

## بررسی اثر نسبت منظری نانولوله‌های کربنی روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلیمری

محمد هاشمی گهروئی<sup>۱</sup>، حسین گلستانیان<sup>۲\*</sup>، مهدی سلمانی تهرانی<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: [golestanian@eng.sku.ac.ir](mailto:golestanian@eng.sku.ac.ir)

### واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت، نانولوله کربنی، نسبت منظری، تحلیل اجزای محدود، خواص مکانیکی مؤثر.

### چکیده

در این مقاله خواص مکانیکی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی با استفاده از المان حجمی نماینده‌ی مربعی بر اساس مکانیک محیط پیوسته و روش المان محدود به دست آمده است. برای این کار ابتدا با استفاده از تئوری الاستیسیته روابط لازم برای به دست آوردن خواص مؤثر نانوکامپوزیت از حل المان حجمی نماینده تحت دو نوع بارگذاری استخراج شده است. سپس اثرات نسبت منظری نانولوله‌ی کربنی بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت منظری نانولوله کربنی باعث افزایش مدول یانگ و کاهش مدول یانگ در جهت عرضی می‌شود. همچنین افزایش نسبت منظری نانولوله کربنی باعث افزایش نسبت پواسون در صفحه‌ی  $xz$  و کاهش نسبت پواسون در صفحه‌ی  $xy$  می‌شود.

۱- کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

## ۱- مقدمه

مواد نانو ساختار، نانوفاز یا نانو کریستال به موادی گفته می‌شود که اندازه آنها حداقل در یک بعد کمتر از  $100\text{ nm}$  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 دهه پیش کشف شدند. نانولوله‌های کربنی با مورفولوژی‌های گوناگونی مانند نانولوله‌های مستقیم، موج، فنرگونه و شاخه‌دار پیش بینی، مشاهده و تولید شده‌اند [۱].

وقتی ماتریس پلیمری با نانولوله‌های کربنی تقویت شود به دلیل ویژگی‌های حائز اهمیت نانولوله‌ها مانند اندازه بسیار کوچک، حالت رسانایی و نیمه رسانایی آنها بر حسب شکل هندسی‌شان، 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 می‌شود.

ویژگی‌های منحصر به فرد نانولوله‌های 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 می‌یابد که این نکته در بالا بردن و اصلاح خواص مکانیکی نانو کامپوزیت حاصل مؤثر است.

برای تعیین خواص نانولوله‌ها تحقیقات بسیاری انجام شده است. از جمله آنها می‌توان به تحقیقات لیو اشاره کرد در این تحقیقات مدول یانگ نانولوله  $1\text{ TPa}$ ، مدول برشی  $0/45\text{ TPa}$  و مدول بالک  $0/74\text{ TPa}$  به دست آمده است [۲].

به‌طور کلی از دو روش دینامیک مولکولی و مکانیک محیط‌های پیوسته برای شبیه‌سازی نانو کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. روش دینامیک مولکولی برای مطالعه نانو کامپوزیت‌ها 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 محدودیت‌های موجود در توان محاسباتی محدود شده است. به عنوان نمونه توستنسن، چانیو و چو با توجه به شبیه‌سازی دینامیک مولکولی اظهار داشته‌اند که مدول یانگ نانولوله‌ها به زاویه‌ی پیچش

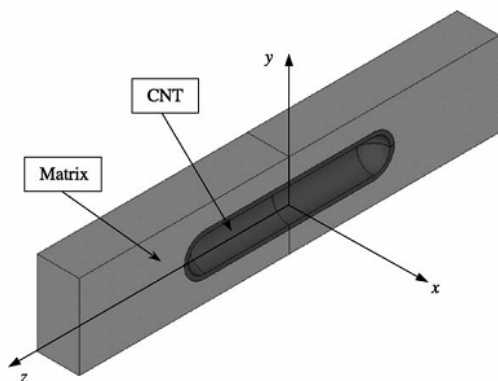
ورق گرافیتی که برای تولید نانولوله استفاده شده بستگی دارد. زمانی که این زاویه کم است مدول یانگ افزایش می‌یابد. در این مقاله قطر نانولوله‌های طنابی  $7\text{ }\mu\text{m}$  میکرومتر بیان شده و اهمیت نسبت حجم مواد تقویت کننده آشکار شد و آنها در تحقیقات خود دریافتند که با افزایش چشمگیر در سطح تماس بین نانولوله‌های ساده و ماتریس، ویژگی‌های کامپوزیت بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های سطح مشترک بین ماتریس و نانولوله‌ها قرار می‌گیرد. همچنین از روش شبیه‌سازی برای نانولوله‌های طنابی استفاده کردند که این روش بر سه گام اصلی زیر استوار بود. ۱- تعدادی نانولوله‌ی تک دیواره با زاویه هلیکال  $10^\circ$  درجه در نظر گرفته شد. ۲- مجموع این نانولوله‌ها مکانیزم انتقال بار را ایجاد می‌کرد. ۳- دسته نانولوله‌ها با ماتریس پلیمری احاطه شده و کامپوزیت حاصل شامل  $54/6\%$  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 فشر در نظر گرفتند [۴].

یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی شکل نانولوله است. در مطالعه صورت گرفته توسط متین و گلستانیان مشخص شد نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌ی صاف خواص مکانیکی بهتری نسبت به نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های هلیکال شکل دارند. همچنین در این تحقیق آنها اثر زاویه‌ی هلیکال را بر روی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی هلیکال نانولوله مدول محوری نانو کامپوزیت کاهش می‌یابد [۵].

در مطالعات صورت گرفته بر مبنای نظریه مکانیک محیط‌های پیوسته نانولوله‌های کربنی به صورت مواد هموزن و ایزوتروپیک با استفاده از مدل‌های پیوسته تیر، پوسته و همچنین مدل‌های سه بعدی در بررسی تغییر شکل، کماتش و

الاستیسیته متناظر با المان حجمی نماینده مکعب مستطیلی به ارتفاع  $L$  و مساحت سطح  $2a \times 2a$  مقطع شکل (۳) می‌باشد.



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

پاسخ‌های الاستیسیته می‌توانند تحت شرایط بارگذاری معینی به‌دست آیند. مدل الاستیسیته با یک ماده ایزوتروپیک عرضی که دارای ۵ ثابت مستقل است پر شده است. چهار ثابت مؤثر ماده (مدول یانگ  $E_x$  و  $E_z$  و نسبت‌های پواسون  $\nu_{zx}$  و  $\nu_{xy}$  مربوط به مولفه‌های نرمال تنش و کرنش) طبق مراحل که در ادامه خواهد آمد تعیین می‌شوند، جهت محور مختصات مطابق شکل (۲) است. پنجمین ثابت مستقل ماده که همان مدول برشی ( $G_{zx}=G_{zy}$ ) است که می‌تواند با استفاده از یک حالت بارگذاری پیچشی ساده به‌دست آید که در این جا به آن پرداخته نشده است [۶].

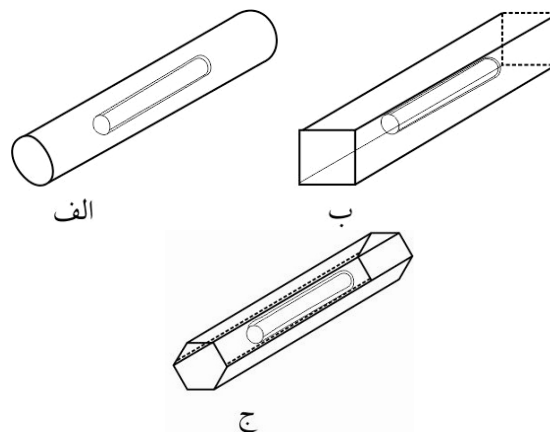
رابطه کلی تنش و کرنش در حالت سه بعدی برای تنش‌های نرمال  $\sigma_x$ ،  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  و کرنش‌های نرمال  $\epsilon_x$ ،  $\epsilon_y$  و  $\epsilon_z$  برای ماده‌ای که به‌صورت عرضی متقارن است به شکل رابطه (۱) است.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & \frac{1}{E_z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

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

پاسخ مکانیکی نانولوله‌های کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص مواد مانند مدول یانگ، ضریب پواسون و مودهای کمانش با استفاده از نظریه محیط‌های پیوسته با موفقیت پیش‌بینی شده است [۶].

پیشنهاد شده است بجای استفاده از مدل‌های تیر یا پوسته از مدل‌های سه بعدی الاستیسیته برای شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی قرار گرفته در ماتریس استفاده شود. یک روش بر مبنای تئوری الاستیسیته برای تخمین خواص نانوکامپوزیت 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 بارگذاری استخراج شده است.



