

تأثیر دما بر رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی

عاطفه پورجاهد^۱، احسان فریدونی^۲، رضا کردزنگنه^۳

^۱ دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول atpourjahed@jsu.ac.ir

^۲ دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول ehsan.fereidoony@gmail.com

^۳ دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول reza.zangeneh2021@gmail.com

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری را می‌توان با فرایند محلول کردن (ماتریس‌های ترموپلاستیک)، اختلاط توده‌ای (ماتریس‌های ترموپلاستیک)، اختلاط مذاب (ماتریس‌های ترموپلاستیک)، و پلیمریزاسیون در محل (ماتریس‌های ترموپلاستیک و ترموست) تهیه کرد. در مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری به دلیل رفتار ویسکوالاستیک فاز زمینه، این فاز دچار پدیده‌ی خزش و آزادسای تنش حتی در دماهای پایین می‌شود. به همین دلیل لحاظ کردن این پدیده در طراحی سازه‌های کامپوزیتی از اهمیت خاصی برخوردار است. بستر شیمیایی بهینه و به وجود آمدن گروه‌های عاملی روی سطوح نانوذرات، برای به وجود آوردن پیوندهای قوی شیمیایی در سطح مشترک کامپوزیت‌های پلیمری، برای استفاده بهتر از نانولوله‌های کربن به منظور تقویت مکانیکی کامپوزیت‌ها لازم و ضروری است. در این مطالعه تأثیر دما بر مشخصه‌های ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی، بررسی شده است. اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به روش لایه نشانی در ساختار کامپوزیت، باعث تغییر این مواد از حالت عایق به نیمه رسانا به واسطه‌ی بیشتر شدن توانایی جذب و انتقال بارهای الکتریسیته ساکن، خواهد شد. اثر اضافه کردن نانولوله‌های کربنی بر مشخصه‌های کششی و خمشی کامپوزیت‌های پلیمری نیز، در این مطالعه بررسی شده است. برای میسر شدن این هدف، تأثیر اضافه کردن نانولوله‌های کربنی بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها به صورت آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای، می‌تواند بر روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار بگیرد. نتایج بررسی‌ها نشان دهنده مثبت بودن اثر نانولوله‌های کربنی بر روی استحکام خمشی بیشتر از اثر همان مقدار نانولوله کربنی بر بهتر شدن استحکام کششی می‌باشد. سازگاری نتایج حاصل از تحلیل عددی و مدل‌سازی چند مقیاسی با نتایج حاصل از تحلیل تجربی نشان می‌دهد که می‌توان در تعریف مدل‌های جدید مورد استفاده قرار گیرد. به کارگیری نانولوله‌های کربن در ساختار کامپوزیت‌های رشته‌ای نسبت به استفاده نشدن و یا پخش کردن آن‌ها در ماتریس پلیمری، باعث افزایش مقاومت برشی بین‌لایه‌ای و تحمل بارهای استاتیکی خواهد شد. بررسی نتایج حاصل از مطالعات پیشین و مدل‌سازی‌ها، نمایانگر موفق بودن استفاده از نانولوله‌های کربنی در بهینه شدن عملکرد مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری است.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت پلیمری، نانولوله کربنی، استحکام، خمش، کشش.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۱. مقدمه

نانولوله‌های کربنی (CNT) پس از شناسایی ساختار منحصر به فرد آن‌ها در اوایل دهه ۱۹۹۰، توجه گسترده‌ای را از سوی محققان به خود جلب کردند. CNT ها دارای ساختاری به صورت صفحات گرافنی هستند که به صورت استوانه‌ای پیچ خورده است. نانولوله‌های کربنی با نسبت طول به قطر بالا ساخته شده‌اند که به طور قابل توجهی بزرگتر از هر ماده دیگری هستند که این خصوصیت، خواص الکترونیکی، مکانیکی و حرارتی فوق العاده‌ای به آن‌ها می‌دهد [۱-۲]. نانو لوله‌های کربنی یکی از مهم‌ترین تقویت کننده‌های مواد کامپوزیتی هستند [۳-۴]. کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با کربن دارای خصوصیات منحصر به فردی شامل استحکام بالا، مدول بالا، وزن پایین و مقاومت نسبت به خوردگی هستند. این کامپوزیت‌ها در صنایع هوایی، حمل و نقل، نظامی، ورزشی، الکترونیک، خودرو و انرژی کاربرد دارند [۳-۷].

نانولوله‌های کربنی دارای مدول یانگ بالا، چگالی کم و خواص الکتریکی و حرارتی عالی هستند که آن‌ها را به پرکننده‌های ایده آل برای کامپوزیت‌های پلیمری تبدیل می‌کند. پراکندگی همگن نانولوله‌های کربنی در یک زمینه پلیمری نقش مهمی در تهیه کامپوزیت‌های پلیمری بر اساس برهم‌کنش‌های سطحی بین CNT ها و ماتریس پلیمری ایفا می‌کند. افزودن مقدار کمی از CNT ها خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها را به شدت بهبود می‌بخشد. با این حال، نامحلول بودن و پراکندگی ضعیف CNT ها در حلال‌ها و ماتریس‌های رایج، کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. هدف این مقاله بررسی فن‌آوری پردازش و بهبود خواص کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با CNT است [۸]. موضوعات اصلی در زمینه تهیه کامپوزیت‌های تقویت شده با CNT عبارت از پراکنش موثر نانولوله‌ها در ماتریس‌های پلیمری و ارزیابی پراکنش و آرایش و کنترل نانولوله‌ها در ماتریس پلیمری هستند. برای پراکنش نانولوله‌ها در ماتریس پلیمری چند روش وجود دارد از جمله اختلاط محلول، اختلاط مذاب به شیوه‌ی الکترورسی، پلیمریزاسیون در محل و عامل‌دار کردن شیمیایی نانولوله‌های کربنی [۹].

