

تحلیل افت انتقال صوت ورق تقویت شده با گرافن براساس تئوری الاستیسیته سه بعدی

مصطفی سلامتی قمصری^۱، مسعود قصابی^۲، روح الله طالبی توتی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، سازه های هوایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳. دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۰)

چکیده

با توجه به اهمیت رفتار سازه در مقابل امواج اکوستیکی، در این مطالعه سعی شده تا افت انتقال صوت ورق کامپوزیتی تقویت شده با گرافن مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. مواد زیادی به منظور افزایش استحکام و بهبود رفتار ارتعاشات ناشی از صوت سازه های ساندویچی مورد استفاده قرار گرفته اند که گرافن یکی از آنها بوده و طی چند سال اخیر محققان زیادی را به پژوهش در این باره واداشته است. به منظور استخراج معادلات حاکم بر مسئله از تئوری الاستیسیته سه بعدی استفاده شده و به منظور حل معادلات روش تحلیلی و دقیق بردار حالت به کار گرفته شده است. برای بررسی اعتبار نتایج بدست آمده به کمک مطالعات پیشین، از دو پژوهش که افت انتقال صوت ورق را بررسی کرده اند، استفاده شده است. در ادامه برای یافتن پارامترهای موثر روی مقدار افت انتقال صوت ورق، تغییرات کسر وزنی گرافن، ضخامت ورق، زاویه موج برخوردی، ضخامت صفحات نازک گرافن (GPLs) و عرض GPL بررسی شده است. در نهایت نتایج عددی حاکی از آن بوده که افزودن گرافن به ماده کامپوزیتی باعث افزایش استحکام آن شده و در نتیجه رفتار سازه را در مقابل فشار امواج اکوستیکی بهبود بخشیده است. همچنین افزایش ضخامت ورق نیز تاثیر مثبتی روی افت انتقال صوت داشته و بررسی تغییرات عرض GPLها با طول ثابت نشان داده که تاثیر چندانی روی رفتار وایبرواکوستیک سازه نخواهد داشت.

واژه های کلیدی: وایبرواکوستیک، افت انتقال صوت، ماده تقویت شده با گرافن، تئوری الاستیسیته سه بعدی

Sound transmission loss analysis of graphene platelets reinforced plate based on three-dimensional elasticity theory

Motafa Salamati Qamsari, Masood Ghassabi and Roohollah Talebitooti

Abstract

In this article, Vibroacoustic behavior of graphene reinforced composite plate (GRCP) is studied to investigate the sound transmission loss (STL), Due to the importance of the behavior of the structure against sound waves. Many materials have been used to increase the stiffness and improve the vibroacoustic behavior of sandwich structures. which in recent years, Graphene has prompted many researchers to use it in sandwich structures. Governing equations are derived based on three-dimensional elasticity and state vector method is used to solve equations of motion. To evaluate the validity of the results from previous studies, two studies that have examined the sound transmission loss of plate have been used. To find the effective parameters on the amount of plate STL, changes in graphene weight fraction, plate thickness, incidence angle, thickness of graphene nanoplatelets (GPLs) and width of GPLs are investigated. Finally, numerical results show that adding a small amount of GPLs to the composite matrix increases its stiffness and thus improves the behavior of the structure against the pressure of sound waves. Also, Increasing the plate thickness has a good effect on the STL, and increasing width of GPLs with constant length has no effect on the vibroacoustic behavior of the structure.

Keywords: Vibroacoustic, Sound transmission loss, Graphene reinforced materials, Three-dimensional elasticity theory

مقدمه

بررسی افت انتقال صوت در سازه‌های مختلف، مخصوصاً سازه‌های هوایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از جمله مواردی که می‌توان به آن اشاره کرد تلاش برای کاهش قابل توجه ورود صدا به داخل کابین بالگرد می‌باشد که یک موضوع فوق‌العاده با اهمیت است و تلاش برای رسیدن به این هدف می‌تواند یک ارتباط تنگاتنگ میان صنعت هوافضایی و محققان به وجود آورد. در این رابطه استفاده از ماده‌ای با استحکام و سفتی مناسب می‌تواند رفتار ارتعاشات ناشی از صوت^۱ سازه را در مقابل برخورد امواج صوتی بهبود بخشد. گرافن به دلیل خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای که دارد، اثر بهبودبخش بیشتری را نسبت به سایر مواد از جمله نانولوله‌های کربن از خود نشان می‌دهد. بدین منظور مطالعات زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل رفتار سازه‌های ساندویچی تقویت شده با گرافن انجام شده است. یانگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۶، به بررسی کمناش تیر کامپوزیتی مدرج تابعی تقویت شده با گرافن و با بستر الاستیک به کمک تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی پرداختند [۱]. کیتپورنچای^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۶، مطالعه‌ای روی ارتعاشات آزاد و کمناش تیر تقویت شده با گرافن براساس تئوری تیر تیموشنکو و با روش ریتز انجام دادند [۲]. ژائو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۷، ارتعاشات و خمش یک ورق دوزنقه‌ای مدرج تابعی تقویت شده با گرافن را با استفاده از روش حل اجزا محدود مورد مطالعه قرار دادند [۳]. آن‌ها به منظور تخمین خصوصیات مکانیکی ورق از جمله مدول یانگ از مدل هالپین-تسای^۵ و قانون اختلاط استفاده کردند. یانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷، خمش ترموالاستیک یک ورق حلقوی دایروی را براساس تئوری الاستیسیته سه‌بعدی و روش حل تحلیلی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی مطالعه کردند [۴]. شن^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۷، کمناش غیرخطی یک ورق کامپوزیت لایه‌ای تقویت شده با گرافن را براساس تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی ردی و تحت شرایط محیطی حرارتی مورد بررسی قرار دادند [۵]. غلامی و همکارش در سال ۲۰۱۷، آنالیز تحلیل جابجایی بزرگ غیرخطی ورق مستطیلی

