فصلنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir



بررسی اثر نسبت منظری نانولولههای کربنی روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیـت پلیمری

محمد هاشمی گهروئی'، حسین گلستانیان''*، مهدی سلمانی تهرانی"

* نويسنده مسئول: golestanian@eng.sku.ac.ir

چکیدہ		واژههای کلیدی
در این مقاله خواص مکانیکی نانو	وكامپوزيت تقويت شده با نانولوله كربني با استفاده المان	نانو کامپوزیت، نانولوله کربنی، نسبت منظری.
حجمی نمایندهی مربعی بر اساس	س مکانیک محیط پیوسته و روش المان محدود بهدست	تحلیل اجزای محدود، خواص مکانیکی
آمده است. برای این کار ابتدا با	با استفاده از تئوری الاستیسیته روابط لازم برای بهدست	مۇ ثر.
آوردن خواص مؤثر نانوكامپوزيت	ت از حل المان حجمی نماینده تحت دو نوع بارگذاری	
استخراج شده است. سپس اثرات ز	، نسبت منظری نانولولهی کربنی بر روی خواص مکانیکی	
نانوكامپوزيت بهدست آمده است.	ت. نتایج نشان میدهد که افزایش نسبت منظری نانولوله	
كربني باعث افزايش مدول يانگ	ه نانوکامپوزیت در جهت الیاف و کاهش مدول یانگ در	
جهت عرضی میشود. همچنین افز	افزایش نسبت منظری نانولوله کربنی باعث افزایش نسبت	C
پواسون در صفحهی xz و کاهش ن	، نسبت پواسون در صفحهی xy می شود.	ΛV

۱- کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهر کرد.

۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهر کرد.

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱- مقدمه

مواد نانوساختار، نانوفاز یا نانو کریستال به موادی گفته می شود که اندازه آنها حداقل در یک بعد کمتر از ۱۰۰ بوده یا اجزای تشکیل دهنده آنها دارای این ویژگی باشد. نانولولههای کربنی تاکنون به طور گسترده مورد مطالعهی تئوری و تجربی قرار گرفتهاند. نانولولههای کربنی اولین بار توسط ایجیما در دو گوناگونی مانند نانولولههای مستقیم، مواج، فنر گونه و شاخهدار پیش بینی، مشاهده و تولید شدهاند [۱].

وقتی ماتریس پلیمری با نانولوله های کربنی تقویت شود به دلیل ویژگی های حائز اهمیت نانولوله ها مانند اندازه بسیار کوچک، حالت رسانایی و نیمه رسانایی آنها بر حسب شکل هندسی شان، قدرت رسانایی گرمایی خیلی بالا، استحکام و چگالی سطحی زیاد در خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی کامپوزیت از جمله مدول و استحکام کششی، ممانعت در برابر نفوذ گاز و مایعات و مقاومت حرارتی بهبود حاصل می شود. ویژگی های منحصر به فرد نانولوله های کربنی به آرایش اتمی، طول، قطر و ساختار آنها بستگی دارد. مثلاً با افزایش نسبت طول به قطر نانولوله میزان انتقال بار توسط نانولوله افزایش می بابد که این نکته در بالا بردن و اصلاح خواص مکانیکی نانو کامپوزیت حاصل مؤثر است.

برای تعیین خواص نانولوله ها تحقیقات بسیاری انجام شده است. از جمله آنها می توان به تحقیقات لیو اشاره کرد در این تحقیقات مدول یانگ نانولوله ۱*TPA*، مدول برشی *TPa ۴۵/۰* و مدول بالک *TPa ۰/۷۴ ب*هدست آمده است [۲].

