سال ۲۸، شماره ۱۲۸، صفحات ۳۱–۳۸، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

تأثیر نانوتیوب کربن و گرافن بر خواص کششی، کمانشی و ارتعاشی مواد مرکب زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن

فرزین عظیم‌پور شیشوان[۱]، بابک عبازاده[۲ و *]

[۱] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد بناب، بناب

[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب

*مسئول مکاتبات: abazadeh@bonabu.ac.ir

◄ چکیده

در این تحقیق اثرات اضافه نمودن نانوتیوب کربن و گرافن بر خواص ارتعاشی و مکانیکی مواد مرکب (مواد کامپوزیت) زمینه اپوکسی تقویت‌شده بررسی گردیده است. بدین منظور پنج نوع ماده مرکب شامل ماده مرکب کلاسیک با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با الیاف کربن و مواد مرکب چند مقیاسه شامل الیاف کربن با زمینه اپوکسی حاوی ٪۰/۱ نانوتیوب کربن و ٪۰/۵ گرافن با استفاده از روش وکیوم بگینگ ساخته شد. آنالیز ارتعاشی تیرهای ماده مرکب در مد یک انجام گردیده و مقادیر فرکانس طبیعی برای نمونه‌های مختلف استخراج شد. فرکانس‌های طبیعی بدست‌آمده جهت محاسبه مدول الاستیسیته نمونه‌ها استفاده گردیده و مقادیر بدست‌آمده با نتایج تست کشش مقایسه شد. نتایج نشان داده‌اند که افزایش نانو ذرات نانوتیوب کربن و گرافن با افزایش مقاومت مکانیکی زمینه و افزایش میزان چسبندگی زمینه و الیاف، با ایجاد نانو ساختارها در ناحیه فصل مشترک باعث بهبود خواص مکانیکی مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن گردیده است. در حالت کلی نانوذرات گرافن با توجه به ساختار صفحه‌ای و مساحت تماس بالا نسبت به نانوتیوب‌های کربنی و افزایش احتمال انباشتگی و ایجاد تمرکز تنش در ساختار زمینه ماده مرکب، تأثیر کمتری در بهبود مشخصات مکانیکی و ارتعاشی مواد مرکب داشته‌اند.

◄ واژگان کلیدی

خواص ارتعاشی
خواص مکانیکی
الیاف کربن
نانوتیوب کربن
گرافن

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۲
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

۱ مقدمه

مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل داشتن خواص مکانیکی بسیار بالا مانند مقاومت و مدول الاستیسیته ویژه [۱] در صنایع هوایی، دریایی، هوافضا و ساخت اتومبیل‌های ویژه که استفاده از مواد با مقاومت بالا و وزن کم جهت کاهش مصرف سوخت مد نظر می‌باشد مورد توجه قرار گرفته اند. علاوه بر خواص مکانیکی و شکست، قابلیت این مواد در جذب ارتعاشات سیستم جهت افزایش ضریب اطمینان و عمر سیستمهای ساخته شده از دلایل استفاده رایج از این نوع مواد مرکب می‌باشد.

در بیست سال اخیر با پیشرفت علم نانو، استفاده از نانو مواد در ساختار مواد مرکب بعنوان فاز تقویت کننده افزایش یافته است. به همین دلیل در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در زمینه خواص مکانیکی، دمایی و ارتعاشی مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با نانو مواد صورت پذیرفته است [۲–۴]. از میان نانو مواد موجود آلوتروپهای کربن همانند فلورن صفر بعدی، نانوتیوب کربن[۱] تک‌بعدی و گرافن[۲] دوبعدی به دلیل داشتن خواص مکانیکی عالی [۵] همانند مدول الاستیسیته بسیار بالا (یک تراپاسکال) و خواص دمایی مناسب همانند ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین (-۱×۱۰^{-۶}) مورد توجه بسیار زیادی قرارگرفته است [۶]. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه خواص ارتعاشی انواع نانو مواد مرکب صورت پذیرفته است. راجریا[۳] و جلیلی [۷] با بکار بردن درصدهای مختلفی از نانوتیوب کربن‌های تک جداره و چندجداره در ساختار مواد مرکب سعی در افزایش سختی و میرایی ارتعاشاتی مواد مرکب داشته اند. این محققان در این زمینه ۸ نوع نمونه متفاوت مشتمل بر ماده مرکب بازمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن حاوی ۵ درصد وزنی کربن ناتیوب تک‌جداره و چندجداره، اپوکسی ۲/۵، ۵ و ۷ درصد وزنی کربن ناتیوب تک‌جداره و چندجداره را ساخته و آزمون‌های لازم جهت مشخص کردن تأثیرات نانومواد بر خواص ارتعاشی این مواد را انجام داده‌اند. در این تحقیق مواد مرکب ساخته شده تحت تأثیر تست‌های ارتعاشی گیردار و آزاد قرار گرفته و مقادیر فرکانس طبیعی و ضریب میرایی مواد از پاسخهای ارتعاشی استخراج گردیده‌اند. در ادامه جهت محاسبه پارامترهای وابسته به فرکانس طبیعی طول تیر تغییر داده شده و تست‌های لازم تکرار شده است. نتایج بدست آمده حکایت از افزایش خواص میرایی ماده مرکب بیش از سختی ماده در اثر افزودن نانوتیوب کربن به ساختار ماده مرکب دارد. علاوه براین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از نانوتیوب‌های کربن چند جداره در ساختار ماده تأثیر بیشتری نسبت به نانوتیوب‌های کربن تک جداره دارد. بر اساس نتایج بدست آمده استفاده از ۵ درصد وزنی از هر دو نوع نانوتیوب کربن بیشترین تأثیر را بر خواص ارتعاشی مواد مرکب داشته است. از طرفی دیگر

[1] Carbon nanotube [2] graphene [3] Rajoria [4] Khan

نتایج آزمون‌های ضربه و بارگذاری‌های خستگی که بصورت سینوسی اعمال میگردد نشانگر این است که در بارگذاری با مدهای بالا، افزودن نانوذرات تأثیر بیشتری بر روی نتایج آزمون داشته است.

