ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران
دانشگاه خوارزمی

بررسی افت انتقال صوت و فشار صوتی پوسته دوانحنایی با استفاده از تئوری لایه‌گون

محمد صادق فایض* ، فواد رضایی

[آ] گروه مپنا، شرکت توگا، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: *Fayez.Mohammadsadegh@mapnaturbine.com*

۱- چکیده

ورق‌ها و به طور کلی پوسته‌های دوانحنایی کامپوزیتی، به دلیل نسبت بالای مقاومت مکانیکی به وزن و همچنین قابلیت ساخت ساده‌تر در مقایسه با دیگر سازه‌های مقاوم، مورد توجه مهندسین قرار دارند. از پوسته‌های دوانحنایی در ساخت انواع مختلفی از سازه‌ها در صنایع مختلف مانند صنایع هوایی، توربین سازی، عایق‌های صوتی، خودروسازی وغیره استفاده می‌شوند. عملکرد صوتی و دینامیکی سازه‌های کامپوزیتی، به ویژگی‌های مواد، لایه‌چینی و شکل هندسی سازه تشکیل دهنده آن‌ها وابسته است. در سازه‌های کامپوزیتی به دلیل لایه‌چینی‌هایی که وجود دارد در نقاطی که دارای ناپیوستگی در هندسه و یا خواص مکانیکی هستند، دچار تمرکز تنش می‌شوند که می‌تواند منجر به شکست ماتریس، لایه لایه شدن و درنتیجه معیوب شدن سازه بشود که تئوری‌های تک لایه نظیر تئوری‌های برشی، به دلیل ماهیت آن، قابلیت محاسبه این‌گونه تنش‌ها و نیروها را ندارند. همچنین با توجه به اهمیت کاهش صدا در فضاهای صنعتی مانند سالن‌های توربین، اطراف پمپ‌ها، کمپرسورها و غیره شناخت هرچه بهتر سازه و در مقیاس میکروسکوپیک عملکرد هرلایه در برابر صوت، اهمیت فراوانی پیدا می کند. در زمان‌هایی که از سازه‌های کامپوزیتی به عنوان سازه‌های اولیه و یا اصلی استفاده می‌گردد، هدف از تحلیل این سازه‌ها باید ارزیابی دقیق رفتار کلی سازه مانند تنش‌های بین لایه‌ای، فرکانس طبیعی و عملکرد هرلایه به صورت جداگانه باشد. با توجه به ضخیم‌تر بودن سازه‌های اولیه، تئوری‌های تک‌لایه، برای مدلسازی گزینه مناسبی نمی‌باشند. لذا تحلیل سازه‌های کامپوزیتی اولیه نیازمند استفاده از یک تئوری می‌باشد. بنابراین در این پژوهش با استفاده از تئوری لایه‌گون به تحلیل افت انتقال صوت و فشار صوتی یک پوسته دوانحنایی پرداخته می‌شود. ابتدا با استفاده از اصل همیلتون معادلات حاکم استخراج و سپس با کمک نرم‌افزار متلب یک برنامه کامپیوتری نوشته شده و نتایج حاصل با پژوهش‌های انجام گرفته صحت سنجی می‌شود. در ادامه، افت انتقال صوت در پوسته دوانحنایی مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که استفاده از سازه دوانحنایی در فرکانس‌های پایین باعث افزایش افت انتقال صوت می‌شود. همچنین با افزایش شعاع انحنا، فرکانس انحنا در محدوده پایین‌تری اتفاق می‌افتد، اما تاثیری بر فرکانس انطباقی ندارد. از دیگر نتایج دیگر بدست آمده می‌توان به زاویه برخورد اشاره نمود که افزایش آن، افت انتقال صوت در فرکانس‌های بالا را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: افت انتقال صوت ؛ فشار صوتی؛ تئوری لایه‌گون؛ تئوری سه بعدی.