مدرج تابعی تقویت شده با گرافن را تحت بار مکانیکی به منظور بررسی تئوری‌های مختلف تغییر شکل برشی ردی به کمک اصل کار مجازی انجام دادند [۶]. شن و همکارش در سال ۲۰۱۸، تحلیل و بررسی کمناش پوسته استوانه‌ای مدرج تابعی تقویت شده با گرافن را تحت بارگذاری عرضی و هیدرواستاتیک و در شرایط محیطی حرارتی انجام دادند [۷]. وانگ^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۸، تحلیل کمناش پوسته استوانه‌ای مدرج تابعی تقویت شده با گرافن را به منظور بررسی تاثیرات هندسه و سایز و محل قرارگیری گرافن مورد مطالعه قرار دادند [۸]. وانگ در همان سال، ارتعاشات آزاد و خمش استاتیک پوسته دوانحنایی نازک مدرج تابعی تقویت شده با گرافن و دو الگوی مختلف توزیع در راستای ضخامت را براساس تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی مورد مطالعه قرار داد [۹]. ابراهیمی و همکارانش در سال ۲۰۱۹، تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته مدرج تابعی تقویت شده با گرافن و با بستر الاستیک را تحت سه نوع بار حرارتی براساس تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی و اصل همپلتون با روش حل ناویر بررسی کردند [۱۰]. حیدرپور و همکارانش در سال ۲۰۱۹، به بررسی رفتار یک پوسته مخروطی شکل مدرج تابعی تقویت شده با گرافن تحت بار حرارتی پرداختند [۱۱]. آن‌ها در این مطالعه از تئوری ترموالاستیک لورد-شالمن^۸ به منظور استخراج معادلات حاکم بر مسئله استفاده کردند. راوت^۹ و همکارانش در سال ۲۰۱۹، پوسته دوانحنایی مدرج تابعی تقویت شده با گرافن را به منظور تحلیل اثر ترموالاستیک روی ارتعاشات آزاد آن بررسی کردند [۱۲]. آن‌ها به منظور مدل‌سازی پوسته از تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی و روش حل اجزا محدود استفاده کردند. ژو^{۱۰} و همکارانش در سال ۲۰۱۹، پاسخ‌های ارتعاشات ناشی از صوت یک ورق کامپوزیت لایه‌ای تقویت شده با گرافن را براساس تئوری مرتبه سوم تغییر شکل برشی و اصل همپلتون به کمک روش حل ناویر مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. ژو در سال ۲۰۲۰ نیز به بررسی تابش صوت و افت انتقال صوت ورق محدود مدرج تابعی تقویت شده با گرافن براساس تئوری شبه سه‌بعدی مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی با در نظر گرفتن اثرات کشش، برش و پارامتر ضخامت پرداخت [۱۴]. ژو در هر دو مطالعه به

¹ Vibro-acoustic

² Yang

³ Kitipornchai

⁴ Zhao

⁵ Halpin-Tsai

⁶ Shen

⁷ Wang

⁸ Lord-Shalman

⁹ Rout

¹⁰ Xu

$$\eta_T = \frac{(E_G / E_m) - 1}{(E_G / E_m) + \xi_T} E_m \quad (۶)$$

که در آن E_m و E_G به ترتیب مدول‌های ماتریس و GPLها؛ پارامترهای ξ_L و ξ_T به نسبت‌های هندسی GPLها مرتبط هستند:

$$\xi_L = 2(a_G / t_G) \quad (۷)$$

$$\xi_T = 2(b_G / t_G) \quad (۸)$$

a_G ، b_G و t_G به ترتیب میانگین طول، عرض و ضخامت GPLها هستند.

چگالی، ρ و نسبت پواسون، ν را می‌توان به کمک قانون اختلاط به دست آورد:

$$\rho = \rho_m V_m + \rho_G V_G \quad (۹)$$

$$\nu = \nu_m V_m + \nu_G V_G \quad (۱۰)$$

معادلات ارتعاشات ناشی از صوت

به منظور محاسبه افت انتقال صوت ورق، نیاز به معادلات ارتعاشات ناشی از صوت آن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، فشار اکوستیک سطح بیرونی ورق به صورت حاصل جمع فشار موج برخوردی و موج انعکاسی می‌باشد که به کمک رابطه زیر می‌توان فشار روی سطح بیرونی ورق را نشان داد [۱۵]:

$$p_1 = p^I + p^R \quad (۱۱)$$

اندیس ۱ در معادله بالا نشان دهنده محیط بیرونی ورق و p^I و p^R به ترتیب فشار اکوستیکی برخوردی و انعکاسی می‌باشد. همچنین اگر چگالی و سرعت امواج اکوستیک در محیط بیرونی به ترتیب ρ_1 و c_1 در نظر گرفته شود، معادله موج در محیط بیرونی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$c_1^2 \nabla^2 (p^I + p^R) - \left(\frac{\partial}{\partial t} + \nu \nabla \right)^2 (p^I + p^R) = 0 \quad (۱۲)$$

که ∇^2 عملگر لاپلاسین می‌باشد.

منظور تخمین خصوصیات مکانیکی کامپوزیت از مدل هالپین-تسای استفاده کرد.

