

تحلیل عملکرد نانوکامپوزیت‌ها در المان‌های سازه‌های دریایی

رباب انبارکی^۱، سعید جامعی^{۲*}، حسین اسکندری^۳، سمیه حاتمی^۴، امیر زمانی^۵

۱- فوق لیسانس، گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خورموج، دانشگاه آزاد اسلامی، خورموج، ایران

۵- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

با توجه به کاربردهای سازه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری و نیاز روز افزون بر افزایش بیشتر استحکام و سفتی این نوع کامپوزیت‌ها، همچنین به علت وجود خواص منحصر به فرد نانولوله‌های کربن (CNTs)، به بررسی امکان استفاده از نانولوله‌های کربن، به‌عنوان تقویت‌کننده اضافه در یک کامپوزیت پلیمری پرداخته شده است. در این تحقیق، المان حجمی معرف (RVE) در درصدها و اندازه‌های مختلف نانولوله کربنی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. ابتدا روابط تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار الاستیک یک المان حجمی معرف ارائه می‌شود؛ سپس با مدل‌سازی المان در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس (ABAQUS) رفتار مکانیکی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی و استخراج خواص مکانیکی الاستیک نانوکامپوزیت پلیمری با زمینه رزین اپوکسی همراه با الیاف کربن و شیشه به‌عنوان تقویت‌کننده نخست و نانولوله کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده دوم است. بارگذاری محوری و خمشی به‌صورت جابه‌جایی و دوران واحد، به المان اعمال می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که سختی محوری و خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و ۵٪ نانولوله کربن (به ازای شعاع داخلی ۲nm) به ترتیب به میزان ۸۳/۸٪ و ۲۴۴/۹٪ افزایش می‌یابد در حالیکه این مقادیر برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و با شرایط یکسان، به ترتیب ۱۷،۵٪ و ۵۵٪ می‌باشد. از طرف دیگر، افزایش ضخامت نانولوله کربن (کاهش r_1) باعث افزایش قابل توجهی در مقادیر مقاومت محوری و خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و کربن می‌شود.

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۳/۳۰

نانوکامپوزیت، المان سازه‌های دریایی، نانوفناوری، روش اجزاء محدود، نانولوله کربن

واژگان کلیدی

Performance Analysis of Nano Composites in Marine Structural Elements

R. Anbaraki¹, S. Jamei^{2*}, H. Eskandari³, S. Hatami⁴, A. Zamani⁵

1- M.Sc., Department of Marine Engineering, Persian Gulf University, Boushehr, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Persian Gulf University, Boushehr, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Persian Gulf University, Boushehr, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Khormuj Branch, Islamic Azad University, Boushehr, Iran

5- M.Sc., Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Boushehr, Iran

Abstract

Considering the structural applications of polymer composites and the increasing demand for greater strength and stiffness of these types of composites, also due to the unique properties of Carbon Nano Tubes (CNTs), the possibility of using Carbon nanotubes as an additional reinforcement in a polymer composite have been investigated. In this research, the representative volume element (RVE) is studied in different percentages and sizes of Carbon nanotubes. First, the analytical equations for predicting the elastic behavior of a representative volume element are presented, then the mechanical behavior of element is investigated by modeling the element in ABAQUS finite element software. The main objective of this research is to model and extract the elastic mechanical properties of polymer nanocomposite with epoxy resin underlay with carbon and glass fiber as the first reinforcement and carbon nanotube as the second reinforcement. Axial and bending loading is applied to the element as a displacement and single rotation. The results show that the axial and flexural stiffness of glass fiber-reinforced composite with 5 percent carbon nanotubes (inner radius=2nm) increase by 83.8% and 244.9%, respectively, while those for carbon fiber-reinforced composite and with the same conditions, it is 17.5% and 54.9%, respectively. On the other hand, increasing the thickness of carbon nanotubes by 1.5 nm causes a significant increase in the axial and flexural strength values of the composite reinforced with glass and carbon fibers.

Keywords

Nanocomposite, Marine Structural Element, Nanotechnology, Finite element method, Carbon nanotube

۱- مقدمه

حرکت شتابان و رو به رشد بکارگیری دانش نانو تکنولوژی در دنیای امروز دریچه‌ی بزرگی از شاخه‌های علمی را روبروی محققین و دانشمندان گشوده است. تا سال ۱۹۸۰ سه آلوتروپ کربن (کربن غیر بلوری) به نام‌های الماس، گرافیت و کربن بی شکل شناخته شده بودند. اما امروزه خانواده کاملی از سایر اشکال کربن نیز وجود دارد. اولین آلوتروپ کربن که در سال ۱۹۸۵ کشف شد، فولرین باکمینستر که به نام‌های دیگر باکی بال و فلورن نیز نامیده شده است. فلورن‌ها مولکول‌های کروی کربن هستند که به سبب شکل و خواص منحصر به فردشان توجه محققین را به خود جلب کرده‌اند. آلوتروپ دیگر خانواده کربن که در ۱۹۹۱ کشف شد نانولوله نام دارد [۱]. در یک نانولوله‌ی کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای شکل آرایش یافته‌اند. ساختار مولکولی انواع آلوتروپ‌های کربن در شکل ۱ به نمایش درآمده است.

نانولوله‌های کربن به‌عنوان تقویت‌کننده در مقیاس نانو در کامپوزیت‌های جدید به دلیل خواص مکانیکی شگرفشان در حال گسترش‌اند. CNT ها در مقایسه با الیاف کربن متداول به‌عنوان تقویت‌کننده، به مقدار قابل توجهی سفتی و استحکام کامپوزیت‌ها را بالا می‌برند.

نانولوله‌های کربنی استوانه‌های بلند و لاغری از جنس کربن هستند که در سال ۱۹۹۱ هنگام تولید دوده به‌وسیله قوس الکتریکی توسط ایجیما به دنیا معرفی شد [۱].

در گذشته، پیشنهاد‌های زیادی برای فهم خواص مواد کامپوزیتی بیان شده است. روش‌های محاسباتی می‌توانند قوانین مهمی برای ویژگی‌های نانولوله‌ها نمایش دهند. مشکلات بررسی نانولوله‌ها به روش تجربی باعث روی آوردن محققان به روش‌های تئوری جهت شناسایی خواص نانولوله‌ها شده است.

از میان روش‌های مدل‌سازی در دسترس، روش دینامیک مولکولی که بر پایه روش‌های نیرویی و انرژی پتانسیل بین اتمی در نانولوله‌ها در حالت ماکروسکوپی است به‌طور گسترده‌تری استفاده شده است. در این روش، پتانسیل‌های پیوندی و غیر پیوندی به‌صورت ترم‌هایی از نیروهای ثابت و فاصله متغیر بین پیوندهای اتمی در نظر گرفته می‌شود و سپس مدول الاستیک با اعمال کرنش‌های کوچک محاسبه می‌شود.

با این وجود، محاسبات سنگین این روش برای همگرایی مورد نیاز در دینامیک مولکولی، اندازه نانولوله را محدود می‌کند. از این رو است که شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در مقیاس کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی که مکانیک محیط پیوسته نوعی روش برای مدل‌سازی مقیاس بزرگ نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این روش نانولوله می‌تواند به‌عنوان یک تیر صلب یا پوسته‌ای پیوسته

تحت کشش، خمش یا پیچش قرار گیرد [۲].

در مقیاس نانو، حل مدل‌های تحلیلی کار خسته‌کننده‌ای است و همچنین تست‌های آزمایشگاهی برای مطالعات خیلی گران هستند. لذا مدل‌سازی و شبیه‌سازی نانو کامپوزیت‌ها با استفاده از کامپیوتر و روش‌های محاسباتی کامپیوتری می‌تواند با ارزش باشد که این‌ها نقش قابل توجهی در NRP ها به نمایش می‌گذارد.

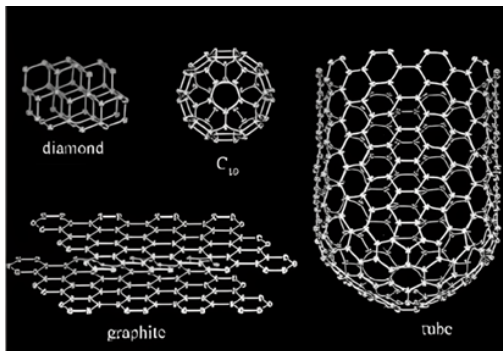
روش دینامیک مولکولی در سطح مولکولی برای مقیاس بزرگ به یک حافظه زیاد کامپیوتر نیاز دارد و از این رو به مدل‌های با مقیاس کوچک محدود می‌شود. مکانیک پیوسته می‌تواند بر این بحث فائق آید و کار را برای بررسی و توصیف مدل‌های بزرگ آسان‌تر کند.

روش اجزاء محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) دو روش عددی در مکانیک پیوسته می‌باشند که هر دو پتانسیل قابل توجهی در بررسی مشخصات نانو کامپوزیت‌ها دارند.

در کنار کارهای آزمایشگاهی بسیاری که بر روی نانولوله‌های کربنی صورت گرفته، تعدادی از دانشمندان به بررسی نانولوله‌ها با استفاده از روش‌های مدل‌سازی تئوری روی آوردند. این روش‌های مدل‌سازی به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. یکی از این روش‌ها مدل‌سازی اتمی است و شامل روش دینامیک مولکولی کلاسیک MD، دینامیک مولکولی پیوند مستحکم TBM و تئوری تابعی چگالی DFT می‌شود.