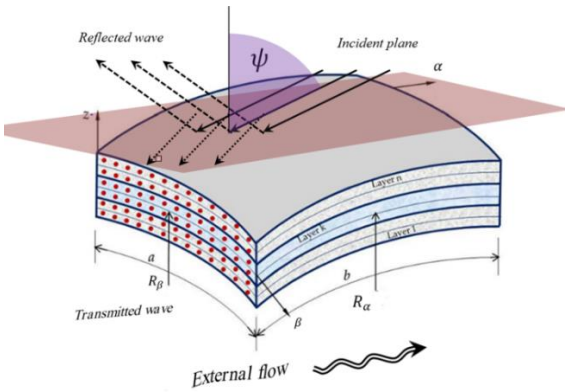
۲- مقدمه

تصور جهان پیشرفته کنونی بدون وجود مواد کامپوزیتی مشکل است. در کاربردهای مهندسی، امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را فراهم نماید، وجود ندارد. کلید این مشکل، استفاده از کامپوزیت‌ها می‌باشد. کامپوزیت‌ها موادی چند جزئی هستند که خواص آنها در مجموع از هرکدام از اجزاء بهتر است. ضمن آنکه اجزای مختلف، کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند و می‌توان با توجه به نیاز، آن‌ها را در هندسه‌های مختلف تولید کرد. از اینرو، اغلب ماشین‌ها و سازه‌های صنعتی و فضایی تا اندازه‌ای می‌توانند ارتعاش کنند. از آنجایی که کاهش صدا و ارتعاشات دغدغه‌ی اصلی در رشته‌های مختلف صنعتی نظیر توربین سازی و هوافضا می‌باشد، کاربرد این‌گونه سازه‌ها افزایش یافته است [۱].

برخلاف تئوری‌های تک‌لایه، در تئوری‌های لایه‌گون مبتنی بر جابجایی، میدان جابجایی پیوستگی گام به گام در راستای ضخامت را ارائه می‌دهد. این رفتار منجر به مشتقات ناپیوسته جابجایی در راستای ضخامت می‌شود که امکان پیوستگی تنش‌های لایه‌ای را فراهم می‌کند. ردی و همکاران [۲] در مقاله‌ای، کمانش پوسته استوانه‌ای را با استفاده از تئوری لایه‌گون مطالعه نمودند. آن‌ها با استفاده از روش ریلی ریتز و بسط سری فوریه مثلثاتی دوگانه، معادلات جابجایی معادلات حاکم را حل نمودند. طهانی و نثیر [۳] یک رابطه الاستیسیته برای بررسی رفتار یک لمینای cross-ply (متقارن و نامتقارن) را تحت کشش و توزیع دما توسعه دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که تاثیرات لبه در چنین لمینیت‌هایی یک مسئله سه‌بعدی می‌باشد. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از تئوری لایه‌ای تنش‌های بین لایه‌ای نزدیک لبه آزاد لمینیت کامپوزیتی چندلایه cross-ply را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها دریافتند که تئوری لایه‌ای می‌تواند به صورت دقیق تنش‌های به وجود آمده در لبه داخلی و نزدیک لبه آزاد لمینیت کامپوزیتی را پیش‌بینی کند. لیو و لیم [۴] در مقاله‌ای به بررسی ارتعاشات پوسته‌های کم عمق دو انحنا با شرایط مرزی مختلف پرداختند. در این پژوهش هر دو انحنای مثبت (پوسته کروی) و منفی (پوسته پاربولیدال هذلولوی) گوس را در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از روش انرژی، معادلات حاکم بر مشخصه‌های ارتعاشی این پوسته‌ها را بدست آوردند. رحمت نژاد و همکاران [۵] پاسخ ترمو-آکوستیک سازه کامپوزیتی دو انحنا را با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول به دست آوردند. به منظور استخراج معادلات ارتعاشی تحت شرایط دمایی از اصل همیلتون استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برخلاف گوشه‌های سازه که بیشترین مقدار افت انتقال صوت را دارا می‌باشد، مرکز سازه بیشترین مقدار فشار ترمو-آکوستیک انتقالی را دارد.

