

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

تأثیر دما بر رفتار ویسکوالاستیک کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با نانو لوله های کربنی

عاطفه پورجاهد^۱، علی ظاهرزاده^۲ (نویسنده مسئول) ، نرگس یاقوت پور^۳

^۱استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول atefehpourjahed@gmail.com

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد پدیده‌های انتقال، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول zaherzadeh_khdez@yahoo.com

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد شبکه های کامپیوتری، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه غیرانتفاعی کارون اهواز Narges.teacher@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، اثر دما بر خواص رئولوژیکی پلیمرهای تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی، پلیمرهای پلی پروپیلن، پلی اتیلن سنگین با وزن مولکولی بالا، فوتورزیست، اپوکسی و پلی‌تری‌متیل‌ترفتالات مورد بررسی قرار گرفته است. پلیمرهای ذکر شده، به عنوان ماده ویسکوالاستیک و نانولوله‌های کربنی به عنوان ماده الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شوند. جهت مقایسه خواص ویسکوالاستیک پلیمر خالص و نانو کامپوزیت پلیمری، پارامترهایی از جمله زمان آرامش، مدول ذخیره و مدول اتلاف در دماها و ترکیب درصدی مختلف از نانولوله‌های کربنی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نانو کامپوزیت، نانو لوله های کربنی، اثر دما، خواص 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

۱. مقدمه

پلیمرهای مورد استفاده در صنایع مهندسی از خود رفتار ویسکوالاستیک (تغییر خواص الاستیک با نرخ بارگذاری) نشان می‌دهند. به طور کلی مواد ویسکوالاستیک از خود رفتار خزشی در پاسخ به بار ثابت ارائه می‌دهند [۱]. همه‌ی مواد تا حدی می‌توانند از خود رفتار ویسکوالاستیک نشان دهند؛ رفتار ویسکوالاستیک مواد معمولاً وابسته به شرایط محیطی مانند دما است. هنگامی که دما تا نیمی از دمای ذوب ماده افزایش یابد، اثرات ویسکوالاستیک ظاهر می‌شوند. مواد پلیمری در دمای اتاق رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. وابستگی دمایی خواص پلیمرها کاملاً متفاوت است و در مورد آن‌ها دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) برای بررسی رفتار ویسکوالاستیک آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. این مسئله در مورد فرمولاسیون‌های مختلف اپوکسی نیز که دماهای انتقال شیشه‌ای و پخت متفاوتی دارند، نیز صادق است. برخی از پلیمرها مانند پلی‌ایمیدها دارای خواص خوبی در دماهای بالا هستند که به آن‌ها امکان رقابت با تیتانیوم را می‌دهد. به عنوان مثال، در قطعات موتور هواپیما از ماتریس‌های پلی‌ایمید استفاده می‌شود که دمای کارکرد بالایی تا ۲۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد دارند [۱].

برای بهبود خواص مکانیکی پلیمرها، انواع مختلفی از ذرات با خواص ویژه به ماتریس افزوده می‌شود که از جمله ذرات نانوآکاکرس در حجم‌های مختلف با پلی‌پروپیلن ترکیب می‌شود تا خواص حرارتی و ویسکوالاستیک این پلیمر بهبود یابد. اگرچه فیلرها (پرکننده‌ها) سبب بهبود خواص مکانیکی پلیمرها می‌شوند، با این حال نانوذرات به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالاتر برای بهبود خواص پلیمرها جذاب‌تر هستند. به طور خاص نانولوله‌های کربنی (CNTs) به دلیل ترکیب منحصر به فرد خود، از نظر خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به همین دلیل این نانومواد پتانسیل بالایی برای ترکیب شدن با ماتریس پلیمری و بهبود خصوصیات مختلف آن دارند. مدول یانگ نانولوله‌های کربنی در محدوده‌ی بین ۲-۱ تر پاسکال و استحکام کششی آن‌ها نیز بین ۱۰۰-۳۷ گیگاپاسکال است. اتصالات کووالانسی سیگما بین اتم‌های کربن سبب این خواص مکانیکی بهینه است [۲].

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک زمینه، از خود رفتار وابسته به زمان نشان می‌دهند. به همین دلیل مطالعه خصوصیات ویسکوالاستیک چنین موادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین خواص کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به ویژه استحکام، به شدت وابسته به دما می‌باشد [۱،۳].

نانولوله‌های تک‌دیواره به دلیل سختی و استحکام بالا، حتی در مقدار کم (کم‌تر از یک درصد وزنی) منجر به افزایش قابل توجه در خواص مکانیکی می‌شوند. افزایش حجم CNT ها به درون ماتریس پلیمر با محدودیت مواجه است؛ زیرا در صورت افزودن حجم بالا از این نانومواد، آن‌ها به آسانی درون پلیمر مذاب با ویسکوزیته‌ی بالا پراکنده نمی‌شوند. میزان بهینه درصد وزنی نانولوله‌های جهت افزایش کارآمدی تقویت کننده، حدود ۵/۰ درصد برآورد شده است. علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، افزودن CNT تاثیر مستقیمی بر خواص رئولوژی نانوکامپوزیت‌ها دارد. CNT ها سبب افزایش ویسکوزیته پلیمر شده و تغییر فاز از حالت سیال به جامد رخ می‌دهد [۲].

