

بررسی رفتار مکانیکی و ارتعاشی تیرهای نانوکامپوزیتی تقویت شده با ترکیب هم افزایی نانولوله های کربنی چندجداره و اکسید گرافن کاهش یافته

محمدامین بهرامی^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: maba63@gmail.com

چکیده

در این مطالعه، رفتار مکانیکی و ارتعاشی تیرهای نانوکامپوزیتی اپوکسی تقویت شده با نانولوله های کربنی چندجداره (MWCNT) و اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) به صورت تکی و هیبریدی بررسی شده است. نمونه ها با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات ساخته شدند و آزمایش کشش برای تعیین مدول یانگ، تنش تسلیم، استحکام نهایی، چقرمگی شکست و کرنش شکست انجام شد. برای تحلیل نظری، از مدل هالپین-سای برای پیش بینی خواص مکانیکی استفاده شد و تأثیر تجمع و هم افزایی نانوذرات در سیستم هیبریدی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۰۶ درصد وزنی MWCNT و ۰/۶ درصد وزنی rGO با نسبت ۱۰:۱ بیشترین افزایش را در مدول یانگ و فرکانس طبیعی تیر ایجاد می کند. فرکانس های طبیعی تیر یکسر گیردار برای مدهای اول تا سوم محاسبه و با نتایج تجربی از شبیه سازی آباکوس مقایسه شدند. نتایج نشان می دهد که افزودن درصد بهینه ای از نانوذرات، خواص مکانیکی و سختی خمشی تیر را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد و در نتیجه فرکانس های طبیعی آن را افزایش می دهد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت؛ اپوکسی؛ نانوذرات؛ فرکانس طبیعی

۱- مقدمه

رزین های اپوکسی به خاطر چسبندگی زیاد، پایداری شیمیایی خوب، مقاومت در برابر خوردگی و فرآیندپذیری خوب به عنوان یکی از پرکاربردترین رزین های ترموست در صنایعی مانند هوافضا، الکترونیک، خودرو و سازه های سبک بکار برده می شوند. اما اپوکسی خالص اساساً رفتار شکننده، چقرمگی کم و مدول یانگ محدود دارد و استفاده از آن در کاربردهای تحمل بار و ارتعاش محدود است

[۱]. برای برطرف کردن این مشکل، افزودن نانوذرات به ماتریس‌های پلیمری به عنوان یک رویکرد کارآمد برای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و دینامیکی پیشنهاد شده است [۲-۴].

نانولوله‌های کربنی چند جداره به دلیل استحکام کششی زیاد و نسبت ابعاد بالا و اکسید گرافن کاهش یافته به دلیل ساختار دوبعدی، ضخامت نانومتری و سطح ویژه بالا، از مؤثرترین مواد در بهبود خواص مکانیکی پلیمرها محسوب می‌شوند. نانوپرکننده‌ها می‌توانند مواد آلی یا معدنی باشند که حداقل یک بعد آنها در اندازه نانو است. همچنین آنها می‌توانند ساختارهای یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی داشته باشند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزودن مقادیر کمی نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن کاهش یافته منجر به افزایش قابل توجه مدول یانگ و استحکام کششی اپوکسی می‌شود [۵]. با این حال، پراکندگی غیر یکنواخت و تمایل شدید نانوذرات به تجمع در ماتریس، مشکلات اصلی در استفاده از این تقویت‌کننده است. مطالعات نشان داده‌اند که در درصد‌های وزنی پایین، افزایش یکنواختی در سختی و استحکام مشاهده می‌شود، اما در درصد‌های بالاتر، تشکیل تجمع نانومواد باعث چسبندگی کمتر بین فازها و کاهش خواص می‌شود [۶].