۳- معادلات حاکم

فرض می‌شود یک پوسته دوانحنایی در یک سیال غوطه‌ور قرارگرفته است. سیالی غیرلزج و تراکم پذیر با سرعت ثابت از کنار سازه شکل (۱) عبور می‌کند.

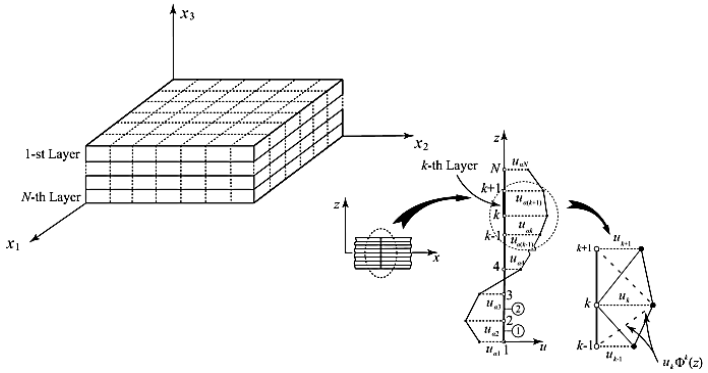


شکل۱. پوسته‌ی کم عمق قرارگرفته در محیط تحت فشار آکوستیکی

تئوری لایه‌گون برای سازه مورد نظر به صورت معادله (۱) تعریف می شود [۶]:

$$u^k(\alpha.\beta.z.t) = \sum_{j=1}^{m} u_j^k(\alpha.\beta.t)\phi_j^k(z)$$
$$v^k(\alpha.\beta.z.t) = \sum_{j=1}^{m} v_j^k(\alpha.\beta.t)\phi_j^k(z) \qquad (۱)$$
$$w^k(\alpha.\beta.z.t) = \sum_{j=1}^{m} w_j^k(\alpha.\beta.t)\psi_j^k(z)$$

که در رابطه (۱)، u_j^k، v_j^k و w_j^k به ترتیب مولفه‌های جابجایی نهایی در راستای α، β و z می‌باشد و $\phi_j^k(z)$ و $\psi_j^k(z)$ تابعی پیوسته در راستای ضخامت می‌باشند. در حالت کلی $\psi_j^k(z) \neq \phi_j^k(z)$ است. توابع $\phi_j^k(z)$ و $\psi_j^k(z)$ به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که توابعی پیوسته در هر لایه باشند. به عنوان مثال، آن‌ها می‌توانند یک تابع درونیابی لاگرانژ یک بعدی باشند که در آن u_j^k، v_j^k و w_j^k نشان دهنده مقادیر u^k، v^k و w^k در صفحه jام می‌باشد. تعداد گره‌ها، n، در راستای ضخامت تعیین کننده درجه چند جمله‌ای می‌باشد، $p=n+1$، که تنها در درون لایه‌ی kام تعریف می‌شود. توابع $u_j^k(\alpha.\beta.t)$، $v_j^k(\alpha.\beta.t)$ و $w_j^k(\alpha.\beta.t)$ نشان دهنده مولفه‌های جابجایی تمام نقاط قرار گرفته بر روی صفحه jام در لمینیت تغییر شکل نیافته است. چون تغییرات ضخامت مولفه‌های جابجایی بر حسب تابع درون‌یابی لاگرانژ تکه‌ای تعریف می‌شود، مولفه‌های جابجایی در راستای ضخامت لمینیت پیوسته خواهد بود، اما کرنش عمودی[1] در امتداد سطح مشترک بین لایه‌های مجاور ناپیوسته خواهد بود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این اتفاق می‌تواند منجر به پیوسته بودن تنش عمودی در راستای سطح مشترک بین لایه‌ها شود.