۲. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی پلی‌پروپیلن (PP)

پلی‌پروپیلن ماده‌ای سبک از خانواده پلی‌اولفین‌ها است که در حجم بسیار زیاد و به طور تجاری تولید می‌شود. بلورینگی زیاد پلی‌پروپیلن به این ماده استحکام زیاد، سفتی و سختی می‌بخشد. پلی‌پروپیلن عملاً در اثر تنش‌های محیطی ترک نمی‌خورد، اما این پلیمر به طور ذاتی در برابر تخریب گرمایی پایداری کم‌تری نسبت به دیگر اولفین‌ها چون پلی‌اتیلن دارد. پلی‌پروپیلن به علت کاربری آسان، قیمت و جرم مخصوص کم، کاربرد فراوانی در اتومبیل‌سازی برای قطعاتی چون ضربه‌گیرها، پنجره‌ها، صندلی عقب، دریچه‌های هوا و بخاری داشته و در تولید لوله‌های انتقال آب، نفت خام و گاز تحت فشار و لوله‌های زیرزمینی نیز کاربرد دارد. به دلیل این که PP مدول الاستیک و مقاومت ضربه پایینی دارد، برای بهبود خواص مکانیکی آن، انواع مختلفی از نانوذرات با خواص ویژه به ماتریس افزوده می‌شود [۴].

پلی‌پروپیلن، همچنین دارای یک بازه ترموفرمینک (شکل‌دهی حرارتی) خیلی باریک است و خواص مکانیکی آن با افزایش دما، کاهش می‌یابد. نانولوله‌های کربنی پتانسیل بالایی برای بهبود ماتریس‌های پلیمری دارند. نانو لوله‌های تک دیواره حتی در مقدار کم (کم‌تر از یک

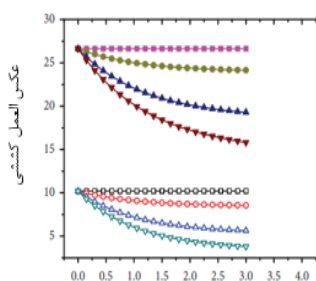
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

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

senaconf.ir

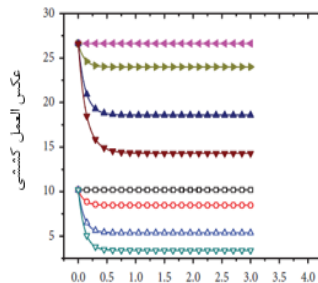
درصد وزنی) به دلیل سختی و استحکام بالا می‌تواند سبب افزایش قابل توجه در خواص مکانیکی شوند. با این حال افزایش حجم CNT به آسانی درون PP با ویسکوزیته بالا پراکنده نمی‌شوند. علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، افزودن CNT، تاثیر مستقیمی بر خواص رئولوژیکی نانوکامپوزیت‌ها دارد. برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک مواد، از مدول آرامش برای ارائه وابستگی زمانی PP/CNT و PP استفاده می‌شود. در مقابل، حجم CNT به کار رفته شده، نقش مهمی در خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها خواهد داشت [۵].

مدول الاستیک PP در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برابر با ۱۸۸۰ مگاپاسکال است [۶]. زمانی که دما به ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌گراد می‌رسد، مدول الاستیک به ترتیب ۱۵۳۶، ۹۴۶ و ۵۸۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. در این جا از تغییر زمان آرامش برای شبیه‌سازی خواص ویسکوالاستیک PP خالص و PP/CNT در دماهای مختلف استفاده می‌شود. نتایج عددی در شکل ۱ ارائه شده است. در همه موارد، کسر حجمی CNT، ۰/۵ درصد ثابت است. بنابراین نیروهای عکس‌العمل پاسخ به جابه‌جایی به دست می‌آیند. شکل ۱-الف، نمودار نیروی عکس‌العمل- زمان بارگذاری برای PP خالص و کامپوزیت PP/CNT در زمان آرامش یک ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار برای همه‌ی موارد، نیروی عکس‌العمل کاهش می‌یابد (پدیده‌ی آرامش). همچنین به آسانی می‌توان دریافت که افزایش دما سبب کاهش خواص ویسکوالاستیک ماتریس و نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. به عنوان مثال، در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و زمان ۳ ثانیه، نیروی عکس‌العمل برای PP خالص از ۱۰/۱۸۸ به ۳/۷۹۹ نانونیوتن در دمای ۲۰ درجه کاهش می‌یابد، و همین شرایط، برای نانوکامپوزیت‌ها، از ۲۶۰۶۳۶ به ۱۵،۸۲ کاهش می‌یابد؛ لذا در دمای بالاتر نانوکامپوزیت‌ها دارای مقاومت بهتری نسبت به ماتریس خالص هستند [۷].



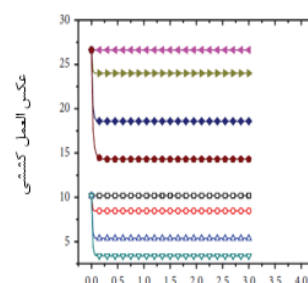
شکل (الف)

□- PP (20°C) ■- CNT-PP (20°C)
 ○- PP (40°C) ●- CNT-PP (40°C)
 △- PP (60°C) ▲- CNT-PP (60°C)
 ▽- PP (80°C) ▼- CNT-PP (80°C)



شکل (ب)

□- PP (20°C) ■- CNT-PP (20°C)
 ○- PP (40°C) ●- CNT-PP (40°C)
 △- PP (60°C) ▲- CNT-PP (60°C)
 ▽- PP (80°C) ▼- CNT-PP (80°C)



شکل (ج)

□- PP (20°C) ■- CNT-PP (20°C)
 ○- PP (40°C) ●- CNT-PP (40°C)
 △- PP (60°C) ▲- CNT-PP (60°C)
 ▽- PP (80°C) ▼- CNT-PP (80°C)

شکل ۱- نمودار عکس‌العمل کششی- زمان در دماهای مختلف؛ الف) در زمان آرامش ۱ ثانیه؛ ب) در زمان آرامش ۰/۱ ثانیه؛ ج) در زمان آرامش ۰/۰۱ ثانیه [۷].