شکل (۱) سه نوع المان حجمی نماینده قابل استفاده برای بررسی نانوکامپوزیت (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

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{A} \int_A \sigma_z(x, y, L/2) dx dy \quad (4)$$

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

با استفاده از اولین (یا دومین) معادله از مجموعه معادلات (۱) و با جایگذاری  $\sigma_z/E_z$  از رابطه (۳) رابطه (۵) به دست می‌آید.

در نتیجه ضریب پواسون از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_x = -\frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z = -\nu_{zx} \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta a}{a} \quad (5)$$

$$\nu_{zx} = -\left(\frac{\Delta a}{a}\right) / \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (6)$$

مدول یانگ  $E_z$  و ضریب پواسون  $\nu_{zx} = \nu_{zy}$  با محاسبه  $\Delta a$  و تنش میانگین  $\sigma_{ave}$  از نتایج المان محدود برای بارگذاری نشان داده شده در شکل (۳) حالت (الف) و جایگذاری آنها در معادلات (۳) و (۶) به دست می‌آید [۶].

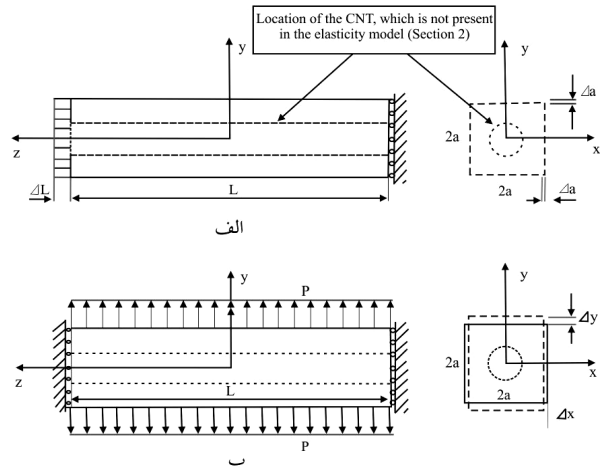
### ۲-۲- المان حجمی نماینده تحت بارگذاری عرضی یکنواخت

در این نوع بارگذاری طبق شکل (۳) ب، المان حجمی نماینده مربعی تحت بارگذاری عرضی گسترده یکنواخت  $p$  (فشار منفی) بعنوان نمونه در جهت  $y$  قرار می‌گیرد. 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) تبدیل می‌شود.

$$\varepsilon_z = 0, \quad \sigma_z = \nu_{zx}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} & \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} \quad (8)$$

است (بعنوان مقایسه المان حجمی نماینده‌های استوانه‌ای به سه حالت بارگذاری نیاز دارند). این دو حالت بارگذاری در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود ابتدا المان حجمی نماینده تحت بارگذاری محوری قرار گرفته (شکل ۳ قسمت الف) و تغییر اندازه اضلاع سطح مقطع  $\Delta a$  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 نانوکامپوزیت بکار برده شده است. (الف) کشش محوری  $\Delta L$  بارگذاری عرضی یکنواخت  $p$ .

### ۲-۱- المان حجمی نماینده مربعی تحت کشش محوری $\Delta L$

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

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\Delta a}{a} \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

که  $\Delta a$  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  $z=L/2$  می‌توان  $E_z$  را از رابطه شماره (۳) به دست آورد.

$$E_z = \frac{\sigma_{ave}}{\varepsilon_z} = \frac{L}{\Delta L} \sigma_{ave} \quad (3)$$

با توجه به اینکه مقدار  $\sigma_z$  در راستای محور  $z$  متغیر است یک مقدار میانگین به صورت رابطه شماره (۴) برای آن تعریف می‌کنیم.

می توان مدول یانگ و ضریب پواسون برای نانوکامپوزیت را محاسبه کرد.

در هر دو حالت المانهای مکعبی مرتبه دوم (CDAR) برای مدل های 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 انتگرال گیری کاهش یافته استفاده می کند.

#### ۴- شبیه سازی 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  $L=100 \text{ nm}$  برای نانولوله ی کربنی طول  $r_i=4/66 \text{ nm}$  و شعاع خارجی  $r_o=5 \text{ nm}$  مدول یانگ و ضریب پواسون به کار برده شده برای نانولوله کربنی و ماتریس به صورت زیر هستند:

جدول (۱) خواص ماتریس و نانولوله کربنی.

$\nu_m = 0.3$	$E_m = 2/6 \text{ GPa}$	ماتریس
$\nu_l = 0.3$	$E_l = 1000 \text{ GPa}$	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 کوپل شده اند. در تمامی مدل ها درصد حجمی نانولوله کربنی ۱/۳۹ درصد است. مقادیر ابعاد و خواص ماده فقط به منظور نمایش اهدافی برگزیده شده اند که در گستره وسیع مقادیر گزارش شده در مراجع [۷-۱۳] قرار دارند.