خان[۴] و همکارانش [۸] در تحقیقی که انجام دادند اثرات اضافه کردن کربن نانوتیوب را بر خواص ارتعاشی ماده مرکب با زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن و اپوکسی خالص را بررسی کردند. در این تحقیق جهت تقویت ماده ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانوتیوب کربن به ساختار ماده مرکب متشکل از الیاف کربن و زمینه اپوکسی ذکرشده در سطر بالا اضافه شده و خواص ارتعاشی مواد ساخته‌شده در شرایط مرزی آزاد و گیردار بررسی گردیده است. در این تحقیق جهت بررسی رفتار میرایی مواد، تست‌هایی با مدهای ارتعاشی مختلف، فرکانس‌های طبیعی و دامنه‌های مختلف به کار گرفته شده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده [۸]، ضریب میرایی مواد با افزوده شدن نانوتیوب کربن به ساختار آنها افزایش یافته است. علاوه براین وابسته بودن خواص میرایی ماده به جهت گیری نانوتیوب‌های کربن تک بعدی از مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌باشد. همچنین افزایش ضریب میرایی مواد با افزایش درصد وزنی نانوتیوب کربن بکار گرفته شده در ساختار ماده با استفاده از نتایج این تحقیق قابل استنباط است.

هر[۵] و یح[۶] اپوکسی مایع و ماده سخت‌کننده آنرا در درصدهای ترکیبی مختلف ترکیب کرده، به ساختار آنها در حدود ۱ و ۲ درصد وزنی نانوتیوب کربن چند جداره اضافه کردند [۹]. در ادامه نمونه‌های ساخته‌شده با روش وکیوم اینفیوژن را تحت بارگذاری کششی قرار داده ومقادیر تنش تسلیم و مدول الاستیسیته مواد را بدست آوردند. در عین حال خواص ارتعاشی مواد ساخته شده از قبیل فرکانس طبیعی و ضریب میرایی در شرایط مرزی آزاد نیز با انجام تست‌های ارتعاشی محاسبه گردید. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این تحقیق مقادیر فرکانس طبیعی و مدول الاستیسیته با افزایش درصد وزنی نانو ذرات نانوتیوب کربن افزایش یافته و ضریب میرایی مواد کاهش می‌یابد.

کیم[۷] و همکارانش [۱۰] با افزودن ٪۷ نانوتیوب کربن تک جداره به زمینه مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن نمونه‌های ماده مرکب چند مقیاسه ساخته‌اند. در این تحقیق جهت بررسی خواص میرایی مواد مرکب ساخته‌شده، مواد تحت تست‌های ارتعاشی قرار گرفتند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این تحقیق خواص میرایی مواد مرکب با افزایش درصد کربن نانوتیوب به ماده مرکب افزایش یافته که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ماده تقویت‌کننده بر میزان میرایی ماده بوده است [۱۰]. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق از افزایش ٪۱۲/۳ فرکانس طبیعی مد اول، ٪۱۶/۱ فرکانس طبیعی مد دوم با افزودن ٪۷ وزنی نانوتیوب کربن به زمینه ماده مرکب حکایت دارد.

آلوا[۸] و راجا[۹] در تحقیقی که در زمینه تأثیرات افزودن نانومواد به ساختار مواد مرکب انجام داده‌اند به بررسی اثرات افزایش نانوتیوب‌های کربن بر خواص میرایی مواد مرکب پرداخته‌اند [۱۱]. در این تحقیق رفتار میرایی نانو مواد مرکب با توجه به فرکانس طبیعی این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج این تحقیق با افزوده شدن نانوتیوب کربن به ساختار مواد مرکب، این مواد در فرکانس‌های بالا خواص میرایی بهتری را ارائه می‌دهند که نتیجه‌ای عجیب و تأمل‌برانگیز می‌باشد. فرمیکا[۱۰] و همکاران [۱۲] ماده مرکب زمینه اپوکسی تقویت‌شده با کائوچو را با استفاده از نانوتیوب کربن تقویت نموده و خواص ارتعاشی ماده مرکب را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست‌آمده فرکانس طبیعی ماده مرکب حاصل از افزوده شدن نانو ذرات نانوتیوب کربن ٪۵۰۰ بیشتر از ماده مرکب اولیه بوده است.

ژانگ[۱۱] و همکارانش [۱۳] رفتار ارتعاشی صفحات ماده مرکب زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن مثلثی حاوی نانوتیوب کربن را در ضخامت‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار داده‌اند. چاندرا[۱۲] و همکارانش [۱۴] با استفاده از روش المان محدود و با توجه به محدودیت‌های مدلسازی، المان‌بندی در مقیاس نانو با استفاده از نرم‌افزارهای آنالیز به روش المان محدود نانو صفحه گرافن را در مقیاس اتمی مدل‌سازی کردند. در این مقاله تحقیقات جامعی در زمینه تأثیرات افزودن گرافن به ساختار نمونه‌های ماده مرکب با طول‌ها و شرایط مرزی متفاوت در شکل مدهای ارتعاشی بوجود آمده و فرکانس طبیعی صورت گرفته است.

چاندرا و همکارانش [۱۵] در تحقیقاتی که در زمینه تأثیرات نانوذرات بر خواص ارتعاشی مواد مرکب انجام داده‌اند، با افزودن گرافن تک‌لایه و دولایه به زمینه ماده مرکب، تأثیرات نوع نانوذرات را بر مدهای ارتعاشی این مواد بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، تغییر نوع ماده افزودنی تأثیری بر مدهای ارتعاشی نداشته و در هر دو حالت گرافن تک‌لایه و دولایه، مدهای ارتعاشی ثابت بوده‌اند. مشابه نتایج تحقیقات قبلی، در این تحقیق نیز با افزایش نسبت عرض به طول نانوذرات مقادیر فرکانس طبیعی کم شده است.

روحی و انصاری [۱۶] با استفاده از روش المان محدود گرافن تک‌لایه را بصورت اتمی مدل‌سازی کرده و کمانش محوری و خواص ارتعاشی این نانوماده را بررسی کردند. بر اساس نتایج بدست‌آمده در شرایط مرزی مختلف با افزایش طول لایه گرافن مقدار فرکانس طبیعی کاهش یافته است. فخرآبادی و همکارانش [۱۷] تحقیقاتی در زمینه مشخص کردن مقادیر بار بحرانی کمانش و فرکانس طبیعی لایه‌های تغییر شکل داده گرافن انجام داده‌اند.

