



افت انتقال صوت پوسته‌های مخروطی ناقص با مواد متخلخل

علی اصغر جعفری^{*}، مسعود گلزاری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳

کلمات کلیدی:

افت انتقال صوت
پوسته مخروطی ناقص
مواد متخلخل
موج صوتی صفحه‌ای

خلاصه: یک مدل تئوری به منظور مطالعه افت انتقال صوت در یک پوسته مخروطی ناقص با لایه متخلخل معرفی می‌شود. پوسته مخروطی همسانگرد و جدار نازک است و به وسیله یک موج صوتی صفحه‌ای که به صورت مایل به سطح بیرونی آن برخورد می‌کند، تحریک می‌شود. از تئوری لایه جهت پیاده‌سازی معادله‌های حرکت پوسته مخروطی استفاده می‌شود، و با استفاده از یک روش حل همگرا بر پایه سری‌های توانی، پاسخ دینامیکی پوسته به صورت دقیق محاسبه می‌گردد. همچنین جهت مدل‌سازی انتشار موج در ماده متخلخل، از روش سیال معادل بر پایه تئوری بایو بهره گرفته می‌شود. در ابتدا، نتایج مدل حاضر با نتایج مطالعه‌های گذشته اعتبارسنجی می‌گردد. سپس، اثرات چندین پارامتر مهم طراحی همچون شرایط مرزی مختلف در دو سر پوسته مخروطی، زاویه رأس مخروط، زاویه موج صوتی برخوردی و جنس پوسته بر ویژگی‌های افت انتقال صوت این نوع سازه بررسی می‌گردد. نشان داده می‌شود مدل حاضر می‌تواند به عنوان یک ابزار موثر در مرحله طراحی صوتی پوسته‌های مخروطی ناقص به کار گرفته شود. به علاوه، افت انتقال صوت در حضور لایه‌ای از ماده متخلخل که در دو ساختار متفاوت به جداره پوسته متصل شده است، محاسبه می‌گردد. نتایج به‌طور کلی عملکرد مطلوب لایه متخلخل را در زمینه عایق‌بندی صوتی سازه نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

روش‌های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی به بررسی انتقال صوت از ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای شکل با ساختارهای متفاوت پردازند و تکنیک‌هایی را جهت کاهش انرژی صوتی منتقل شده به داخل سیستم‌های مکانیکی به کار ببرند. انتقال صوت در ورق‌ها توسط محققین متعددی مانند برانک و ورک [۱]، کوال [۲]، بولتون و همکاران [۳]، وو و دنداپانی [۴]، لیو و همکاران [۵]، ژین و همکاران [۶] و ژین و لو [۷]، لیو و سباستین [۸]، و مانا و سونتی [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. کوال [۲] با در نظر گرفتن پانل کابین هواپیما، اثرات انحنای پانل، فشار و جریان هوای بیرونی را بر افت انتقال صوت^۲ از این سازه‌ها مورد بررسی قرار داد. بولتون و همکاران [۳] انتقال صوت از پانل‌های دوجداره ساندویچی

امروزه از ورق‌ها و پوسته‌ها در کاربردهای گسترده مهندسی در صنایع مختلف همچون هوافضا، خودرو، دریایی و نظامی بهره گرفته می‌شود. در این سازه‌ها، توجه به اثرات تراکنش^۱ بین سازه و سیال اطراف حائز اهمیت است. چرا که این مهم می‌تواند موجب انتقال ناخواسته انرژی به صورت ارتعاش-صوت به داخل سیستم‌های مکانیکی شده که علاوه بر آلودگی صوتی می‌تواند موجب خستگی سازه گردد. به عنوان مثال، نویز منتقل شده به داخل کابین هواپیما موجب ناراحتی مسافران و خدمه پرواز است. بنابراین اهمیت بالای این موضوع موجب شده است که در دهه‌های اخیر محققین با ارائه

1 Interaction

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ajafari@kntu.ac.ir

2 Sound Transmission Loss (STL)



با لایه‌ای از مواد متخلخل^۱ را به هر دو روش تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از تئوری بایو برای مدل‌سازی انتشار موج در ماده متخلخل بهره گرفتند و انطباق خوب نتایج تحلیلی خود را با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند. وو و دنداپانی [۵] با کمک روش عددی المان مرزی افت انتقال صوت در یک پانل جدار نازک را محاسبه کردند. ژین و همکاران [۶] با در نظر گرفتن یک پانل دوجداره با ابعاد محدود افت انتقال صوت در آن را به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در تحقیق دیگری [۷] از مقایسه نتایج حاصل از پانل با ابعاد محدود و پانل با ابعاد نامحدود نشان دادند اثرات شرایط مرزی خصوصاً در فرکانس‌های پایین بر مشخصات افت انتقال صوت قابل توجه است. مانا و سونتی [۹] با ارائه یک مدل تئوری انتقال صوت از یک پانل سوراخ سوراخ شده را پیش‌بینی کردند.