شکل۲. نمایش جابجایی و تقریب خطی تابع $\phi^I(z)$ استفاده شده در تئوری لایه‌گون [۷]

با توجه به اینکه چگالی و سرعت امواج آکوستیکی در محیط داخلی و خارجی پوسته به ترتیب برابر با $(\boldsymbol{\rho_1}.\boldsymbol{c_1})$ و $(\boldsymbol{\rho_3}.\boldsymbol{c_3})$ می‌باشد. معادله امواج آکوستیک در فضای خارجی پوسته به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$c_1^2\nabla^2(P^I + P^R) - \left(\frac{\partial}{\partial t} + V.\nabla\right)^2 (P^I + P^R) = 0 \qquad (۲)$$

که در معادله (۲)، $\boldsymbol{P^I}$ معرف فشار موج برخورد و $\boldsymbol{P_1^R}$ فشار موج منعکس شده می‌باشند. همچنین $\boldsymbol{\nabla^2}$ عامل لاپلاسین می‌باشد.
برای فضای داخلی پوسته نیز معادله امواج آکوستیک به صورت رابطه (۳) تعریف می گردد:

$$c_1^2\nabla^2 P_3^T - \frac{\partial^2 P_3^T}{\partial t^2} = 0 \qquad (۳)$$

که در معادله (۳) ، P_3^T بیانگر موج انتقالی می‌باشد. همچنین در رابطه فشار $P_1 = P^I + P_1^R$ نیز تمامی فشارهای مربوط به امواج برخورد، انتقالی و انعکاسی برقرار است.

[1] *Transverse strain*

۳-۱ محاسبه افت انتقال صوت

افت انتقال صوت (TL) نسبت توان موج برخورد به توان موج منتقل شده در یک طول واحد استوانه می‌باشد و به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود.

$$STL = -10log(\frac{I^T}{I^i}) \qquad (۴)$$

۳-۲ محاسبه فشار صوتی

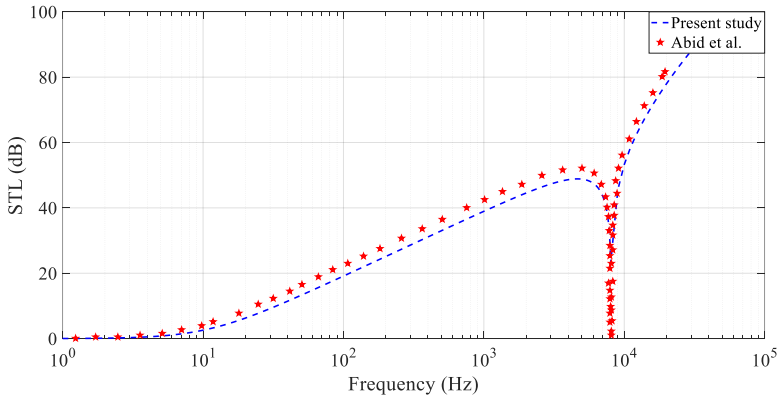
سطح فشار صوتی[۲] یا SPL یکی از مشخصه‌های مهم حوزه آکوستیک است و از SPL به منظور تخمین انرژی آکوستیکی تابیده شده[۳] استفاده می‌شود. SPL، عامل بسیار مهمی در جهت تشخیص بلندی صدا می‌باشد. همانطور که مشخص است، صدا از طریق هوا با تغییرات کوچک در فشار هوا منتشر می‌شود. این تغییرات فشار عموما به نام فشار صدا[۴] نامیده و واحد آن بر حسب Pa می‌باشد، اما SPL عموما با واحد dB[۵] بیان و با نماد L_p نشان می‌دهند و رابطه‌ای لگاریتمی، با فشار صوتی دارد و مطابق با رابطه (۵) تعریف می‌گردد:

$$L_p = 20\log_{10}\frac{P}{P_0} \qquad (۵)$$

که P_0 در رابطه (۵) برابر با فشار صوتی مبنا در هوا می‌باشد و برابر با ۲۰ μPa و P برابر با فشار آکوستیک می‌باشد.