رحماندوست و همکارانش [۱۸] جهت بررسی خواص ارتعاشی و یافتن مقادیر فرکانس طبیعی کربن نانوتیوب‌ها از روش المان محدود استفاده کرده و این مواد را در دو شکل زیگ زاگ وآرم چیر مدلسازی نمودند. در انتها نتایج بدست‌آمده از المان محدود با نتایج تجربی مقایسه گردیده و به سازگاری نتایج دو روش پی برده شد. در تحقیق حاضر زمینه ماده مرکب رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن با بکارگیری ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی از نانوذرات یک‌بعدی نانوتیوب کربن و دو بعدی گرافن مسلح گردیده و نمونه‌های ساخته‌شده تحت بارهای کششی و کمانشی قرار گرفته و مقادیر مدول الاستیسیته و بار بحرانی کمانش مواد مرکب حاصل مقایسه گردید. علاوه بر تست‌های مکانیکی خواص ارتعاشی مواد ساخته شده با استفاده از تست‌های ارتعاشی مد یک در شرایط مرزی متفاوت ارزیابی گردیده و مقادیر فرکانس طبیعی مواد ساخته شده مقایسه گردید. در انتها مدول الاستیسیته مواد مختلف با بکارگیری روابط ارتعاشی از مقادیر فرکانس طبیعی محاسبه گردیده و با نتایج تست کشش مقایسه گردید.

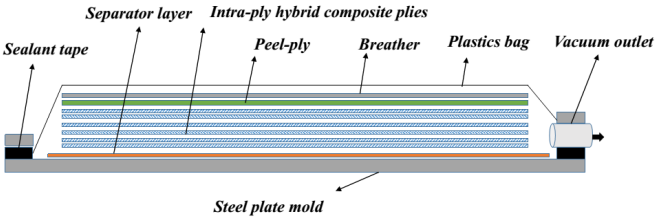
[5]Her [6]Yeh [7]Kim [8]Alva [9]Raja [10]Formica [11]Zhang [12]Chandra

جدول ۱: درصد اجزا تشکیل دهنده مواد مرکب ساخته شده

ماده	الیاف کربنی (درصد حجمی)	اپوکسی (درصد حجمی)	نانوتیوب کربن (درصد وزنی)	گرافن (درصد وزنی)	ضخامت (mm)
C-pure	۶۰	۴۰	۰	۰	۲/۵
C-0.1 CNT	۶۰	۴۰	۰/۱	۰	۲/۵
C-0.5 CNT	۶۰	۴۰	۰/۵	۰	۲/۵
C-0.1 GNP	۶۰	۴۰	۰	۰/۱	۲/۵
C-0.5 GNP	۶۰	۴۰	۰	۰/۵	۲/۵

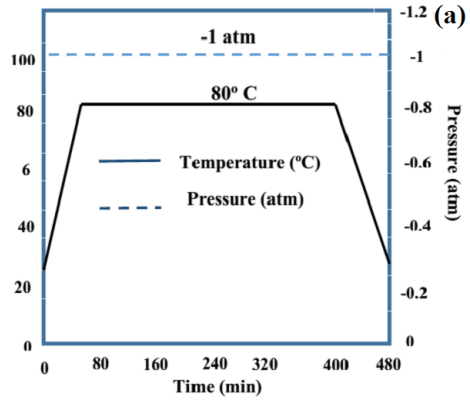
۲ ساخت نمونه‌های ماده مرکب

پنج نوع ماده مرکب با زمینه اپوکسی و الیاف کربن حاوی ۰/۱ و ۰/۵ درصد نانو ذرات آلوتروپ کربن شامل آلوتروپ تک‌بعدی، نانوتیوب کربن و دوبعدی گرافن با استفاده از روش وکیوم بگینگ ساخته شد (شکل ۱). درصد اجزای تشکیل‌دهنده مواد مرکب ضخامت نمونه‌های ساخته‌شده در جدول ۱ داده شده است.

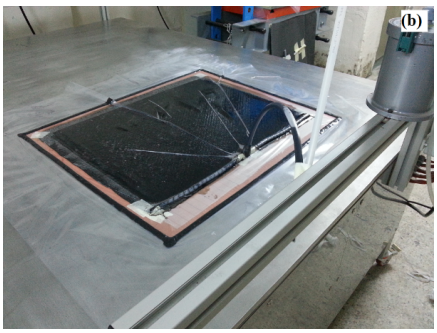


شکل ۱: شماتیک ساخت ماده مرکب به روش وکیوم بگینگ.

الیاف کربن استفاده شده بافتی و از نوع جناغی می‌باشند. جرم سطحی بافت‌ها ٪۵ ± ۲۰۰ gr/m^2، ضخامت آنها mm ٪ ۵ ± ۰/۲ و مقاومت کششی‌شان در راستای الیاف ۳۸۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. این الیاف از شرکت اسپینتکس واقع در آنکارا خریداری شدند. اپوکسی استفاده شده در ساختار ماده مرکب به عنوان ماده زمینه از نوع هانتسمن[۱۳] آرالدیت[۱۴] LY/1564 با هاردنر آرادور[۱۵] ۳۴۸۷ می‌باشد که از شرکت مواد پیشرفته هانتسمن[۱۶] در آمریکا خریداری شد. مدول الاستیسیته اپوکسی ۲/۹۴ گیگا پاسکال بوده و مقاومت کششی آن ۷۲ مگاپاسکال می‌باشد. نانوذرات استفاده شده در ساختار ماده مرکب از نوعی نانوتیوب کربن تک جداره و گرافن بوده و از شرکت صنایع شیمیایی آنکارا خریداری گردید. عملیات ساخت مواد مرکب در دو مرحله صورت پذیرفت. در مرحله اول چهار نوع نانو ماده مرکب با زمینه اپوکسی حاوی نانو ذرات کربن ناتیوب و گرافن در درصدهای وزنی ٪۰/۱ و ٪۰/۵ با استفاده از همزن اولتراسونیک[۱۷] در توان ۹۰ وات و بمدت ۱۵ دقیقه در دمای صفر درجه جهت ممانعت از عملیات کیورینگ آماده گردید. در مرحله بعد صفحات ماده مرکب در فشار منفی یک اتمسفر و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از روش وکیوم بگینگ ساخته شد. مدت زمان لازم جهت کیورینگ ماده مرکب ۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده و عملیات ساخت در شرکت فیبرمارک واقع در ازمیر ترکیه انجام گردیده است. تصویر ساخت ماده مرکب و شماتیک مرحله کیورینگ در شکل ۲ نمایش داده شده است. شکل ۲ب معروف به پروفایل کیورینگ ماده مرکب بوده و بیانگر نحوه همزمان اعمال دما و فشار به در مرحله کیورینگ از مراحل ساخت ماده مرکب می‌باشد. الیاف کربن مورد استفاده جهت ساخت ماده مرکب از نوع الیاف بافتی می‌باشد و مواد مرکب ساخته شده از ۱۲ لایه تشکیل گردیده است. صفحات ساخته شده از ماده مرکب در ابعاد ۷۰۰ × ۷۰۰ میلی‌متر بوده و با استفاده از روش جت آب جهت تبدیل به نمونه‌هایی با ابعاد استاندارد تحت برش قرار گرفتند.