۲- کامپوزیت‌های پلیمری

کامپوزیت‌های با زمینه‌ی پلیمری جز اولین کامپوزیت‌های تقویت شده توسط ساخت دست بشر است. در زمان قدیم، مردم در سرزمین جنوب و مرکز آمریکا، برای ساخت وسایلی مانند دستکش و یا چکمه از لاستیک‌های طبیعی و یا پلی‌ایزوپرن استفاده می‌کردند. همچنین از این مواد برای ساخت توپ‌های پلاستیکی یا توپ بسکتبال استفاده می‌کردند. اما مشکلی که برای استفاده در این وسایل برای آن‌ها پیش آمد این بود که پوشیدن دستکش‌ها برای آن‌ها دشوار بود. در اواسط قرن ۱۹ میلادی چارلز مکیناتش به این نتیجه رسید که پارچه کتان را در لاستیک طبیعی، جاسازی کند تا استفاده از آن‌ها راحت‌تر شود. کتان از نوعی پلیمر طبیعی به نام سلولز به وجود آمده است. از ایده چارلز مکیناتش برای پوشاک‌های ضدآب و امثال آن بهره برده شده که تاکنون نیز ادامه دارد.

در ساختار کامپوزیت‌ها با زیاد شدن تنش، زنجیره‌ها آزاد می‌شوند و شکل صاف پیدا می‌کنند. صاف شدن زنجیره‌ها باعث ایجاد اتصال واندروالس شده که باعث افزایش نیروی لازم برای کرنش می‌شود. پدیده خزش مسئله دیگری است که در پلیمرها مورد توجه قرار می‌گیرد. معمولاً مقاومت خزشی پلیمرها کم است و زنجیره‌های پلیمری به سرعت تغییر شکل می‌دهند و دچار کرنش می‌شوند. در کامپوزیت‌های پلیمری بر خلاف سرامیک‌ها و فلزها، کرنش با گذشت زمان افزایش می‌یابد. مرحله مهم خزش که مرحله پایداری است، در پلیمرها وجود ندارد. همچنین در پلیمرها با افزایش دما سرعت خزش افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دما گرانیوی کاهش می‌یابد. در کامپوزیت‌های پلیمری، وقتی ماده در مواجهه با تنش مشخصی دچار کرنش می‌شود، با ثابت ماندن تنش، میزان کرنش ثابت نمی‌ماند. در واقع با حرکت زنجیره‌ها، تنش ذخیره شده در آن‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد. برای ثابت ماندن کرنش لازم است که تنش کاهش پیدا کند. این ویژگی به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک پلیمرها است که به استهلاک تنش معروف است. در پلیمرها زمان استهلاک تنش متغیر است و از دمایی که پلیمر دارد تاثیر می‌پذیرد [۱۰-۱۲].

مقاومت به ضربه ویژگی دیگری است که در پلیمرها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حقیقت رفتار ویسکوالاستیک، مقاومت به ضربه را در پلیمرها تحت تاثیر قرار می‌دهد. با زیاد شدن سرعت کرنش و زنجیره‌های پلیمری، در صورتی که زمان کافی برای لغزش و چرخش وجود نداشته باشد، کامپوزیت پلیمری از خود رفتار ترد نشان خواهد داد. عموماً دمایی در کامپوزیت‌های پلیمری تحت عنوان دمای شیشه‌ای شدن (T_g) تعریف می‌شود که در دماهای پایین‌تر از آن، پلیمر رفتار ترد دارد و در دماهای بیشتر از آن رفتار ترد مشاهده نمی‌شود [۱۳].

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

مشخصه‌های کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تحت تاثیر رطوبت و تابش تغییر می‌کند. این تغییرات با افزایش دما، بیشتر دیده می‌شود. اگر زمینه‌های پلیمری به کمک نانولوله کربنی تقویت شده باشند، رطوبت بر نانولوله‌های کربنی نیز موثر خواهد بود. در این صورت با در نظر گرفتن این مساله، اثر مخرب رطوبت نیز افزایش می‌یابد [۱۰].

۳- کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی

استفاده از پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع مختلف به شدت در حال افزایش است. نانوکامپوزیت پلیمری از زمینه‌ی پلیمر به همراه یک ماده تقویت کننده در مقیاس نانو، شکل می‌گیرد. مواد پرکننده زیادی برای بهبود یا اصلاح خواص پلیمرها مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که بخشی از این مواد در ابعاد نانو هستند. نانولوله‌های کربنی یکی از بهترین مواد پرکننده برای کاربردهای آینده است. رسانایی، قابلیت ارتجاعی، استحکام، و طول عمر کامپوزیت‌ها، با به کارگیری نانولوله‌های کربنی، قابل ارتقا است. با توجه به خاص بودن مشخصه‌های این نانولوله‌ها، میزان خیلی کم استفاده از آن‌ها می‌تواند اثر خیلی زیاد و ویژه‌ای روی مشخصات یک کامپوزیت داشته باشد [۱۴].