۴- نتایج

در شکل (۳) صحت سنجی انجام گرفته بر اساس تئوری لایه‌گون و مطالعات آبید و همکارانش [۸] بررسی گردیده است. ایشان با بهره‌گیری از تئوری کلاسیک معادلات حاکم بر ارتعاشات آکوستیک. یک ورق را استخراج و نمودار افت انتقال صوت را ترسیم نمودند. از آنجا که ضخامت ورق در این پژوهش بسیار کم می باشد در نتیجه ترم‌های برشی تاثیر کمی در نتایج حاصل دارند. بنابراین همانطور که از این شکل قابل مشاهده است با توجه به ضخامت کم ورق مورد بررسی، نتایج حاصل از تئوری ارائه شده در این رساله و تحقیق آبید و همکاران کاملا برهم منطبق می باشند.



شکل ۳. مقایسه نمودار افت انتقال صوت بین مطالعه حاضر و پژوهش آقای آبید و همکاران [۸]

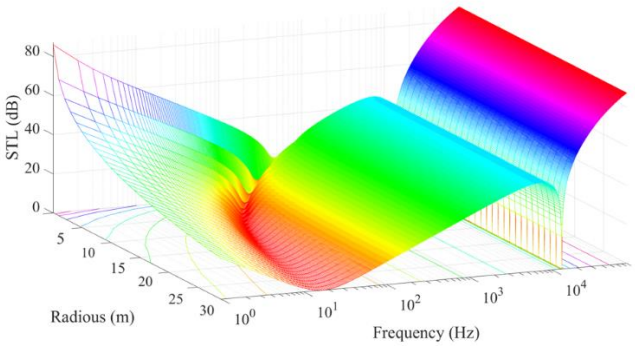
[2] *Sound pressure level*
[3] *Radiated*
[4] *Sound Pressure*
[5] *Decible*

جدول ۱. خواص مواد و ویژگی‌های هندسی [۹]

ماده مورد استفاده	شیشه اپوکسی	ضخامت هر لایه (mm)	۰/۵	مدول یانگ *(GPa)*	E_1 =۵۳/۸ E_2 =۱۷/۹ E_3 =۱۷/۹
چگالی$(\frac{kg}{m^3})$	۲۵۰۰	زاویه برخورد (درجه)	۳۰	چگالی هوا $(\frac{kg}{m^3})$	۱/۲۱
ضریب پواسون	۰/۲۵	$R_x = R_y\ (m)$	۱/۵	سرعت صوت *(m/s)*	۳۴۳

۴-۱ اثر شعاع انحنا

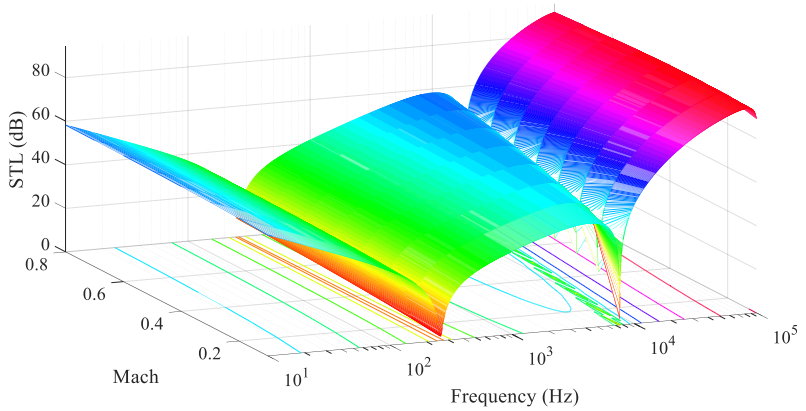
در این قسمت به بررسی اثر شعاع انحنا بر روی پاسخ افت انتقال صوت پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا یک سازه‌ی کامپوزیتی با خواص مکانیکی و شرایط محیطی مطابق جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود. لایه‌چینی این سازه [۹۰ ۰ ۹۰ ۰] می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشخص است، با افزایش شعاع انحنا f_{curve} در فرکانس پایین‌تری رخ می‌دهد. به عنوان مثال هنگامی که شعاع‌های انحنا یک متر می‌باشد، فرکانس انحنا در حدود ۱۰۰۰ هرتز رخ می‌دهد درحالی که با افزایش شعاع‌های انحنا، این فرکانس کاهش می‌یابد. اما در مورد فرکانس انطباقی یا f_{coin} تغییرات شعاع انحنا تاثیری در موقعیت رخ دادن این شیب ندارد و همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ثابت می‌باشد. از دیگر نکاتی که از این نمودار دریافت می‌شود، می‌توان به اثر طیف شعاع‌های انحنا اشاره کرد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با کاهش شعاع انحنا، *STL* به سبب افزایش استحکام سازه، در فرکانس‌های بیشتری رخ می‌دهد. این درحالی است که این تغییرات هیچ اثری برروی شیب دوم ندارد. این قسمت شبیه به ناحیه سفتی نمودار *STL* در پوسته استوانه‌ای می‌باشد.