(الف)



(ب)

شکل ۲: ساخت صفحات ماده مرکب، الف) شماتیک مرحله کیورینگ، ب) روش وکیوم بگینگ

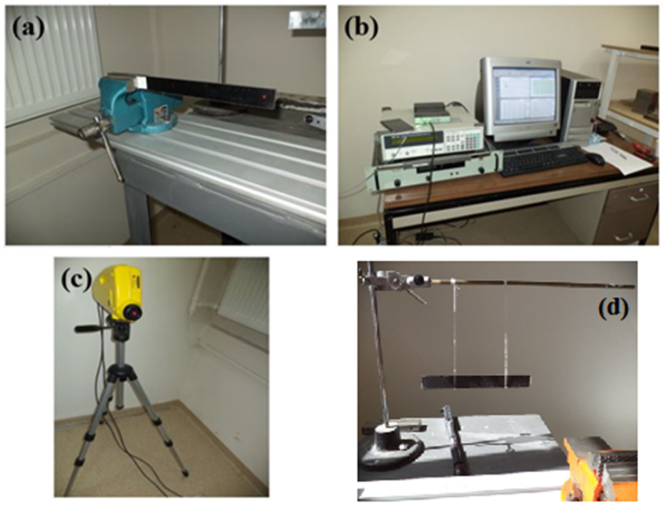
۳ تست‌های ارتعاشی

در این مرحله جهت بررسی تأثیرات افزودن نانوتیوب کربن و گرافن، فرکانس طبیعی مواد مرکب ساخته‌شده تعیین و مقایسه گردید. تست‌های ارتعاشی با استفاده از سیستم اندازه‌گیری ارتعاشی پالسی چندکاناله متصل به کامپیوتر انجام گردید. این سیستم توانایی اندازه‌گیری در فرکانس‌های مختلف را دارد و مجهز به نرم‌افزارهای آنالیز ارتعاشی متفاوت می‌باشد. تجهیزات استفاده‌شده

[13] Huntsman [14] Araldite [15] Aradur [16] Huntsman Advanced Materials [17] ultrasonic mixer

جهت اندازه‌گیری پارامترهای ارتعاشی، در شکل ۳ داده شده است.

در این مرحله دو نوع تست ارتعاشی با شرایط مرزی متفاوت آزاد و گیردار انجام شد. در شرایط مرزی یک سر گیردار نمونه‌های ماده مرکب پس از بسته شدن به تثبیت‌کننده با استفاده از آچار گشتاورسنج جهت ثابت ماندن مقدار گشتاور در تمامی نمونه ها، تحت بارگذاری ارتعاشی قرار گرفتند. درشرایط مرزی آزاد نمونه با استفاده از دو عدد نخ مخصوص که مقاومت بالایی برای کار در شرایط محیطی مختلف مانند تغییرات دمایی دارند مطابق شکل ۳ آویزان گردیدند. در ادامه نمونه‌های ساخته‌شده از مواد مختلف با استفاده از چکش ضربه مخصوص تحریک شده و فرکانس‌های طبیعی مواد با استفاده از دستگاه ویبرومتر لیزری اندازه‌گیری و ثبت گردید. اندازه‌گیری خواص ارتعاشی حداقل بر روی سه نمونه مشابه از هر ماده انجام گرفته و تست در هر نمونه در ۶ نقطه مختلف تکرار شد. کلیه نتایج بدست‌آمده توسط نرم‌افزار ثبت گردیده و مقادیر فرکانس طبیعی نمونه‌های مختلف استخراج گردید.



شکل ۳: آزمایشگاه ارتعاشات، الف) نمونه آزمایش گیردار و نگهدارنده آن، ب) سیستم اندازه‌گیری پالس ارتعاشی، ج) ویبرومتر لیزری، د) نمونه آزمایش آزاد

۴ تست کمانش

تست کمانش با استفاده از دستگاه کشش شیمادزو با ظرفیت ماکزیمم بار ۱۰۰ کیلونیوتن و در دمای اتاق انجام گردید. تصویر دستگاه تست کشش در حین انجام تست کمانش در شکل ۴ داده شده است.

شکل ۴: تست کمانش در دستگاه شیمادزو

۵ تست کشش

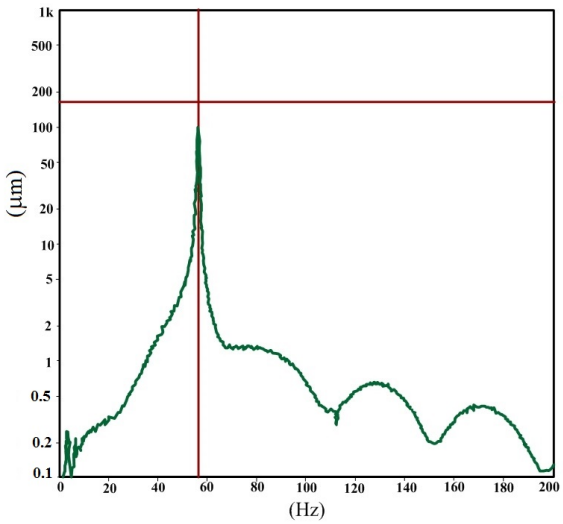
جهت بررسی تأثیرات افزودن نانو مواد بر مشخصات مکانیکی مواد مرکب زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن نمونه‌هایی از مواد ساخته شده تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. این تست در دستگاه کشش شیمادزو با ظرفیت صد کیلونیوتن و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min انجام گرفت. تمامی تست‌های مکانیکی اعم از کمانش و کشش در لابراتوار مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آتاترک ترکیه صورت پذیرفت. نمونه‌های استفاده شده در تست کشش مشابه نمونه‌های تست ارتعاشی و کمانش بوده و دارای ابعاد $۲۵۰ \times ۲۵ \times ۲/۵\ mm^3$ می‌باشد. این تست مطابق با استاندارد ASTM D3039 انجام گرفت و در انتها نتایج بدست آمده برای مدول الاستیسیته با نتایج استخراج شده از تست‌های ارتعاشی مقایسه شد.