در اصل، هر مسئله‌ای در ارتباط با حرکت اتمی یا مولکولی را می‌توان از طریق این شیوه‌های مدل‌سازی شبیه‌سازی کرد. علاوه بر این، با توجه به حجم سنگین محاسبات، کاربرد عملی تکنیک‌های مدل‌سازی اتمی به سیستم‌هایی با تعداد کم مولکول یا اتم محدود می‌شود و معمولاً به مطالعه پدیده‌ها با عمر کوتاه می‌پردازند.

روش دیگر، مدل‌سازی مکانیک محیط پیوسته است. بسیاری از دانشمندان برای شبیه‌سازی نانولوله‌های کربنی به این روش متوسل شده‌اند. در یافته‌های محیط پیوسته گوناگون، یک المان حجم معرف (RVE) از ساختار شیمیایی گرافیت با یک خرابی معادل



شکل ۱: ساختار مولکولی الماس، گرافیت، باکی بال و نانولوله [۱]

برخی از دانشمندان سعی داشتند خواص مکانیکی نانولوله‌ها را بر اساس مدول خمشی مؤثر مشخص کنند. وانگ و همکاران رابطه بین ممان خمشی و انحناى خمش نانولوله‌های کربنی را مطالعه کردند تا تغییرات مدول خمشی مؤثر نسبت به مدول یانگ را در نانولوله‌ها تشریح کنند [۱۲]. در پژوهش دیگری توسط وانگ و همکارانش به بررسی رابطه انحنا-ممان خمشی غیر خطی برای نانولوله‌های کربنی با تغییر شکل محدود پرداخته‌اند [۱۳].

کالامکاروف و همکاران با استفاده از روش عددی اجزاء محدود به محاسبه خواص مؤثر نانولوله‌ها پرداخته‌اند و در مدل‌سازی از المان‌های تیر و فنر غیرخطی به ترتیب برای شبیه‌سازی پیوندهای قوی کووالانس و ضعیف واندروالس کربن-کربن استفاده کرده‌اند [۱۴].

وو و همکاران برای تعیین خواص مکانیکی نانولوله‌ها، از مدل تعادل-انرژی که براساس تعادل بین مکانیک مولکولی و مکانیک ساختاری است بهره برده‌اند. در این کار، آن‌ها مدلی برای نشان دادن نانولوله‌های کربنی تک جداره ارائه داده‌اند. در این روش، نانولوله‌های کربنی تک جداره به‌عنوان یک استوانه جدار نازک تحت بارگذاری کششی محوری و پیچشی در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی نانولوله‌های تک جداره به این روش، نویسنده از هر دو اصل مکانیک مولکولی و انرژی پتانسیل تغییرات طول و زاویه کل سیستم استفاده می‌کند. وو و همکارانش در این مدل‌سازی‌ها تنها به نانولوله‌های تک جداره اکتفا نکرده بلکه پا را فراتر گذاشته و نانولوله‌های چند دیواره را نیز مدل کرده‌اند [۱۵].

ژائو و همکاران با استفاده از مدل مکانیک ساختاری مولکولی تحلیلی و با در نظر گرفتن تعاملات غیر خطی نیروهای واندروالس بین لایه‌ها، تغییر شکل نانولوله‌های تک جداره و چند جداره را تحت فشار داخلی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۶].

تسرپس و همکاران برای مدل‌سازی رفتار کشسانی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی یک المان حجم معرف چند مقیاسی که بر اساس پتانسیل بین اتمی مورس ایجاد شده است را ارائه کرده‌اند [۱۷].

اسکادلر و همکارانش نشان داده‌اند که با افزایش ۵٪ حجمی نانولوله کربن به زمینه اپوکسی، استحکام آن تا ۴۰٪ نسبت به ماتریس اپوکسی خالص، افزایش پیدا می‌کند [۱۸].

ژانگ و همکاران با استفاده از روش المان محدود در مقیاس نانو رفتار الاستیک نانولوله‌های کربنی را تحت تأثیر دماهای مختلف محیطی بررسی کردند. آن‌ها پیوندهای کووالانسی اتم‌های کربن را به وسیله تیر اولر برنولی با دو گره مدل کردند و نیروهای واندروالس بین لایه‌های نزدیک نانولوله کربنی با فنرهای غیر خطی

یا مدل‌های محیط پیوسته دیگر جایگزین می‌شود. ترسوف انرژی فولرین‌ها را با محاسبات ساده‌ای بر اساس تغییر شکل صفحه گرافیتی مسطح، به‌عنوان یک محیط پیوسته الاستیک، به دست آورد و نتیجه گرفت که ویژگی‌های الاستیک صفحه گرافیتی می‌تواند برای پیش‌بینی انرژی کرنشی الاستیک فولرین‌ها و نانولوله‌ها به کار رود [۳].

یاکوبسون و کوچمن متوجه ظاهر ویژه فولرین‌ها شدند و یک مدل پوسته‌ای پیوسته را ارائه دادند [۴]. از این رو با استفاده از مدل پوسته‌ای پیوسته به بررسی کماتش نانولوله‌ها تحت فشار محوری پرداختند. این نوع مدل پوسته‌ای می‌تواند برای تحلیل رفتار مکانیکی استاتیک یا دینامیکی نانولوله‌ها به کار رود. با وجود این، این مدل از مشخصه‌های جزئی کایرالیته نانولوله‌ها صرف نظر می‌کند و قادر نیست نیروهایی را که به اتم‌های انفرادی وارد می‌شوند به حساب آورد [۵].

تسرپس و پاپانیکوس یک مدل المان محدود سه بعدی برای نانولوله‌های کربنی تک دیواره آرمچیر، زیگزاگ و کایرال پیشنهاد کردند، که بر اساس این فرضیه بنا شده بود که نانولوله‌های کربنی تک دیواره تحت بارگذاری، مانند ساختار متشکل از تیر عمل می‌کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدول یانگ بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۷ ترا پاسکال و مدول برشی بین ۰/۲۴ تا ۰/۵ ترا پاسکال متغیر است اگر ضخامت دیواره ۰/۳۴ نانومتر باشد [۶].

جیانوپولوس و همکاران یک روش المان محدود غیر پیوسته را با استفاده از المان فنر برای محاسبه پاسخ‌های مکانیکی نانولوله‌های کربنی تک دیواره آرمچیر و زیگزاگ ایجاد کردند [۷]. در این مدل به جای المان‌های تیر که توسط لی و چو پیشنهاد شده بود، از المان‌های فنر الاستیک خطی، برای مدل کردن اندرکنش‌های بین اتمی استفاده شده است [۸]. در یک مدل پیشنهاد شده در سال ۲۰۰۸ توسط روسی و مؤ مدل المان محدودی برای تعیین خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی تک دیواره از جمله مدول یانگ و تنش و کرنش نهایی، بر پایه تئوری مکانیک مولکولی به وجود آمد که در این مدل از المان‌های غیر خطی و فنر پیچشی برای مدل کردن اندرکنش‌های بین اتمی استفاده شده است [۹]. مدل مکانیک مولکولی تحلیلی، به منظور ارتباط خواص الاستیک یک نانولوله کربنی تک دیواره به ساختار اتمی‌اش با ثوابت میدان نیروی اندازه‌گیری شده، توسط چانگ و جیو پیشنهاد شده است [۱۰].

مدل تحلیلی مکانیک مولکولی ایجاد شده توسط ژائو و همکاران به منظور وارد کردن تابع پتانسیل مورس برای تخمین ثابت‌های الاستیک و پیش‌بینی روابط تنش و کرنش برای نانولوله‌های کربنی، تحت بارگذاری‌های کششی و پیچشی گسترش یافت [۱۱].

شبیه‌سازی شدند. مدل المان محدود در مقیاس نانو به روشی تمایل به کاهش مدول یانگ نانولوله‌های کربنی با افزایش و تغییر دمای محیط را نشان می‌دهد [۱۹].

خسروی و همکارانش تأثیر افزودن نانولوله کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت زمینه اپوکسی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که بهبود خواص در درصدهای ۰/۳ و ۰/۵ نانولوله کربنی حاصل شده است [۲۰].

اینام و همکارانش تأثیر مقادیر بسیار کم نانولوله کربنی (۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد وزنی) را در کامپوزیت زمینه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین خواص مکانیکی در مقدار ۰/۰۲۵ درصد وزنی نانولوله کربنی به دست آمده که موجب افزایش ۳۵ درصدی مدول خمشی شده است [۲۱].

مطالعه رفتار مکانیکی این دسته از مواد، با استفاده از روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. چن و همکاران به کمک المان حجمی معرف (RVE)، خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربن را مورد مطالعه قرار داده‌اند؛ این تحلیل بر اساس مکانیک محیط پیوسته و با استفاده از روش المان اجزاء محدود انجام گرفته است [۲۲].

هرناندز و آویلز در یک مدل‌سازی به روش المان محدود و با فرض پیوسته و ایزوتروپیک بودن مواد تشکیل دهنده المان حجمی معرف، مدول یانگ مؤثر کامپوزیت را محاسبه کرد [۲۳].

باوفا بیگدیلو و همکارانش تأثیر افزودن نانولوله کربنی چند جداره بر رفتار ضربه سرعت بالای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی را بررسی کردند؛ نتایج به دست آمده نشان داد جذب انرژی برای نمونه حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به نمونه بدون نانو به میزان ۱۳/۵۶ درصد افزایش یافته است [۲۴].

اثباتی و ایرانی عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی و مکانیزم شکست نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی سالم و عامل‌دار شده را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی باعث بهبود استحکام نانوکامپوزیت پلیمری شده و شکنندگی آن را کاهش می‌دهد [۲۵].

داور و همکاران رفتار فشاری سازه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی را با ۲٪ نانولوله به عنوان تقویت کننده و بدون نانولوله، به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان داد که افزودن ۲٪ وزنی به رزین اپوکسی در حین ساخت، نیروی قابل تحمل بیشینه را حدود ۴۴٪ افزایش می‌دهد [۲۶].