اما بهبود خواص کامپوزیت‌ها به کمک نانولوله‌ها تا به امروز به میزانی که مورد انتظار بوده، نرسیده است. مدول الاستیک زیاد و مقاومت کششی بالای نانولوله‌های کربنی، زمانی که آن‌ها با پلیمر پیوند می‌خورند، همواره یک نانوکامپوزیت با مشخصات ارتقا یافته را تضمین نمی‌کند. برای رشد و توسعه اقتصادی استفاده از نانولوله‌ها چالش‌های فنی وجود دارند که باید رفع گردند. بزرگ‌ترین چالش در این مسیر هزینه‌ی تمام شده است. نانولوله‌های کربنی باکیفیت و خالص قیمت بالایی دارند. هرچند، در سالیان گذشته به دلیل تمرکز بر روی تولید انبوه نانولوله‌ها، قیمت آن‌ها به مقدار قابل توجهی، کاهش یافته است [۱۴].

بررسی مطالعات انجام شده نشان دهنده این است که چهار شرط از جمله، تقویت، پراکندگی، بزرگ بودن نسبت سطح به حجم، منتقل شدن تنش بین دو فاز زمینه و تقویت کننده، برای بهینه شدن خصوصیات مواد کامپوزیتی وجود دارد. نانولوله‌های کربنی عموماً، نسبت سطح به حجم بسیار بالایی دارند، در حالی که طول مطلق کوتاهی دارند که در این شرایط ایجاد تغییر در آن‌ها دشوار می‌شود. طول بیشتر برای نانولوله‌ها عموماً در مقیاس میکرون مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که نانولوله‌های خاصی با طول چند سانتیمتر هم ساخته شده‌اند [۱۵]. این ویژگی نانولوله‌ها باعث می‌شود که نیروی کووالانسی قوی بین آن‌ها تشکیل شود که باعث ایجاد باندها بین آن‌ها شده که این امر جداسازی آن‌ها را دشوار می‌کند. کارایی هر چه بهتر نانو لوله‌ها در گرو توزیع یکنواخت و مناسب آن‌ها در کنار یکدیگر است. به علت داشتن ویژگی‌های ساختاری و الکتریکی مشخص، نانولوله‌ها به ایجاد پیوند قدرتمند با زمینه میزبان، تمایلی ندارند. در نظر گرفتن این مساله، بهبود خواص و عملکرد بهینه این ذرات محدود می‌شود. برای حل این مساله مطالعات شیمیایی زیادی انجام شده است که نشان داده برای رسیدن به نتایج بهتر نیاز است درک هر چه بیشتری از برهم‌کنش بین نانولوله‌ها و پلیمر حاصل شود. فرایند تولید و پردازش نانولوله‌ها باعث می‌شود که تک دیواره یا چند دیواره بودن، قطر، طول، ناخالصی‌ها و عیوب در نانولوله‌ها مشاهده شود و خواص آن‌ها متغیر باشد. در صورت ضعیف بودن پیوستگی بین دو فاز، تمرکز بار مشاهده می‌شود و باعث می‌شود نانولوله‌ها شبیه ترک یا سوراخ درون پلیمر عمل کنند و به همین دلیل، امکان جدا شدن آن‌ها وجود دارد [۱۶].

برای انتقال بار موثر در پلیمر توزیع نانولوله‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. این مسأله باعث می‌شود که توزیع تنش به صورت یکنواخت صورت گیرد و تاثیر تمرکز تنش حداقل شود. در رابطه با پراکندگی نانولوله‌ها در زمینه، دو چالش، یعنی جدا کردن نانولوله‌ها از همدیگر و در مرحله بعد مخلوط کردن یکنواخت نانولوله‌ها با زمینه پلیمر وجود دارد. هم‌ترازی نانولوله کربنی درون زمینه، از بین چهار شرط مطرح شده برای تقویت بهتر کامپوزیت به واسطه نانولوله کربنی، کم اهمیت‌ترین شرط است. عموماً نیازهای هم‌ترازی، با در نظر گرفتن کارایی، برنامه ریزی می‌شود. اگر نانولوله‌ها به شدت متمایل به یک جهت خاص باشند، بیشترین استحکام مشاهده خواهد شد. نانولوله‌هایی که به صورت تصادفی و غیریکنواخت توزیع می‌شوند منجر به خواص مکانیکی ایزوتروپیک می‌شوند که باعث کاهش بهینه سازی در خواص زمینه می‌شود. برای داشتن نانوکامپوزیت با قابلیت بالا و کارایی بهتر نیاز است تا شرایطی برای توزیع همگن و یکنواخت این نانو ذرات فراهم شود [۱۷-۱۵].