شکل ۴. مقایسه افت انتقال صوت برای شعاع‌های انحنای متفاوت سازه نازک

۴-۲ اثر سرعت صوت

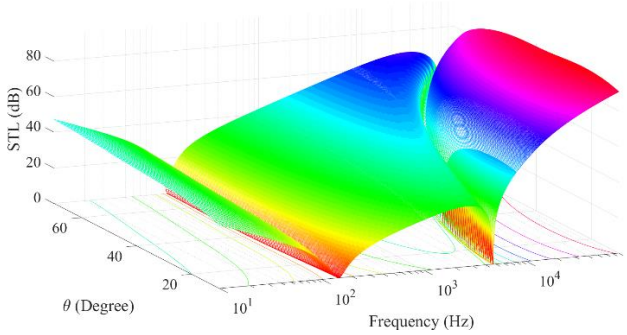
شکل (۵) به بررسی اثر عدد ماخ برروی افت انتقال صوت پوسته دوانحایی می‌پردازد. لایه‌چینی پوسته دوانحنایی کامپوزیتی در نظرگرفته شده به‌صورت [۹۰ ۰ ۹۰ ۰] در نظر گرفته شده است. همانطور که از تصویر مشاهده می‌شود با افزایش عدد ماخ، فرکانس انطباقی در فرکانس‌های بالاتری اتفاق می‌افتد، در حالی که افزایش سرعت صوت، تاثیری بر فرکانس انحنا ندارد.



شکل ۵. اثر عدد ماخ بر افت انتقال صوت پوسته دوانحنایی

۴-۳ *اثر زاویه برخورد*

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، اثرات زوایای برخوردی θ بر روی افت انتقال صوت پوسته دو انحنایی کامپوزیتی مطالعه می‌شود. با بررسی این نمودار مشاهده می‌گردد اثرات تغییر زاویه بیشتر در فرکانس‌های بالا و به خصوص فرکانس انطباقی مشاهده می‌شود و اثر زیادی بر روی فرکانس انحنا ندارد. به عبارت بهتر افزایش زاویه برخوردی، باعث انتقال f_{coin} به فرکانس‌های بالاتر می‌شود. نکته قابل توجه بعدی که بر روی شکل مذکور نیز مشخص شده این است که با افزایش زاویه برخورد، میزان افت انتقال صوت کاهش می‌یابد و این دو پارامتر با یکدیگر رابطه معکوس دارند. این کاهش افت انتقال صوت به دلیل کاهش سفتی در جهت انتشار موج[۶] می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش زاویه برخورد و نزدیک شدن آن به ۹۰ درجه مقاومت سازه در مقابل عبور امواج آکوستیکی را کاهش می‌دهد.