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

$$\sigma_x = 0, \quad \sigma_y = p, \quad \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{a}, \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta y}{a} \quad (9)$$

که در این رابطه  $\Delta x$  و  $\Delta y$  تغییرات ابعاد در جهات  $x$  و  $y$  متناظر با این حالت بارگذاری هستند. با به کار بردن اولین و دومین معادله از معادلات (۸) روابط شماره (۱۰) و (۱۱) به دست می آیند.

$$\varepsilon_x = -\left(\frac{\nu_{xy}}{E_x} + \frac{\nu_{zx}^2}{E_z}\right)p = \frac{\Delta x}{a} \quad (10)$$

$$\varepsilon_y = \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z}\right)p = \frac{\Delta y}{a} \quad (11)$$

با حل این دو معادله می توان مدول یانگ و ضریب پواسون را در جهت عرضی (صفحه  $xy$  شکل ۲) مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) به دست آورد.

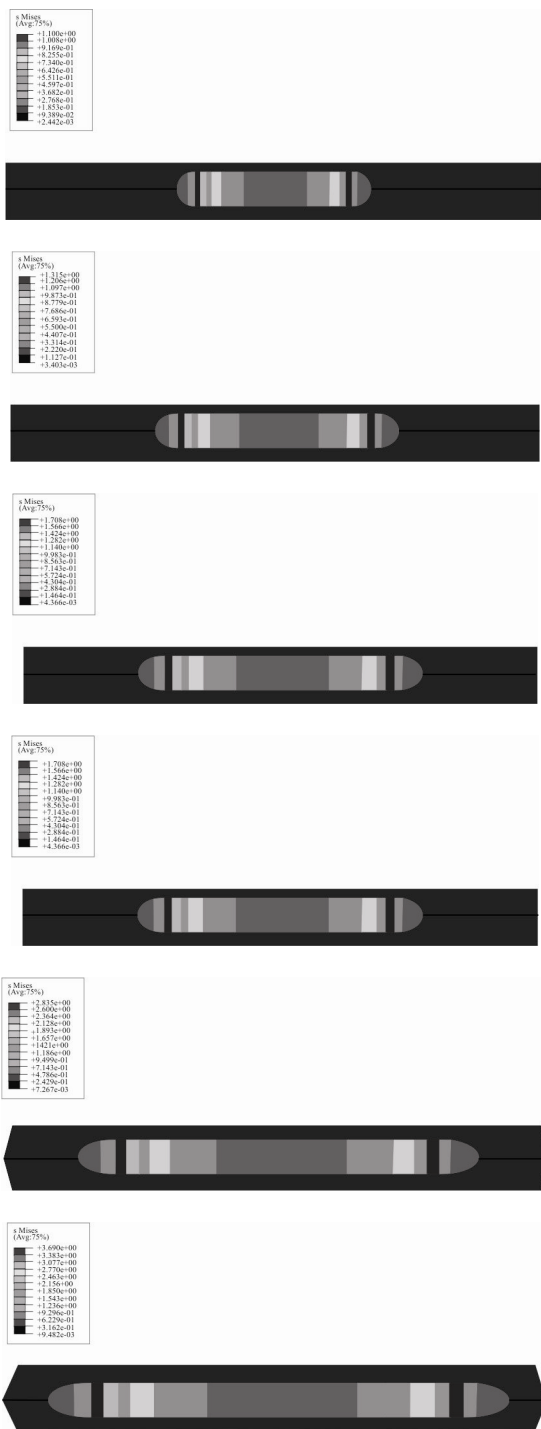
$$E_x = E_y = \frac{1}{\frac{\Delta y}{pa} + \frac{\nu_{zx}^2}{E_z}} \quad (12)$$

$$\nu_{xy} = -\left(\frac{\Delta x}{pa} + \frac{\nu_{zx}^2}{E_z}\right) / \left(\frac{\Delta y}{pa} + \frac{\nu_{zx}^2}{E_z}\right) \quad (13)$$

که در این روابط  $E_z$  و  $\nu_{zx}$  از معادلات (۳) و (۶) مربوط به حالت بار گذاری (الف) به دست آمده اند. هنگامی که تغییرات ابعاد  $\Delta x$  و  $\Delta y$  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  $\nu_{xy}$  را به دست آورد.