مطالعات متعددی گزارش داده‌اند که نسبت بهینه‌ای بین اکسید گرافن کاهش یافته و نانولوله‌های کربنی چند جداره وجود دارد که در آن اثر هم‌افزایی منجر به افزایش قابل توجه مدول یانگ، استحکام کششی، چقرمگی و پایداری حرارتی می‌شود. افزودن هر یک از این تقویت‌کننده‌ها به صورت جداگانه خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، اما ترکیب آنها با نسبت بهینه به طور مؤثر انتقال تنش را افزایش می‌دهد، میزان کلوخه شدن را کاهش می‌دهد و یک شبکه تقویت‌کننده سه‌بعدی در مقیاس نانو تشکیل می‌دهد. بهرامی و همکاران [۷]، اثر هم‌افزایی اکسیدگرافن کاهش یافته و نانولوله کربنی چندجداره را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند و مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم برای اثر هم‌افزایی مربوط به ترکیب ۰/۰۶ درصد وزنی نانولوله کربنی چند جداره و ۰/۶ درصد نانواکسیدگرافن کاهش یافته با ۴۲/۲، ۲۵/۸۸ و ۱۸/۹۷ درصد افزایش به دست آوردند. ردواری و همکاران [۸]، اثر هم‌افزایی نانوپلیت گرافن و نانولوله کربنی را بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی نمودند و مشخص شد که ۰/۲۵ درصد نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوصفحات گرافن بهبود یافته‌تری نسبت به ۰/۵ درصد نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوصفحات گرافن نشان می‌دهند.

بهینه کردن خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها اثر مستقیم بر رفتار دینامیکی آنها دارد. مشخصه‌های ارتعاشی مانند فرکانس طبیعی و شکل مود بطور مستقیم با مدول یانگ و چگالی مؤثر ماده در ارتباط هستند. بهبود مدول مؤثر نانوکامپوزیت‌ها باعث افزایش سختی خمشی می‌شود و این افزایش موجب بالا رفتن فرکانس‌های طبیعی سازه‌های ساخته شده از نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. تیرهای اپوکسی خالص معمولاً دارای فرکانس‌های طبیعی پایینی هستند و با افزودن درصد‌های مشخص از نانوذرات، دامنه‌ی ارتعاش را می‌توان کاهش داد و سازه پایداری را ایجاد کرد. این امر در کاربردهایی مانند بال‌های هواپیما، صفحات تقویتی، قاب‌های سبک و سازه‌های هوشمند بسیار حائز اهمیت است [۹، ۱۰]. مدل‌های مختلفی در مقالات علمی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی و دینامیکی نانوکامپوزیت‌ها ارائه شده است. مدل هالپین-سای به دلیل در نظر گرفتن هندسه نانوذرات و توزیع تقویت‌کننده‌ها، یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیلی است. این مدل برای حالت‌های نانوآلیاف و نانوصفحات قابل استفاده است و معمولاً در درصد‌های پایین دقت بالایی دارد [۱۱]. برای بررسی‌های دقیق‌تر خواص دینامیکی، مدل‌های تحلیلی با شبیه‌سازی‌های عددی مانند روش المان محدود در نرم‌افزارهایی مانند Abaqus مقایسه می‌شوند تا میزان تطابق بین رفتارهای واقعی و تحلیلی تعیین شود.