اسماعیلی و همکاران به بررسی استحکام کششی و سختی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی در درصدهای مختلف وزنی شامل ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ پرداختند و

نتایج نشان داد؛ درصد وزنی نانولوله‌های کربن مهمترین پارامتر بر استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌باشد. همچنین با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام کششی نمونه‌ها تقریباً به میزان ۳۱٪ و با افزودن ۱/۵٪ وزنی نانولوله کربنی سختی به میزان ۱۵٪ بهبود یافت [۲۷].

کریمی و همکاران در این مقاله خواص الاستوپلاستیک یک نانوکامپوزیت پلیمری با تکیه بر تعدادی از عوامل مقیاس مزو مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان به این نتیجه رسیده‌اند که با بررسی طول نانولوله‌ها، نانولوله‌های دارای طول ۱۰ تا ۳۰۰ نانومتر، تأثیر قابل توجهی بر سفتی نانوکامپوزیت دارد، درحالی‌که تأثیر طول‌های کوتاه‌تر و بلندتر چندان قابل توجه نیست [۲۸].

ژو و همکارانش پاسخ تنش-کرنش رزین اپوکسی تقویت شده با نانولوله کربن را بررسی کردند، نتایج رشد ۳۰ الی ۷۰ درصدی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را با افزودن ۱ الی ۴ درصد نانولوله نشان داد [۲۹]. در مجموع می‌توان گفت قابلیت افزایش و هدفمند کردن چندین خصوصیت فیزیکی و مکانیکی به صورت همزمان، در کنار بهبود رفتارهای ارتعاشی سازه، از ویژگی‌های منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده در ماتریس‌های پلیمری است. مطالعات نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های پلیمری مبتنی بر نانولوله کربن، پتانسیل بسیار مناسبی برای تولید مواد جدید با نسبت استحکام به وزن بالا دارند. این مواد می‌توانند برای ساخت کامپوزیت‌ها با خواص بهینه‌تر مورد استفاده قرار گیرند [۲۵].

حقگو و همکاران به بررسی رفتار الکترومکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت‌شده با فیبر فازی حاوی نانولوله‌ی کربنی پرداخته و تأثیرات درصد حجمی و اندازه نانولوله‌ی کربنی بر خواص نهایی کامپوزیت هیبریدی را مورد تحقیق قرار داده‌اند. ایشان پس از انجام پژوهش برای خواص الکترومکانیکی عرضی بهتر، استفاده کردن از نانولوله‌ی کربنی با قطر کمتر پیشنهاد داده‌اند [۳۰].

۲- بخش مدل‌سازی

۲-۱. روش مدل‌سازی نانولوله‌های کربنی

توجه به تحقیقات وسیع در زمینه نانو تکنولوژی از جمله نانومکانیک و گران بودن ابزارآلات آزمایشگاهی و همچنین نیاز به پیش‌بینی رفتار مواد در این مقیاس، روش‌های مدل‌سازی جایگاه ویژه‌ای در این حوزه یافته‌اند. روش‌های شبیه‌سازی مکانیکی در مقیاس نانو علاوه بر مزیت مذکور توانایی ما را در درک میکرو و نانو، مکانیزم‌های مختلف در پدیده‌های مکانیکی از جمله پلاستیسیته و شکست بالا می‌برند. این درک بهتر طراحی مواد با عملکرد بهینه‌تر را در پی خواهد داشت. در این بخش بعضی از روش‌های

مدل سازی نانولوله‌های کربنی بررسی می‌شود.

۲-۲. مکانیک محیط پیوسته برای نانو کامپوزیت‌ها

روش‌های محاسباتی شامل دو روش دینامیک مولکولی و مکانیک محیط پیوسته است. مکانیک محیط پیوسته در گذشته با موفقیت برای بیان کردن مشخصات CNTها استفاده شده است. استفاده از مدل سازی اجزاء محدود و شبیه‌سازی روشی بسیار کارا و مقرون به صرفه برای ارائه مشخصات کامپوزیت‌های تقویت‌شده با CNT در مقیاس بزرگ بوده و نتایج به دست آمده می‌تواند با نتایج آزمایشگاهی و دینامیک مولکولی قابل دسترسی از گزارشهای مقالات [۳۱] و [۳۲] مقایسه شود. در همهی مقالات و آزمایشات CNTها عموماً مواد همگن و ایزوتروپیک فرض شده‌اند و نمونه یک تیر پیوسته با المان‌های مکعبی سه بعدی و پوسته ارائه شده است. این روش عموماً برای تحلیل تغییر شکل، خمش و واکنش‌های دینامیکی CNTها و همه واکنش‌های نانو کامپوزیت‌ها استفاده شده است. همه روش‌ها از مفهوم عمومی RVE استفاده می‌کنند.

به‌طور کلی تمام روش‌ها همگی از مفهوم المان حجمی نماینده یا سلول واحد استفاده کرده‌اند. از این مفهوم در گذشته برای توصیف کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف استفاده شده است. در اینجا این مفهوم برای تحلیل نانو کامپوزیت‌ها، بسط پیدا کرده است. در این نوع مدل سازی یک نانولوله کربنی با ماتریسی که اطراف آن را احاطه کرده است مدل سازی می‌شود. آنگاه شرایط مرزی صحیح در مرزهای خارجی و بین نانولوله و ماتریس به مدل اعمال می‌گردد. بعد از مدل سازی سلول واحد، روش‌های عددی، نظیر روش اجزای محدود برای توصیف پاسخ کلی مدل و به دست آوردن خواص مکانیکی سلول واحد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳. تئوری قانون مخلوطها برای کامپوزیت‌ها

محاسبه خواص موثر مواد کامپوزیتی مبنی بر تئوری مقاومت

مصالح با اصطلاح تحلیل ساده‌ای بدست می‌آید (قانون مخلوطها). این قانون مخلوطها همراه با نتایج بسط داده شده در مورد الیاف تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها با موفقیت در گذشته برای نانو کامپوزیت‌های کربنی به کار برده شده است. هرچند تئوری مقاومت مصالح وقتی تنش بین وجهی ارزیابی می‌شود دقیق نیست، ولی ثابت‌های مؤثر مواد (مدول یانگ و ضریب پواسن) در جهت محوری و عمود بر آن بر RVE را با دقت مطلوبی پیش‌بینی می‌کند. نمونه‌ای از RVE در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای RVE مربعی مطابق با شکل ۳، کسر حجمی CNT مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه خواهد شد:

$$V_t = \frac{\pi(r_0^2 - r_i^2)}{4a^2 - \pi r_i^2} \quad (1)$$

با توجه به شکل ۳ بار اعمال شده در جهت طولی بین الیاف و ماتریس تقسیم می‌شود. بنابراین می‌توان مطابق رابطه‌ی ۲ نوشت:

$$F_z = F_t + F_m \quad (2)$$

اگر رابطه‌ی ۲ را بر اساس تنش باز نویسی کنیم آنگاه خواهیم داشت:

$$\sigma_z A = \sigma_t A_t + \sigma_m A_m \quad (3)$$

باتوجه به قانون هوک می‌توان نوشت:

$$E_z \varepsilon_z A = E_t \varepsilon_t A_t + E_m \varepsilon_m A_m \quad (4)$$

با توجه به اینکه فشردگی پواسن قابل چشم‌پوشی است. اما از فرض کرنش مشابه در CNT، ماتریس و کامپوزیت داریم:

$$E_z A = E_t A_t + E_m A_m \quad (5)$$

از تقسیم معادله به سطح کل داریم:

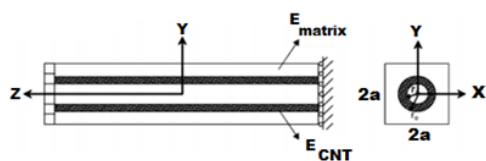
$$E_z = E_t \left(\frac{A_t}{A}\right) + E_m \left(\frac{A_m}{A}\right) \quad (6)$$

اما برای یک RVE تک جهتی (A_t/A) و (A_m/A) به ترتیب برابر V_t و $V_m = (1 - V_t)$ هستند، که E_z مدول کششی طولی کامپوزیت است.

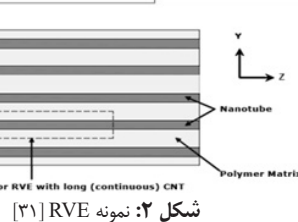
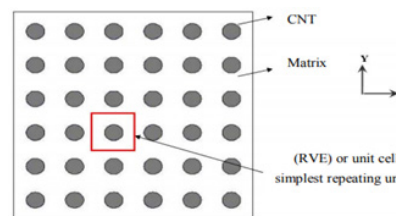
$$E_z = E_t V_t + E_m (1 - V_t) \quad (7)$$

رابطه‌ی ۷ مشابه قانون مخلوطهاست که برای محاسبه مدول یانگ موثر برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف متعارف در جهت الیاف به کار می‌رود و در گذشته برای تایید نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است [۳۲].

در این پژوهش، با علم به خصوصیات ممتاز نانولوله‌های کربنی به بررسی اثر تغییر تعداد و ضخامت CNT در المان حجمی معرف بر روی سختی کامپوزیت، از جنس اپوکسی / فیبر کربن و اپوکسی /



شکل ۳: الیاف پیوسته تقویت‌کننده در مجاورت ماتریس [۳۱]



شکل ۲: نمونه [۳۱] RVE

کامپوزیت تقویت شده با نانولوله های کربن محاسبه می شود (جدول ۱). برای استخراج ثابت های معادل مواد در روابط مکانیک پیوسته، یک RVE شش گوش به صورت همگن در نظر گرفته شد و هر یک از درجات آزادی نانولوله های کربنی در مدل المان محدود پیوسته مدل شد. مدل اجزای محدود از مسئله در شکل ۴ آمده است.