### ۳- نمونه های عددی

در این قسمت رفتار کامپوزیت های تقویت شده توسط نانولوله های کربنی، با استفاده از المان حجمی نماینده مربعی متشکل از نانولوله های کربنی تک جداره قرار گرفته در ماده ماتریس به روش اجزای محدود شبیه سازی شده است. با استفاده از روش اجزای محدود تغییر شکل ها و تنش ها ابتدا برای دو حالت بار گذاری (شکل ۳) همان گونه که قبلاً توضیح داده شد محاسبه شده اند. با استفاده از نتایج به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود و معادلات (۳)، (۶)، (۱۲) و (۱۳)



شکل (۴) توزیع تنش‌های ون میز در یک چهارم المان حجمی نماینده برای کشش محوری (تنش‌ها بر حسب  $N/mm^2$  هستند).

با توجه به شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود 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 می‌شود. این کاهش به دلیل آن است

سپس المان حجمی نماینده را تحت دو نوع بار گذاری نشان داده شده در شکل (۳) قرار داده تا بتوان مجهولات مورد نیاز  $(\Delta a, \Delta x, \Delta y, \sigma_{ave})$  در روابط را به دست آورد. که  $\sigma_{ave}$  از  $\Delta a$  از بارگذاری طولی (شکل ۳-الف) و  $\Delta x$  و  $\Delta y$  از بارگذاری عرضی (شکل ۳-ب) به دست می‌آیند. با جایگذاری این پارامترهای به دست آمده از شبیه سازی اجزا محدود در معادلات (۳)، (۶)، (۱۲) و (۱۳) خواص مکانیکی ماده  $(E_x, E_z, E_y, \nu_{xz}, \nu_{xy})$  استخراج می‌شود.

## ۵- نتایج

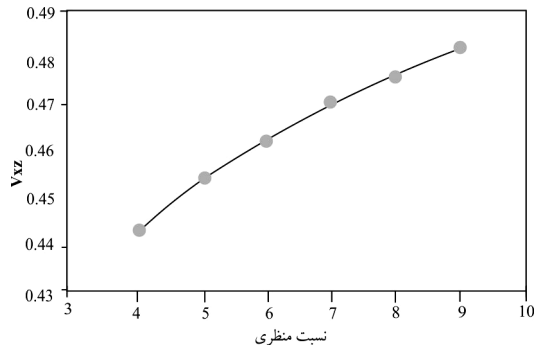
توزیع تنش‌های ون میز در یک چهارم المان حجمی نماینده در شکل (۴) برای کشش محوری نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نانولوله کربنی نقش اصلی تحمل بار اعمال شده را دارد. در این شکل برای نمایش اثر نسبت منظری نانولوله‌ی کربنی نمای افقی المان حجمی نمونه نمایش داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی اجزای محدود نانوکامپوزیت پایه پلیمری مشاهده می‌شود 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 می‌دهد.

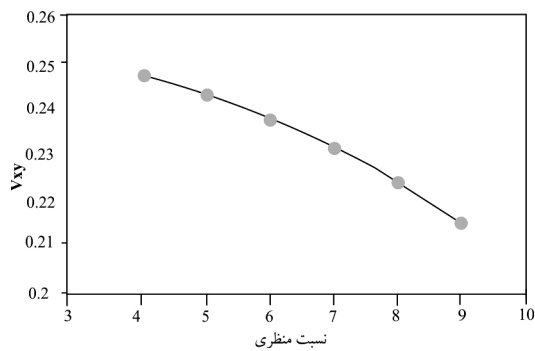
با توجه به جدول (۲) و شکل (۵) مشاهده می‌شود که نسبت مدول محوری نانوکامپوزیت به مدول ماتریس با افزایش نسبت منظری افزایش می‌یابد. بطوریکه با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت منظری نسبت مدول طولی نانوکامپوزیت به مدول ماتریس ۸۰/۷ درصد افزایش پیدا می‌کند، که نشان می‌دهد نسبت منظری یکی از عواملی است که تأثیر زیادی روی مدول یانگ نانوکامپوزیت در جهت طولی دارد.

جدول (۲) خواص نانوکامپوزیت.