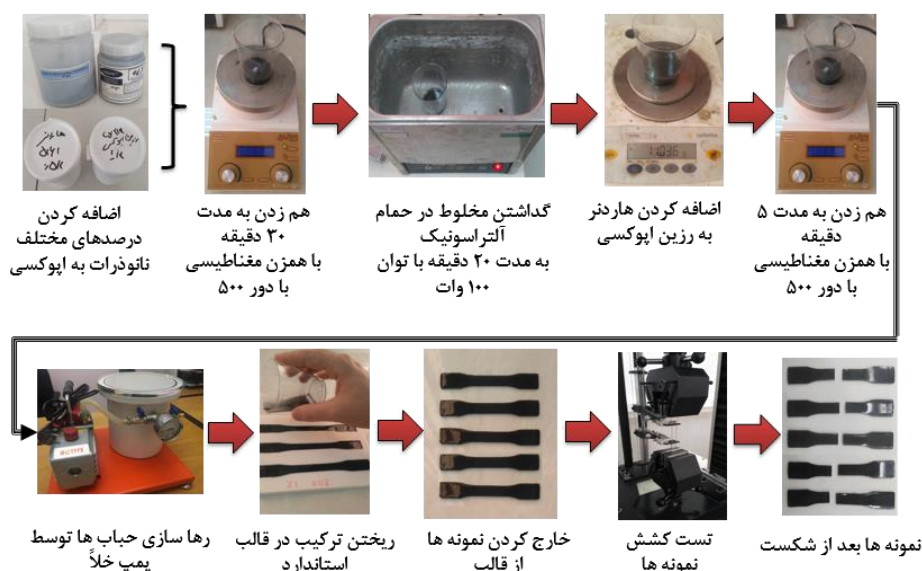
با توجه به موارد فوق، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره، اکسید گرافن کاهش یافته و ترکیب هم‌زمان آنها بر خواص مکانیکی و ارتعاشی تیر نانوکامپوزیتی اپوکسی است. ابتدا نمونه‌های نانوکامپوزیتی استاندارد با درصد‌های مختلف نانوذرات ساخته شده و خواص مکانیکی آنها از طریق آزمایش کشش اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از مدل هالپین-سی، مدول یانگ مؤثر برای هر سیستم بدست می‌آید و اثرات سینرژیک و تجمع نیز در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، بر اساس مدول مؤثر و چگالی تجربی، فرکانس طبیعی تیر نانوکامپوزیتی تک سر ثابت به صورت تحلیلی و عددی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه می‌شود. در نهایت، نتایج تحلیلی، عددی و تجربی با هم مقایسه و تحلیل می‌شوند.

۲- مواد و روش ساخت نمونه‌ها

رزین اپوکسی مورد استفاده شامل دی‌گلیسیدیل اتر مبتنی بر بیسفنول A با نام تجاری (CY-219) و سخت‌کننده آمینه (HY-5161) با نسبت اختلاط ۲ به ۱ از شرکت هانستمن است که توسط شرکت شیمی‌افسون عرضه شده است. اکسید گرافن کاهش یافته با ابعاد بین ۱ تا ۱۰ میکرون و ضخامت ۰/۸ تا ۲ نانومتر و خلوص بیشتر از ۹۸/۸ درصد و نانولوله کربنی چند جداره با طول میانگین ۱۰ میکرون و میانگین قطر خارجی ۲۵ نانومتر و درصد خلوص بیشتر از ۹۸/۸ از شرکت یونایتد نانوتک تهیه شده‌اند. خواص فیزیکی نانولوله کربنی چند جداره و اکسیدگرافن کاهش یافته استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی نانولوله کربنی چند جداره و اکسیدگرافن کاهش یافته مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

نانوذره	چگالی (g/cm ³)	استحکام کششی (GPa)	مدول یانگ (GPa)
نانولوله کربنی چند جداره	2.1	150	1000
اکسیدگرافن کاهش یافته	1.9	130	750



شکل ۱. مراحل آماده سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت.

ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانولوله کربنی چندجداره و اکسید گرافن کاهش یافته هم به صورت هم‌زمان و هم به صورت جداگانه می‌باشد. جهت آماده سازی نانوکامپوزیت‌ها در این مرحله از استاندارد ASTM D638 و روش مخلوط سازی مستقیم استفاده شده است. در شکل ۱ مراحل آماده سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت نشان داده شده است. جهت انجام آزمایش کشش از ماشین آزمون کشش یونیورسال سنتام ۱۵۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. برای تمامی نمونه‌ها ۵ عدد ساخته شده و نتیجه نهایی به کمک میانگینی از اعداد بدست آمده است.

۳- مدل سازی تحلیلی

مدل تحلیلی هالپین-سای یکی از کارآمدترین مدل‌های نیمه تجربی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته‌ی نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات است. این روش بر مبنای تئوری اختلاط و تقویت مکانیکی فازهای ماتریس و تقویت‌کننده عمل می‌کند [۱۲].