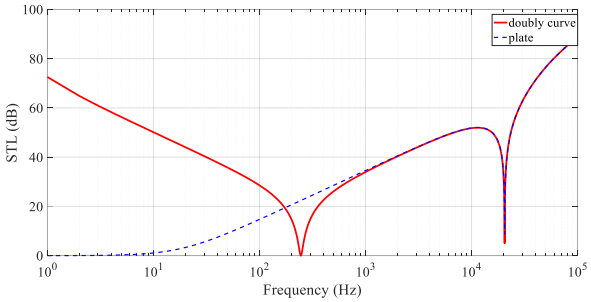
شکل ۶. اثر زاویه برخوردی بر میزان افت انتقال صوت پوسته دو انحنایی

۴-۴ *افت انتقال صوت در پوسته دو انحنا و یک ورق*

پوسته‌های دوانحنایی به دلیل استحکام سازه‌ای بیشتری که نسبت به ورق‌های بدون انحنا دارند کاربردهای گسترده‌تری در صنایع مختلف، به خصوص صنایع هوایی و فضایی دارند. بنابراین در شکل (۷) افت انتقال صوت در یک پوسته کامپوزیتی دوانحنایی با یک ورق، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین با توجه به اینکه کنترل صدا بسیار مهم است، سازه‌های دوانحنایی موثرتر می‌باشند و استفاده از این سازه‌ها تاثیر بیشتری نسبت به ورق‌ها در کاهش صدا دارند.

[6] *Wave propagation*

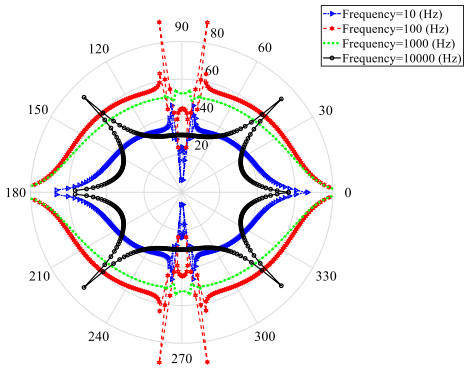
بدیهی است که این توانایی در کاهش صدا به دلیل داشتن شعاع انحنا می‌باشد. اما در فرکانس‌های بالا تفاوتی بین سازه‌های دو انحنایی و ورق‌ها در افت انتقال صوت وجود ندارد.



شکل ۷. مقایسه افت انتقال صوت در ورق و پوسته دوانحنایی

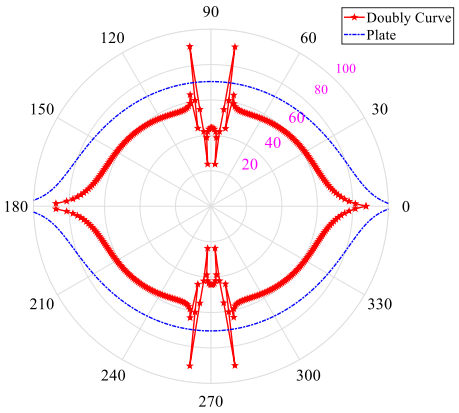
۴-۵ سطح فشار صوتی

در شکل (۸) فشار عبوری از یک پوسته دوانحنایی برای زوایای برخوردی مختلف به صورت قطبی بیان گردیده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در نمودار برای هر فرکانس، نقطه‌هایی به صورت شیب در یک زاویه مشخص رخ داده است که این نقاط شیب، بیانگر نقطه فرکانس انطباقی یا فرکانس انحنا می‌باشد. در این شکل، زمانی که فشار آکوستیکی با زاویه ۸۲ درجه در فرکانس ۱۰۰ هرتز برخورد نماید، فرکانس انطباقی رخ می‌دهد.



شکل ۸. نمودار قطبی سطح فشار صوتی (SPL) برای زاویه‌های مختلف برخوردی در فرکانس‌های مختلف

شکل (۹) به مقایسه‌ی سطح فشار صوتی در یک سازه دوانحنا و یک ورق می‌پردازد. ضخامت و لایه چینی هر دو سازه با یکدیگر یکسان و برابر با [۰ ۹۰ ۰ ۹۰ ۰ ۹۰ ۰ ۹۰] می‌باشد. مطابق این شکل، سازه دوانحنایی به دلیل استحکام سازه‌ای بیشتری که دارد، سطح فشار صدای کمتری را ایجاد می‌کند. همچنین در این شکل، نقاط شیب تنها برای سازه‌ی دوانحنایی مشاهده می‌شود و ورق دارای شعاع انحنا نمی‌باشد. داشتن این شیب‌ها بدین سبب است که در سازه دوانحنایی مطابق با شکل (۹) در حدود فرکانس ۱۰۰ هرتز فرکانس انحنا اتفاق می‌افتد اما در ورق در اطراف این فرکانس، شیبی رخ نمی‌دهد. بنابراین این شیب‌ها نشان‌دهنده فرکانس انحنا در این سازه می‌باشد.