و ساول بای ۱۱ (۲۰ م بدست میاه میلی این این به طور کلی از دو روش دینامیک مولکولی و مکانیک محیطهای پیوسته برای شبیه سازی نانو کامپوزیت ها استفاده می شود. روش دینامیک مولکولی برای مطالعه نانو کامپوزیت ها خصوصاً، برای مطالعه سطح تماس نانولوله و ماتریس و خواص سطح تماس یا مودهای شکست ضروری است. هرچند که در حال حاضر روش دینامیک مولکولی به دلیل محدودیت های موجود در توان محاسباتی محدود شده است. به عنوان نمونه توستنسن، چانیو و چو با توجه به شبیه سازی دینامیک مولکولی اظهار داشته اند که مدول یانگ نانولوله ها به زاویه ی پیچش

ورق گرافیتی که برای تولید نانولوله استفاده شده بستگی دارد. زمانی که این زاویه کم است مدول یانگ افزایش می یابد. در این مقاله قطر نانولوله های طنابی ۷ میکرومتر بیان شده و اهمیت نسبت حجم مواد تقویت کننده آشکار شد و آنها در تحقیقات خود دریافتند که با افزایش چشمگیر در سطح تماس بین نانولوله های ساده و ماتریس، ویژگی های کامپوزیت بیشتر تحت تأثیر ویژگی های سطح مشترک بین ماتریس و نانولوله ها قرار می گیرد. همچنین از روش شبیه سازی برای نانولوله های طنابی استفاده کردند که این روش بر سه گام اصلی زیر استوار بود. ۱- تعدادی نانولوله ی تک دیواره با زاویه هلیکال ۱۰ درجه در نظر گرفته شد. ۲- مجموع این نانولوله ها مکانیزم انتقال بار را ایجاد می کرد. ۳- دسته نانولوله ها با ماتریس پلیمری احاطه شده و کامپوزیت حاصل شامل ۵۴/۶/نانولوله بود [۳].

یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای تقویت شده با نانولولههای کربنی استحکام پیوند ماتریس و نانولوله است. در مطالعه صورت گرفته توسط گلستانیان و شجاعی مشخص شد که هر چه استحکام فصل مشترک بین نانولوله و ماتریس بیشتر شود خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل بهبود مییابد. آنها این فصل مشترک را به صورتهای مختلفی از جمله پیوند کاملاً درگیر و بدون لغزش، یک لایهی نازک الاستیک و المانهای فنر در نظر گرفتند [۴].

یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با نانولوله های کربنی شکل نانولوله است. در مطالعه صورت گرفته توسط متین و گلستانیان مشخص شد نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانولوله ی صاف خواص مکانیکی بهتری نسبت به نانوکامپوزیت های تقویت شده با نانولوله های هلیکال شکل دارند. همچنین در این تحقیق آنها اثر زاویه ی هلیکال را بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش زاویه ی هلیکال

نانولوله مدول محوری نانو کامپوزیت کاهش مییابد [۵]. در مطالعات صورت گرفته بر مبنای نظریه مکانیک محیطهای پیوسته نانولولههای کربنی بهصورت مواد هموژن و ایزوتروپیک با استفاده از مدلهای پیوسته تیر، پوسته و همچنین مدلهای سه بعدی در بررسی تغییر شکل، کمانش و

پاسخ مکانیکی نانولولههای کربنی مورد استفاده قرار می گیرد. خواص مواد مانند مدول یانگ، ضریب پوآسون و مودهای کمانش با استفاده از نظریه محیطهای پیوسته با موفقیت پیش بینی شده است [۶].

پیشنهاد شده است بجای استفاده از مدلهای تیر یا پوسته از مدلهای سه بعدی الاستیسیته برای شبیه سازی نانولولههای کربنی قرار گرفته در ماتریس استفاده شود. یک روش بر مبنای تئوری الاستیسیته برای تخمین خواص نانو کامپوزیت با استفاده از المان حجمی نماینده مربعی بنا نهاده شده (شکل ۱). رابطههایی برای بهدست آوردن خواص مؤثر مواد با استفاده از نتایج عددی توسط المان حجمی نماینده تحت دو حالت بار گذاری استخراج شده است.



شکل (۱) سه نوع المان حجمی نماینده قابل استفاده برای بررسی نانو کامپوزیت (الف) المان حجمی نماینده استوانه ای (ب) المان حجمی نماینده مربعی (ج) المان حجمی نماینده شش ضلعی.

