی کامپوزیتی می‌باشند.

بنابراین حجم این المان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{FFRC} = \frac{\sqrt{3}}{4} D^2 l \quad (14)$$

که $D = 2R$ است. حجم رشته‌ی کربن نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V^f = \frac{\pi}{8} d^2 l \quad (15)$$

که در آن $d = 2a$ می‌باشد. بنابراین کسر حجمی رشته‌ی کربن موجود در کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی به صورت زیر قابل محاسبه است:

V حجم، μm^3
v کسر حجمی

علائم یونانی

θ زاویه‌ی دوران نانولوله‌های کربنی (rad)

σ تنش ایجاد شده در نانوکامپوزیت (GPa)

ε کرنش ایجاد شده در نانوکامپوزیت

بالانویس‌ها

PMNC نانوکامپوزیت زمینه پلیمری احاطه کننده‌ی رشته‌ی کربن

nc نانوکامپوزیت

FFRC کامپوزیت تقویت شده با الیاف فازی

f رشته‌ی کربن

CFF تار فازی کامپوزیتی

۶- مراجع

- [1] Iijima S., Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [2] Yakobson B., Brabec, C., Bernholc J., Nanomechanics of carbon tubes: Instabilities beyond linear response, *Physical Review Letters*, Vol. 76, No. 14, pp. 2511-2514, 1996.
- [3] Salvétat J. P., Bonard J. M., Thomson N. H., Kulik A. J., Forro L., Benoit W., Zuppiroli L., Mechanical Properties of Carbon Nanotubes, *Applied Physics A*, Vol. 69, pp. 69-260, 1999.
- [4] Shen L., Li J., Transversely isotropic elastic properties of single-walled carbon nanotubes, *American Physical Society*, 2004.
- [5] Tserpes K. I., Papanikos P., Finite Element Modeling of Single-Walled Carbon Nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, No 5, pp. 468-477, 2005.
- [6] Rossi M., Meo M., 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.
- [7] Thostenson E. T., Chow T. W., on the Elastic Properties of Carbon Nanotube Based Composites: Modelling and Characterization, *Journal of Physics D*, Vol. 36, No. 5, pp. 573-582, 2003.
- [8] Chen X. L., Liu Y. J., 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.
- [9] Griebel M., Hamaekers J., Molecular dynamics simulations of the elastic moduli of polymer-carbon nanotube composites, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, No. 17-20, pp. 1773-1788, 2004.
- [10] Gou J., Minaie B., Wang B., Liang Z., Zhang C., Computational and experimental study of interfacial bonding of single-walled nanotube reinforced composites, *Computational Materials Science*, Vol. 31, No. 3-4, pp. 225-236, 2004.
- [11] Gao X. L., Li K., A shear-lag model for carbon nanotube-reinforced polymer composites, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 5-6, pp. 1649-1667, 2005.
- [12] Seidel G. D., Lagoudas D. C., Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites, *Mechanics of Materials*, Vol. 38, No. 8-10, pp. 884-907, 2006.
- [13] Ashrafi B., Hubert P., Modeling the elastic properties of carbon nanotube array/polymer composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 3-4, pp. 387-396, 2006.
- [14] Jiang B., Liu, C., Zhang, C., Liang, R., Wang, B., Maximum nanotube volume fraction and its effect on overall elastic properties of nanotube-reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 212-217, 2009.
- [15] Shao L. H., Luo R. Y., Bai S. L., Wang J., Prediction of effective moduli of carbon nanotube-reinforced composites with waviness and debonding, *Composite Structures*, Vol. 87, No. 3, pp. 274-281, 2009.
- [16] Esteve M., Spanos P. D., 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.
- [17] Shokrieh M. M., Rafiee R., On the tensile behavior of an embedded carbon nanotube in polymer matrix with non-bonded interphase region, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, pp. 647-652, 2010.
- [18] Tsai J. L., Tzeng S. H., Chiu Y. T., Characterizing elastic properties of carbon nanotubes/polyimide nanocomposites using multi-scale simulation, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 106-115, 2010.
- [19] Ayatollahi M. R., Shadlou S., Shokrieh M. M., Multiscale modelling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2250-2259, 2011.
- [20] Bower C., Zhu W., Jin S., Zhou O., Plasma-Induced Alignment of Carbon Nanotubes, *Applied Physics Letters*, Vol. 77, pp. 830-832, 2000.
- [21] Mathur R. B., Chatterjee S., Singh B. P., Growth of carbon nanotubes on carbon fibre substrates to produce hybrid/phenolic composites with improved mechanical properties, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 7-8, pp. 1608-1615, 2008.
- [22] Garcia E. J., Wardle B. L., John Hart A., Yamamoto N., 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.
- [23] Zhao J., Liu L., Guo Q., Shi J., Zhai G., Song J., Liu Z., Growth of Carbon nanotubes on the surface of Carbon fibers, *Carbon*, Vol. 46, pp. 380-383, 2008.
- [24] Ray M. C., Guzman de Villoria R., Wardle B. L., Load Transfer Analysis in Short Carbon fibers With Radially-Aligned Carbon Nanotubes Embedded in A Polymer Matrix, *Journal of Advanced Materials*, Vol. 41, pp. 82-94, 2009.
- [25] Ray M. C., Batra R. C., Effective Properties of Carbon Nanotube and Piezoelectric fiber Reinforced Hybrid Smart Composite, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 76(034503), pp. 1-4, 2009.
- [26] Ray M. C., The concept of a novel hybrid smart composite reinforced with radially aligned zigzag carbon nanotubes on piezoelectric fibers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 3, pp. 035008, 2010.
- [27] Kundalwal S. I., Ray M. C., 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, No. 0, pp. 191-203, 2012.