۳-۱ مدل هالپین-سای برای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده

مدول موثر نانوکامپوزیت تقویت شده با نانولوله کربنی چندجداره با این روش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{MWCNT} = E_m \left[\frac{3}{8} \left(\frac{1 + 2\xi \eta_L V_{NT}}{1 - \eta_L V_{NT}} \right) + \frac{5}{8} \left(\frac{1 + 2\eta_T V_{NT}}{1 - \eta_T V_{NT}} \right) \right], \quad (1)$$

$$\eta_L = \frac{\alpha \left(\frac{E_{NT}}{E_m} \right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_{NT}}{E_m} \right) + 2\xi}, \eta_T = \frac{\alpha \left(\frac{E_{NT}}{E_m} \right) - 1}{\alpha \left(\frac{E_{NT}}{E_m} \right) + 2}, \xi = \frac{l_{NT}}{d_{NT_o} - d_{NT_i}} \quad (2)$$

که E_{MWCNT} مدول مؤثر نانوکامپوزیت، E_m مدول ماتریس اپوکسی، E_{NT} مدول نانولوله‌ی کربنی چندجداره، V_{NT} کسر حجمی نانولوله‌ها، ξ پارامتر هندسی تقویت‌کننده است. پارامتر ξ تابعی از شکل و نسبت طول به قطر نانولوله‌هاست. برای درصد‌های وزنی بالاتر، به دلیل کلوخه‌شدن پیوستگی بین فازها کم شده و مقداری از نانوذرات به صورت کلوخه‌های غیرفعال رفتار می‌کنند و در نتیجه مدول مؤثر کاهش پیدا می‌کند. پس ضریب تصحیحی برای V_{NT} تعریف می‌شود:

$$V_{NT,eff} = V_{NT} (1 - \beta) \quad (3)$$

که در آن β بیانگر نسبت حجمی از نانولوله‌های مربوط به کلوخه‌هاست و معمولاً بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ در درصد‌های بالاتر است پس مدل اصلاح‌شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_{MWCNT} = E_m \left[\frac{3}{8} \left(\frac{1 + 2\xi \eta_L V_{NT,eff}}{1 - \eta_L V_{NT,eff}} \right) + \frac{5}{8} \left(\frac{1 + 2\eta_T V_{NT,eff}}{1 - \eta_T V_{NT,eff}} \right) \right], \quad (4)$$

مدول مؤثر نانوکامپوزیت تقویت شده با اکسیدگرافن کاهش یافته با این روش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{m-rgo} = \left[\frac{1}{5} \left(\frac{1 + \xi_L \eta_L V_{rgo}}{1 - \eta_L V_{rgo}} \right) E_m + \frac{4}{5} \left(\frac{1 + \xi_T \eta_T V_{rgo}}{1 - \eta_T V_{rgo}} \right) E_m \right] \quad (5)$$

$$\eta_L = \frac{\frac{E_{rgo}}{E_m} - 1}{\frac{E_{rgo}}{E_m} + \xi_L}, \eta_T = \frac{\frac{E_{rgo}}{E_m} - 1}{\frac{E_{rgo}}{E_m} + \xi_T} \quad (6)$$

$$\xi_L = 2 \frac{l_{rgo}}{t_{rgo}} + 40 V_{rgo}^{10}, \xi_T = 2 \frac{w_{rgo}}{t_{rgo}} + 40 V_{rgo}^{10} \quad (7)$$

که در آن V_{rgo} ، t_{rgo} ، w_{rgo} به ترتیب عرض، ضخامت و کسر حجمی RGO و E_m مدول ینگ ماتریس اپوکسی هستند. در ضمن مدل هالپین-سای زمانی که از دو نانوذره بصورت هم‌زمان استفاده می‌شود به فرم زیر توسعه داده شده است:

$$E_{hyb} = E_m \frac{1 + \xi_{eq} \eta_{eq} V_{eff}}{1 - \eta_{eq} V_{eff}} \quad (8)$$