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

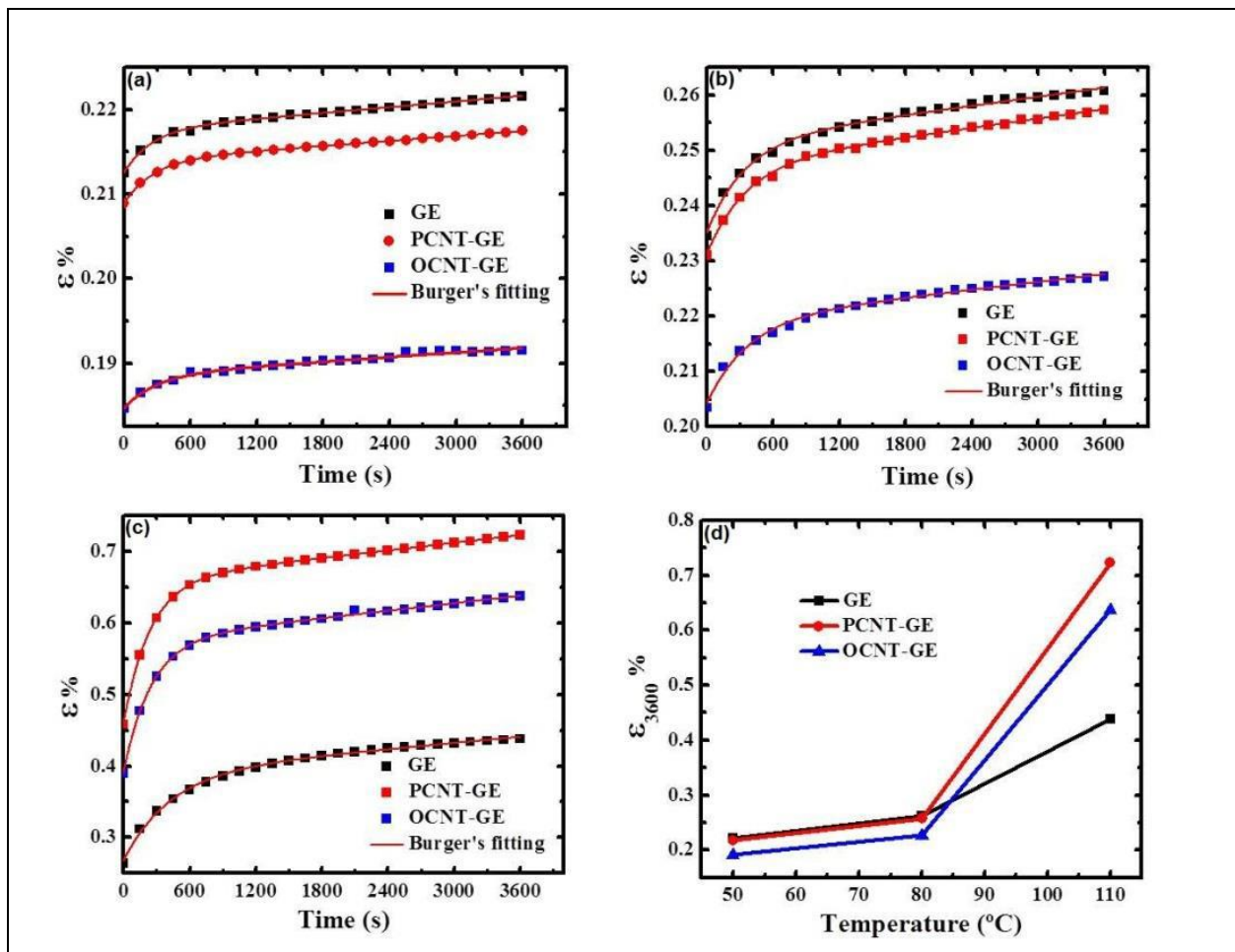
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

۴- خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی

ماده ویسکوالاستیک به ماده‌ای اطلاق می‌شود که رابطه‌ی بین کرنش ایجاد شده و تنش اعمالی بر آن ماده با زمان تغییر کند. شناخت مشخصات ویسکوالاستیک نانولوله‌های کربنی به واسطه وابستگی مشخصات مکانیکی نانولوله‌ها به ساختار و اندازه نانو، از شناخت مشخصه‌های مواد دیگر، دشوارتر است.

در مطالعاتی که اخیراً صورت گرفته پیشرفت قابل توجهی در این راستا اتفاق افتاده است. دو روش تجربی و نظری برای حاصل شدن نتیجه مورد نظر استفاده شده است. در ادامه برخی از این مطالعات بررسی شده است. همواره ارائه یک مدل رفتاری برای شبیه سازی پاسخ کامپوزیت پلیمری به بارگذاری مکانیکی تحت شرایط دمایی مختلف اهمیت داشته است [۱۹-۱۸]. در همین راستا آناند و همکاران نشان دادند که با کاهش دما نرخ کرنش و کرنش خزشی کاهش می یابد [۲۰].



شکل ۱. نمودارهای خزش در دماهای ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد [۲۰]

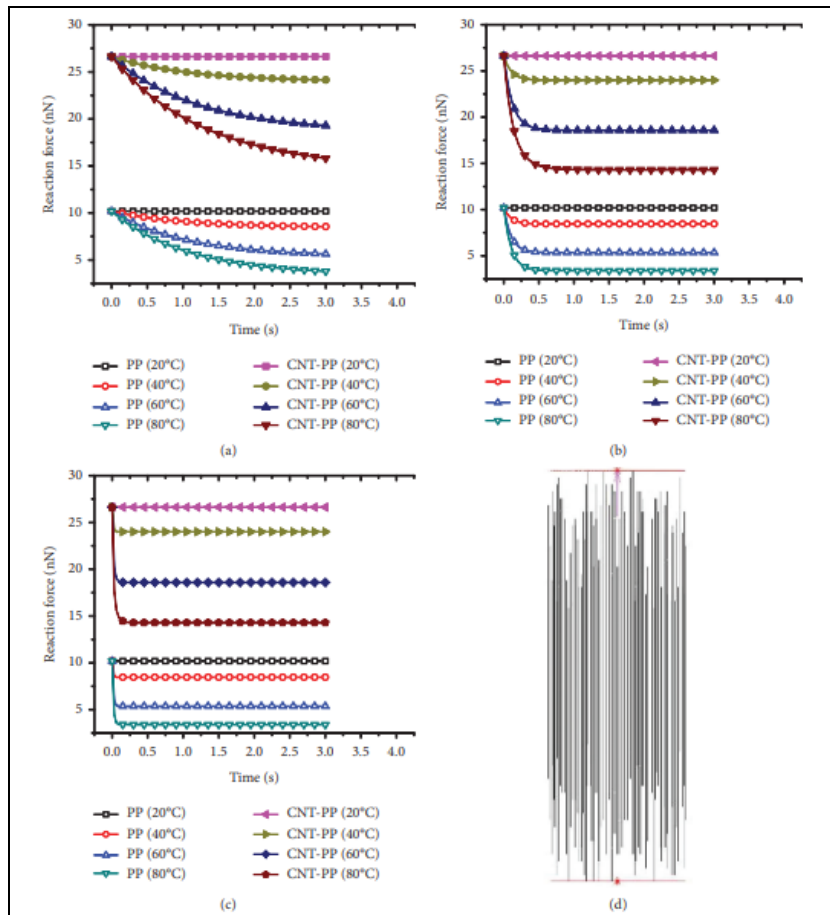
روش المان محدود یکی از روش‌هایی است که برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی پلیمرهای تقویت شده با نانولوله‌های کربنی استفاده می‌شود. هانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ با به کارگیری همین روش در مطالعه‌ای با در نظر گرفتن پلیمر به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، اثر دما را بر مشخصه‌های ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بررسی کردند [۲۱]. در این مطالعه تغییرات زمان ماند برای شبیه‌سازی خواص ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت‌های در دماهای مختلف استفاده شد. نتایج عددی در شکل زیر