همان‌طور که در بالا اشاره شد، مطالعات زیادی روی سازه‌های تقویت شده با گرافن به منظور بررسی رفتار ارتعاشی آن به کمک تئوری‌های گوناگونی از جمله تغییر شکل برشی ردی انجام شده است؛ اما افت انتقال صوت ورق تقویت شده با گرافن براساس تئوری الاستیسیته سه‌بعدی تا به حال انجام نشده است. در مطالعه حاضر رفتار ارتعاشات ناشی از صوت و افت انتقال صوت در ورق کامپوزیتی تقویت شده با گرافن براساس تئوری الاستیسیته سه‌بعدی و به کمک روش بردار حالت مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات گرافن

مدول یانگ موثر ورق کامپوزیت حاوی گرافن را می‌توان با استفاده از مدل ویت-رئوس^{۱۱} تخمین زد [۱۳]:

$$E = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad (۱)$$

که در آن E_L و E_T مدول‌های طولی و عرضی برای ورق تک‌جهته می‌باشد و می‌توان به کمک مدل هالپین-تسای به دست آورد:

$$E_L = \frac{1 + \xi_L \eta_L V_G}{1 - \eta_L V_G} E_m \quad (۲)$$

$$E_T = \frac{1 + \xi_T \eta_T V_G}{1 - \eta_T V_G} E_m \quad (۳)$$

E_m نشان‌دهنده مدول یانگ ماتریس و V_G کسر وزنی صفحه نازک گرافن می‌باشد.

با جایگذاری معادلات (۲) و (۳) در رابطه‌ی (۱) نتیجه زیر حاصل می‌شود:

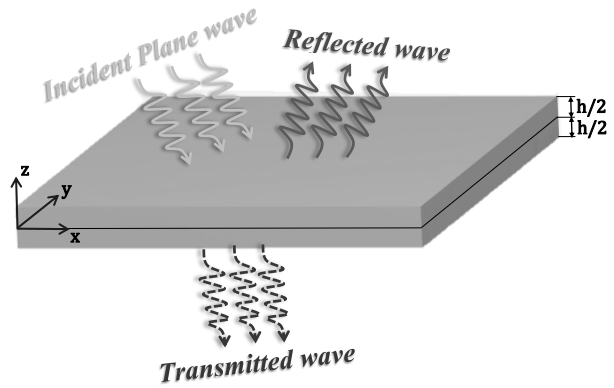
$$E = \frac{3}{8} \frac{1 + \xi_L \eta_L V_G}{1 - \eta_L V_G} E_m + \frac{5}{8} \frac{1 + \xi_T \eta_T V_G}{1 - \eta_T V_G} E_m \quad (۴)$$

پارامترهای η_L و η_T به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_L = \frac{(E_G / E_m) - 1}{(E_G / E_m) + \xi_L} E_m \quad (۵)$$

¹¹ Voight-Reuss

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_{xx}^s &= \gamma_1^s = \frac{\partial u_x^s}{\partial x} \\ \gamma_{yy}^s &= \gamma_2^s = \frac{\partial u_y^s}{\partial y} \\ \gamma_{zz}^s &= \gamma_3^s = \frac{\partial u_z^s}{\partial z} \\ \gamma_{yz}^s &= \gamma_4^s = \frac{\partial u_z^s}{\partial y} + \frac{\partial u_y^s}{\partial z} \\ \gamma_{xz}^s &= \gamma_5^s = \frac{\partial u_z^s}{\partial x} + \frac{\partial u_x^s}{\partial z} \\ \gamma_{xy}^s &= \gamma_6^s = \frac{\partial u_x^s}{\partial y} + \frac{\partial u_y^s}{\partial x} \end{aligned} \right. \quad (14)$$



شکل ۱ - هندسه و دستگاه مختصات ورق

با توجه به این که ماده ساندویچی تقویت شده با گرافن در دسته مواد همسان‌گرد^{۱۳} قرار داده شده، قانون هوک برای لایه s ام، که رابطه میان تنش‌ها را به کمک ماتریس سفتی با کرنش‌ها بیان می‌کند، به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^s \\ \sigma_{yy}^s \\ \sigma_{zz}^s \\ \sigma_{yz}^s \\ \sigma_{xz}^s \\ \sigma_{xy}^s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^s & C_{12}^s & C_{12}^s & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^s & C_{11}^s & C_{12}^s & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^s & C_{12}^s & C_{11}^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xx}^s \\ \gamma_{yy}^s \\ \gamma_{zz}^s \\ \gamma_{yz}^s \\ \gamma_{xz}^s \\ \gamma_{xy}^s \end{Bmatrix} \quad (15)$$

که G معرف مدول برشی ماده همسانگرد بوده و رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \quad (16)$$

حال به منظور حذف پارامتر ضخامت، معادله حالت به شکل زیر شامل مجهولات مستقل مسئله برای لایه s ام تعریف شده است [۱۷]:

$$F^s = \left[u_x^s \quad u_y^s \quad u_z^s \quad \sigma_{zz}^s \quad \sigma_{zx}^s \quad \sigma_{zy}^s \right]^T, \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} F^s = A^s F^s \quad (18)$$

حال با توجه به این که ورق ضخیم در نظر گرفته شده، باید برای استخراج معادلات حاکم بر مسئله از تئوری الاستیسیته سه‌بعدی استفاده شود. همچنین به دلیل این که ضخامت ورق h در نظر گرفته شده و در معادلات پارامتر ضخامت وارد شده، از یک مدل لایه‌ای به همراه فرمولاسیون موسوم به معادله حالت به همراه روش ماتریس انتقال، برای مدل‌سازی و تحلیل رفتار ارتعاشات ناشی از صوت ورق استفاده شده است.