که $V_{eff} = V_{CNT} + V_{rgo}$ کسر حجمی کل نانوذرات است و ξ_{eq} ضریب هندسی معادل که بصورت زیر معادل شده است:

$$\xi_{eq} = \alpha \xi_{CNT} + (1 - \alpha) \xi_{rgo} \quad (9)$$

$$\alpha = V_{CNT} / V_{eff} \quad (10)$$

ضریب η_{eq} نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{eq} = \frac{\left(\frac{E_{rGO}V_{rGO} + E_{CNT}V_{CNT}}{E_m}\right) - 1}{\left(\frac{E_{rGO}V_{rGO} + E_{CNT}V_{CNT}}{E_m}\right) + \xi_{eq}} \times (1 - \beta) \quad (11)$$

که در آن مقدار β در نسبت‌های بهینه از نتایج تجربی بدست می‌آید.

۳-۲ تحلیل ارتعاش تیر یکسرگیردار

معادله ارتعاش آزاد برای تیر اویلر-برنولی به شکل زیر است:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

شرایط مرزی یکسرگیردار به فرم زیر است:

$$w(0, t) = 0, \frac{dw}{dx}(0, t) = 0, \frac{d^2w}{dx^2}(L, t) = 0, \frac{d^3w}{dx^3}(L, t) = 0 \quad (13)$$

با حل معادله ۱۲ از روش جداسازی متغیرها و اعمال شرایط مرزی فرکانس طبیعی به فرم زیر بدست می‌آید:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (14)$$

۴- نتایج تجربی و تحلیلی

در این بخش، نتایج آزمایش‌های کشش نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چندجداره، اکسید گرافن کاهش یافته و حالت هیبریدی آن‌ها ارائه و تحلیل می‌شود. نتایج تجربی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل نیمه تجربی هالپین-سای مقایسه شده و میزان تطابق و خطای نسبی آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، فرکانس‌های طبیعی تیرهای ساخته شده از این نانوکامپوزیت‌ها محاسبه و باهم مقایسه می‌شوند.

در این مدل، مدول یانگ ماتریس اپوکسی برابر با ۷۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بر اساس داده‌های تجربی و ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات، پارامتر شکل (ξ) و ضریب تجمع که بیشترین تأثیر را بر رفتار مکانیکی دارند بهینه شدند. مقادیر $\xi_{CNT} = 250$ و $\xi_{rGO} = 15$ انتخاب شدند. در نظر گرفتن اثر تجمع نانوذرات در ماتریس، ۵ درصد به عنوان ضریب کاهش مؤثر، برای حجم واقعی فاز تقویت‌کننده در نظر گرفته شد تا سهم نواحی کلوخه شده در مدل کاهش یابد. با این پارامترها، اختلاف مدول یانگ تحلیلی و تجربی کاهش یافت و این دقت بیانگر این است که پارامترهای انتخابی به خوبی تأثیر شکل، توزیع و تعامل فازها را در مدل تحلیلی نمایان می‌سازند.

برای اپوکسی ترکیب شده با نانولوله کربنی چندجداره نتایج در جدول ۲ آورده شده است. در درصد‌های پایین نتایج تجربی با مدل هالپین-سای انطباق خوبی دارد که بیانگر انتقال مؤثر تنش از ماتریس به نانولوله‌ها است. این افزایش می‌تواند به خاطر نسبت طول به قطر نانولوله‌ها و پیوستگی مناسب بین فازها و پراکندگی یکنواخت نانوذرات در غلظت‌های پایین باشد. اما در درصد‌های بالا به واسطه تشکیل کلوخه‌ها نتایج با نتایج مدل اختلاف زیادی دارد. این می‌تواند بخاطر کاهش سطح تماس مؤثر بین نانولوله و ماتریس باشد که منجر به تمرکز تنش و کاهش کارایی انتقال بار می‌شود.