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

نشان داده شده است. در همه موارد، جابجایی بارگذاری در ۰.۱ نانومتر و کسر حجمی بر روی ۰.۵٪ ثابت شده است، بنابراین نیروهای واکنش، که پاسخ به جابجایی هستند، به این صورت به دست می‌آیند.



شکل ۲. نمودار نیرو-زمان ماند برای دماهای مختلف [۲۱]

به طور کلی پلیمرهای مورد استفاده در صنایع مهندسی از خود رفتار ویسکوالاستیک (تغییر خواص الاستیک با نرخ بارگذاری) نشان می‌دهند. عموماً مواد ویسکوالاستیک از خود رفتار خزشی در پاسخ به بار ثابت نشان می‌دهند. از طرفی دیگر، پلیمرهای تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک زمینه‌ای، از خود رفتار وابسته به زمان نشان می‌دهند [۲۲]. یانگ و همکاران مقاومت خزشی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با یک درصد حجمی نانولوله‌های چندجداره را بررسی و گزارش کرده‌اند که بر اثر اضافه کردن نانولوله کربنی، نرخ کرنش و تغییر شکل کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است [۲۳].

مدل توسعه‌یافته لی و همکاران، وابستگی رفتار خزشی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی را نسبت به تغییر دما، ابعاد نانولوله، کسر حجمی نانولوله و جهت‌گیری نانولوله به عنوان پارامتر کنترل کننده ارائه کرده است [۲۴]. جیا و همکاران، کرنش‌های خزشی برای نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با نانولوله کربنی را بررسی کردند [۲۵].

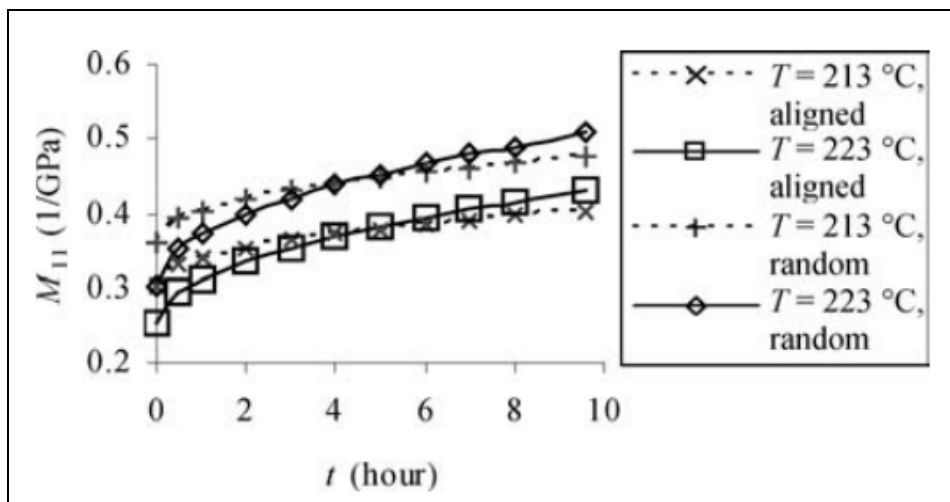
در ادامه تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده، پاسخ ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانولوله کربنی توسط استارکووا مطالعه شد [۲۶]. در کنار کارهای آزمایشگاهی انجام شده بر رفتار ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت‌های پلیمری، مطالعات تحلیلی فراوانی بر رفتار ویسکوالاستیک نانوکامپوزیت‌ها انجام شده است. لی و همکاران، یک مدل میکرومکانیکی برای تأثیر بارگذاری نانولوله‌های کربنی بر نانوکامپوزیت‌ها ارائه کردند. آن‌ها مطالعاتی را بر تأثیرات جهت‌گیری نانولوله‌های کربنی و تغییرات دما بر رفتار ویسکوالاستیک