مدل سازی بر اساس طرح کلی کامپوزیت سه فازی که در شکل ۵ آمده طراحی شده است.

طرح شماتیک المان حجمی معرف مطابق با شکل ۶ نشان داده شده است.

یکی از پارامترهای بسیار مهم در حل اجزای محدود، بحث زمان و هزینه است. این پارامتر به شکل مستقیم به تعداد المان های ایجاد شده بستگی دارد. در این پژوهش؛ کامپوزیت سه فازی، در چندین سایز مش مورد تحلیل قرار گرفت؛ بدین صورت که کامپوزیت را در حالتی که حاوی ۱ درصد نانولوله بود؛ تحت اثر بار محوری قرار داده و نتایج سختی محوری آن در حداقل تعداد مش ۵۸۹۷۸ همگرا گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱. اعتبارسنجی مدل عددی

در تحلیل حاضر معادلات آنالیزی بر پایه قانون اختلاط، برای استخراج ویژگی های مؤثر مواد، به کار رفته است؛ روش مکانیک پیوسته نیز به طور موفقیت آمیزی برای شبیه سازی پاسخ مکانیکی نانولوله های منفرد مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور برآورد خواص مکانیکی کامپوزیت های سه فاز، ترکیب های متفاوتی از ماتریس در نظر گرفته می شود. جهت اعتبار سنجی، مدل حاضر تحت تنش محوری خالص فرض شده و نتایج با مطالعات تئوری مورد مقایسه قرار گرفته است.

مقایسه نتایج برآمده از روش تئوری اختلاط و روش عددی انجام شده تحت تنش محوری خالص در نرم افزار آباکوس در جدول ۲ آمده است.

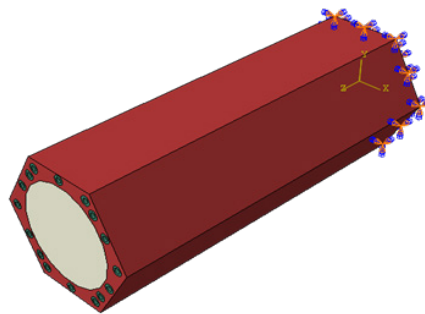
به طور کلی می توان گفت بنابر نتایج حاصله هنگامی که نانولوله تحت اثر تنش محوری قرار گیرد، نسبت سختی محوری در کامپوزیت سه فازی با نسبت های مختلف CNT (E_c)، به سختی محوری در حالت CNT=0 (E_0)، در نرم افزار آباکوس در درصدهای یک، دو، سه، چهار و پنج به ترتیب ۱/۰۳۵، ۱/۰۷۰، ۱/۱۰۵، ۱/۱۴۰ و ۱/۱۷۵ خواهد بود که در مقایسه با نسبت سختی محوری بدست آمده از تئوری اختلاط به ترتیب ۱/۲۴٪، ۳/۰۷٪، ۶/۱۷٪ و ۷/۴۸٪ اختلاف خواهد داشت که به نظر قابل قبول

فیبر شیشه تحت نیروی فشاری و خمشی پرداخته شده است که رزین اپوکسی به عنوان ماتریس، فیبر کربن / شیشه به عنوان تقویت کننده اولیه و نانولوله های کربنی به عنوان تقویت کننده اضافه در نظر گرفته می شود و با تغییر در درصدهای CNT، کامپوزیت تحت تحلیل کششی و خمشی قرار می گیرد. همچنین باید توجه داشت که اتصال بین آن ها صلب می باشد.

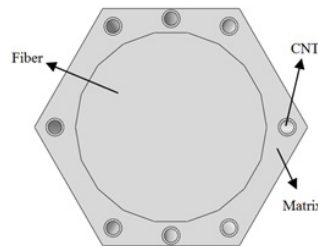
۲-۴. مدل اجزاء محدود

جهت مدل سازی اجزا محدود این کامپوزیت سه فاز، در ابتدا با استفاده از روابط مکانیک پیوسته و قانون اختلاط، خواص مکانیکی جدول ۱: مشخصات مکانیکی اجزای کامپوزیت سه فازی مدل شده

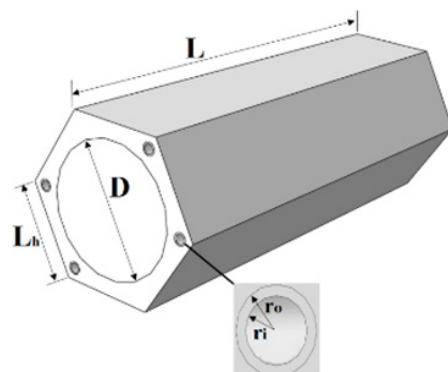
ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (nN/mm^2)	جزء کامپوزیت
0/3	1000	CNT
0/39	6	رزین اپوکسی
0/22	76	فیبر شیشه
0/2	380	فیبر کربن



شکل ۴: مدل اجزای محدود مسئله



شکل ۵: اجزای کامپوزیت سه فاز



شکل ۶: نمای شماتیک از المان حجمی معرف

خواهد بود.

بنابر شکل ۷ به وضوح می‌توان گفت هرچه درصد CNT افزایش یابد، المان توانایی بالاتری در تحمل تنش‌های محوری را از خود نشان می‌دهد در نتیجه سختی محوری به‌دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد بود و مطابق با حدس اولیه، نانو کامپوزیت با ۵ درصد CNT بیشترین سختی محوری را از خود نشان می‌دهد. به‌طوری‌که تحمل ۹۱۰/۵۵ نانونیوتن نیرو را به ازای جابجایی ۱ واحدی خواهد داشت. میزان افزایش سختی محوری در جدول ۴ نمایش داده شده است و کانتورهای تنش مربوط به این مدل‌ها در اشکال ۸ و ۹ آمده‌اند. قابل ذکر از آنکه V_f درصد حجمی CNT می‌باشد.

نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به مدل‌های شامل هسته کربنی

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی و تئوری اختلاط در کامپوزیت سه‌فاز تحت تنش محوری

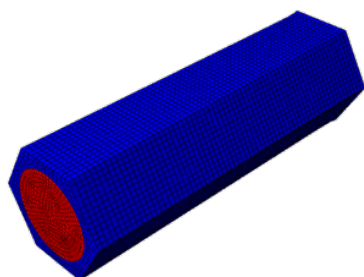
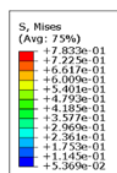
V_t (%)	V_f (%)	V_m (%)	Abaqus (E_c/E_0)	تئوری اختلاط (رابطه ۷)	خطا (%)
1	59/9	39/1	1/035	1/048	1/24
2	60/7	37/3	1/070	1/104	3/07
3	61/4	35/3	1/105	1/160	4/74
4	62/2	33/8	1/140	1/215	6/17
5	63/0	32/0	1/175	1/270	7/48

جدول ۳: نام‌گذاری مدل‌ها در حالت تنش محوری به ازای $r_i=2nm$

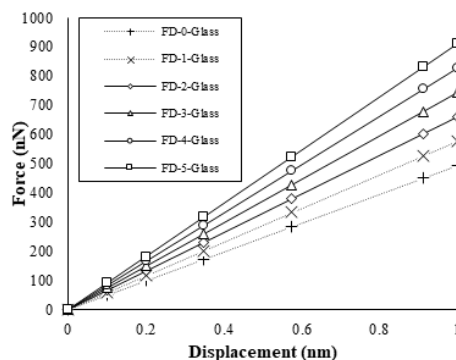
نام مدل	توضیحات
FD-0-Glass	هسته شیشه و ۰ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-1-Glass	هسته شیشه و ۱ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-2-Glass	هسته شیشه و ۲ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-3-Glass	هسته شیشه و ۳ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-4-Glass	هسته شیشه و ۴ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-5-Glass	هسته شیشه و ۵ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-0-Carbon	هسته کربن و ۰ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-1-Carbon	هسته کربن و ۱ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-2-Carbon	هسته کربن و ۲ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-3-Carbon	هسته کربن و ۳ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-4-Carbon	هسته کربن و ۴ درصد CNT. تحت تنش محوری
FD-5-Carbon	هسته کربن و ۵ درصد CNT. تحت تنش محوری

جدول ۴: تأثیر درصد‌های مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر شیشه)، تحت بار محوری

V_t (%)	سختی محوری (nN/nm)	میزان افزایش سختی محوری	
		نسبت به $V_t = 0$	
0	495/358	-	
1	578/585	16/8 %	
2	661/394	33/5 %	
3	744/358	50/3 %	
4	827/609	67/1 %	
5	910/552	83/8 %	



شکل ۸: کانتور تنش در مدل FD-0-Glass

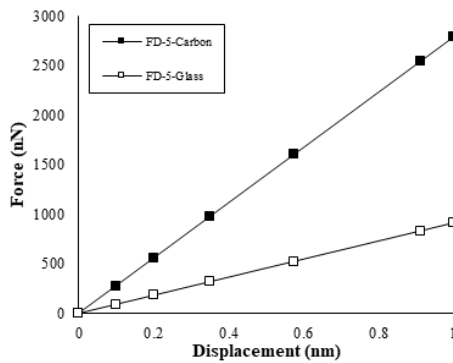


شکل ۷: نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های با هسته شیشه و درصد‌های متفاوت CNT تحت اثر تنش محوری

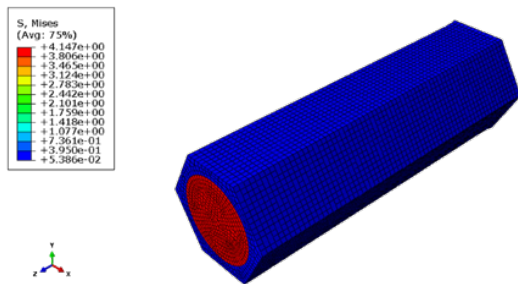
ضریب ارتجاعی بالاتر آن نسبت به شیشه می باشد. بنابر این در جابجایی واحد یکسان (مثلا به ازای ۱ واحد جابجایی) مدل FD-5-Carbon، ۲۷۸۴ نانونیوتن نیرو تحمل خواهد کرد در حالی که مدل FD-5-Glass، ۹۱۰/۵ نانونیوتن تحمل نیرو خواهد داشت که ۳۳ درصد همتای خود ولی با هسته کربنی می باشد و این موضوع در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است. میزان افزایش سختی محوری در جدول ۵ نمایش داده شده است و کانتورهای تنش مربوط به این مدل ها در اشکال ۱۲ و ۱۳ آمده اند.