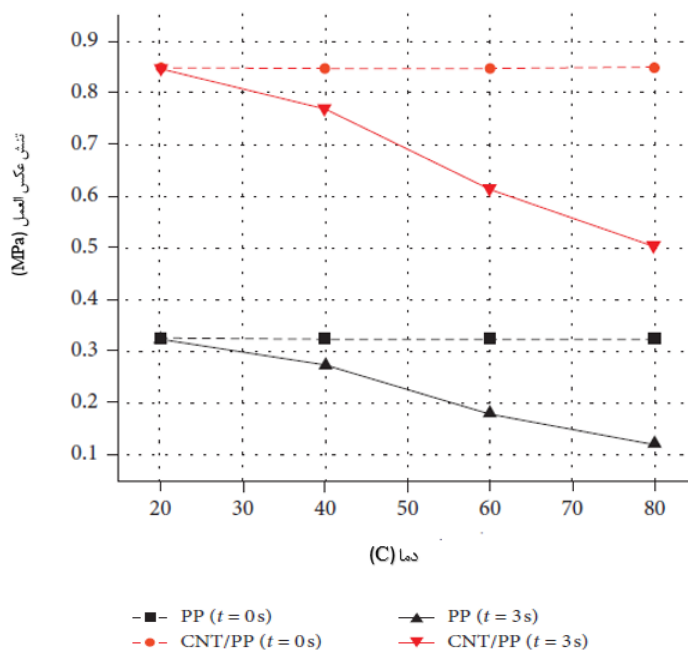
همچنین با توجه به نمودار، برای به دست آوردن تغییر شکل یکسان، باید بارگذاری بیشتری بر روی نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با ماتریس پلیمری خالص اعمال کرد. نمودارهای مشابه برای زمان آرامش ۰/۱ و ۰/۰۱ ثانیه به ترتیب در نمودارهای شکل ۱-ب و ۱-ج آورده شده و در مقایسه با نمودار الف، زمان آرامش تاثیر مستقیمی بر خواص ویسکوالاستیک PP و PP/CNT دارد. در همه موارد، افزایش زمان آرامش، سبب کاهش نیروی عکس‌العمل می‌شود. جهت مقایسه اثر دما و زمان آرامش روی خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌ها، زمان بارگذاری ویژه (۰ و ۳ ثانیه) و حجم (۰/۵ درصد) برای تجزیه و تحلیل نتایج انتخاب شده است. با در نظر گرفتن سطح مقطع نمونه، نیروهای

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

عکس العمل را می توان به تنش های عکس العمل تبدیل کرد. داده های مرتبط در نمودار شکل ۲ رسم شده است. تنش های عکس العمل PP/CNT بسیار بزرگ تر از ماتریس PP است و تفاوتی در زمان بارگذاری ۰ و ۳ ثانیه وجود ندارد. در شرایطی که زمان بارگذاری ۳ ثانیه باشد، تنش های عکس العمل با افزایش دما، کاهش می یابد [۷].



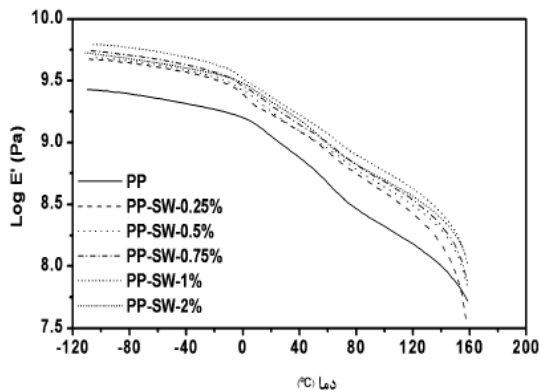
شکل ۲- اثر دما بر خواص ویسکوالاستیک PP و PP/CNT با درصد ترکیب ۰/۵ درصد [۷]

آنالیز حرارتی - دینامیکی - مکانیکی برای مطالعه تأثیر نانولوله های کربنی بر روی مدول ذخیره نانوکامپوزیت PP/CNT انجام شد. شکل ۳ منحنی مدول ذخیره این نانوکامپوزیت ها را نشان می دهد. از این نمودارها دو نتیجه حاصل می شود؛ مدول ذخیره نانوکامپوزیت ها به طور واضح با افزایش دما کاهش می یابد و دیگری همان طور که انتظار می رود با افزایش میزان نانولوله های کربنی در دمای اتاق، مدول ذخیره همانند مدول یانگ نانوکامپوزیت ها افزایش می یابد. در دماهای پایین، پلی پروپیلن و نانوکامپوزیت هایی که از آن ساخته می شود، در شرایط شیشه ای هستند. بنابراین، زنجیره های پلیمری آن ثابت می مانند که این خاصیت می تواند منجر به افزایش ذاتی مدول ذخیره شود. منحنی های $\tan \delta$ نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. واضح است که میزان میرایش، با افزایش دما و مقدار نانو لوله های کربنی تقریباً بدون تغییر است. به علاوه پیک دمای انتقال شیشه ای با افزایش نانولوله های کربنی در پلی پروپیلن به علت هسته زایی نانولوله های کربنی در ماتریس پلیمری که منجر به کریستالیزاسیون سریع تر در پلی پروپیلن می شود، کاهش می یابد [۸، ۲].