براساس تئوری الاستیسیته سه‌بعدی، معادله حرکت برای لایه s ام و در مختصات کارتزین^{۱۲} براساس مولفه‌های تنش به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}^s}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^s}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial z} &= \rho^s \frac{\partial^2 u_x^s}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}^s}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^s}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}^s}{\partial z} &= \rho^s \frac{\partial^2 u_y^s}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}^s}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}^s}{\partial z} &= \rho^s \frac{\partial^2 u_z^s}{\partial t^2} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

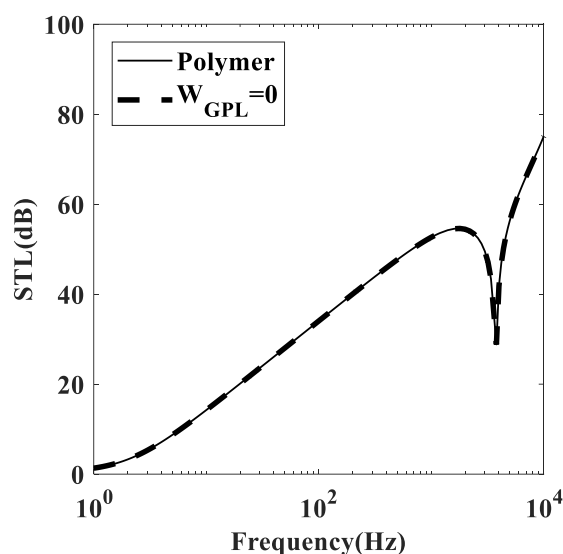
روابط کرنش‌ها برای معادلات حرکت فوق با تغییر فرم کوچک، به صورت زیر می‌باشد:

¹³ isotropic

¹² Cartesian

به منظور بررسی اعتبار مطالعه در نمودار شکل ۲، افت انتقال صوت برای کامپوزیت با ماتریس پلیمر و نمودار افت انتقال صوت برای کامپوزیت تقویت شده با گرافن در حالتی که مقدار کسر وزنی گرافن صفر در نظر گرفته شود، مقایسه شده است. همان طور که دیده می شود، انطباق نمودارهای دو حالت، صحت مطالعه انجام شده را نشان می دهد.

به منظور بررسی دقیق تر و اعتبارسنجی بر اساس مطالعات پیشین، از دو پژوهش که به بررسی افت انتقال صوت ورق با ماده همسان گرد پرداخته اند، استفاده شده است. برای انجام این اعتبارسنجی می توان از نتایج موجود در تحقیقات ژین و همکارانش^{۱۴} [۱۸] و روسوس^{۱۵} [۱۹] کمک گرفت. خواص هندسی و مکانیکی ورق مربوط به این مراجع در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲-مقایسه افت انتقال صوت کامپوزیت با ماتریس پلیمر و کامپوزیت تقویت شده با کسر وزنی صفر

در رابطه بالا، ماتریس A^s با انجام عملیات جبری و ساده سازی روابط به دست آمده و سپس جهت بی بعد سازی پارامترها با تقسیم پارامتر ضخامت بر h به صورت $\bar{z} = \frac{z}{h}$ ، پارامتر بدون بعد ضخامت در ماتریس A^s جایگزین می شود. حال با داشتن معادله حالت برای هر لایه از ورق، با استفاده از مدل لایه ای تقریبی به همراه روش ماتریس انتقال محلی معادله (۱۸) برای تمام زیرلایه ها حل می شود. در ادامه نیز با استفاده از روش ماتریس انتقال عمومی، این مراحل برای لایه ها نیز تکرار می شود و در نتیجه اثر ضخامت از معادلات حذف می شود.

در انتها با استفاده از شرایط مرزی مسئله و به کمک رابطه افت انتقال صوت که در زیر بیان شده، می توان مقدار افت انتقال صوت را محاسبه کرد:

$$STL = -10 \log \left(\frac{I_T}{I_I} \right) \quad (19)$$

که I_I و I_T به ترتیب توان موج عبوری و موج برخوردی را نشان داده و به صورت زیر به دست می آید [۱۵]:

$$I_T = \frac{|P_0^T|}{\rho_3 c_3} \quad (20)$$

$$I_I = \frac{|P_0^I|}{\rho_1 c_1} \quad (21)$$

نتایج و بحث

به منظور مطالعه پارامترهای مختلف، تاثیر تغییرات کسر وزنی گرافن، ضخامت ورق و عرض GPL روی افت انتقال صوت بررسی شده است.

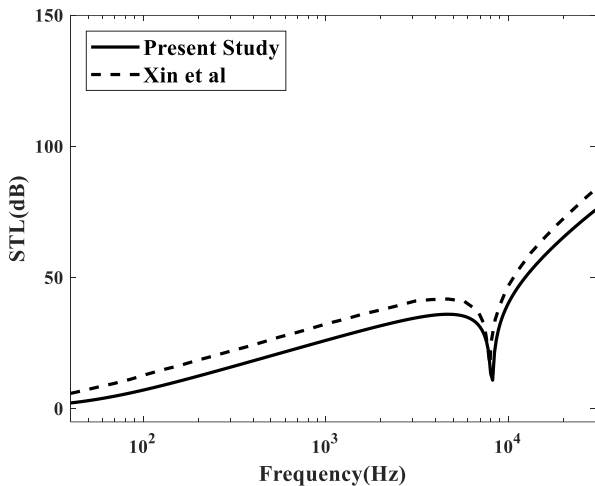
مشخصات و ابعاد ورق در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- مشخصات ورق و ابعاد GPL

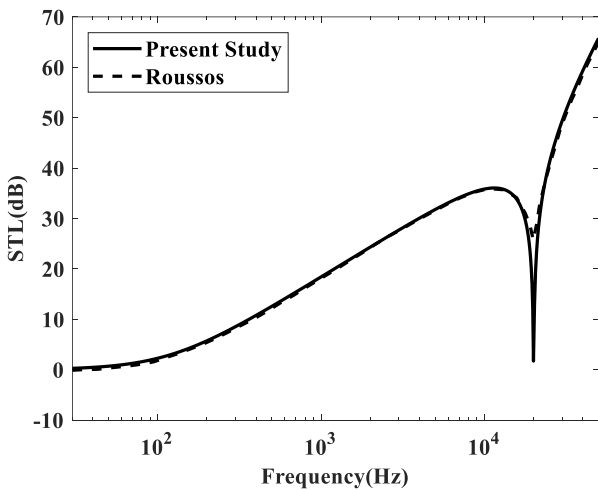
ابعاد GPL		مشخصات ورق	
a_{GPL}	$2 / 5 \mu m$	V_{GPL}	$0 / 01$
b_{GPL}	$1 / 5 \mu m$	h	$50 mm$
t_{GPL}	$1 / 5 nm$	θ	45°
مشخصات گرافن			
E_{GPL}	$1.01 e12$	ρ_{GPL}	$1.06 e3$