۶ بحث و نتیجه‌گیری

۱.۶ آنالیز ارتعاشی

نمودار پالسی گرفته‌شده از دستگاه پالس‌سنج در حالت ارتعاشی گیردار برای ماده مرکب کربنی حاوی ٪۰/۱ نانوتیوب کربن در شکل ۵ ارائه شده است.

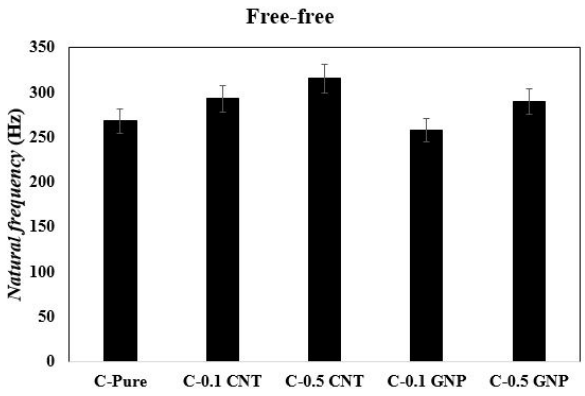
پیک‌های رزونانسی قابل مشاهده در دیاگرام‌های شکل ۵ نشان‌دهنده فرکانس طبیعی ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن در شرط مرزی گیردار می‌باشد. همانگونه که از شکل نیز قابل مشاهده است فرکانس طبیعی حالت ارتعاشی ۵۲/۵ هرتز می‌باشد. جهت پی بردن به تأثیرات افزودن نانو مواد به ساختار مواد مرکب در رفتار ارتعاشی آنها در شرایط مرزی آزاد نمونه‌های حاوی نانوتیوب کربن و گرافن نیز به همین ترتیب تحت بارگذاری ارتعاشی قرار گرفتند. مقادیر فرکانس طبیعی حالت آزاد مواد مرکب ساده تقویت‌شده با الیاف کربن و مواد مرکب چندمقیاسه حاوی نانومواد در شکل ۶ مقایسه شده‌اند.



شکل ۵: نمودار پالسی دامنه برحسب فرکانس ماده مرکب کربنی حاوی ٪۰/۵ نانوتیوب کربن در شرایط مرزی گیردار

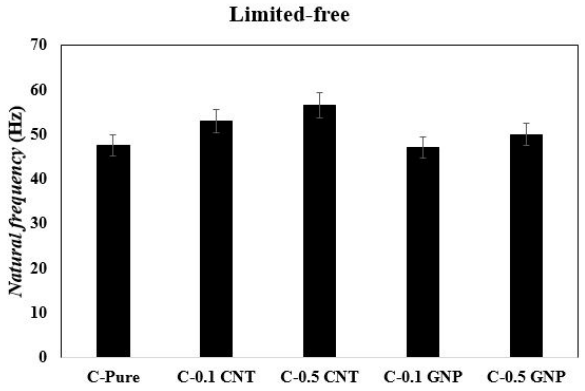
با توجه به نتایج داده‌شده در شکل ۶ مقدار فرکانس طبیعی ماده مرکب ساده کربنی ۲۶۸ هرتز می‌باشد که با افزودن ٪۰/۱ نانوتیوب کربن به زمینه

ماده مرکب این مقدار ٪۹/۲۸ افزایش یافته و به ۲۹۳ هرتز می‌رسد. با افزایش درصد کربن نانوتیوب در ساختار ماده مرکب و در مقدار ٪۰/۵ مقدار فرکانس طبیعی با ٪۱۷/۷۲ درصد افزایش نسبت به ماده مرکب ساده کربنی به ۳۱۵/۵ هرتز می‌رسد. مدول الاستیسیته و مقاومت مکانیکی بالای ذرات نانوتیوب کربن باعث افزایش مشخصات مکانیکی اپوکسی گردیده و در نتیجه صلبیت ماده مرکب را افزایش می‌دهد. همچنین نانوذرات با افزایش پیوندهای بین الیاف و زمینه با ایجاد نانو ساختارها در فصل مشترک بین الیاف و زمینه صلبیت و یکپارچگی ماده مرکب را افزایش داده و بدین ترتیب سبب افزایش فرکانس طبیعی می‌شوند.



شکل ۶: مقایسه مقادیر فرکانس طبیعی مواد مرکب چند مقیاسه تقویت‌شده با الیاف کربن

از سوی دیگر همانگونه که از شکل ۶ قابل مشاهده است افزودن ٪۰/۱ نانو ذرات گرافن به ساختار ماده مرکب سبب کاهش ۳/۶۸ درصدی مقدار فرکانس طبیعی حالت آزاد ماده مرکب گردیده است. دلیل کاهش فرکانس طبیعی با اضافه کردن ٪۰/۱ گرافن کم بودن درصد مواد افزاینده از حد بحرانی می‌باشد که در این حالت فاز تقویت کننده نه تنها نمی‌تواند مشخصات مکانیکی ماده را بهبود بخشد بلکه با ایجاد ناپیوستگی در ساختار زمینه سبب کاهش صلبیت و بدین ترتیب فرکانس طبیعی ماده مرکب می‌گردد. مقادیر فرکانس طبیعی در حالت گیردار مواد مرکب ساده تقویت‌شده با الیاف کربن و مواد مرکب چندمقیاسه حاوی نانومواد در شکل ۷ مقایسه شده‌اند.



شکل ۷: مقایسه مقادیر فرکانس طبیعی مواد مرکب چندمقیاسه تقویت‌شده با الیاف کربن

مقایسه نتایج فرکانس طبیعی در شرایط مرزی گیردار برای ماده مرکب ساده کربنی و چند مقیاسه حاوی نانوذرات نانوتیوب کربن از افزایش مقادیر فرکانس طبیعی مواد مرکب با افزودن این نانوذرات به ساختار مواد مرکب حکایت دارد. بدین ترتیب که با افزودن ٪۰/۱ کربن نانوتیوب به زمینه ماده مرکب فرکانس طبیعی ماده مرکب با ٪۱۱/۵۸ افزایش از ۴۷/۵ هرتز برای ماده مرکب ساده کربنی به مقدار ۵۳ هرتز رسیده است. همانگونه که در قسمت قبلی اشاره شد افزایش صلبیت ماده مرکب در اثر بهبود مشخصات مکانیکی زمینه و افزایش میزان چسبندگی الیاف به زمینه با تشکیل رشته‌های پیوندی جدید میان آنها از مهم‌ترین دلایل افزایش فرکانس طبیعی به دلیل افزودن نانومواد به ساختار ماده مرکب می‌باشد. با افزایش درصد نانوتیوب کربن به ٪۰/۵ مقدار فرکانس طبیعی ٪۱۸/۹۴ افزایش یافته و به مقدار ۵۶/۵ هرتز می‌رسد. افزودن ٪۰/۱ درصد گرافن به زمینه ماده مرکب شرایطی مشابه به حالت شرایط مرزی آزاد ایجاد کرده و بنا به دلایل ذکرشده فرکانس طبیعی ماده مرکب را ٪۱۰۵ درصد کاهش داده و به ۴۷ هرتز رسانده است.