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

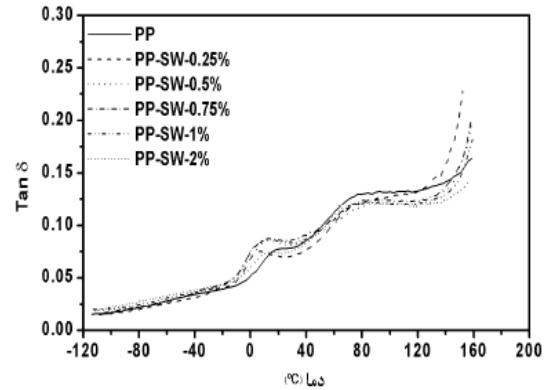
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



شکل ۳- مدول ذخیره پلی پروپیلن و نانو کامپوزیت پلی

پروپیلن/نانولوله کربنی به عنوان تابعی از دما [۸]

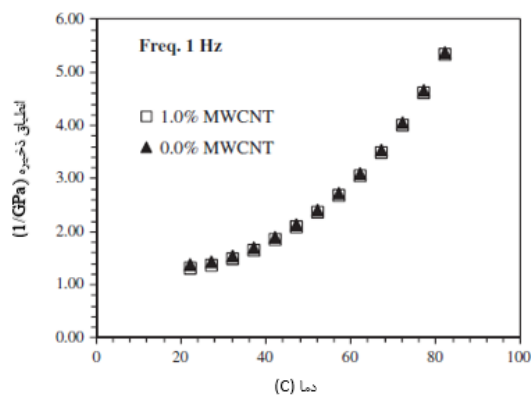


شکل ۴- ترموگراف حرارتی دینامیکی مکانیکی پلی پروپیلن و نانو کامپوزیت

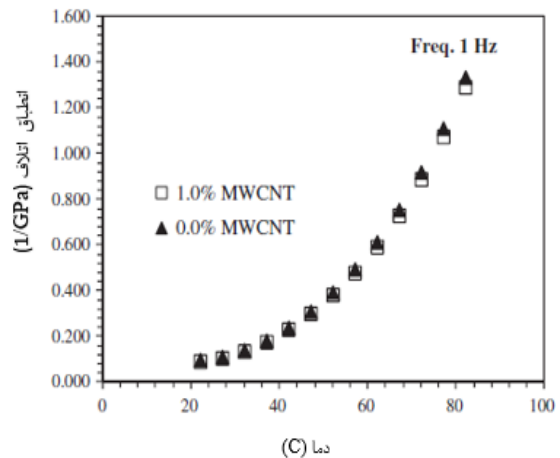
به عنوان تابعی از دما [۸]

۳. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا (UHMWPE)

دلیل افزودن نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT) به UHMWPE، بهبود چقرمگی و مقاومت آن در برابر سایش است. UHMWPE از نظر حرارتی یک ماده‌ی ساده است و روند توزیع زمان‌های آرامش یا تاخیر آن، مستقل از دما است و مقادیر تنش در همه‌ی فرکانس‌ها یا زمان‌ها وابستگی دمایی یکسانی را نشان می‌دهند. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی- دینامیکی- مکانیکی (DMTA) به دست آمد. به این صورت که نمونه‌ها در ۱۲ فرکانس مختلف از ۰/۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز در محدوده‌ی دمایی ۸۲-۲۲ درجه‌ی سانتی‌گراد رسم شد. حداکثر نیروی به کار برده شده، ۸ نیوتن بود که معادل تنش ۰/۸ مگاپاسکال است.



شکل ۵- وادادگی ذخیره بر حسب دما در ۱ هرتز [۹]



شکل ۶- انطباق اتلاف بر حسب دما در یک هرتز [۹].

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

رفتار مکانیکی UHMWPE و نانوکامپوزیت توسط اندازه‌گیری انطباق ذخیره^۱ و انطباق اتلاف^۲ نمونه تحت بار سینوسی در دماها و فرکانس‌های مختلف، مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نمودار شکل ۵، انطباق ذخیره UHMWPE و نانوکامپوزیت UHMWPE/MWCNT (یک درصد) با افزایش دما، افزایش یافت. برای دماهای پایین، کاهش جزئی انطباق ذخیره مشاهده شد ولی برای دماهای بالاتر اثر تقویت‌کنندگی از بین رفت. در نمودار شکل ۶، اثر دما بر انطباق اتلاف نشان داده شده است. می‌توان دریافت که تفاوت قابل توجهی بین UHMWPE و نانوکامپوزیت UHMWPE/MWCNT (یک درصد) وجود ندارد. اگر چه کاهش جزئی انطباق اتلاف نانوکامپوزیت در دماهای بالا وجود دارد، اما برای دماهای پایین تقویت‌کنندگی از بین می‌رود [۹].

۴. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی فوتورزیست SU-8

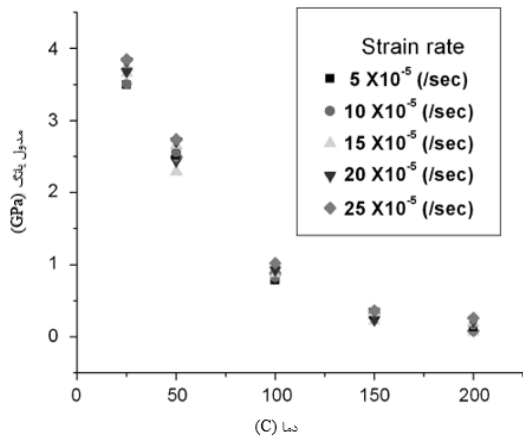
فوتورزیست SU-8 یک فوتورزیست منفی، بر پایه‌ی رزین اپوکسی و حساس به نور UV می‌باشد که جهت کاربردهای میکروالکترومکانیکی (MEMS) و ریزسیالی طراحی شده است. به منظور استفاده صحیح از SU-8 در MEMS درک رفتار مواد از جمله خواص مکانیکی و حرارتی در مقیاس MEMS ضروری است. در مطالعه‌ی ای که توسط سون وان و همکاران انجام شد، مشخصات کامپوزیت پلیمری چند منظوره تقویت شده با CNT در دماها و نرخ جابه‌جایی مختلف، بررسی شده است. مدول یانگ و نسبت پواسون مربوط به SU-8 تقویت شده با CNT با پلیمر SU-8 خالص مقایسه شد. همچنین تغییرات مدول یانگ و نسبت پواسون SU-8 در نرخ کرنش استفاده شده، بررسی شد. با توجه به نمودار شکل ۷، مدول یانگ در تمام دماها، با افزایش نرخ بارگذاری، افزایش یافت، در حالی که با افزایش دما، نسبت پواسون کم شد (نمودار شکل ۸). تغییرات مدول یانگ نسبت به اثر نرخ بارگذاری مبهم بود. دماهای اعمال شده ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و تنش‌های اندازه‌گیری شده در نمودار شکل ۹ ارائه شده است. با افزایش دما، تنش به دلیل کاهش مدول یانگ کم و افت شدید تنش به وضوح در دمای بالا مشاهده شد. با توجه به نتایج حاصله، اثر دما بر آرام سازی تنش SU-8 بسیار بالا بود. بر اساس کار انجام شده، مدول آرامش تنش قابل اندازه‌گیری بود؛ مدول ویسکوالاستیک ماکسول که از نوع سری می‌باشد، کاهش تنش نسبت به زمان را اثبات می‌کند [۱۰].