شکل ۹. نمودار قطبی سطح فشار صوتی نمودار قطبی سطح فشار صوتی (SPL) برای یک ورق و یک سازه دو انحنا درفرکانس ۱۰۰ هرتز

۵. نتیجه گیری

در نیروگاه‌ها و ایستگاه‌های تقویت فشار، به دلیل وجود تجهیزات دوار، شدت صدای بالایی وجود دارد. از این رو در این پژوهش به بررسی افت انتقال صوت پوسته‌های دوانحنایی به منظور کاهش انتقال صداهای تولید شده توسط این تجهیزات به محیط اطراف آن پرداخته شد. همانطور که نتایج نشان داد، استفاده از سازه‌های دوانحنایی به نسبت ورق‌ها اثرات قابل توجهی در کاهش انتقال صوت دارد. از جمله مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- استفاده از پوسته‌های دوانحنایی به جای ورق‌ها در فرکانس‌های پایین می‌تواند باعث افزایش افت انتقال صوت گردد و با توجه به فرکانس کاری توربین، گزینه‌ی بسیار مناسبی جهت افزایش افت انتقال صوت می‌باشد.
- استفاده از پوسته‌هایی با شعاع انحنا بالاتر باعث افزایش افت انتقال صوت می‌شود.
- افزایش زاویه برخورد از صفر درجه به سمت ۹۰ درجه که همان راستای عمود بر صفحه می‌باشد، باعث انتقال f_{coin} به فرکانس‌های بالاتر می‌شود.
- سازه دوانحنایی به دلیل استحکام سازه‌ای بیشتری که دارد، سطح فشار صدای کمتری را را در سطح ایجاد می‌کند.

مراجع

[1] V. N. Nikhil, “Composite materials in aerospace applications,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 4, no. 9, pp. 1–10, 2014.

[2] J. N. Reddy and M. Savoia, “Layer-wise shell theory for postbuckling of laminated circular cylindrical shells,” *AIAA J.*, vol. 30, no. 8, pp. 2148–2154, 1992, doi: 10.2514/3.11193.

[3] A. Nosier, R. K. Kapania, and J. N. Reddy, “Free vibration analysis of laminated plates using a layerwise theory,” *AIAA J.*, vol. 31, no. 12, pp. 2335–2346, 1993, doi: 10.2514/3.11933.

[4] . M. Liew and C. W. Lim, “Vibration of doubly-curved shallow shells,” *Acta Mech.*, vol. 114, pp. 95–119, 1996, doi: 10.1007/BF01170398.

[5] K. Rahmatnezhad, M. R. Zarastvand, and R. Talebitooti, “Mechanism study and power transmission feature of acoustically stimulated and thermally loaded composite shell structures with double curvature,” *Compos. Struct.*, vol. 276, no. May, p. 114557, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114557

[6] J.N. REDDY, *MECHANICS of LAMINATED COMPOSITE PLATES and SHELLS Theory and Analysis*. 2004.

[7] A. M. B. Braga and C. E. A. Rivas, “High-frequency response of isotropic-laminated cylindrical shells modeled by a layer-wise theory,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 42, no. 14, pp. 4278–4294, 2005, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.06.062.

[8] M. Abid, M. S. Abbes, J. D. Chazot, L. Hammemi, M. A. Hamdi, and M. Haddar, “Acoustic response of a multilayer panel with viscoelastic material,” *Int. J. Acoust. Vib.*, vol. 17, no. 2, p. 82, 2012.

[9] J. N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. CRC press, 200