¹⁴ Xin et al

¹⁵ Roussos



شکل ۳- مقایسه نمودار افت انتقال صوت نتیجه مطالعه حاضر براساس تئوری الاستیسیته سه بعدی و مقاله ژین و همکاران [۱۸]



شکل ۴- مقایسه نمودار افت انتقال صوت نتیجه مطالعه حاضر براساس تئوری الاستیسیته سه بعدی و مقاله روسوس [۱۹] برای ورق نازک

در ادامه نتایج به دست آمده از مطالعه پارامتری و تاثیر موارد مختلف از جمله افزودن گرافن و تغییرات در هندسه و زاویه موج برخوردی روی مقدار افت انتقال صوت مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا تاثیر افزایش کسر وزنی گرافن از مقدار ۰ تا ۵ درصد روی افت انتقال صوت ورق بررسی شده که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲- خواص هندسی و مکانیکی ورق مربوط به مراجع [۱۸] و [۱۹]

روسوس [۱۹]	ژین و همکاران [۱۸]	
۰/۸۱	۲	ضخامت (mm)
۳۰	۳۰	زاویه برخوردی (درجه)
آلومینیوم	آلومینیوم	مواد
۷۰	۷۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳۳	۰/۳۳	ضریب پواسون
۲۷۰۰	۲۷۰۰	چگالی (kg/m ³)

هم چنین چگالی هوا و سرعت صوت در محیط بیرونی و درونی ورق به ترتیب $\rho = 1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ و $c = 343 \text{ (m/s)}$ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۳ مقایسه میان نمودار افت انتقال صوت استخراج شده از مطالعه حاضر و پژوهش ژین و همکاران را نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، اگر چه روند نمودار و نقطه شیب^{۱۶} برای هر دو مطالعه مشابه است اما مقدار افت انتقال صوت بدست آمده از تئوری الاستیسیته سه بعدی در تمامی فرکانس ها مقدار کمتری دارد. از طرف دیگر ژین و همکاران در مطالعه انجام شده از تئوری کلاسیک استفاده کرده اند و در عین حال ورق را نسبتاً ضخیم در نظر گرفته اند که این کار باعث به وجود آمدن خطا در محاسبات آن ها شده است. لذا با توجه به این که تئوری کلاسیک برای ورق های ضخیم مناسب نمی باشد و پاسخ دقیقی نمی دهد، اختلاف موجود بین دو نمودار بدین شکل استنباط می شود.

در مقایسه بعدی با پژوهش روسوس که در شکل ۴ ارائه شده است، نمودار افت انتقال صوت برای ورق نازک رسم شده است. در این مقایسه نمودار افت انتقال صوت در مطالعه حاضر براساس تئوری الاستیسیته سه بعدی رسم شده و با نتیجه ای که روسوس به کمک تئوری کلاسیک بدست آورده، مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، دو نمودار کاملاً بر هم منطبق می باشند و علت این انطباق را می توان چنین استنباط کرد که روسوس در مطالعه خود، ضخامت ورق را کم در نظر گرفته و پاسخ دقیقی به دست آورده است. در نتیجه هنگامی که از تئوری کلاسیک برای ورق ضخیم استفاده گردد، نتایج بدست آمده با خطا همراه خواهد شد.

¹⁶ Dip point

در نمودار شکل ۶، تاثیر تغییرات ضخامت ورق روی رفتار آن در مقابل امواج صوتی برخوردی بررسی شده است. بدین منظور ضخامت ورق از ۴۰ میلی‌متر تا ۶۰ میلی‌متر افزایش داده شده است.

افزایش ضخامت ورق نیز رفتاری مشابه کسر وزنی گرافن نشان داده و باعث افزایش افت انتقال صوت ورق و بهبود رفتار سازه در مقابل امواج صوتی شده است. همان‌طور که شکل دیده می‌شود، افزایش ضخامت ورق نه تنها در فرکانس‌های بالا بلکه در فرکانس‌های پایین نیز، افت انتقال صوت را افزایش داده است. علت این افزایش را می‌توان در افزایش سفتی ورق دانست و از آن‌جا که افزایش ضخامت باعث افزایش جرم سازه می‌شود، سفتی آن نیز افزایش یافته است. در مقابل افزایش جرم سازه مخصوصاً در سازه‌های هوایی اثری نامطلوب به شمار می‌آید. در نتیجه تغییر ضخامت ورق دارای محدودیتی است که کاربرد سازه مقدار این محدودیت را تعیین خواهد کرد.