۳-۳. رفتار خمشی نانولوله

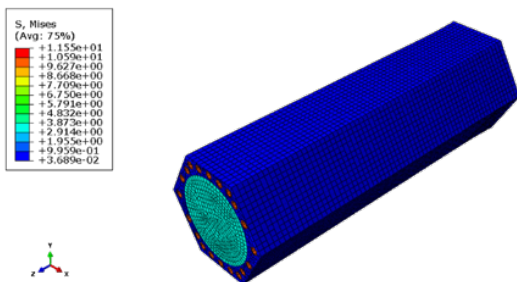
برای بررسی رفتار خمشی نانولوله ها نیز ابتدا نامگذاری برحسب جنس هسته و درصد CNT انجام شده و سپس نمودارهای ممان- دوران برای آن ها ترسیم شده است. نام گذاری مدل ها در حالت



شکل ۱۱: مقایسه استفاده از هسته کربنی و شیشه ای در تحمل تنش محوری

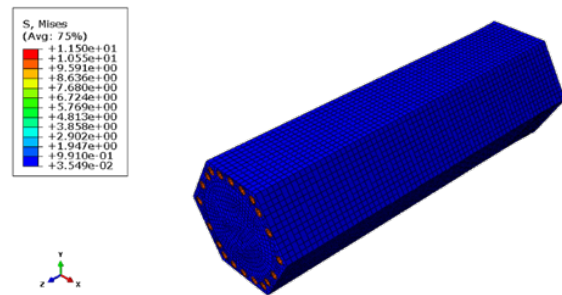


شکل ۱۲: کانتور تنش در مدل FD-0-Carbon

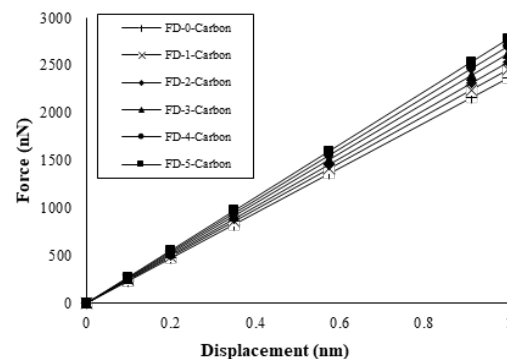


شکل ۱۳: کانتور تنش در مدل FD-5-Carbon

و درصد های متغیر CNT نیز در شکل ۱۰ به تصویر درآمده است. مطابق شکل ۱۰ می توان گفت هرچه درصد CNT افزایش یابد، به دلیل ویژگی های رفتاری ذاتی CNT، نانولوله ها توانایی بالاتری در تحمل تنش های محوری از خود نشان می دهند در نتیجه سختی محوری به دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد رفت و مطابق با حدس اولیه، رفتار نانولوله با ۵ درصد CNT بیشترین سختی محوری را از خود نشان می دهد به طوری که تحمل ۲۷۸۴ نانونیوتن نیرو را به ازای جابجایی ۱ واحدی خواهد داشت. البته همانطور که در شکل مشهود است، در مقایسه با شکل ۷ تأثیر افزایش درصد CNT در بالابردن سختی محوری و تحمل نیروهای محوری کمتر از حالتی خواهد بود که هسته تماما از شیشه ساخته شده باشد و این موضوع به دلیل خصوصیات بارز کربن و



شکل ۹: کانتور تنش در مدل FD-5-Glass



شکل ۱۰: نمودار نیرو-جابجایی مدل های با هسته کربنی و درصد های متفاوت CNT تحت اثر تنش محوری

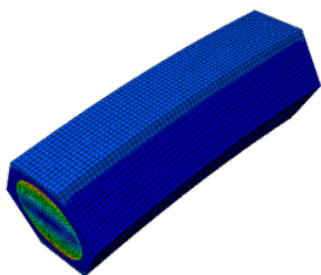
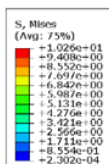
جدول ۵: تأثیر درصد های مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر کربن)، تحت بار محوری

میزان افزایش سختی محوری نسبت به $V_f = 0$	سختی محوری (nN/nm)	V_f (%)
-	2369/32	0
3/5 %	2452/34	1
7/0 %	2535/36	2
10/5 %	2618/32	3
14/0 %	2701/61	4
17/5 %	2784/56	5

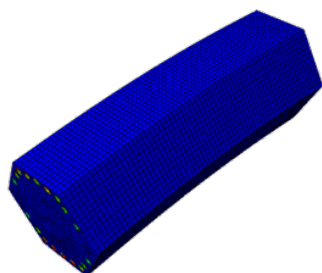
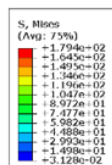
نمودارهای ممان-دوران مربوط به مدل‌های شامل هسته شیشه کربنی و درصدهای متغیر CNT نیز در شکل ۱۷ به تصویر درآمده است. مطابق شکل ۱۷ می‌توان گفت با افزایش درصد CNT، به دلیل خصوصیات منحصر به فرد ذاتی CNT، نانوکامپوزیت توانایی بالاتری در تحمل خمش از خود نشان می‌دهد در نتیجه سختی خمشی به دست آمده از نمودار ممان-دوران نیز به مراتب بالاتر خواهد رفت و مطابق با حدس اولیه، رفتار نانولوله با ۵ درصد CNT بیشترین سختی خمشی را از خود نشان می‌دهد به طوریکه تحمل ۱۸۲۸۴۶ نانونیوتن-نانومتر را به ازای دوران ۱ واحدی خواهد داشت (جدول ۸). البته همانطور که در شکل مشهود است، در مقایسه با شکل ۱۴ تأثیر افزایش درصد CNT در بالابردن سختی خمشی و تحمل نیروهای خمشی کم‌تر از حالتی خواهد بود که هسته تماماً از شیشه ساخته شده باشد و این موضوع به دلیل

جدول ۷: تأثیر درصدهای مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر شیشه) تحت اثر خمش

V_t (%)	سختی خمشی (nN/mm)	میزان افزایش سختی محوری نسبت به $V_t = 0$
۰	26458/6	-
۱	34869/8	31/8%
۲	54989/6	107/8%
۳	66754/0	152/3%
۴	71240/8	169/2%
۵	91269/4	244/9%



شکل ۱۵: کانتور تنش مدل RM-0-B-G



شکل ۱۶: کانتور تنش مدل RM-5-B-G

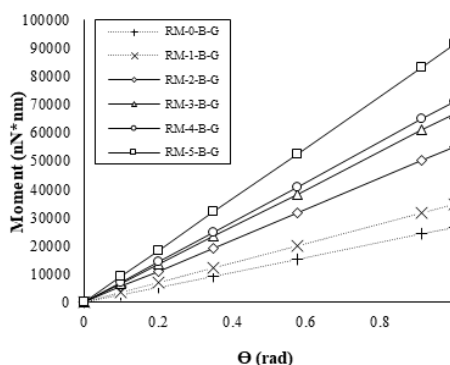
تحت خمش شامل هسته‌های از جنس شیشه و کربن بر اساس جدول ۶ صورت پذیرفته است.

نمودارهای ممان-دوران مربوط به مدل‌های شامل هسته شیشه‌ای و درصدهای متغیر CNT تحت خمش در شکل ۱۴ به تصویر درآمده است.

بنابر شکل ۱۴ می‌توان گفت هرچه درصد CNT افزایش یابد، المان تحمل بالاتری را در مقابل تنش خمشی از خود نشان می‌دهد در نتیجه سختی خمشی به دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد بود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، نانوکامپوزیت با ۵ درصد CNT بیشترین سختی خمشی را از خود نشان می‌دهد. به طوریکه تحمل ۹۱۲۶۹/۴ نانونیوتن-نانومتر را به ازای دوران ۱ واحدی خواهد داشت. میزان افزایش سختی خمشی در جدول ۷ نمایش داده شده است. در ادامه کانتورهای تنش فون مایسز مربوط به این مدل‌ها در اشکال ۱۵ و ۱۶ آمده‌اند.