جدول ۲. مقایسه نتایج آزمون کشش و مدل هالپین-سای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله کربنی چندجداره

درصد نانولوله کربنی چندجداره	مدول یانگ تجربی (E_{exp} (MPa)	مدول یانگ تحلیلی (E_{HT} (MPa)	درصد خطا
0	770	770.0	0.0
0.02	958.97	925.8	3.5
0.04	1040.31	1003.4	3.5
0.06	901.28	971.2	7.8
0.08	612.82	920.6	50.2
0.10	702.56	888.1	26.4

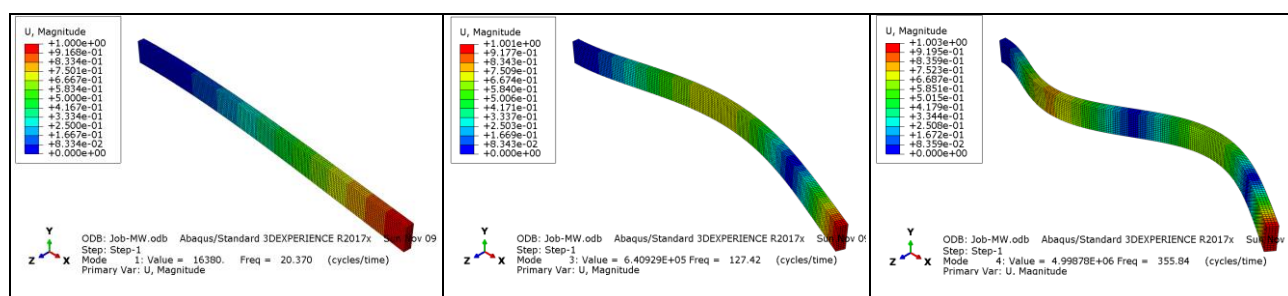
نتایج مربوط به فرکانس‌های طبیعی برای این نانوکامپوزیت‌ها در جدول ۳ آورده شده است. مطابق نتایج بیشترین فرکانس مربوط به ۰/۰۴ درصد است که بیشترین میزان مدول یانگ را دارد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس برای خصوصیات داده شده از جدول ۳ نیز آورده شده که با نتایج تحلیلی مطابقت خوبی دارد.

جدول ۳. مقایسه مدهای فرکانسی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله کربنی چندجداره

درصد نانولوله کربنی چندجداره	مد اول		مد دوم		مد سوم	
	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس
0	17.54	17.35	110.1	108.57	307.7	303.19
0.02	19.23	19.37	120.5	121.16	337.2	338.35
0.04	19.97	20.175	125.1	126.21	350.1	352.41
0.06	19.65	18.778	123.1	117.46	344.5	328.02
0.08	19.18	15.484	120.2	96.859	336.2	270.48
0.10	18.83	16.579	118	103.71	330.1	289.61

براساس نتایج جدول ۳ بیشترین فرکانس‌های طبیعی (برای مدهای اول تا سوم) است و این تأیید می‌کند که افزودن نانولوله کربنی چندجداره سختی خمشی تیر را افزایش و در نتیجه فرکانس‌های طبیعی را افزایش می‌دهد. در درصد‌های وزنی بالاتر فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد و به دلیل تشکیل کلوخه‌های نانولوله در ماتریس اپوکسی است. مقایسه فرکانس‌های تحلیلی با فرکانس‌های تجربی در درصد‌های پایین تطابق خوبی دارد و این رفتار برای ترکیب اپوکسی با نانواکسید گرافن کاهش یافته نیز در جدول ۵ تکرار شده است.