در این مقاله از المان حجمی نماینده مربعی برای تخمین خواص نانوکامپوزیت استفاده شده است. رابطههایی بر مبنای تئوری الاستیسیته برای استخراج خواص مؤثر از پاسخ المان حجمی نماینده مربعی بهدست آمده و مطالعات عددی با استفاده از روش اجزا محدود صورت گرفته است.

۲- روابط اساسی حاکم برای بهدست آوردن رابطههایی برای استخراج ثابتهای ماده، یک مدل همسانگرد الاستیسیته از المان حجمی نماینده مربعی طبق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. هندسه مدل

الاستیسیته متناظر با المان حجمی نماینده مکعب مستطیلی به ارتفاع L و مساحت سطح ۲۵×۲۵ مقطع شکل (۳) می باشد.



شکل (۲) یک نمای برشی از المان حجمی نماینده مربعی شامل یک نانولولهی کربنی کوتاه.

پاسخهای الاستیسیته می توانند تحت شرایط بار گذاری معینی بهدست آیند. مدل الاستیسیسته با یک ماده ایزوتروپیک عرضی که دارای ۵ ثابت مستقل است پرشده است. چهار ثابت مؤثر ماده (مدول یانگ $z = e_x e_z$ و نسبتهای پو آسون ثابت مؤثر ماده (مدول یانگ $z = e_x e_z$ و نسبتهای پو آسون مراحلی که در ادامه خواهد آمد تعیین می شوند، جهت محور مراحلی که در ادامه خواهد آمد تعیین می شوند، جهت محور محصات مطابق شکل (۲) است. پنجمین ثابت مستقل ماده که همان مدول برشی (۲) است. پنجمین ثابت مستقل ماده که همان مدول برشی (۲) است. پنجمین شابت مستقل ماده که همان مدول برشی (۲) است. پنجمین شابت مستقل ماده در این جا به آن پرداخته نشده است [۶]. رابطه کلی تنش و کرنش در حالت سه بعدی برای تنش های

رابطه على تنس و ترتش در خلف شد بندى براى تنس تاى نرمال σ_x و σ_y و σ_z و كرنش هاى نرمال ε_x ، σ_x و برمال مادهاى كه به صورت عرضى متقارن است به شكل رابطه (۱) است.

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \\ \varepsilon_{z} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{x}} & -\frac{\nu_{xy}}{E_{x}} & -\frac{\nu_{zx}}{E_{z}} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_{x}} & \frac{1}{E_{x}} & -\frac{\nu_{zx}}{E_{z}} \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_{z}} & -\frac{\nu_{zx}}{E_{z}} & \frac{1}{E_{z}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \\ \sigma_{z} \end{bmatrix}$$
(1)

برای تعیین چهار ثابت مجهول E_x ،E_z و v_{xy} و v_{zx} ماده به چهار معادله نیاز داریم. دو حالت بارگذاری برای بهدست آوردن این معادلهها بر اساس تئوری الاستیسیته تعریف شده

است (بعنوان مقایسه المان حجمی نمایندههای استو آنهای به سه حالت بارگذاری نیاز دارند). این دو حالت بارگذاری در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود ابتدا المان حجمی نماینده تحت بارگذاری محوری قرار گرفته (شکل ۳ قسمت الف) و تغییر اندازه اضلاع سطح مقطع ΔA اندازه گیری شده است. سپس المان حجمی نماینده تحت بارگذاری عرضی قرار گرفته طبق شکل (۳- ب) و مانند قبل تغییر اندازه اضلاع سطح مقطع برای آن اندازه گیری شده است.



شکل (۳) دو حالت بارگذاری اعمال شده به المان حجمی نماینده مربعی که برای تخمین خواص نانو کامپوزیت بکار برده شده است. (الف) کشش محوری ΔL (ب) بار گذاری عرضی یکنواخت p.