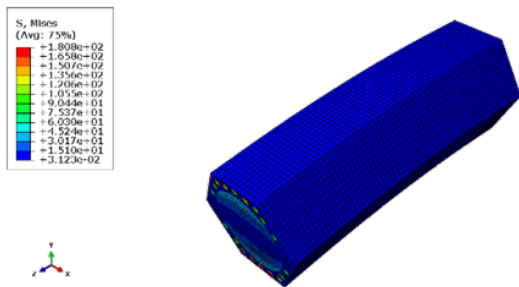
جدول ۶: نام‌گذاری مدل‌ها در حالت خمش به ازای $r_f=2nm$

نام مدل	توضیحات
RM-0-B-G	هسته شیشه و ۰ درصد CNT، تحت خمش
RM-1-B-G	هسته شیشه و ۱ درصد CNT، تحت خمش
RM-2-B-G	هسته شیشه و ۲ درصد CNT، تحت خمش
RM-3-B-G	هسته شیشه و ۳ درصد CNT، تحت خمش
RM-4-B-G	هسته شیشه و ۴ درصد CNT، تحت خمش
RM-5-B-G	هسته شیشه و ۵ درصد CNT، تحت خمش
RM-0-B-C	هسته کربن و ۰ درصد CNT، تحت خمش
RM-1-B-C	هسته کربن و ۱ درصد CNT، تحت خمش
RM-2-B-C	هسته کربن و ۲ درصد CNT، تحت خمش
RM-3-B-C	هسته کربن و ۳ درصد CNT، تحت خمش
RM-4-B-C	هسته کربن و ۴ درصد CNT، تحت خمش
RM-5-B-C	هسته کربن و ۵ درصد CNT، تحت خمش

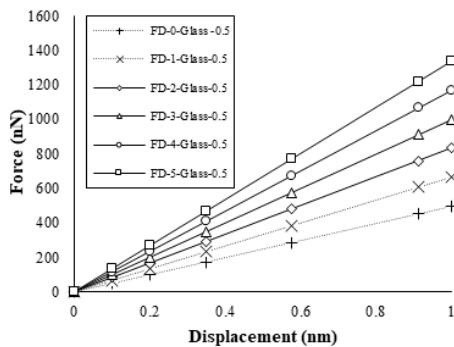


شکل ۱۴: نمودار ممان-دوران برای مدل‌های با هسته شیشه و درصدهای متفاوت CNT تحت اثر خمش

نانونیوتن-نانومتر تحمل خواهد داشت که حدوداً نصف مدل نظیر خود ولی با هسته کربنی می باشد. این مهم در شکل ۱۸ نیز به تصویر آمده است. همچنین کانتورهای تنش مربوط به این مدل ها در اشکال ۱۹ و ۲۰ آمده اند.



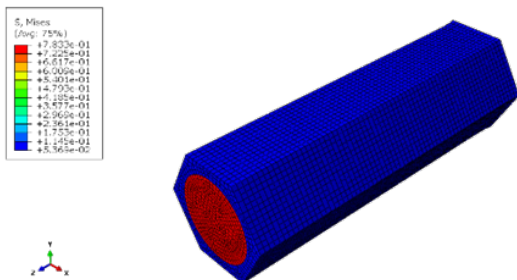
شکل ۲۰: کانتور تنش مدل RM-5-B-C



شکل ۲۱: نمودار نیرو-جابجایی مدل های با هسته شیشه و درصد های متفاوت CNT تحت اثر نیروی محوری

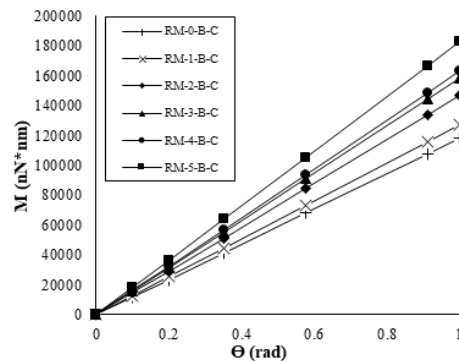
جدول ۹: تأثیر درصد های مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر شیشه)، تحت بار محوری

(%) V_t	سختی محوری (nN/nm)	میزان افزایش سختی محوری نسبت به $V_t = 0$
0	495/36	-
1	663/59	33/9 %
2	831/40	67/8 %
3	999/37	101/7 %
4	1167/52	135/7 %
5	1335/47	169/6 %



شکل ۲۲: کانتور تنش در مدل FD-0-Glass 0.5

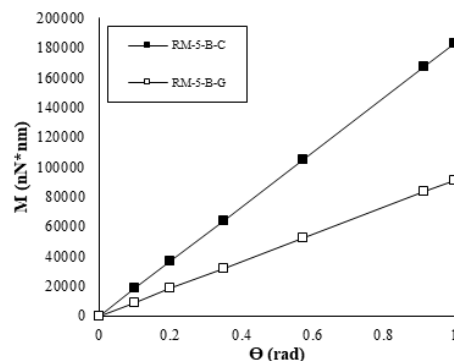
خصوصیات بارز کربن و ضریب ارتجاعی بالاتر آن نسبت به شیشه یافت می شود. بنابر این به ازای دوران واحد یکسان (مثلاً به ازای ۱ واحد جابجایی) مدل RM-5-B-C، ۱۸۲۸۴۶ نانونیوتن-نانومتر را تحمل خواهد کرد در حالی که مدل RM-5-B-G، ۹۱۲۶۹/۴



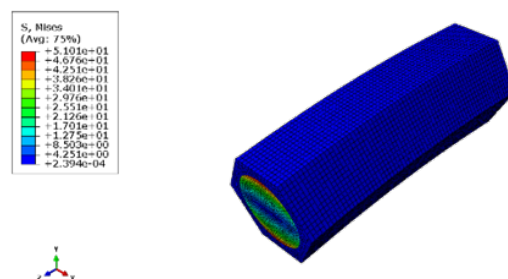
شکل ۱۷: نمودار ممان-دوران برای مدل های با هسته کربنی و درصد های متفاوت CNT تحت اثر خمشی

جدول ۸: تأثیر درصد های مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر کربن)، تحت بار خمشی

(%) V_t	سختی خمشی (nN/nm)	میزان افزایش سختی خمشی نسبت به $V_t = 0$
0	118040	-
1	126883	7/5 %
2	146557	24/2 %
3	158323	34/1 %
4	162812	38 %
5	182846	55 %

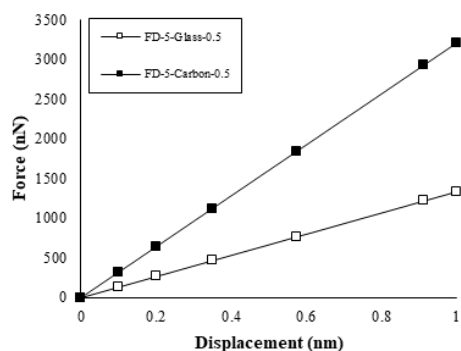


شکل ۱۸: مقایسه استفاده از هسته کربنی و شیشه ای در تحمل خمشی

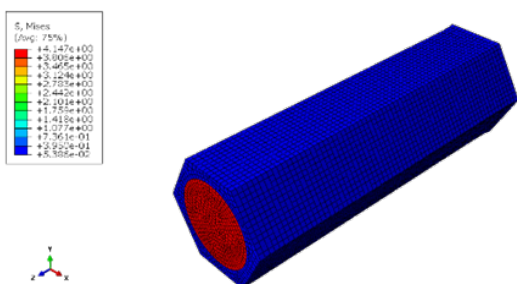


شکل ۱۹: کانتور تنش مدل RM-0-B-C

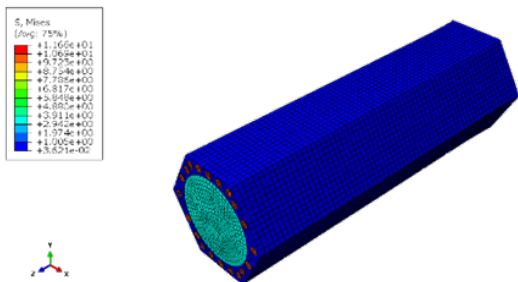
۵ درصد CNT بیشترین سختی محوری را از خود نشان می‌دهد. به‌طوریکه تحمل ۱۳۳۵/۴۷ نانونیوتن نیرو را به ازای جابجایی ۱ واحدی خواهد داشت. در مقایسه با بخش پیشین از آنجا که قطر داخلی نانولوله کاهش یافته است و این باعث قطور شدن کلی نانولوله گردیده است لذا انتظار می‌رود در این وضعیت با افزایش سختی محوری و افزایش تنش‌های محوری روبرو باشیم. میزان افزایش سختی محوری در جدول ۹ نمایش داده شده است. کانتورهای تنش مربوط به این مدل‌ها در اشکال ۲۲ و ۲۳ آمده‌اند. نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به مدل‌های شامل هسته کربنی و درصدهای متغیر CNT نیز در شکل ۲۴ به تصویر درآمده است: مطابق شکل ۲۴ می‌توان گفت هرچه درصد CNT افزایش یابد، به دلیل ویژگی‌های رفتاری ذاتی CNT، المان توانایی بالاتری در تحمل تنش‌های محوری از خود نشان می‌دهد، در نتیجه سختی محوری به‌دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد رفت و نانوکامپوزیت با ۵ درصد CNT بیشترین سختی



شکل ۲۳: مقایسه استفاده از هسته کربنی و شیشه‌ای در تحمل تنش محوری



شکل ۲۴: کانتور تنش در مدل FD-0-Carbon 0.5



شکل ۲۵: کانتور تنش در مدل FD-5-Carbon 0.5

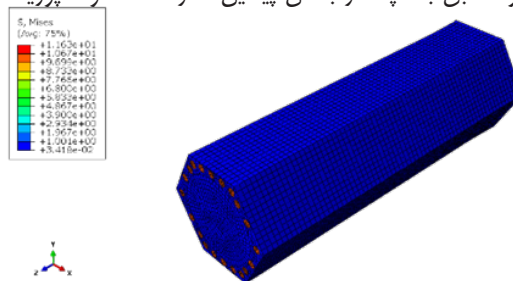
۳-۴. تأثیر ضخامت نانولوله بر سختی محوری و خمشی

در این بخش تأثیر ضخامت نانولوله را سختی محوری و خمشی بررسی خواهد شد. با قطور کردن نانولوله‌ها به ازای شعاع داخلی ۰/۵ نانومتر این مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

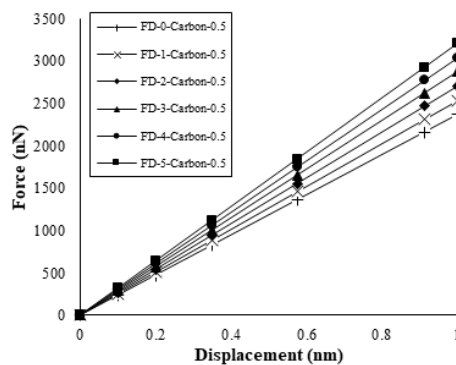
۳-۴-۱. نانولوله تحت تنش محوری

نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به مدل‌های شامل هسته شیشه‌ای و درصدهای متغیر CNT تحت تنش محوری در شکل ۲۱ به تصویر درآمده است.