بررسی نتایج بدست‌آمده بیانگر تأثیرات افزایشی بهتر نانوتیوب کربن نسبت به گرافن می‌باشد. بطوریکه در هر دو حالت بارگذاری ارتعاشی آزاد و گیردار افزودن نانوذرات نانوتیوب کربن به میزان ٪۰/۵ بیشترین اثر را در افزایش فرکانس طبیعی داشته است. مقایسه میزان تأثیر افزودن نانو مواد در فرکانس طبیعی در حالت آزاد و گیردار از بیشتر بودن تأثیر نانومواد در شرایط مرزی گیردار به دلیل ماهیت این نوع شرط مرزی و وابستگی بیشتر خواص ارتعاشی مواد به صلبیت ماده در این حالت حکایت دارد.

در این مقاله جهت بررسی تأثیرات نانومواد بر خواص مکانیکی مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن از ارتباط فرکانس طبیعی مد اول ارتعاشی با مدول الاستیسیته ماده استفاده گردیده (رابطه (۱)) و رابطه ای جهت محاسبه مدول الاستیسیته بر حسب فرکانس طبیعی استخراج گردیده است. نتایج بدست آمده برای مدول الاستیسته از تست کشش و تست ارتعاشی در دو شرط مرزی آزاد و گیردار در شکل ۷ مقایسه گردیده است.

$$E = \frac{۴\pi^۲ \rho A L^۴ \omega^۲}{(\beta L_i)^۴} \qquad (۱)$$

در این روابط ω فرکانس طبیعی مد یک، E مدول الاستیسیته ماده، I ممان اینرسی، A سطح مقطع نمونه، L طول نمونه، (βL_i) ضریب ثابت وابسته به مد ارتعاشی که برای مد یک برابر ۱/۸۷۵۱۰۴ و ρ چگالی ماده می‌باشد.

۲.۶ آنالیز کشش

مقادیر مدول الاستیسیته بدست‌آمده از تست کشش برای مواد مرکب ساده کربنی و حاوی نانوذرات نانوتیوب کربن و گرافن در جدول ۲ داده شده است.

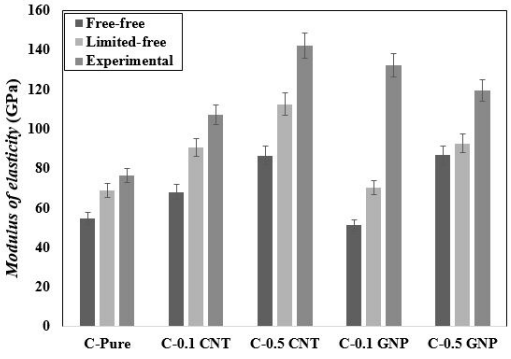
جدول ۲: مدول الاستیسیته مواد مرکب چندمقیاسه تقویت‌شده با الیاف کربن

ماده	مدول الاستیسیته (GPa)
C-Pure	۷۶/۴۳
C-0.1 CNT	۱۰۷/۲
C-0.5 CNT	۱۴۲/۰۸
C-0.1 GNP	۱۳۲/۳۵
C-0.5 GNP	۱۱۹/۳۶

با توجه به نتایج داده‌شده در جدول ۲ ماده مرکب ساده کربنی دارای مدول الاستیسیته و مقاومت کششی پایین‌تری نسبت به مواد مرکب چندمقیاسه

حاوی نانوذرات نانوتیوب کربن و گرافن می‌باشد. همانگونه که قبلاً نیز اشاره گردید افزودن نانو ذرات آلوتروپی کربن با دو مکانیسم سبب افزایش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی مواد مرکب می‌شود. در مکانیسم اول نانو ذرات پس از ریخته شدن در داخل اپوکسی و پس از همزنی با استفاده از همزن اولتراسونیک بصورت کامل در داخل زمینه دیسپرسه شده و با افزایش کروس لینک ها در داخل ساختار اپوکسی سبب افزایش مقاومت مکانیکی زمینه ماده مرکب می‌گردند. بدین ترتیب افزایش مقاومت زمینه سبب بالا رفتن مقاومت کششی و مدول الاستیسیته ماده مرکب می‌گردد. در مکانیسم دوم نانوذرات با تشکیل ساختارهای نانو در فصل مشترک بین الیاف و زمینه سبب افزایش پیوندهای میان الیاف و زمینه گردیده و بدین ترتیب با افزایش مقاومت این ناحیه در برابر جدایش باعث افزایش مقاومت ماده مرکب می‌گردند. در مکانیسم دوم نانوذرات با تشکیل ساختارهای نانو که با جای گیری نانو ذرات در ناحیه فصل مشترک در حد فاصل الیاف و زمینه صورت گرفته و با تشکیل پیوندهای دوجانبه میان الیاف و زمینه سبب افزایش استحکام میان الیاف و زمینه گردیده و بدین ترتیب با افزایش مقاومت این ناحیه در برابر جدایش باعث افزایش مقاومت ماده مرکب می‌گردند.