المان حجمی نماینده مربعی تحت کشش -1-1 محوری ΔL

در این نوع بارگذاری طبق شکل (۳ الف) مولفههای تنش و کرنش در صفحه عرضی بهصورت رابطه شماره (۲) هستند.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\Delta a}{a} \qquad \varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L}$$
 (Y)

که ∆a تغییر اندازه اضلاع سطح مقطع المان حجمی نماینده تحت کشش است. با انتگرال گیری و میانگین گرفتن از سومین معادله از مجموعه معادلات شماره (۱) در صفحه ۲ / z=L می توان Ez را از رابطه شماره (۳) بهدست آورد.

$$E_z = \frac{\sigma_{ave}}{\varepsilon_z} = \frac{L}{\Delta L} \sigma_{ave} \tag{(4)}$$

با توجه به اینکه مقدار σ_z در راستای محور z متغیر است یک مقدار میانگین به صورت رابطه شماره (۴) برای آن تعریف می کنیم.

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{A} \int_{A} \sigma_z(x, y, L/r) dx dy \qquad (r$$

که در این رابطه A مساحت سطح مقطع انتهای المان حجمی نماینده میباشد (این تذکر برای المان حجمی نماینده مربوط به الیاف کوتاه میباشد که در آنها سطح مقطع در راستای محور z یکنواخت نیست). مقدار σ_{ave} از نتایج شبیه سازی اجزا محدود بهدست آمده است.

با استفاده از اولین (یا دومین) معادله از مجموعه معادلات (۱) و با جایگذاری σ_z/E_z از رابطه (۳) رابطه (۵) بهدست میآید. در نتیجه ضریب پواسون از رابطه (۶) بهدست میآید:

$$\varepsilon_x = -\frac{v_{zx}}{E_z}\sigma_z = -v_{zx}\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta a}{a}$$
(δ)

$$v_{zx} = -\left(\frac{\Delta a}{a}\right) / \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \tag{9}$$

 Δa مدول یانگ $E_z = v_{zy}$ و ضریب پو آسون $v_{zx} = v_{zy}$ با محاسبه σ_a و تنش میانگین σ_{ave} از نتایج المان محدود برای بار گذاری نشان داده شده در شکل (۳) حالت (الف) و جایگذاری آنها در معادلات (۳) و (۶) بهدست می آید [۶].

۲-۲- المان حجمی نماینده تحت بار گذاری عرضی یکنواخت

در این نوع بارگذاری طبق شکل (۳ ب)، المان حجمی نماینده مربعی تحت بارگذاری عرضی گسترده یکنواخت *q* (فشار منفی) بعنوان نمونه در جهت *y*، قرار می گیرد. المان حجمی نماینده در جهت *z* مقید شده است تا شرط کرنش صفحهای برقرار شده و شبیه سازی نیروهای اعمالی به المان حجمی نماینده بر اثر مواد اطراف آن انجام شود. به دلیل اینکه برای حالت کرنش صفحهای رابطه (۷) برقرار است رابطه تنش کرنش (۱) (برای مؤلفههای عمودی) به رابطه (۸)

$$\varepsilon_z = \circ$$
, $\sigma_z = v_{zx} (\sigma_x + \sigma_y)$ (V)

$$\begin{cases} \varepsilon_{x} \\ \varepsilon_{y} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{v}{E_{x}} - \frac{v_{zx}^{Y}}{E_{z}} & -\frac{v_{xy}}{E_{x}} - \frac{v_{zx}^{Y}}{E_{z}} \\ -\frac{v_{xy}}{E_{x}} - \frac{v_{zx}^{Y}}{E_{z}} & \frac{v}{E_{x}} - \frac{v_{zx}^{Y}}{E_{z}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x} \\ \sigma_{y} \end{bmatrix}$$
(A)

در مدل الاستیسته متناظر طبق شکل (۳– ب) برای یک نقطه روی سطوح جانبی، مؤلفههای نرمال تنش و کرنش مطابق رابطه (۹) هستند:

 $\sigma_{\rm X} = \circ$, $\sigma_{\rm y} = p$, $\varepsilon_{\rm x} = \frac{\Delta x}{a}$, $\varepsilon_{\rm y} = \frac{\Delta y}{a}$ (9) $\gamma_{\rm X} = 0$, $\sigma_{\rm y} = p$, $\varepsilon_{\rm x} = \frac{\Delta x}{a}$, $\varepsilon_{\rm y} = \frac{\Delta y}{a}$ (9) Δx to compare the set of Δx of Δx and Δx of λ is a compared of Δx of λ is a compared of λ of λ of λ is a compared of λ of λ of λ of λ is a compared of λ of λ of λ of λ of λ is a compared of λ of \lambda

$$\varepsilon_x = -(\frac{v_{xy}}{E_x} + \frac{v_{zx}^*}{E_z})p = \frac{\Delta x}{a} \tag{(1.)}$$

$$\varepsilon_y = \left(\frac{1}{E_x} - \frac{v_{zx}^{Y}}{E_z}\right)p = \frac{\Delta y}{a} \tag{11}$$

با حل این دو معادله می توان مدول یانگ و ضریب پو آسون را در جهت عرضی (صفحه xy شکل۲) مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) بهدست آورد.

$$E_x = E_y = \frac{1}{\frac{\Delta y}{pa} + \frac{v_{zx}^{\dagger}}{E_z}}$$
(1Y)

$$v_{xy} = -\left(\frac{\Delta x}{pa} + \frac{v_{zx}^{*}}{E_{z}}\right) / \left(\frac{\Delta y}{pa} + \frac{v_{zx}^{*}}{E_{z}}\right)$$
(11)

که دراین روابط $E_z e_x v_{zx}$ از معادلات (۳) و (۶) مربوط به حالت بار گذاری (الف) بهدست آمدهاند. هنگامی که تغییرات ابعاد Δx و Δy برای المان حجمی نماینده با استفاده از نتایج شبیه سازی اجزا محدود محاسبه شوند با استفاده از معادلات (۱۲) و (۱۳) به ترتیب می توان $E_y = E_x$ و v_{xy} را بهدست آورد.

۳- نمونه های عددی

در این قسمت رفتار کامپوزیتهای تقویت شده توسط نانولولههای کربنی، با استفاده از المان حجمی نماینده مربعی متشکل از نانولولههای کربنی تک جداره قرار گرفته در ماده ماتریس به روش اجزای محدود شبیه سازی شده است. با استفاده از روش اجزای محدود تغییر شکلها و تنشها ابتدا برای دو حالت بار گذاری (شکل۳) همان گونه که قبلاً توضیح داده شد محاسبه شدهاند. با استفاده ازنتایج به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود و معادلات (۳)، (۶) ،(۱۲) و (۱۳)

میتوان مدول یانگ و ضریب پواسون برای نانوکامپوزیت را محاسبه کرد.

در هر دو حالت المانهای مکعبی مرتبه دوم (CTDAR) برای مدلهای سه بعدی به کار رفته است. این المان مکعبی شکل دارای ۸ گره است، که هر گره دارای شش درجه آزادی است. توزیع تنش در این المان خطی است و از روش انتگرالگیری کاهش یافته استفاده می کند.

٤-شبیهسازی اجزا محدود نانولوله کربنی کوتاه قرار گرفته در المان حجمی نماینده مربعی

در این مثال یک المان حجمی نماینده مربعی در برگیرنده یک نانولوله کربنی کوتاه در یک ماتریس، مطابق شکل(۲) مورد مطالعه قرار گرفته است.

ابعاد به صورت زیر هستند: برای ماتریس طول L=۱۰۰ nm برای نانولولهی کربنی طول r_i =۴/۶۶ nm و شعاع خارجی r_o= ۵ nm مدول یانگ و ضریب پوآسون به کار برده شده برای نانولوله کربنی و ماتریس بهصورت زیر هستند:

جدول (۱) خواص ماتریس و نانولوله کربنی.

$$v_m = \cdot / * \qquad E_m = * / % GPa$$
ماتریس $v_t = \cdot / * \qquad E_t = 1 \cdots GPa$
نانولوله

با فرض پیوند کامل بین نانولوله و ماتریس، تماس بین آنها به صورت Tie در نظر گرفته شده است. به منظور شبیه سازی قیود اعمالی از سوی مواد اطراف به المان حجمی نماینده، تمام نقاط سطوح عرضی در جهت عمود بر سطح به مقداری مساوی حرکت کنند بنابراین درجات آزادی سطوح جانبی المان حجمی نماینده در جهت عمود بر سطح به یکدیگر المان حجمی نماینده در جهت عمود بر سطح به مقداری المان حجمی نماینده در جهت عمود بر مطح به مقداری نمایش اهدافی بر گزیده شدهاند که در گستره وسیع مقادیر گزارش شده در مراجع [۷–۱۳] قرار دارند.