بنابر شکل ۲۱ می‌توان اشاره داشت با افزایش درصد CNT، تحمل تنش‌های محوری بالاتر خواهد رفت در نتیجه سختی محوری به‌دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد بود و مطابق با آنچه در بخش پیشین اشاره شد، نانوکامپوزیت با



شکل ۲۶: کانتور تنش در مدل FD-5-Glass 0.5



شکل ۲۷: نمودار نیرو-جابجایی مدل‌های با هسته کربنی و درصدهای متفاوت CNT تحت اثر تنش محوری

جدول ۱۰: تأثیر درصدهای مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر کربن)، تحت بار محوری

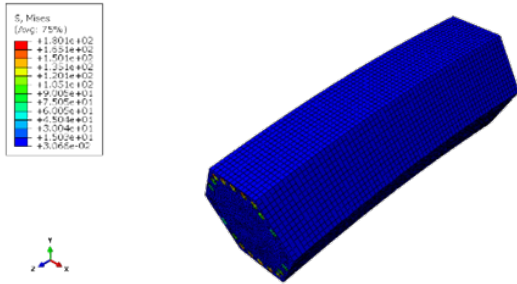
$(\%)V_t$	سختی محوری (nN/nm)	میزان افزایش سختی محوری	
		نسبت به $V_t = 0$	
0	2369/32	-	
1	2538/47	7/1 %	
2	2705/37	14/2 %	
3	2873/37	21/3 %	
4	3041/56	28/4 %	
5	3209/55	35/5 %	

در جدول ۱۰ نمایش داده شده است. کانتورهای تنش مربوط به این مدل ها در اشکال ۲۶ و ۲۷ آمده اند.

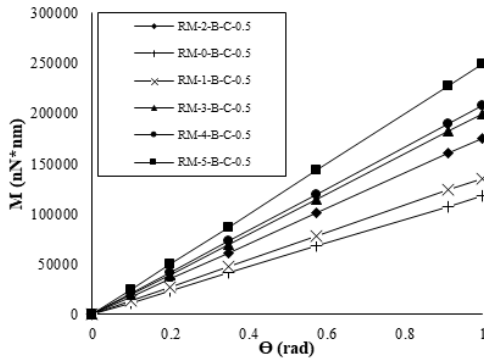
۳-۴-۲. نانولوله تحت خمش

نمودارهای ممان-دوران مربوط به مدل های شامل هسته شیشه ای و درصدهای متغیر CNT تحت خمش در شکل ۲۸ به تصویر درآمده است.

بنابر شکل ۲۸ می توان گفت هرچه درصد CNT افزایش یابد، المان تحمل بالاتری تنش خمشی بالاتر از خود نشان می دهد در نتیجه سختی خمشی به دست آمده از نمودار نیرو-جابجایی نیز به مراتب بالاتر خواهد بود. همان گونه که انتظار می رود، نانوکامپوزیت با ۵ درصد CNT بیشترین سختی خمشی را از خود نشان می دهد. به طوریکه تحمل ۱۵۷۴۴۱ نانونیوتن-انومتر را به ازای دوران ۱



شکل ۳۰: کانتور تنش مدل RM-5-B-G-0.5

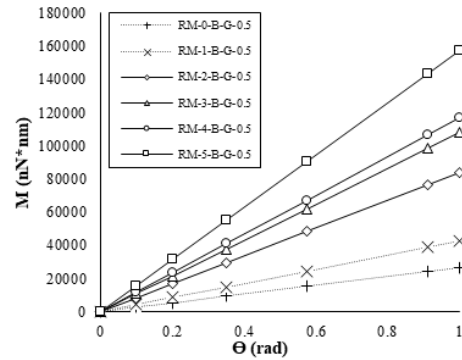


شکل ۳۱: نمودار ممان-دوران برای مدل های با هسته کربنی و درصدهای متفاوت CNT تحت اثر خمش

جدول ۱۲: تأثیر درصدهای مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر کربن)، تحت بار خمشی

(%) V_t	سختی خمشی (nN/nm)	میزان افزایش سختی نسبت به $V_t = 0$
0	118040	-
1	135584	14/9 %
2	175709	48/8 %
3	199513	69 %
4	208488	76/6 %
5	249030	111 %

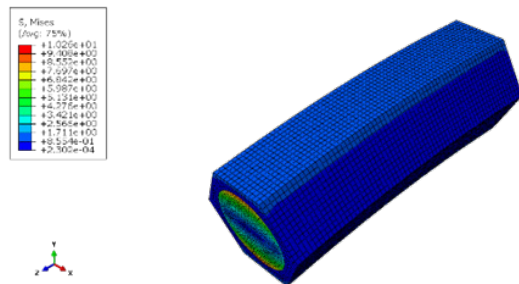
محوری را از خود نشان می دهد به طوریکه تحمل ۳۲۰۹ نانونیوتن نیرو را به ازای جابجایی ۱ واحدی خواهد داشت. البته همانطور که در شکل مشهود است، در مقایسه با شکل ۲۱ تأثیر افزایش درصد CNT در بالابردن سختی محوری و تحمل نیروهای محوری کمتر از حالتی خواهد بود که هسته تماما از شیشه ساخته شده باشد و این موضوع به دلیل خصوصیات بارز کربن و ضریب ارتجاعی بالاتر آن نسبت به شیشه استنباط می شود. بنابر این در جابجایی واحد یکسان (مثلا به ازای ۱ واحد جابجایی) مدل FD-5-Carbon 0.5، ۳۲۰۹ نانونیوتن نیرو تحمل خواهد کرد درحالی که مدل FD-5-Glass 0.5، ۱۳۳۵/۴۷ نانونیوتن تحمل نیرو خواهد داشت که ۴۱ درصد هم تای خود ولی با هسته کربنی می باشد و این موضوع در شکل ۲۵ به نمایش درآمده است. میزان افزایش سختی محوری



شکل ۳۲: نمودار ممان-دوران برای مدل های با هسته شیشه و درصدهای متفاوت CNT تحت اثر خمش

جدول ۱۱: تأثیر درصدهای مختلف نانولوله در سختی کامپوزیت (رزین-فیبر شیشه)، تحت بار خمشی

(%) V_t	سختی خمشی (nN/nm)	میزان افزایش سختی نسبت به $V_t = 0$
0	26458/6	-
1	42819/3	61/8 %
2	84139/2	218 %
3	107938	307/9 %
4	116911	341/8 %
5	157441	495 %



شکل ۳۳: کانتور تنش مدل RM-0-B-G-0.5

موضوع به دلیل خصوصیات هسته کربنی و ضریب ارتجاعی بالاتر آن نسبت به شیشه می‌باشد. بنابر این به ازای دوران واحد یکسان (مثلا به ازای ۱ واحد جابجایی) مدل RM-5-B-C-0.5، ۲۴۹۰۳۰ نانونیوتن-نانومتر تحمل خواهد کرد در حالی که مدل RM-5-B-G-0.5، ۱۵۷۴۴۱ نانونیوتن-نانومتر تحمل خواهد داشت که حدودا ۶۳ درصد مدل نظیر خود با هسته کربنی می‌باشد. این مهم در شکل ۳۲ نیز به تصویر آمده است. میزان افزایش سختی خمشی در جدول ۱۲ نمایش داده شده است. کانتورهای تنش مربوط به این مدل‌ها در اشکال ۳۳ و ۳۴ آمده‌اند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش حل عددی توانایی آن در مقایسه با روش مینتی بر تئوری مخلوط برای کامپوزیت‌ها به اثبات در آمد. نتایج نشان می‌دهد که:

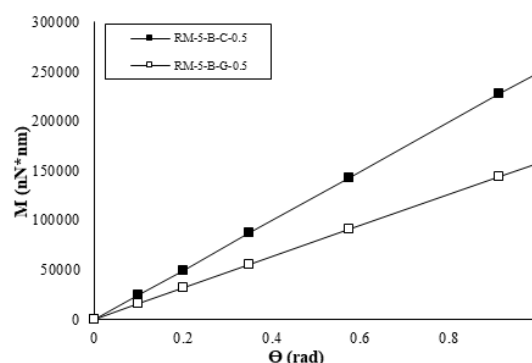
۱. تحت بار محوری و خمشی، در کامپوزیت سه فاز رزین اپوکسی، فیبر کربن و نانولوله کربن به ازای شعاع داخلی ۲nm، با افزایش درصد CNT به میزان ۵ درصد، سختی محوری ۱۷٫۵٪ و سختی خمشی ۵۵٪ افزایش یافت. این مقادیر برای کامپوزیت مشابه و نانولوله کربنی با شعاع داخلی ۰.۵ nm، به ترتیب ۳۵٫۵٪ و ۱۱۱٪ می‌باشد.