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

نانوکامپوزیتها انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت ابعاد نانولوله‌ها به طور قابل توجهی مقاومت خزشی محوری آنها را افزایش می‌دهد، اما تأثیرات ناچیزی بر روی انطباق خزش عرضی، برشی و کرنش صفحه‌ای دارد. علاوه بر این، تأثیر جهت گیری نانولوله بر روی انطباق برشی بسیار ناچیز است. علاوه بر این، برای کامپوزیت‌هایی با نانولوله‌های هم‌تراز یا با جهت‌گیری تصادفی، همه انطباق‌ها با افزایش کسر حجمی نانولوله به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابند. در نهایت، تأثیرات دمای آزمایش بر روی انطباق خزش مرکب مشابه تأثیرات روی انطباق ماتریس است. [۲۷]. پن و همکاران، یک مطالعه میکرومکانیکی را بر تأثیرات صفحه میانی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی انجام دادند. در این مطالعه انتقال بار از ماتریس به نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفت و یک رابط برای بررسی اثر لغزش سطحی بر خزش وابسته به زمان ارائه دادند و نشان داده شد که ویژگی‌های ویسکو الاستیک نانو کامپوزیت به شرایط رابط وابسته است [۲۸]. در مدل لی و همکاران، در دو دمای ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۲۳ درجه سانتی‌گراد، بررسی انطباق کرنش انجام شد که اثر دما مشابه انطباق ماتریس بود، به این صورت که در دمای ۲۱۳ درجه سانتی‌گراد مقدار انطباق در ابتدا بزرگتر از دمای ۲۲۳ درجه است ولی در انتها کمتر شده بود [۲۷].



شکل ۳. انطباق خزش کامپوزیت پلیمری تقویت شده با نانولوله کربنی [۲۷]

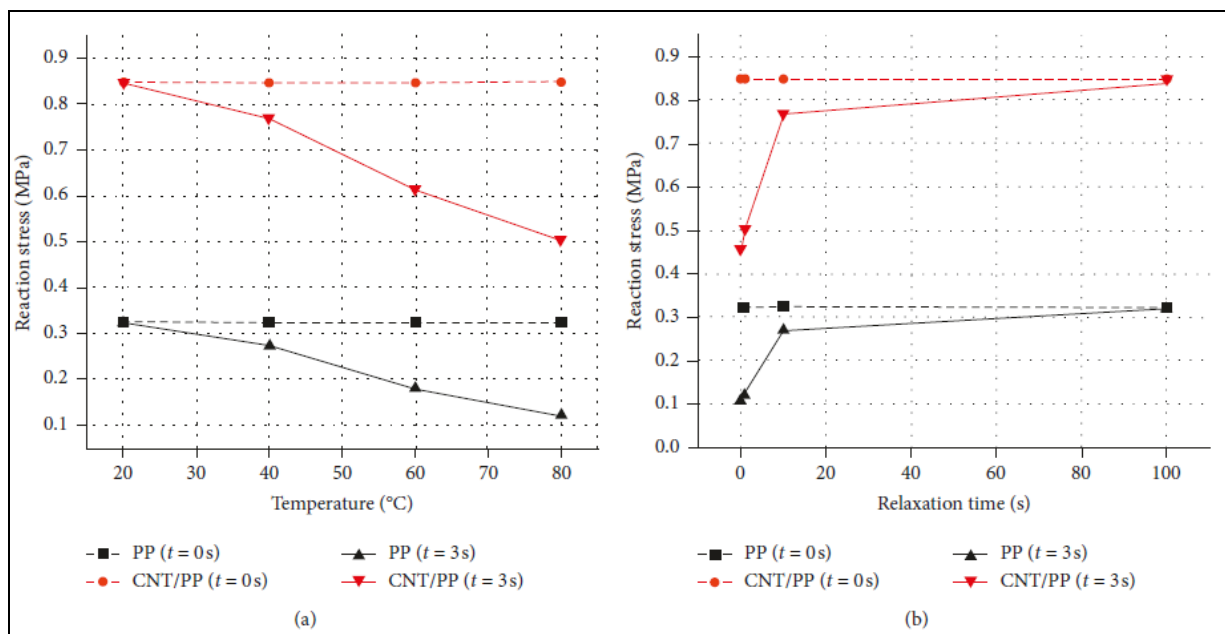
بررسی تأثیرات فاز میانی ویسکو الاستیک بر خواص مکانیکی کامپوزیت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. هاشمی، رفتار وابسته به زمان نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با گرافین را مورد مطالعه قرار داد. تأثیرات شرایط اتصال صفحه میانی بر مشخصه‌های ویسکو الاستیک کامپوزیت در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شرایط رابط تأثیر زیادی بر تنش و رابطه تنش-کرنش نانوکامپوزیت‌های گرافن/پلیمر تحت بارگذاری با نرخ کرنش ثابت دارد. همچنین داده‌های خزش تجربی را نمی‌توان به طور رضایت‌بخش تحت شرایط فرضی رابط، مدل‌سازی کرد. [۲۸]. انصاری و حسن زاده، رفتار خزشی نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را توسط مدل میکرومکانیکی سلولی مطالعه کردند. المان حجمی نماینده این پژوهش از سه فاز مجزای پلیمر، نانولوله کربنی و فازمیانی نانولوله/پلیمر تشکیل شده بود [۲۹]. لی و ونگ، تأثیرات فاز میانی ویسکو الاستیک بر نرمی خزشی و کرنش کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با فیبر را که روابط تنش تحت یک تنش ثابت قرار دارند، بررسی کردند [۳۰]. انصاری و حسن زاده، با استفاده از ادغام مدل ویسکو الاستیک شیپری با مدل میکرومکانیکی سلول واحد، پاسخ ویسکو الاستیک نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تحت بارگذاری تک‌جهت و دوجبهت را بررسی کردند. آن‌ها از این مدل برای مطالعه تأثیرات فاز میانی (الاستیک یا ویسکو الاستیک) بر رفتار خزشی نانوکامپوزیت استفاده کردند. نتایج به وضوح نشان داد که کرنش خزشی عرضی به رفتار ویسکو الاستیک غیرخطی پلیمری و ماده بین فازی وابسته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که رفتار کلی نانوکامپوزیت مشابه پاسخ الاستیک در جهت محوری است. علاوه بر این، در این مطالعه منحنی‌های تنش-کرنش هم‌زمان برای بارگذاری