نسبت منظری	$E_x/E_m$	$E_z/E_m$	$\nu_{xz}$	$\nu_{xy}$
۴	۰/۹۶۷	۱/۳۶۸	۰/۴۴۳	۰/۲۴۷
۵	۰/۹۵۵	۱/۵۱۳	۰/۴۵۴	۰/۲۴۳
۶	۰/۹۳۲	۱/۶۶۳	۰/۴۶۲	۰/۲۳۷
۷	۰/۹۰۸	۱/۸۷۷	۰/۴۷۰	۰/۲۳۱
۸	۰/۸۸۱	۲/۱۲۰	۰/۴۷۶	۰/۲۲۳
۹	۰/۸۵۶	۲/۴۷۲	۰/۴۸۲	۰/۲۱۴



شکل (۷) نسبت پواسون نانو کامپوزیت،  $v_{zx}$  بر حسب نسبت منظری.



شکل (۸) نسبت پواسون نانو کامپوزیت،  $v_{xy}$  بر حسب نسبت منظری.

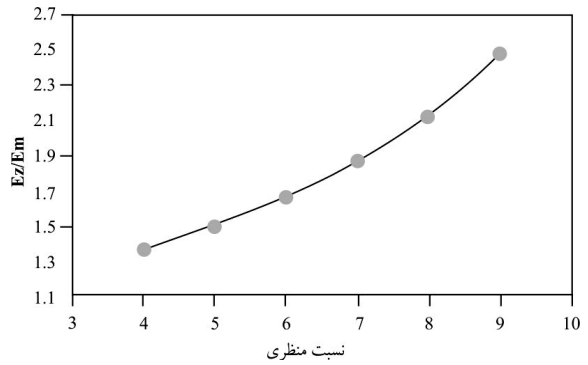
## ۶- نتیجه گیری

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 ی کربنی 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 ۸۰/۷ درصدی نسبت مدول محوری نانو کامپوزیت به مدول ماتریس و کاهش ۱۱/۵ درصدی نسبت مدول عرضی نانو کامپوزیت به مدول ماتریس می شود.

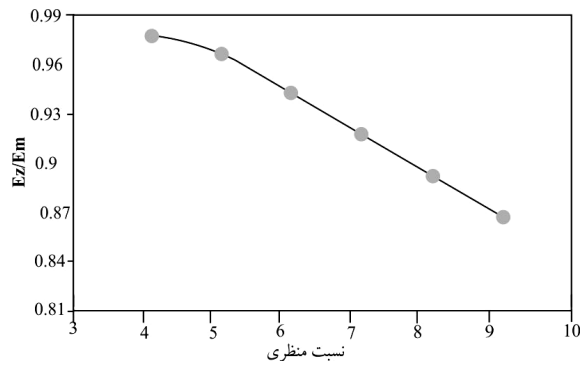
## فهرست علائم

$E$	مدول یانگ
$\nu$	نسبت پواسون
$\sigma$	تنش
$\sigma_{ave}$	تنش میانگین
$\Delta L$	تغییر طول

که قطر نانولوله ثابت است، لذا با افزایش نسبت منظری طول افزایش می یابد و چون نانولوله توخالی و دارای ضخامت بسیار کمی است موجب تضعیف نانو کامپوزیت در جهت عرضی می شود. همانطور که مشاهده می شود نسبت منظری نانولوله ی کربنی تأثیر بسیار کمتری روی مدول یانگ نانو کامپوزیت در جهت عرضی نسبت به جهت طولی داشته است.



شکل (۵) نسبت مدول محوری نانو کامپوزیت به مدول ماتریس بر حسب نسبت منظری.



شکل (۶) نسبت مدول عرضی نانو کامپوزیت به مدول ماتریس بر حسب نسبت منظری.

در شکل (۷) تغییرات نسبت پواسون در صفحه ی  $xz$  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 صفحه ی  $xz$  افزایش می یابد. بطوریکه با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت پواسون نانو کامپوزیت در صفحه ی  $zx$ ، ۸/۸ درصد افزایش پیدا می کند.

در شکل (۸) تغییرات نسبت پواسون در صفحه ی  $xy$  را بر حسب تغییرات نسبت منظری ترسیم شده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده می شود که با افزایش نسبت منظری نانولوله، نسبت پواسون در صفحه ی  $xy$  کاهش می یابد. به طوری که با افزایش ۱۲۵ درصدی نسبت پواسون نانو کامپوزیت در صفحه  $xy$ ، ۱۳/۳۶ درصد کاهش پیدا می کند.

- [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., Fattbert 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] Salvat 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.

$P$	فشار
$A$	سطح انتهایی المان مربعی
$\varepsilon$	کرنش
$\Delta x$	تغییر طول ضلع $RVE$ در راستای $x$
$\Delta y$	تغییر طول ضلع $RVE$ در راستای $y$

#### ۸- مراجع

- [1] 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.