۲. تحت بار محوری و خمشی، در کامپوزیت سه فاز رزین اپوکسی، فیبر شیشه و نانولوله کربن به ازای شعاع داخلی ۲ nm، با افزایش درصد CNT به میزان ۵ درصد، سختی محوری ۸۳٫۸٪ و سختی خمشی ۲۴۴٫۹٪ افزایش یافت. این مقادیر برای کامپوزیت مشابه و نانولوله کربنی با شعاع داخلی ۰.۵ nm، به ترتیب ۱۶۹٫۶٪ و ۴۹۵٪ می‌باشد.

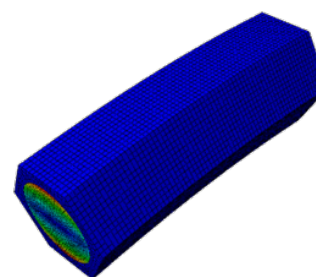
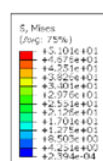
۳. با افزایش ضخامت نانولوله کربن به میزان ۵/۱ nm (به ازای ۵٪ CNT) در کامپوزیت با هسته شیشه و کربن، به ترتیب شاهد افزایش ۴۷ و ۱۵ درصدی در مقاومت فشاری کامپوزیت خواهیم بود و می‌توان اظهار کرد که تاثیر افزایش ضخامت در مقاومت محوری کامپوزیت با هسته شیشه، بیش از سه برابر تاثیر آن در نمونه کربنی می‌باشد. همچنین در بررسی میزان افزایش مقاومت خمشی کامپوزیت با هسته شیشه و کربن به ازای افزایش ضخامت نانولوله به میزان ۵/۱ nm، به ترتیب شاهد افزایش ۷۲ و ۳۶ درصدی خواهیم بود که بیانگر آن است که تاثیر افزایش ضخامت نانولوله در مقاومت خمشی کامپوزیت با هسته شیشه، دوبرابر تاثیر آن در نمونه کربنی می‌باشد.

واحدی خواهد داشت. میزان افزایش سختی خمشی در جدول ۱۱ نمایش داده شده است در ادامه کانتورهای تنش فون مایسز مربوط به این مدل‌ها در اشکال ۲۹ و ۳۰ آمده‌اند.

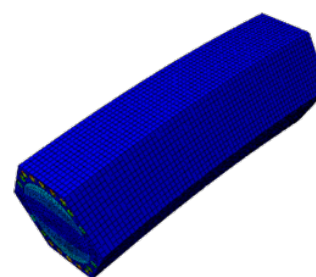
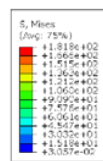
نمودارهای ممان-دوران مربوط به مدل‌های شامل هسته کربنی و درصدهای متغیر CNT نیز در شکل ۳۱ به تصویر درآمده است. مطابق شکل ۳۱ با افزایش درصد CNT، نانولوله‌ها توانایی بالاتری در تحمل خمش از خود نشان می‌دهد در نتیجه سختی خمشی به دست آمده از نمودار ممان-دوران نیز به مراتب بالاتر خواهد رفت. در نتیجه نانولوله با ۵ درصد CNT بیشترین سختی خمشی را از خود نشان می‌دهد به طوری که تحمل ۲۴۹۰۳۰ نانونیوتن-نانومتر را به ازای دوران ۱ واحدی خواهد داشت. البته همان‌طور که در شکل مشهود است، در مقایسه با شکل ۲۸ تأثیر افزایش درصد CNT در بالابردن سختی محوری و تحمل نیروهای محوری کمتر از حالتی خواهد بود که هسته تماماً از شیشه ساخته شده باشد و این



شکل ۳۲: مقایسه استفاده از هسته کربنی و شیشه‌ای در تحمل خمش



شکل ۳۳: کانتور تنش مدل RM-0-B-C-0.5



شکل ۳۴: کانتور تنش مدل RM-5-B-C-0.5

۵- مراجع

- [1] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354(1991), 56-58.
- [2] H. Malekian, Vibration analysis of multi-walled nano tube using numerical method, MSc Thesis, Birjand University, Iran, 2011.
- [3] J. Tersoff, Energies of fullerenes, *Phys. Rev. B*, 46(1992), 15546-15549.
- [4] B. I. Yakobson, L. S. Couchman, Persistence length and nanomechanics of random bundles of nanotubes, *Journal of Nanoparticle Research*, 8(2006), 105-110.
- [5] C. Q. Ru, Effective bending stiffness of carbon nanotubes, *Phys. Rev. B*, 62(2000), 9973-9976.
- [6] K. I. Tserpes, P. Papanikos, Finite element modeling of single-walled carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 36(2005), 468-477.
- [7] G. I. Giannopoulos, P. A. Kakavas, N. K. Anifantis, Evaluation of the effective mechanical properties of single walled carbon nanotubes using a spring based finite element approach, *Computational Materials Science*, 41(2008), 561-569.
- [8] C. Li, T. W. Chou, A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes, *International Journal of Solids and Structures*, 40(2003), 2487-2499.
- [9] 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*, 69(2009), 1394-1398.
- [10] T. Chang, H. Gao, Size-dependent elastic properties of a single-walled carbon nanotube via a molecular mechanics model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(2003), 1059-1074.
- [11] J. R. Xiao, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr., An analytical molecular structural mechanics model for the mechanical properties of carbon nanotubes, *International Journal of Solids and Structure*, 42(2005), 3075-3092.
- [12] X. Wang, Y. C. Zhang, X. H. Xia, C. H. Huang, Effective bending modulus of carbon nanotubes with rippling deformation, *International Journal of Solids and Structures*, 41(2004), 6429-6439.
- [13] X. Wang, X. Y. Wang, J. Xiao, A non-linear analysis of the bending modulus of carbon nanotubes with rippling deformations, *Composite Structure*, 69(2005), 315-321.
- [14] A. L. Kalamkarov, V. P. Veedu, M. N. Ghasemi-Nejhad, Mechanical properties modeling of carbon single-walled nanotubes: An asymptotic homogenization method, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2(2005), 124-131.
- [15] Y. Wu, X. Zhang, A. Y. T. Leung, W. Zhong, An energy-equivalent model on studying the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes, *Thin-Walled Structure*, 44(2006), 667-676.
- [16] J. R. Xiao, S. L. Lopatnikov, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr., Nanomechanics on the deformation of single- and multi-walled carbon nanotubes under external radial pressure, *Materials Science and Engineering: A*, 416(2006), 192-204.
- [17] K. I. Tserpes, P. Papanikos, G. N. Labeas, S. G. Pantelakis, multi-scale modeling of tensile behavior of carbon nanotube-reinforced composites, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 49(2010), 51-60.
- [18] L. S. Schadler, S. C. Giannaris, P. M. Ajayan, Load transfer in carbon nanotube epoxy composites, *Applied Physics Letters*, 73(1998), 3842-3844.
- [19] Y. C. Zhang, X. Chen, X. Wang, Effects of temperature on mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 68(2008), 572-581.
- [20] H. Khosravi, H. Eslami-Farsani, R. Ebrahimnezhad-Khaljiri, An experimental study on mechanical properties of epoxy/basalt/carbon nanotube composites under tensile and flexural loadings, *Journal of Science and Technology of Composites*, 3(2016), 187-194.
- [21] F. Inam, D. W. Wong, M. Kuwata, T. Peijs, Multiscale hybrid-micro-nanocomposites based on carbon nanotubes and carbon fibers, *Journal of Nanomaterials*, 1(2010), 1-12.
- [22] Y. L. Chen, B. Liu, X. Q. He, Y. Huang, K. C. Hwang, Failure analysis and the optimal toughness design of carbon nanotube-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 70(2010), 1360-1367.
- [23] A. Hernández-Pérez, F. Avilés, Modeling the influence of interphase on the elastic properties of carbon nanotube composites, *Computational Materials Science*, 47(2010), 926-943.
- [24] M. Bavafa Bigdilou, R. Eslami-Farsani, H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, The effect of carbon nanotubes on high velocity impact behavior of hybrid Kevlar- ultrahigh molecular weight polyethylene fibers composite with interlayer configuration, *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(2018), 533-540.
- [25] A. Esbati, S. Irani, Multiscale modeling of fracture in polymer nanocomposite reinforced by intact and functionalized CNTs, *Journal of Science and Technology of Composites*, 4(2017), 35-46.
- [26] A. Davar, R. Azarafza, V. Bagheri, Experimental and numerical analysis of composite lattice truncated conical structures with and without carbon nanotube reinforcements under axial compressive force, *Journal of Science and Technology of Composites*, 4(2018), 418-425.
- [27] P. Esmaili, T. Azdašt, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, S. Marmaghani, R. Eungkee Lee, Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments, *Journal of Science and Technology of Composites*, 2(2016), 65-73.
- [28] M. Karimi, R. Ghajar, A. Montazeri, Investigation of nanotubes' length and their agglomeration effects on the elastoplastic behavior of polymer-based nanocomposites, *Journal of Science and Technology of Composites*, 4(2017), 229-240.
- [29] J. Zhu, H. Peng, F. Rodriguez-Macias, J. L. Margrave, V. N. Khabashesku, A. M. Imam, K. Lozano, E. V. Barrera, Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes, *Advanced Functional Materials*, 14(2004),

643-648.

[30] M. Haghgoo, R. Ansari Khalkhali, M. K. Hassanzadeh-Aghdam, Micromechanical analysis of electro-elastic response of polymer composites reinforced with fuzzy fiber containing CNTs, *Journal of Science and Technology of Composites*, 5(2019), 485-498.

[31] M. Griebel, J. Hamaekers, Molecular dynamics simulations of the elastic moduli of polymer-carbon nanotube composites, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(2004), 1773-1788.

[32] G. M. Odegard, T. S. Gates, K. E. Wise, C. Park, E. J. Siochi, Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites, *Composites Science and Technology*, 63(2003), 1671-1687.