در این مطالعه، همچنین برای اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک SU-8 خالص، طبق نمودار در دامنه و فرکانس‌های مختلف DMTA انجام شد. برای یک دامنه معین، فرکانس‌های مختلف از ۰/۱ تا ۱۰ هرتز اعمال شد. این فرایند در دماهای بالای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. شکل ۹ مدول ذخیره، مدول اتلاف و ضریب تلفات ($\tan \delta$) را به عنوان تابعی از دما نشان می‌دهد. افت مدول ذخیره و حداکثر مدول تلفات یا فاکتور تلفات در دمای تبدیل شیشه‌ای رخ داد. با توجه به نتایج حاصل از DMTA، دمای انتقال شیشه‌ای بین ۱۵۰-۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. با افزایش فرکانس، دمای انتقال شیشه‌ای افزایش یافت [۱۰].

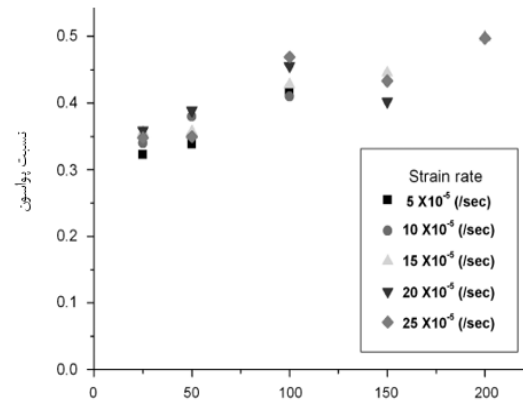
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

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

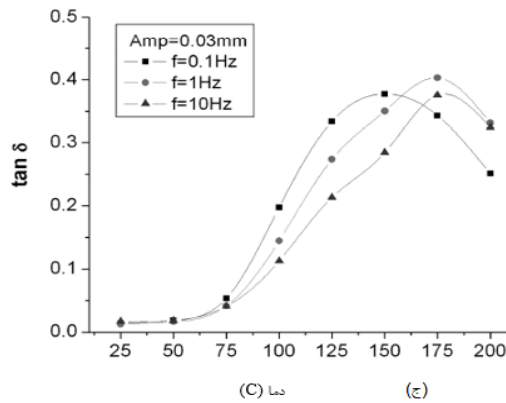
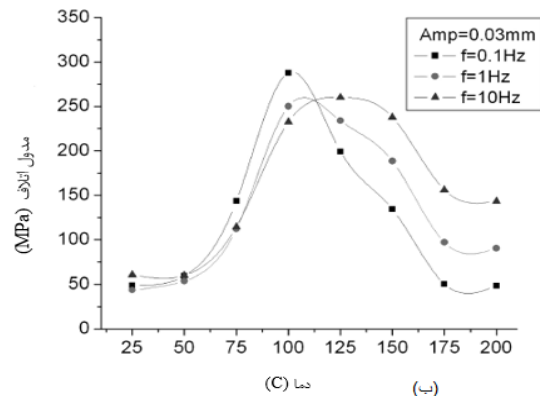
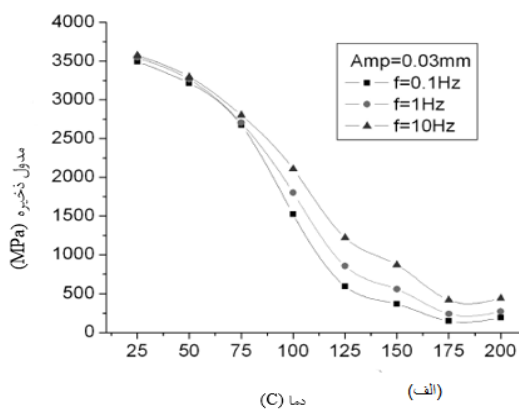
senaconf.ir



شکل ۷- اثر دما بر مدول یانگ [۱۰]



شکل ۸- اثر دما بر نسبت پواسون [۱۰]