شکل ۲ مدهای اول تا سوم تیر شبیه سازی شده در محیط آباکوس را نشان می‌دهد. تیر نانوکامپوزیتی شبیه‌سازی شده در آباکوس دارای طول ۱۵۰، پهنای ۱۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر است. المان C3D8R برای مش‌بندی انتخاب شده و جهت همگرایی مقدار ریزی مش ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. مدهای اول تا سوم تیر نانوکامپوزیتی

نتایج اپوکسی ترکیب شده با اکسید گرافن کاهش یافته و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی در جداول ۴ تا ۷ آورده شده است:

جدول ۴. مقایسه نتایج آزمون کشش و مدل هالپین-سای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با اکسیدگرافن کاهش یافته

درصد اکسیدگرافن کاهش یافته	مدول یانگ تجربی (E_{exp} (MPa)	مدول یانگ تحلیلی (E_{HT} (MPa)	درصد خطا
0	770	770	0.0
0.2	823.08	812.4	1.3
0.4	961.54	925.6	3.7
0.6	1057.69	1014.3	4.1
0.8	746.15	972.1	30.2
1	761.54	934.5	22.7

جدول ۵. مقایسه مدهای فرکانسی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با اکسیدگرافن کاهش یافته

درصد اکسیدگرافن کاهش یافته	مد اول		مد دوم		مد سوم	
	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس
0	17.54	17.35	110.1	108.57	307.7	303.19
0.2	18.02	17.945	112.9	112.25	315.8	313.46
0.4	19.23	19.396	120.5	121.33	337.1	338.81
0.6	20.08	20.342	125.8	127.25	352	355.34
0.8	19.66	17.086	123.2	106.88	344.7	298.46
1	19.32	17.261	121.1	107.97	338.8	301.52

برای اپوکسی ترکیب شده با دو نانوذره بصورت هیبریدی نتایج در جدول ۶ آورده شده است. در این بخش ابتدا درصد ۰/۰۴ را از ترکیب اپوکسی با نانولوله انتخاب شده و با درصدهای مختلف اکسیدگرافن کاهش یافته ترکیب شده و مورد آزمون قرار گرفت. با بررسی نتایج نسبت اختلاط بهینه ۱۰:۱ بدست آمد (یعنی ۱ واحد نانولوله کربنی چندجداره و ۱۰ واحد اکسید گرافن کاهش یافته). با توجه به این نسبت اختلاط جدول ۶ برای درصدهای مختلف دو نانو ذره با نسبت ۱:۱۰ آورده شده است.

جدول ۶. مقایسه نتایج آزمون کشش و مدل هالپین-سای نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با دو نانوذره

درصد نانولوله کربنی چندجداره	درصد اکسیدگرافن کاهش یافته	مدول یانگ تجربی (E_{exp} (MPa)	مدول یانگ تحلیلی (E_{HT} (MPa)	درصد خطا
0.02	0.2	717.69	748.5	4.3
0.04	0.4	798.71	844.2	5.7
0.06	0.6	1091.96	1016.9	6.9
0.08	0.8	744.70	921.7	23.8
0.1	1	698.39	887.3	27.1

جدول ۷. مقایسه مدهای فرکانسی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با اکسیدگرافن کاهش یافته

درصد اکسیدگرافن کاهش یافته	درصد نانولوله کربنی چندجداره	مد اول		مد دوم		مد سوم	
		نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس	نتایج تحلیلی	نتایج آباکوس
0.2	0.02	17.29	16.757	108.3	104.82	303	292.71
0.4	0.04	18.36	17.677	115.1	110.58	321.9	308.79
0.6	0.06	20.11	20.699	126	129.29	352.5	361.05
0.8	0.08	19.19	17.069	120.3	106.77	336.5	298.17
1	0.10	18.82	16.530	117.9	103.40	329.9	288.75

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار مکانیکی و ارتعاشی تیرهای نانوکامپوزیتی اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی چندجداره و اکسید گرافن کاهش‌یافته را به صورت منفرد و هم‌زمان بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات باعث بهبود خواص مکانیکی و دینامیکی تیر شد. در سیستم هیبریدی، اثر هم‌افزایی بین نانولوله‌های کربنی چندجداره و اکسید گرافن کاهش‌یافته به دلیل ایجاد یک شبکه‌ی تقویت‌کننده سه‌بعدی مشاهده شد. در نسبت اختلاط ۱:۱۰، ترکیب بهینه برای دستیابی به حداکثر سختی و مقاومت در برابر ارتعاشات است و این موجب می‌شود که در این درصدها، پراکندگی نانوذرات بهبود یابد و از تجمع مخرب نانوذرات جلوگیری شود. مدل تحلیلی بر اساس مدل هالپین-سای اصلاح‌شده (با در نظر گرفتن پدیده‌های تجمع و هم‌افزایی) با دقت بالا مدول یانگ مؤثر ماده را پیش‌بینی کرد. فرکانس‌های طبیعی به‌دست‌آمده از روش تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی آباکوس در درصدهای پایین سازگاری خوبی دارد که اعتبار مدل‌های مکانیکی و ارتعاشی در این پژوهش را تأیید می‌کند.