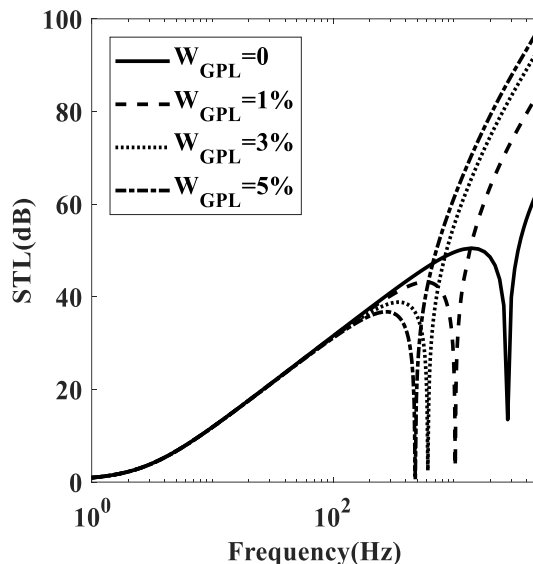
در شکل ۷ تاثیر زاویه برخوردی موج بررسی شده است. بدین منظور سه زاویه برخورد ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برای موج برخوردی به وزق در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییر زاویه برخورد در فرکانس‌های پایین تاثیر اندکی روی مقدار افت انتقال صوت گذاشته است. اما در فرکانس‌های بالا تاثیر محسوسی بر جای گذاشته است و با افزایش زاویه برخوردی از ۳۰ درجه به ۶۰ درجه، مقدار افت انتقال صوت به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

هم‌چنین طبق رابطه ۲۲ با افزایش زاویه θ مقدار مخرج کاهش یافته و در نتیجه مقدار فرکانس شیب افزایش پیدا کرده است. که این مورد در نمودارهای بدست آمده از زاویه‌های مختلف نیز قابل مشاهده می‌باشد.

در ادامه به بررسی اثر ابعاد صفحات نازک گرافن یا GPL روی مقدار افت انتقال صوت ورق پرداخته شده است. در ابتدا اثر ضخامت GPL و سپس اثر عرض آن با طول ثابت یا به عبارتی مساحت GPL مورد مطالعه قرار گرفته است.

در شکل ۸ تغییر ضخامت GPL و اثر آن روی افت انتقال صوت ورق بررسی شده است. برای این منظور مقدار ضخامت GPL سه مقدار ۰/۵، ۱/۵ و ۳ نانومتر در نظر گرفته شده و نمودار افت انتقال برای هر حالت رسم شده است.



شکل ۵- اثر کسر وزنی گرافن روی افت انتقال صوت ورق

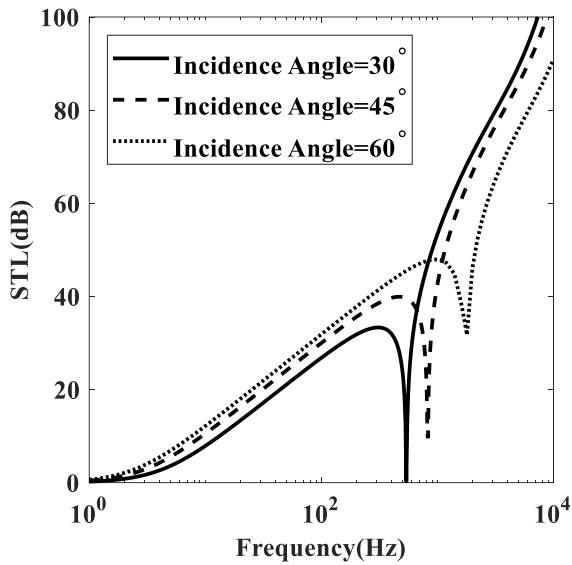
با مشاهده نمودار فوق می‌توان به این نتیجه دست یافت که افزودن مقدار کمی GPL به ورق کامپوزیتی باعث افزایش افت انتقال صوت آن شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، افزایش مقدار اندک کسر وزنی گرافن از ۰ به ۱ درصد، تاثیر قابل توجهی در نمودار افت انتقال صوت داشته و این اثر در فرکانس‌های بالاتر مشهودتر بوده و در فرکانس‌های پایین‌تر ۱۰۰ هرتز تاثیری روی افت انتقال صوت ندارد. هم‌چنین مقایسه منحنی‌های افت انتقال صوت در کسر وزنی‌های مختلف نشان می‌دهد که، نرخ افزایش افت انتقال صوت با افزایش کسر وزنی افزایش یافته است.

به منظور بررسی محل فرکانس نقطه شیب رابطه زیر معرفی شده است [۱۸]:

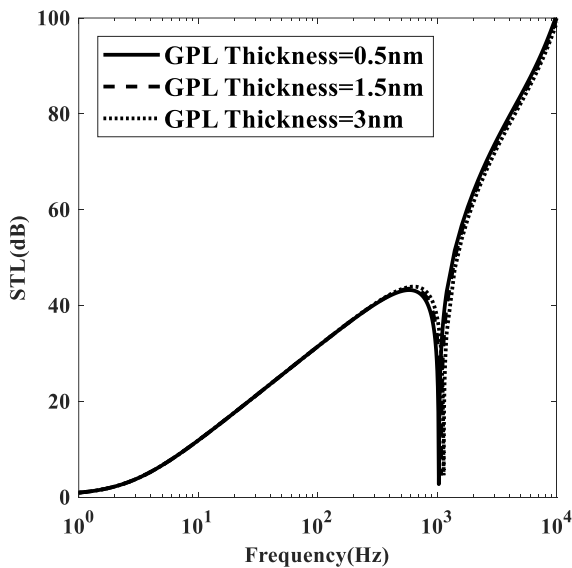
$$f_{coin} = \frac{c_1^2}{2\pi h \cos^2 \theta_i} \sqrt{\frac{12\rho_c(1-\nu_c)}{E}} \quad (22)$$

طبق رابطه فوق می‌توان تاثیر پارامترهای مختلف را در تغییر محل نقطه شیب تعیین کرد.

به عنوان نمونه با توجه به رابطه f چنین پیش‌بینی می‌شود که با افزایش مقدار h یا ضخامت ورق، مقدار فرکانس نقطه شیب کاهش پیدا کند که در شکل ۶ نیز نشان داده شده است.