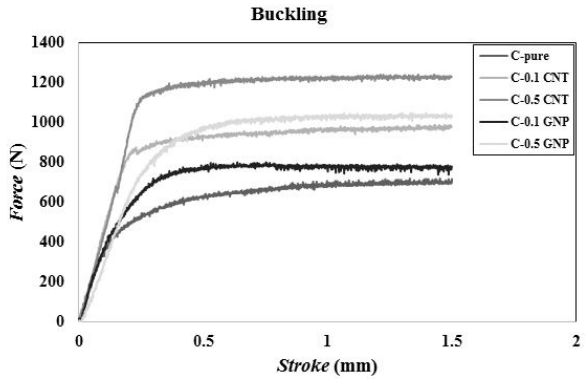
در شکل ۸ مقادیر مدول الاستیسیته بدست‌آمده از تست‌های ارتعاشی در شرایط مرزی آزاد و گیردار با نتایج تجربی تست کشش مقایسه شده‌اند. دلیل این امر نزدیکی ماهیت تست ارتعاشی گیردار با تست کشش می‌باشد. در نتایج بدست‌آمده برای فرکانس طبیعی در تمامی موارد بجز حالت افزودن ۰/۱٪ گرافن، افزودن نانو مواد به ساختار ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن سبب افزایش فرکانس طبیعی گردید که این نتیجه بدست‌آمده برای مدول الاستیسیته، با نتایج تجربی مغایرت دارد. بدین صورت که افزودن گرافن به زمینه ماده مرکب سبب افزایش مدول الاستیسیته گردیده است. با توجه به نتایج تجربی افزودن ۰/۵٪ کربن نانوتیوب به ساختار زمینه ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن با افزایش ۸۵/۸۹٪ مدول الاستیسیته بیشترین تأثیر را در بهبود مشخصات مکانیکی ماده مرکب داشته است. دلیل این امر ساختار تک‌بعدی کرین نانوتیوب‌ها و پایین بودن احتمال انباشتگی آنها در ساختار اپوکسی می‌باشد. علاوه بر این رفتار این نانو مواد در ساختار اپوکسی مشابه رفتار نانوتیرها بوده و به دلیل نسبت سطح به حجم بالا باعث بهبود رفتار مکانیکی مواد مرکب می شود [۱۹، ۲۰]. در عین حال افزودن ۰/۱٪ نانوتیوب کربن با ایجاد ۴۲/۲۶٪ افزایش در مدول الاستیسیته، کمترین اثر را در بهبود مشخصات مکانیکی ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن داشته است.



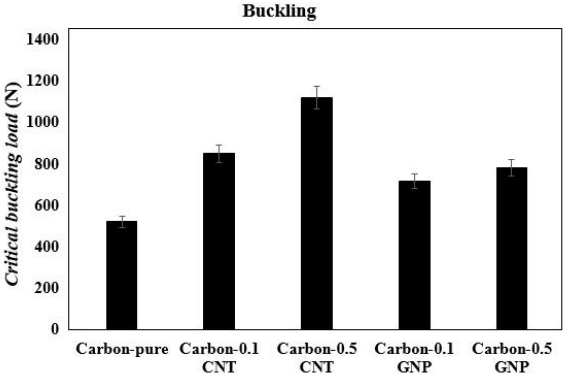
شکل ۸: مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته بدست‌آمده از تست تجربی کشش و محاسبه‌شده از فرکانس طبیعی

۳.۶ آنالیز کمانش

منحنی نیروی وارده بر حسب خیز در تست کمانش برای مواد مرکب کربنی ساده و حاوی نانو ذرات نانوتیوب کربن و گرافن در شکل شماره ۹ داده شده است. با توجه به منحنی‌های نیرو بر حسب خیز نمونه‌های ماده مرکب مورد بررسی نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ نانوتیوب کربن با دارا بودن بالاترین حد نیروی بحرانی بهترین عکس‌العمل را در مقابل بارهای کمانشی به اجرا گذارده‌اند. در این میان مواد مرکب ساده کربنی ضعیف‌ترین عکس‌العمل کمانشی را به اجرا گذارده‌اند. بدین ترتیب افزودن نانو مواد سبب بهبود رفتار کمانشی مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن گردیده است. مقادیر بار بحرانی در بارگذاری کمانشی برای مواد مرکب کربنی ساده و حاوی نانوذرات نانوتیوب کربن و گرافن در دیاگرام شکل ۱۰ برای مواد ساخته شده مقایسه گردیده است.



شکل ۹: منحنی نیرو برحسب خیز مواد مرکب ساده کربنی و حاوی نانومواد نانوتیوب کربن و گرافن



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر بار بحرانی کمانشی مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن ساده و حاوی نانوذرات نانوتیوب کربن و گرافن

مهم‌ترین مد شکست در بارگذاری کمانشی، کمانش الیاف تقویت‌کننده ماده مرکب در اثر بارهای وارده می‌باشد. کمانش الیاف بسته به شکم‌دهی تیر ماده مرکب باعث ایجاد بارهای کششی و فشاری در ساختار الیاف گردیده و در نهایت شکست آن می‌شود. از دیگر مدهای شکست می‌توان به جدایش الیاف از زمینه در اثر کمانش الیاف و شکستن پیوندهای ارتباطی موجود در فصل مشترک میان آنها اشاره کرد که فراهم‌کننده مقدمات لایه‌لایه شدن می‌باشد. وقوع لایه‌لایه شدن سر آغاز از هم گسیختگی ساختار ماده مرکب بوده و باعث شکست تیر می‌شود. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰ مقدار بار

بحرانی برای تیر ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن ۵۲۰/۱ نیوتن بوده و با افزودن ٪۰/۱ نانوتیوب کربن به زمینه ماده مرکب این مقدار ٪۶۳ افزایش یافته و به ۸۵۰/۴۶ نیوتن می‌رسد. تقویت پیوندهای میان الیاف و زمینه با تشکیل نانو ساختارها در فصل مشترک اجزای ماده مرکب و افزایش مقاومت فصل مشترک در برابر رشد ترک از مهم‌ترین دلایل این پدیده می‌باشد. با افزایش میزان نانوتیوب کربن به ٪۰/۵ افزایش بار بحرانی کمانشی ادامه یافته و به ۱۱۲۱/۳۴ نیوتن میرسد که در مقایسه با بار بحرانی کمانش مواد مرکب ساده کربنی ٪۱۱۵/۳۸ افزایش داشته است. بررسی نتایج مربوط به افزودن گرافن به زمینه ماده مرکب از افزایش ٪۳۸ بار بحرانی ماده مرکب ساده کربنی حکایت دارد. با افزایش درصد گرافن افزوده‌شده به ساختار ماده مرکب به ٪۰/۵، بار بحرانی کمانش با افزایش ٪۵۰ به مقدار ۷۸۰/۲۵ نیوتن ارتقا یافته است.

۷ نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات افزودن نانوذرات نانوتیوب کربن و گرافن در دو مقدار ٪۰/۱ و ٪۰/۵ برفرکانس طبیعی و مدول الاستیسیته و نیروی بحرانی کمانش مواد مرکب با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفت. در ضمن، مدول الاستیسیته این مواد با استفاده از روابط ارتعاشاتی محاسبه گردیده و با نتایج بدست‌آمده از تست کشش مقایسه گردیدند.