سپس المان حجمی نماینده را تحت دو نوع بار گذاری نشان داده شده در شکل (۳) قرار داده تا بتوان مجهولات مورد نیاز σ_{ave} , Δa , σ_{ave}) در روابط را به دست آورد. که σ_{ave} ا و Δa ، σ_{ave}) و Δa از عر Δa ، Δa ، σ_{ave}) بارگذاری عرضی (شکل ۳–ب) به دست می آیند. با جایگذاری این پارامترهای به دست آمده از شبیه سازی اجزا محدود در معادلات (۳)، (۶)، (۱۲) و (۱۳) خواص مکانیکی ماده (E_x , E_z

٥- نتايج

توزیع تنشهای ون میزز در یک چهارم المان حجمی نماینده در شکل (۴) برای کشش محوری نشان داده شده است. همانطورکه در شکل مشاهده می شود نانولوله کربنی نقش اصلی تحمل بار اعمال شده را دارد. در این شکل برای نمایش اثر نسبت منظری نانولولهی کربنی نمای افقی المان حجمی نمونه نمایش داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود نانوکامپوزیت پایه پلیمری مشاهده می شود که افزودن نانولولهی کربنی به ماتریس پلیمری مدول محوری نانوکامپوزیت را افزایش و مدول عرضی آن را بدلیل توخالی بودن و ضخامت بسیار کم کاهش می دهد.

با توجه به جدول (۲) و شکل (۵) مشاهده می شود که نسبت مدول محوری نانو کامپوزیت به مدول ماتریس با افزایش نسبت منظری افزایش می یابد. بطوریکه با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت منظری نسبت مدول طولی نانو کامپوزیت به مدول ماتریس ۸۰/۷ درصد افزایش پیدا می کند، که نشان می دهد نسبت منظری یکی از عواملی است که تأثیر زیادی روی مدول یانگ نانو کامپوزیت در جهت طولی دارد.

لدول (۲) خواص نانو کامپوزیت.

v_{xy}	v_{xz}	E_x/E_m	E_z/E_m	نسبت منظرى
•/747	•/444	•/ ٩ ۶٧	١/٣۶٨	۴
•/144	•/404	•/900	1/018	۵
•/٣٣٧	•/491	•/934	1/893	6
•/٣٣١	•/47•	٠/٩٠٨	1/477	٧
•/***	•/479	•/٨٨١	۲/۱۲.	٨
•/114	•/۴۸۲	•//06	2/402	٩



شکل(۴) توزیع تنشهای ون میزز دریک چهارم المان حجمی نماینده برای کشش محوری (تنشها بر حسب ۲/nm^۴ هستند).

با توجه به شکل (۶) نیز مشاهده می شود با افزایش نسبت منظری نانولوله نسبت مدول عرضی نانوکامپوزیت به مدول ماتریس کاهش مییابد. به طوری که افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت منظری منجر به کاهش ۱۱/۵ درصدی نسبت مدول عرضی به مدول ماتریس می شود. این کاهش به دلیل آن است

که قطر نانولوله ثابت است، لذا با افزایش نسبت منظری طول افزایش مییابد و چون نانولوله توخالی و دارای ضخامت بسیار کمی است موجب تضعیف نانوکامپوزیت در جهت عرضی میشود. همانطور که مشاهده میشود نسبت منظری نانولولهی کربنی تأثیر بسیار کمتری روی مدول یانگ نانوکامپوزیت در جهت عرضی نسبت به جهت طولی داشته است.