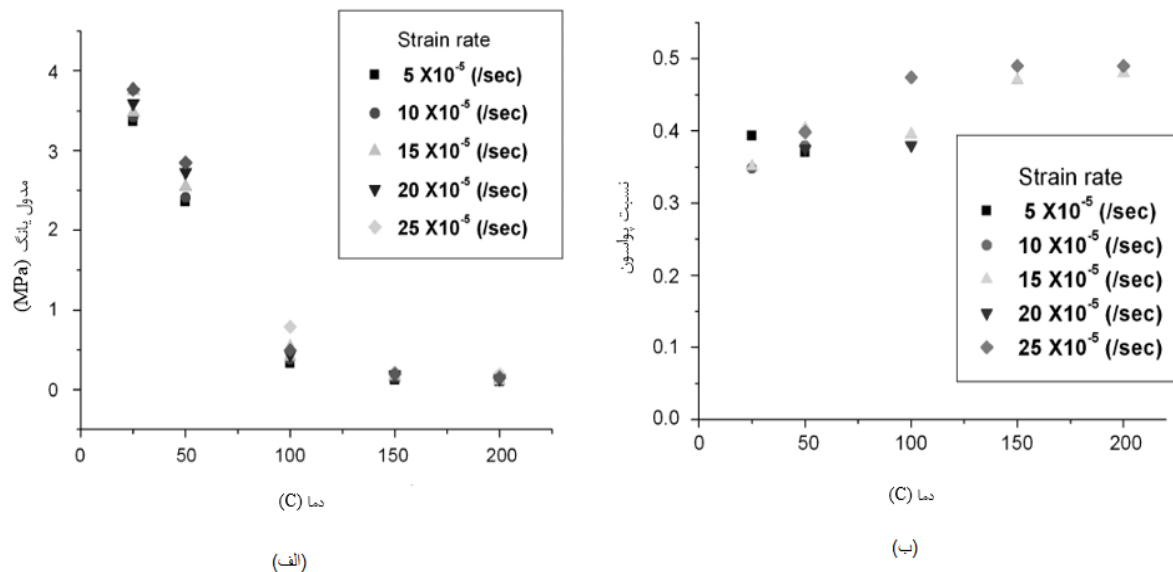


شکل ۹- نتایج DMTA نسبت به دما [۱۰]

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



شکل ۱۰-الف) تغییرات مدول یانگ کامپوزیت نسبت به دما؛ ب) تغییرات نسبت پواسون نسبت به دما [۱۰]

مدول یانگ و نسبت پواسون برای کامپوزیت SU8 تقویت شده با CNT توسط آزمایش کشش تعیین شد. نمونه حاوی ۰/۲ درصد وزنی CNT بود. شکل ۱۰-الف و ب، به ترتیب مدول یانگ و نسبت پواسون را برای این کامپوزیت نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، با افزایش دما، مدول یانگ و نسبت پواسون کاهش یافت. مدول یانگ SU-8 تقویت شده نسبت به SU-8 خالص کمی بیشتر بود. با این حال، پژوهشگران نتوانستند افزایش قابل توجهی در مدول یانگ پلیمر تقویت شده طبق انتظار مشاهده کنند. نسبت پواسون کامپوزیت پلیمری در دماهای بالا بین ۰/۵-۰/۳۵ بود [۱۰].

۵. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی رزین اپوکسی

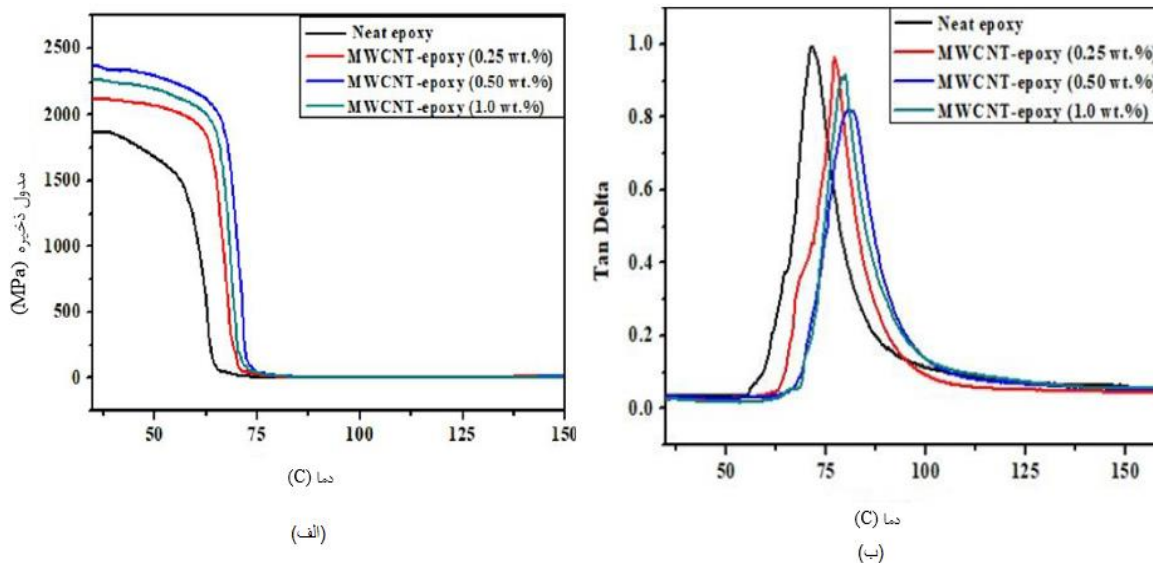
رزین اپوکسی یکی از مهم‌ترین مواد پلیمری است که دارای ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد، چسبندگی عالی، پایداری حرارتی بالا و مقاومت در برابر خوردگی خوب می‌باشد. علی‌رغم این مزایا، دانسیته‌ی اتصال عرضی بالا و مقاومت ضعیف در برابر گسترش ترک، در اپوکسی خالص، سبب می‌شود که این ماده، استحکام و همچنین چقرمگی شکست پایینی از خود نشان دهد که این ویژگی، کاربردهای صنعتی آن را محدود می‌کند. در مطالعه‌ی ای که توسط سری واستاوا و همکاران انجام شد، ترکیب CNTs با استحکام بالا و مساحت سطح ویژه بزرگ، با پلیمر، خواص مکانیکی آن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) به صورت یکنواخت در ماتریس اپوکسی پراکنده شدند. اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی در محدوده‌ی دمایی ۳۰-۱۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، با نرخ گرمایش ۲ درجه بر دقیقه، با استفاده از DMTA مورد بررسی قرار گرفت. این، یک روش ساده برای به دست آوردن مدول ذخیره، مدول اتلاف، و $\tan \delta$ برای پلیمر خالص و نانوکامپوزیت از طریق اندازه‌گیری سفتی و میرایی آنها بود. نمودار شکل ۱۱الف، مدول ذخیره را در دمای مختلف اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی با درصد وزنی مختلفی از MWCTs ارائه می‌دهد. در ناحیه‌ی شیشه‌ای، مقدار مدول ذخیره اپوکسی خالص پایین است. با توجه به نمودار شکل ۱۱، افزایش درصد وزنی MWCNTs در ماتریس اپوکسی، مدول ذخیره نانوکامپوزیت حاصله را افزایش داد. با توجه به برخی مطالعات انجام شده، افزایش مدول استخراج در