۶- مراجع

1. Balguri, P. K., Samuel, D. G. H., and Thumu, U., "A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites", *Mater. Today Proc.*, **44**, pp. 346–355 (2021).
2. Tee, Z. Y., Yeap, S. P., Hassan, C. S., and Kiew, P. L., "Nano and non-nano fillers in enhancing mechanical properties of epoxy resins: a brief review", *Taylor Fr.*, **61**(7), pp. 709–725 (2022).
3. Kumar, A., Sharma, K., and Dixit, A. R., "A review on the mechanical properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene", *Springer*, **31**(2), pp. 149–165 (2021).
4. Pol, M. H. and Liaghat, G. H., "Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles", *Wiley Online Libr.*, **38**(1), pp. 205–212 (2017).
5. Ejaz, H., Mubashar, A., Tanveer, A., Uddin, E., Ali, Z., and Arif, N., "The mechanical behavior of modified epoxy adhesive using GNPs, MWCNTs, and RGO nanomaterials", *Taylor Fr.*, **38**(10), pp. 1608–1628 (2024).
6. Šupová, M., ... G. M.-S. of advanced, and 2011, undefined, "Effect of nanofillers dispersion in polymer matrices: a review", *ingentaconnect.com* M Šupová, GS Martynková, K Barabaszová *Science Adv. Mater.* 2011•ingentaconnect.com (n.d.).
7. Bahrami, M., Heshmati, M., Mechanical, S. F.-A. J. of, and 2021, undefined, "A study on the synergistic influence of reduced graphene oxide and MWCNTs on the mechanical properties of epoxy nanocomposite", *journals.aut.ac.ir* MA Bahrami, M Heshmati, S FeliAmirkabir *J. Mech. Eng.* 2021•journals.aut.ac.ir, **239**(1–2), pp. 81–93 (2025).
8. Reddivari, B. R., Vadapalli, S., Sanduru, B., Buddi, T., Vafaeva, K. M., and Joshi, A., "Fabrication and mechanical properties of hybrid fibre-reinforced polymer hybrid composite with graphene nanoplatelets and multiwalled carbon nanotubes", *Taylor Fr.*, **11**(1) (2024).
9. Elmoghazy, Y., Safaei, B., ... M. A.-A. of, and 2024, undefined, "Computational Modelling and Analysis of Effect of Viscoelastic Materials on Damping and Vibrational Behaviors of Composite Structures—An Extensive Review.", *search.ebscohost.com* (n.d.).
10. Carrera, E., Augello, R., and Abu Salem, K., "Evaluation of the effects of different materials on the dynamic properties of thin-walled metamaterial structures", *Taylor Fr.* (2024).
11. Sokhandani, N., Bavi, O., Zebarjad, S. M., and Setoodeh, A. R., "Experimental investigation and semi-empirical modeling of mechanical behavior in Gr, GO, and rGO nanocomposites", *Results Eng.*, **26**, p. 105290 (2025).
12. Ghasemi, A., ... M. M.-I. J. of polymer, and 2014, undefined, "Investigation of mechanical and thermal properties of polymer composite reinforced by multi walled carbon Nanotube for reduction of residual stress", *194.225.115.32AR Ghasemi, MM Mohamadi, M Moradi* *Iranian J. Polym. Sci. Technol.* 2014•194.225.115.32 (n.d.).