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

دو محوری و سه محوری استخراج شدند [۳۱]. فیشر و برنسون، خواص مکانیکی یک کامپوزیت ویسکوالاستیک سه فاز را با استفاده از روش میکرو مکانیکی تاناکا استخراج کردند. آن‌ها دریافتند که حضور یک ناحیه فاز میانی با خواص ویسکوالاستیک متفاوت با زمینه، تأثیری در نرخ‌های تعویضی مدول‌های برشی ندارد [۳۲].
کانگ و همکاران نشان دادند که زمان ماند و دما بر روی استحکام و سفتی بیشتر کامپوزیت‌ها تأثیر زیادی دارند و می‌توانند باعث بهبود هرچه بیشتر آن شوند. در این مطالعه نشان داده شد که تغییرات با افزایش دما بیشتر و سریعتر خواهد بود. نشان داده شد که ظرفیت تنش پارامتر است که با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۳].



شکل ۴. اثر دما و زمان ماند بر مشخصه‌های ویسکوالاستیک [۲۱]. مشاهده می‌شود که تنش‌های CNT/PP بسیار بزرگ‌تر از PP است، هر چند زمان بارگذاری صفر ثانیه یا ۳ ثانیه در نظر گرفته شود. هنگامی که زمان بارگذاری ۳ ثانیه است، تنش‌های واکنش با افزایش دما کاهش می‌یابد.

۵- جمع بندی

در مطالعات مختلف مشاهده شد که با زیاد شدن درصد حجمی نانولوله‌های کربنی مقدار بیشینه کرنش ویسکوالاستیک کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که با تغییر کمی در درصد حجمی تفاوت زیادی در این مقدار بیشینه حاصل می‌شود. همچنین نشان داده شده است که کاهش دما باعث کاهش کرنش خزشی و نرخ کرنش می‌شود. برای بررسی اثر دما بر رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های پلیمری مدل‌سازی‌هایی هم انجام شده است که وابستگی رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت پلیمری به دما به عنوان پارامتر کنترل‌کننده بررسی شده است. نتایج مطالعات نشان داد که انطباق حجمی کرنش صفحه به طور یکنواخت با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین شد. مقایسه نتایج تجربی و نتایج نظری نشان داد که، مدل HalpinTsai اصلاح شده برای خواص مکانیکی و مدل Schapery اصلاح شده برای خواص گرمایی و نتایج تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. به طوری که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به ماتریس پلیمری سبب کاهش ضریب انبساط گرمایی و افزایش مدول ماتریس تقویت شده می‌شود. نتایج تجربی، کاهش ۲۳/۷ درصد و افزایش ۹ درصد و پیش‌بینی نظری کاهش ۲۳/۲ درصد و افزایش ۱۰/۵ درصد را نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده تأیید می‌کند، نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت منظر زیاد، چگالی کم و نیروهای برهم کنش و اندروالسی زیاد، به طور یکنواخت در داخل ماتریس پلیمری پراکنده نمی‌شود. ظرفیت تنش با افزایش دما کاهش می‌یابد، به خصوص زمانی که دما ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. به طور مشابه، اگر زمان ماند به اندازه کافی زیاد باشد، مشخصه سیالیت کامپوزیت بیشتر به مشخصه جامد نزدیک است. دما و زمان ماند هر چه باشد، SWCNT

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

می تواند به طور بسیار موثری خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ها را زمانی که بارگذاری ثابت است، حتی در محتوای کم، بهبود بخشد. با این حال، افزایش کسر حجمی SWCNT منجر به سفتی و استحکام بالاتر نانوکامپوزیت های SWCNT/PP خواهد شد. در مقابل، زمانی که نیروی بارگذاری ثابت باشد، SWCNT به طور موثر تغییر شکل نانوکامپوزیت ها را محدود می کند. با افزایش محتوای SWCNT، رفتار خرنده نانوکامپوزیت ها اهمیت کمتری پیدا می کند.

۶- پیشنهادات

برای کاهش عدم قطعیت ها، لازم است که بررسی تاثیر دما با مطالعات عددی و مدل سازی های بیشتر انجام شود.