در شکل (۷) تغییرات نسبت پواسون در صفحهی xz را بر حسب تغییرات نسبت منظری ترسیم شده است. با توجه به شکل (۷) مشاهده می شود که با افزایش نسبت منظری نانولوله نسبت پواسون در صفحهی xz افزایش می یابد. بطوریکه با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت پواسون نانوکامپوزیت در صفحهی ۸/۸، zx درصد افزایش پیدا می کند.

در شکل (۸) تغییرات نسبت پوآسون در صفحهی xy را بر حسب تغییرات نسبت منظری ترسیم شده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده میشود که با افزایش نسبت منظری نانولوله، نسبت پواسون در صفحهی xy کاهش مییابد. بهطوری که با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت پواسون نانو کامپوزیت در صفحه xy، ۱۳/۳۶ درصد کاهش پیدا می کند.



۲- نتیجه گیری
با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود نانو کامپوزیت پایه پلیمری مشاهده می شود که افزودن نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری مدول محوری نانو کامپوزیت را افزایش و مدول عرضی آن را کاهش می دهد. همچنین افزایش نسبت منظری نانولوله یکربنی باعث افزایش مدول یانگ نانو کامپوزیت در جهت الیاف و کاهش مدول یانگ در جهت عرضی می شود. به طوریکه افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت منظری باعث افزایش ۲۰/۷ درصدی نسبت مدول محوری نانو کامپوزیت به مدول ماتریس و کاهش ۱۱/۵ درصدی نسبت مدول عرضی نانو کامپوزیت به مدول ماتریس می شود.

فهرست علائم

Ε	ىدول يانك
ν	سبت پواسون
σ	ننش
σ_{ave}	ننش میانگین
ΔL	نغيير طول

www.SID.ir

Р

Е

- [9] Gao G.H., Cagin T., Goddard W.A., Energetic, structure, mechanical and vibrational properties of single-walled carbon nanotubes, *Nanotechnology*, 9, 1998, pp. 187-191.
- [10] Nardelli M.B., Fattebert J.L., Mechanical properties, defects and electronic behavior of carbon nanotubes, Carbon, 38, 2000, pp. 1703-1711.
- [11] Wong E.W., Sheehan P.E., Lieber C.M., Nanobeam mechanics: Elasticity, strength and toughness of nanorods and nanotubes, *Science*, 227, 1997, pp. 1971-1975.
- [12] Ruoff R., Lorents D.C., Mechanical and thermal properties of carbon nanotubes, *Carbon*, 33, 1995, pp. 925-930.
- [13] Salvetat J.P., Bonard J.M., Thomson N.H., Kulik A.J., Mechanical properties of carbon nanotubes, *Applied Physics A-Materials Science and Processing*, 69, 1999, pp. 225-260.

$$\Delta x$$
 تغيير طول ضلع RVE در راستاى x

تغيير طول ضلع RVE در راستاي y در ملع کم

۸- مراجع

- Iijima S., Helical Microtubes of Graphitic Carbon, *Nature* (London), 354, 1991, pp. 56-58.
- [2] Liu Y., Nishimura N., d Otani Y., Large-scale modeling of carbon-nanotube composites by a fast multiple boundary element method, *Computational Materials Science*, 34, 2005, pp. 173-187.
- [3] Thostenson E.T., Chunyu L., Chou T.W., Nanocomposites in context, *Composites science* and *Technology*, 65, 2004, pp. 491-516.
- [4] Golestanian H., Shojaie M., Numerical characterization of VNT-based polymer composites considering interface, *Computational Material Science*, 50, 2010, pp. 731-736.
- [5] Matin Ghahfarokhi Z., Golestanian H., Effects of nanotube helical angle on mechanical properties of carbon nanotube reinforced polymer composites, *Computational Material Science*, 50, 2011, pp. 3171–3177.
- [6] Liu J., Chen X.I., Evaluation of the effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element, *Mechanics of Materials*, 35, 2003, pp. 69-81.
- [7] Florian H.G., Wichmann M., Fiedler B., Schulte K., Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, *Composite Science and technology*, 65, 2005, pp. 2300–2313.
- [8] Cornwell C.F., Wille L.T., Elastic Properties of single-walled carbon nanotubes in compression, *Solid State Communication*, 101, 1997, pp. 555-558.