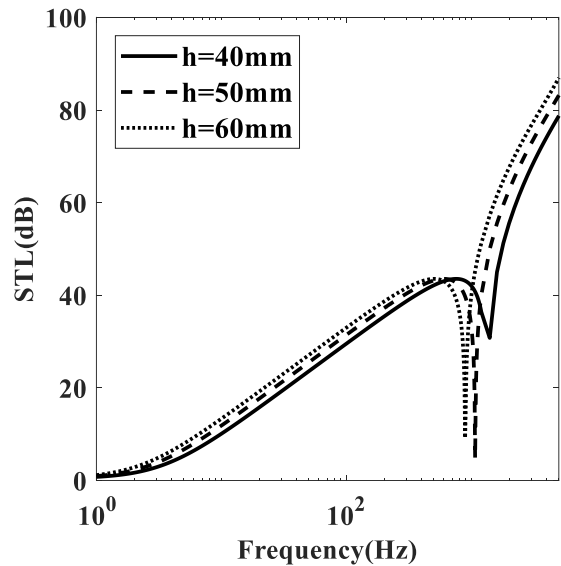


شکل ۷- اثر زاویه برخورد موج روی افت انتقال صوت



شکل ۸- اثر ضخامت صفحات نازک گرافن روی افت انتقال صوت

همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود نمودار مربوط به ضخامت‌های مختلف GPL تقریباً بر هم منطبق شده است و تغییر ضخامت GPL تاثیر بسیار ناچیزی روی افت انتقال صوت ورق گذاشته است. در نتیجه ضخامت صفحات نازک گرافن پارامتر موثری در مورد افت انتقال صوت ورق نمی‌باشد. در ادامه به بررسی تغییر مساحت GPL پرداخته شده است. به عنوان آخرین پارامتر، تاثیر ابعاد GPL بررسی شده که نمودار این مطالعه در شکل ۹ نشان داده است. بدین منظور طول GPL ثابت و عرض آن متغیر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، افزایش عرض GPL با طول ثابت و به عبارت دیگر افزایش سطح صفحات گرافن، تاثیر چندانی روی رفتار وایبرواکوستیک ورق نداشته و تنها در فرکانس‌های بالا و آن هم مقدار بسیار کمی، افت انتقال صوت را افزایش داده است. در نتیجه افزایش سطح صفحات گرافن نمی‌تواند به استحکام ورق در برابر برخورد امواج صوتی کمکی کند.



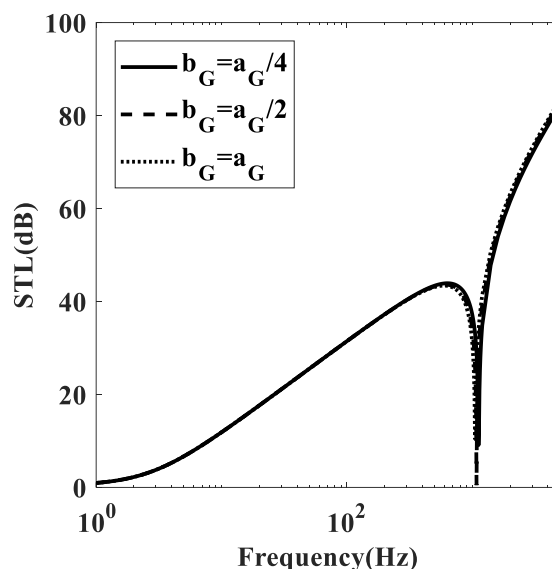
شکل ۶- اثر ضخامت ورق روی افت انتقال صوت

زاویه به دست آمده، سفتی سازه را مورد ارزیابی قرار داد و با افزایش زاویه، سفتی سازه نیز افزایش یافته است.

نتیجه گیری

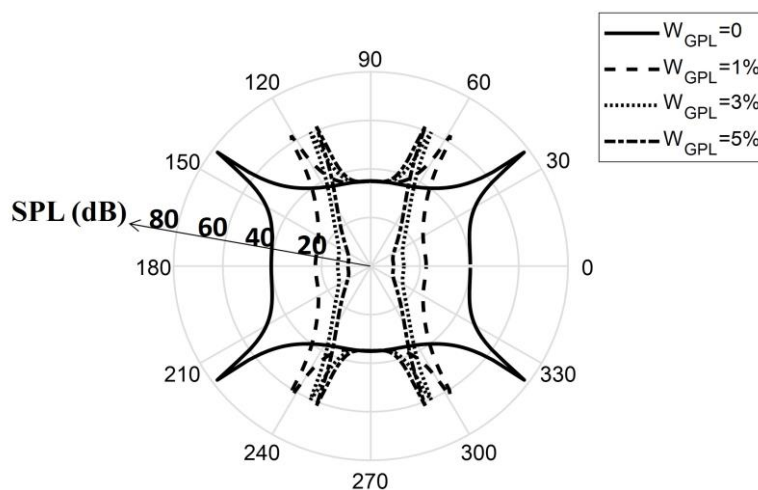
در مطالعه حاضر رفتار ارتعاشات ناشی از صوت و افت انتقال صوت در ورق کامپوزیتی تقویت شده با گرافن براساس تئوری الاستیسیته سه بعدی و به کمک روش بردار حالت انجام شده است. همچنین به منظور مطالعه پارامترهای مختلف، تاثیر افزایش کسر وزنی گرافن، ضخامت ورق و عرض صفحات گرافن روی مقدار افت انتقال صوت بررسی شده است. از نتایج عددی موارد زیر را می توان دریافت: افزودن مقدار کمی GPL، توانسته رفتار وایبرواکوستیک ورق را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

- افزایش ضخامت ورق کامپوزیتی، باعث افزایش مقدار افت انتقال صوت در فرکانس های مختلف شده است.
- افزایش زاویه موج برخوردی نسبت به ورق، مخصوصاً در فرکانس های بالا، موجب کاهش افت انتقال صوت شده است.
- تغییر ضخامت GPL اثری روی مقدار افت انتقال صوت ورق نداشته است.
- افزایش عرض GPL ها با طول ثابت یا به عبارت دیگر افزایش سطح صفحات گرافن، تاثیر چندانی روی رفتار سازه در مقابل امواج صوتی برخوردی نداشته است.