بنا به نتایج بدست آمده، افزودن نانو مواد به زمینه مواد مرکب، فرکانس طبیعی را افزایش داده و باعث بهبود خواص ارتعاشی مواد مرکب چند مقیاسه گردید. در کل نانوتیوب کربن نسبت به گرافن تأثیر بیشتری در بهبود خواص مواد مرکب دارد. این امر را میتوان به احتمال بالای بوجود آمدن انباشتگی در صفحات دوبعدی گرافن به دلیل اندازه سطوح بالای آنها در مقایسه با نانوتیوب کربن نسبت داد.

بر اساس نتایج تست کشش افزودن گرافن و کربن نانوتیوب به ساختار ماده مرکب سبب افزایش مدول الاستیسیته گردیده است. مقادیر مدول الاستیسیته محاسبه‌شده از نتایج تست ارتعاشی نیز بیانگر بهبود خواص مکانیکی ماده مرکب با افزایش نانومواد به زمینه ماده مرکب می‌باشد.

نتایج تست کمانش حاکی از افزایش بار بحرانی کمانش با افزودن گرافن و نانوتیوب کربن می‌باشد. در کل افزودن کربن نانوتیوب تأثیر بیشتری در بهبود خواص مکانیکی و ارتعاشی مواد مرکب نسبت به گرافن داشته است. از این میان درصد بهینه نانوتیوب کربن جهت بهبود رفتار ارتعاشی و مکانیکی ماده مرکب ٪۰/۵ تعیین گردید. افزایش این نانو مواد بالای درصد بهینه سبب انباشتگی نانو ذرات در ساختار زمینه گردیده و با بوجود آوردن تمرکز تنش سبب افت خواص مکانیکی ماده مرکب می‌گردد.

مراجع

[1] Boroujeni, A.Y., Tehrani, M., Nelson, A.J., and Al-Haik, M. Hybrid carbon nanotube–carbon fiber composites with improved in-plane mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 66:475 – 483, 2014.

[2] Rafiee, Mohammad A., Rafiee, Javad, Wang, Zhou, Song, Huaihe, Yu, Zhong-Zhen, and Koratkar, Nikhil. Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS Nano*, 3(12):3884–3890, Dec 2009.

[3] Hajian, Mortaza, Reisi, Mohammad Reza, Koohmareh, Gholam Ali, and Zanjani Jam, Ali Reza. Preparation and characterization of polyvinylbutyral/graphene nanocomposite. *Journal of Polymer Research*, 19(10):9966, 2012.

[4] Potts, Jeffrey R., Dreyer, Daniel R., Bielawski, Christopher W., and Ruoff, Rodney S. Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*, 52(1):5 – 25, 2011.

[5] Yasmin, Asma and Daniel, Isaac M. Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites. *Polymer*, 45(24):8211 – 8219, 2004.

[6] Wang, Shiren, Tambraparni, Madhava, Qiu, Jingjing, Tipton, John, and Dean, Derrick. Thermal expansion of graphene composites. *Macromolecules*, 42(14):5251–5255, 2009.

[7] Rajoria, Himanshu and Jalili, Nader. Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65(14):2079 – 2093, 2005.

[8] Khan, Shafi Ullah, Li, Chi Yin, Siddiqui, Naveed A., and Kim, Jang-Kyo. Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 71(12):1486 – 1494, 2011.

[9] Her, Shiuh-Chuan and Yeh, Shun-Wen. Fabrication and characterization of the composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(10):8110–8115, 2012.

[10] Kim, Hee Chul, Kim, Eun Ho, Lee, In, Byun, Joon Hyung, Kim, Byung Sun, and Ahn, Seok Min. Fabrication of carbon nanotubes dispersed woven carbon fiber/epoxy composites and their damping characteristics. *Journal of Composite Materials*, 47(8):1045–1054, 2013.

[11] Alva, Abhinav and Raja, S. Damping characteristics of epoxy-reinforced composite with multiwall carbon nanotubes. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 21(3):197–206, 2014.

[12] Formica, Giovanni, Lacarbonara, Walter, and Alessi, Roberto. Vibrations of carbon nanotube-reinforced composites. *Journal of Sound and Vibration*, 329(10):1875 – 1889, 2010.

[13] Zhang, L. W., Lei, Z. X., and Liew, K. M. Free vibration analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite triangular plates using the fsdt and element-free imls-ritz method. *Composite Structures*, 120:189–199, 2 2015.

[14] Chandra, Y., Chowdhury, R., Scarpa, F., Adhikari, S., Sienz, J., Arnold, C., Murmu, T., and Bould, D. Vibration frequency of graphene based composites: A multiscale approach. *Materials Science and Engineering: B*, 177(3):303 – 310, 2012.

[15] Chandra, Y., Chowdhury, R., Scarpa, F., and Adhikaricor, S. Vibrational characteristics of bilayer graphene sheets. *Thin Solid Films*, 519(18):6026 – 6032, 2011.

[16] Rouhi, S. and Ansari, R. Atomistic finite element model for axial buckling and vibration analysis of single-layered graphene sheets. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 44(4):764 – 772, 2012.

[17] Fakhrabadi, Mir Masoud Seyyed, Allahverdizadeh, Akbar, Norouzifard, Vahid, and Dadashzadeh, Behnam. Mechanical characterization of deformed carbon nanotubes. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 7(2):717–727, 2012.

[18] Rahmandoust, Moones and Öchsner, Andreas. Buckling behaviour and natural frequency of zigzag and armchair single-walled carbon nanotubes. *Journal of Nano Research*, 16:153–160, 1 2012.

[۱۹] گلمکانی، محمد اسماعیل و رضاطلب، جواد. تحلیل خمش غیرخطی نانو صفحات ارتوتروپیک، براساس مدل غیرموضعی ارینگن توسط روش دیفرانسیل مربعات. *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۳(۱۴):۱۲۲–۱۳۶، ۱۳۹۲.

[۲۰] پوراشرف، سیده طلیعه و انصاری خلخالی، رضا. تحلیل ارتعاشات واداشته غیرخطی نانوتیرهای ساخته شده از مواد هدفمند در محیط‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثرات تنش سطحی و غیر موضعی. *مهندسی مکانیک مدرس*، ۱۴(۱۶):۱۷–۲۶، ۱۳۹۳.