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

درجه‌ی اول به دلیل پیوند کووالانسی بالا بین MWCNTs و ماتریس اپوکسی بود. افزودن ۰/۵ درصد وزنی MWCNTs به ماتریس اپوکسی سبب افزایش حداکثری مدول ذخیره به ۲۳۷۱ مگاپاسکال شد که دلیل آن، پراکندگی یکنواخت MWCNTs بوده که در نهایت بیانگر این است که این نانولوله‌های کربنی در درجه بالایی از اتصال عرضی با شبکه سه بعدی ماتریس اپوکسی قرار گرفته بودند؛ برهم‌کنش چسبنده‌ی مناسب و درجه بالای اتصال عرضی، منجر به کاهش تحرک زنجیره مولکولی و افزایش مدول ذخیره نانوکامپوزیت اپوکسی شده است. مدول ذخیره اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت با درصد وزنی مختلف MWCNTs، با افزایش دما و نزدیک شدن به دمای انتقال شیشه‌ای، کاهش یافت. این کاهش مداوم در مدول ذخیره در محدوده‌ی دمای انتقال شیشه‌ای، به تحرک زنجیره‌ی مولکولی نسبت داده می‌شود. طبق نمودار شکل ۱۱ ب، پخش یکنواخت MWCNTs در ماتریس اپوکسی، سطح زیر حداکثر $\tan \delta$ را نسبت به اپوکسی خالص کاهش داد. دلیل آن، پیوند سطحی MWCNTs با ماتریس اپوکسی است؛ از این رو تحرک زنجیره مولکولی ماتریس پلیمر-MWCNTs کاهش یافته و منجر به کاهش پیک میرایی شد [۱۱، ۱۲].



شکل ۱۱-الف) تغییرات مدول ذخیره نسبت به دما؛ ب) تغییرات نسبت پانسون نسبت به دما [۱۱]

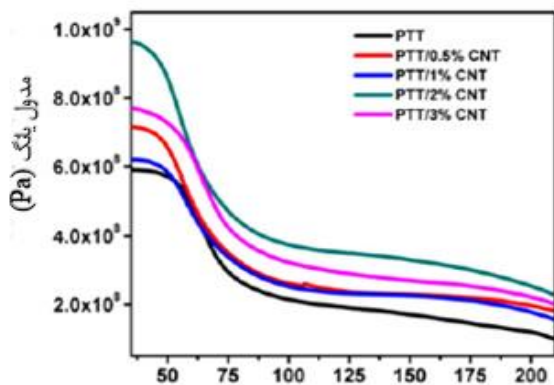
۶. کامپوزیت‌های با زمینه‌ی پلی‌تری‌متیل ترفتالات (PTT)

پلیمر پلی‌تری‌متیل ترفتالات (PTT) یک پلی‌استر آروماتیک نیمه‌کریستالی است که به دلیل دارا بودن سه گروه متیلن، بازیابی الاستیک خوبی نسبت به سایر پلی‌استرها مانند پلی‌بوتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن ترفتالات از خود نشان می‌دهد که با نایلون قابل مقایسه است. از دیگر ویژگی‌های این پلیمر، ثبات خوب رنگ آن، جذب یکنواخت رنگ، مقاومت در برابر لکه است. اگر چه PTT محدودیت‌هایی برای پردازش و شکل‌دهی دارد. در مطالعه‌ی ای که توسط DMTA و همکاران انجام شد نمونه‌هایی از PTT خالص و کامپوزیت PTT تقویت شده با MWCNTs مورد مطالعه قرار گرفت و رفتار ویسکوالاستیک و خواص مرتبط از جمله مدول ذخیره و مدول اتلاف به عنوان تابعی از بارگذاری پرکننده‌ها و دما بررسی شد. تغییرات مدول ذخیره نسبت به دما برای PTT خالص و کامپوزیت PTT در شکل ۱۲ (الف) نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۲ (ب)، وابستگی دمایی مدول ذخیره PTT و نانوکامپوزیت، در سه ناحیه‌ی مختلف وجود دارد؛ ناحیه شیشه‌ای که در آن ناحیه، کامپوزیت‌ها مدول بالا را نشان دادند، منطقه‌ی انتقال که در آن مدول با دما کاهش یافت و ناحیه الاستیک (که به عنوان منطقه جریان شناخته می‌شود) در دمای بسیار بالا رخ داد [۱۳].