شکل ۹- اثر تغییر عرض GPL با طول ثابت روی افت انتقال صوت ورق

شکل ۱۰ سطح فشار صوت برای موج عبوری برای ورق تقویت شده با گرافن را نشان می دهد. در این شکل مقادیر مختلف درصد وزنی گرافن در برابر زاویه های برخوردی گوناگون و در فرکانس ثابت ۱۰۰۰۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفته است. در این شکل به طور قراردادی نقاطی که در آن شیب نمایان شده است، مربوط به فرکانس نقطه شیب می باشد و یا به عبارت دیگر اگر موج با زاویه ای که در آن شیب رخ داده، به سازه برخورد کند، مقدار فرکانس نقطه شیب در این حالت خاص ۱۰۰۰۰ هرتز می باشد. از سوی دیگر می توان به کمک



شکل ۱۰ - سطح فشار صوت (SPL) در مقابل زاویه های برخوردی مختلف برای درصد وزنی های متفاوت در فرکانس ثابت ۱۰۰۰۰ هرتز

منابع و مراجع

- [۹] A. Wang, H. Chen, Y. Hao, and W. Zhang, "Vibration and bending behavior of functionally graded nanocomposite doubly-curved shallow shells reinforced by graphene nanoplatelets," *Results in Physics*, vol. 9, pp. 550-559, 2018.
- [۱۰] F. Ebrahimi, M. Nouraei, and A. Dabbagh, "Modeling vibration behavior of embedded graphene-oxide powder-reinforced nanocomposite plates in thermal environment," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 48, no. 2, pp. 217-240, 2020.
- [۱۱] Y. Heydarpour, P. Malekzadeh, R. Dimitri, and F. Tornabene, "Thermoelastic analysis of rotating multilayer FG-GPLRC truncated conical shells based on a coupled TDQM-NURBS scheme," *Composite Structures*, vol. 235, p. 111707, 2020.
- [۱۲] M. Rout, S. S. Hota, and A. Karmakar, "Thermoelastic free vibration response of graphene reinforced laminated composite shells," *Engineering Structures*, vol. 178, pp. 179-190, 2019.
- [۱۳] Z. Xu and Q. Huang, "Vibro-acoustic analysis of functionally graded graphene-reinforced nanocomposite laminated plates under thermal-mechanical loads," *Engineering Structures*, vol. 186, pp. 345-355, 2019.
- [۱۴] Z. Xu, Z. Zhang, J. Wang, X. Chen, and Q. Huang, "Acoustic analysis of functionally graded porous graphene reinforced nanocomposite plates based on a simple quasi-3D HSDT," *Thin-Walled Structures*, vol. 157, p. 107151, 2020.
- [۱۵] M. Ghassabi, M. Zarastvand, and R. Talebitooti, "Investigation of state vector computational solution on modeling of wave propagation through functionally graded nanocomposite doubly curved thick structures," *Engineering with Computers*, vol. 36, no. 4, pp. 1417-1433, 2020.
- [۱۶] J. Ye, *Laminated composite plates and shells: 3D modelling*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [۱۷] M. Ghassabi, R. Talebitooti, and M. Zarastvand, "State vector computational technique for three-dimensional acoustic sound propagation through doubly curved
- [۱] J. Yang, H. Wu, and S. Kitipornchai, "Buckling and postbuckling of functionally graded multilayer graphene platelet-reinforced composite beams," *Composite Structures*, vol. 161, pp. 111-118, 2017.
- [۲] S. Kitipornchai, D. Chen, and J. Yang, "Free vibration and elastic buckling of functionally graded porous beams reinforced by graphene platelets," *Materials & Design*, vol. 116, pp. 656-665, 2017.
- [۳] Z. Zhao, C. Feng, Y. Wang, and J. Yang, "Bending and vibration analysis of functionally graded trapezoidal nanocomposite plates reinforced with graphene nanoplatelets (GPLs)," *Composite Structures*, vol. 180, pp. 799-808, 2017.
- [۴] B. Yang, S. Kitipornchai, Y.-F. Yang, and J. Yang, "3D thermo-mechanical bending solution of functionally graded graphene reinforced circular and annular plates," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 49, pp. 69-86, 2017.
- [۵] H.-S. Shen, Y. Xiang, and F. Lin, "Nonlinear bending of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates resting on elastic foundations in thermal environments," *Composite Structures*, vol. 170, pp. 80-90, 2017.
- [۶] R. Gholami and R. Ansari, "Large deflection geometrically nonlinear analysis of functionally graded multilayer graphene platelet-reinforced polymer composite rectangular plates," *Composite Structures*, vol. 180, pp. 760-771, 2017.
- [۷] H.-S. Shen and Y. Xiang, "Postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated cylindrical shells subjected to external pressure in thermal environments," *Thin-Walled Structures*, vol. 124, pp. 151-160, 2018.
- [۸] Y. Wang, C. Feng, Z. Zhao, and J. Yang, "Buckling of graphene platelet reinforced composite cylindrical shell with cutout," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 18, no. 03, p. 1850040, 2018.

- [۱۹] L. A. Roussos, "Noise transmission loss of a rectangular plate in an infinite baffle," in *Meeting of the Acoustical Society of America*, 1985 .
- [۱۸] F. Xin and T. Lu, "Analytical modeling of sound transmission across finite aeroelastic panels in convected fluids," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, no. 3, pp. 1097-1107, 2010.
- thick structure," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 352, pp. 324-344, 2019.