۷- منابع

- [1] Zhang, X., Zhang, J., Wang, R., & Liu, Z. (2004). Cationic surfactant directed polyaniline/CNT nanocables: synthesis, characterization, and enhanced electrical properties. *Carbon*, 42(8-9), 1455-1461.
- [2] Sahoo, N. G., Rana, S., Cho, J. W., Li, L., & Chan, S. H. (2010). Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes. *Progress in polymer science*, 35(7), 837-867.
- [3] Horastani, Z. K., Sayedi, S. M., & Sheikhi, M. H. (2014). Effect of single wall carbon nanotube additive on electrical conductivity and methane sensitivity of SnO₂. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202, 461-468.
- [4] Llobet, E. (2013). Gas sensors using carbon nanomaterials: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 179, 32-45.
- [5] Karataş, M. A., & Gökçaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326.
- [6] Hegde, S., Shenoy, B. S., & Chethan, K. N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658-662.
- [7] Gangineni, P. K., Yandrapu, S., Ghosh, S. K., Anand, A., Prusty, R. K., & Ray, B. C. (2019). Mechanical behavior of Graphene decorated carbon fiber reinforced polymer composites: An assessment of the influence of functional groups. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 122, 36-44.
- [8] Asmatulu, E., Twomey, J., & Overcash, M. (2014). Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal of Composite Materials*, 48(5), 593-608.
- [9] Wang, B., Ma, S., Yan, S., & Zhu, J. (2019). Readily recyclable carbon fiber reinforced composites based on degradable thermosets: a review. *Green Chemistry*, 21(21), 5781-5796.
- [10] Greene, J. P. (2021). *Automotive Plastics and Composites: Materials and Processing*. William Andrew.
- [11] Nawab, Y., Sapuan, S. M., & Shaker, K. (Eds.). (2021). *Composite Solutions for Ballistics*. Woodhead Publishing.
- [12] Tong, P., Meng, Y., Liang, J., & Li, J. (2021). Molecularly imprinted electrochemical luminescence sensor based on core-shell magnetic particles with ZIF-8 imprinted material. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 330, 129405.
- [13] Tong, P., Li, M., Meng, Y., & Li, J. (2021). Molecularly imprinted polymer composites in biological analysis. In *Molecularly Imprinted Polymer Composites* (pp. 143-172). Woodhead Publishing.
- [14] حاجی زاده اصل رضا، & یارمحمد توسکی مهدی. (۲۰۲۱). بررسی تاثیر نانو لوله های کربنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه پلیمری.
- [15] حسن زاده اقدم، کرامتی، یاسین، & انصاری. (۲۰۲۳). تحلیل میکرومکانیکی خواص موثر کامپوزیت های زمینه پلیمری حاوی ذرات کربنی پیژوالکتریک و نانولوله های کربنی. *مهندسی مکانیک*, ۳۱(۶)، ۱۳-۲۵.
- [16] Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 354(6348), 56-58.
- [17] Jin, F. L., & Park, S. J. (2011). A review of the preparation and properties of carbon nanotubes-reinforced polymer composites. *Carbon letters*, 12(2), 57-69.
- [18] Shaffer, M. S., & Windle, A. H. (1999). Fabrication and characterization of carbon nanotube/poly (vinyl alcohol) composites. *Advanced materials*, 11(11), 937-941.
- [19] Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D., and Young, J. S., "Surfactant-assisted processing of carbon nanotube/polymer composites," *Chem. Mater.* 12, 1049-1052 (2000)
- [20] Anand, A., Banerjee, P., Sahoo, D., Rathore, D. K., Prusty, R. K., & Ray, B. C. (2019). Effects of temperature and load on the creep performance of CNT reinforced laminated glass fiber/epoxy composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 539-547.
- [21] Huang, J., Rodrigue, D., & Dong, L. (2021). Effect of Temperature on the Viscoelastic Properties of Carbon Nanotube Reinforced Polypropylene Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1-12.
- [22] Hashemi, R. (2016). On the overall viscoelastic behavior of graphene/polymer nanocomposites with imperfect interface. *International Journal of Engineering Science*, 105, 38-55.
- [23] Yang, B. J., Kim, B. R., & Lee, H. K. (2012). Predictions of viscoelastic strain rate dependent behavior of fiber-reinforced polymeric composites. *Composite Structures*, 94(4), 1420-1429.
- [24] Darvizeh, A., Ansari, R., Mahmoudi, M. J., & Hassanzadeh, M. K. (2016). Investigation of interphase effect on the non-linear viscoelastic behavior of multiphase polymer composites. *Modares Mechanical Engineering*, 16(1), 181-191.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

- [25] Jia, Y., Peng, K., Gong, X. L., & Zhang, Z. (2011). Creep and recovery of polypropylene/carbon nanotube composites. *International Journal of Plasticity*, 27(8), 1239-1251.
- [26] Starkova, O., Buschhorn, S. T., Mannov, E., Schulte, K., & Aniskevich, A. (2012). Creep and recovery of epoxy/MWCNT nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1212-1218.
- [27] Li, K., Gao, X. L., & Roy, A. K. (2006). Micromechanical modeling of viscoelastic properties of carbon nanotube-reinforced polymer composites. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 13(4), 317-328.
- [28] Pan, Y., Weng, G. J., Meguid, S. A., Bao, W. S., Zhu, Z. H., & Hamouda, A. M. S. (2013). Interface effects on the viscoelastic characteristics of carbon nanotube polymer matrix composites. *Mechanics of Materials*, 58, 1-11
- [29] Ansari, R., & Aghdam, M. H. (2016). Micromechanics-based viscoelastic analysis of carbon nanotube-reinforced composites subjected to uniaxial and biaxial loading. *Composites Part B: Engineering*, 90, 512-522.
- [30] Li, J., & Weng, G. J. (1996). Effect of a viscoelastic interphase on the creep and stress/strain behavior of fiber-reinforced polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 27(6), 589-598.
- [31] Ansari, R., & Hassanzadeh-Aghdam, M. K. (2016). Micromechanical investigation of creep-recovery behavior of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 115, 45-55.
- [32] Fisher, F. T., & Brinson, L. C. (2001). Viscoelastic interphases in polymer-matrix composites: theoretical models and finite-element analysis. *Composites Science and Technology*, 61(5), 731-748.
- [33] Kong, J., Ye, Z., Chen, W., Shao, X., Wang, K., & Zhou, Q. (2015). Dynamic mechanical behavior of a Zr-based bulk metallic glass composite. *Materials & Design*, 88, 69-74.