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

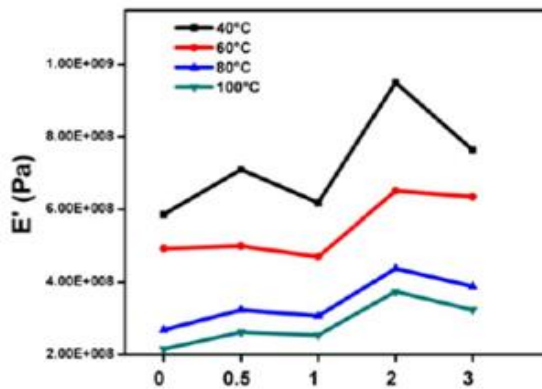
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir



دما (C)

(الف)



درصد تاتو کربن

(ب)

شکل ۱۲- الف) تغییرات مدول ذخیره نسبت به دما؛ ب) تغییرات مدول ذخیره بر حسب درصد وزنی CNT در دماهای مختلف [۱۳]

با توجه به نمودار شکل ۱۵ (ب)، تمام نانوکامپوزیت‌ها مدول ذخیره بالاتری نسبت به PTT خالص در تمام دماهای به کار رفته شده، دارند و مقدار مدول کامپوزیت‌ها در محدوده‌ی دمایی ۶۰-۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نزدیکی منطقه‌ی شیشه‌ای کاهش پیدا می‌کند. دمای انتقال شیشه‌ای PTT خالص ۶۵/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد است؛ در مقایسه با PTT خالص، تمام نانوکامپوزیت‌ها در دو منطقه شیشه‌ای و الاستیک، افزایش مدول ذخیره را داشتند. دلیل بالاتر بودن مدول ذخیره نانوکامپوزیت‌ها، انرژی ذخیره‌ی بالاتر بود که در نهایت باعث شد، سخت‌تر و سخت‌تر شوند. پس از دمای انتقال شیشه‌ای، افت ناگهانی در مدول ذخیره مشاهده شد که نشان دهنده‌ی نرمی بیش از حد مواد برای تحمل بار مکانیکی بود. با افزایش دما، مقدار مدول ذخیره برای PTT خالص و نانوکامپوزیت کاهش یافت. روند کاهش مدول را می‌توان به تحرک بالای زنجیره پلیمر ربط داد که روند آرامش آن‌ها را سرعت بخشید [۱۳].

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

خواص رئولوژی پلیمرهای PP، PTT، اپوکسی، SU-8 و پلی اتیلن سنگین تقویت شده با CNT مورد بررسی قرار گرفت. در تمام موترد با افزودن CNT به ماتریس پلیمر، خواص رئولوژی از جمله مدول ذخیره و مدول یانگ بهبود یافته است. تغییرات خواص رئولوژی پلیمرهای بررسی شده نسبت به دما از جمله مدول یانگ، مدول ذخیره، ضریب اتلاف، نسبت پواسون کاهش می‌باشد.

مراجع

[۱] مجتبی حقگو، ۱۳۹۷. مطالعه‌ی مشخصه های ویسکوالاستیک و منحنی هیستریزس کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت‌شده با نانولوله کربنی، دوره ۱۸، شماره ۰۴، صص ۹۰-۹۸، مجله مهندسی مکانیک مدرس

[۲] ناصر کردانی، ۱۳۸۹. مطالعات رفتار مکانیکی- حرارتی نانوکامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با نانولوله های کربن، جلد ۶، شماره ۴، مجله مکانیک هوا فضا

[3] Montazeri, A., Khavandi, A., Javadpour, J., 2010. Viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles, *Materials & Design*, 31 (7), pp.3383-3388.

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

- [4] Djourelov, N., Suzuki, T., Shantarovich, V. P., Dobрева, T., and Ito, Y., 2005. Transition and Relaxations in Gamma-irradiated Polypropylene Studied by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 72, No. 1, pp. 13-18.
- [5] Martin, P. J., Menary, G., 2010. Viscoelastic material models of polypropylene for thermoforming applications, International Journal of Material Forming, vol. 3, pp. 599–602.
- [6] R. Lesan-Khosh, R., Bagheri, and S. Asgari., 2011 . Nanoindentation of isotactic polypropylene: correlations between hardness, yield stress, and modulus on the local and global scales, Applied Polymer Science, vol. 121, no. 2, pp. 930– 938.
- [7] Huang, J., D. Rodrigue, and L. Dong., 2021. Effect of Temperature on the Viscoelastic Properties of Carbon Nanotube Reinforced Polypropylene Composites, Materials Science and Engineering.
- [8] Deng, C.F., Wang, D.Z., Zhang, X.X. and Ma, Y.X., 2007. Damping Characteristics of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composites, Materials Letters, Vol. 61, No. 14-15, pp. 3229-3231.
- [9] Guedes, R.M., C.M.C. Pereira, and A. Fonseca., 2013 . The effect of carbon nanotubes on viscoelastic behaviour of biomedical grade ultra-high molecular weight polyethylene, Composite Structures, 105
- [10] Soonwan. C., Sandeep. M., Harold .A., and Seungbae Park., 2006 . Material Characterization of Carbon-Nanotube-Reinforced Polymer Composite, Electronic Materials Letters, Vol. 2, No.3, pp. 175-181
- [11] Kundalwal.s., Rathi.A., 2020 . Improved mechanical and viscoelastic properties of CNT-composites fabricated using an innovative ultrasonic dual mixing technique, Journal of the Mechanical Behavior of Materials, vol.29, pp.77–85.
- [12] Srivastava, V.K., 2015 . Viscoelastic and Nanohardness Behaviour of Nano Particles Filled Epoxy Resin Composites, Nanoscience and Nanotechnology, vol.5.
- [13] Aswathi, M.K., M. Padmanabhan, and L. Mathew., 2018 . Carbon Nanotube Reinforced Poly(Trimethylene Terephthalate) Nanocomposites: Viscoelastic Properties and Chain Confinement, POLYMER ENGINEERING & SCIENCE.