در زمینه انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای نیز می‌توان به مطالعه‌های اسمیت [۱۰]، کوال [۱۱-۱۵]، بلیس و همکاران [۱۶-۱۸]، لی و کیم [۱۹ و ۲۰]، دنلی و سان [۲۱]، ژو و همکاران [۲۲]، طالبی توتی و همکاران [۲۳]، اولیازاده و همکاران [۲۴ و ۲۵] و گلزاری و جعفری [۲۶] اشاره کرد. لی و کیم [۱۹ و ۲۰] افت انتقال صوت از پوسته‌های استوانه‌ای تک‌جداره و دوجداره را به دو روش تحلیلی و آزمایشگاهی محاسبه کردند و اثرات خواص هندسی و مکانیکی پوسته، و زاویه موج صوتی برخوردی را بر ویژگی‌های انتقال صوت از این سازه‌ها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مدل تئوری خود طول پوسته را نامحدود فرض کردند. دنلی و سان [۲۱] با معرفی یک روش عددی توان صوتی منتقل شده به داخل یک پوسته استوانه‌ای ساندویچی را محاسبه کردند. خواص عایق‌بندی صوتی یک پوسته استوانه‌ای ساندویچی دوجداره با طول نامحدود توسط ژو و همکاران [۲۲] به صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها از روش سیال معادل بر پایه تئوری بایو جهت مدل‌سازی انتشار موج در ماده متخلخل استفاده کردند. اولیازاده و فرشیدیان‌فر [۲۴] افت انتقال صوت پوسته‌های استوانه‌ای شکل با طول نامحدود را محاسبه کردند و روش‌هایی را برای کاهش توان صوتی انتقال یافته به داخل این سازه‌ها پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها در مطالعه دیگری [۲۵] تکنیک‌هایی را برای اندازه‌گیری تجربی افت انتقال صوت از پوسته‌های استوانه‌ای

به کار گرفته و نتایج حاصل را مقایسه کردند. گلزاری و جعفری [۲۶] عملکرد عایق‌بندی صوتی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی سه و چند جداره را در یک میدان صوتی پخشنده^۲ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف نشان دادند استفاده از کوپلینگ‌های مختلف بین لایه‌های مواد متخلخل و شکاف‌های هوا گزینه‌های بیشتری را جهت تنظیم عملکرد عایق‌بندی صدا در طیف‌های فرکانسی مختلف در اختیار قرار می‌دهد.

امروزه از مواد متخلخل در صنایع گوناگون به عنوان مواد جاذب لایه‌ای جهت کاهش انرژی صوتی ورودی به سیستم‌های مکانیکی به شکل وسیعی استفاده می‌گردد. به عنوان مثال استفاده از صفحه‌ها و پوسته‌ها با لایه‌ای از مواد متخلخل، در ساخت بدنه وسایل نقلیه مانند هواپیما، خودرو و قطار به صورت گسترده استفاده می‌شود. از این‌رو، این مهم در سال‌های اخیر مورد توجه محققین متعددی قرار گرفته است [۳، ۲۲، ۲۳، ۲۵، ۲۶]. این مواد که از دو فاز جامد و سیال تشکیل شده انرژی صوتی را در اثر واکنش متقابل این دو فاز و از طریق واکنش‌های گرمایی، ویسکوزیته برشی سیال و ویسکوزیته سازه‌ای دفع می‌کنند.

اگرچه پوسته‌های مخروطی شکل در کاربردهای عملی مختلفی مانند، موشک‌ها و ماهواره‌برها، زبردایی‌ها و مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند، با این حال رفتار انتقال صوت در این سازه‌های کاربردی پیچیده به ندرت مورد توجه محققین قرار گرفته است که در این خصوص می‌توان تنها به مطالعه‌های تجربی ویپرمن و همکاران [۲۷] اشاره کرد. از دلایل اصلی این مهم می‌توان به پیچیدگی‌های بیشتر معادله‌های حاکم بر حرکت پوسته‌های مخروطی، محیط‌های صوتی، شرایط مرزی، روش حل و محاسبات مسئله ارتعاش صوت این سازه‌ها نسبت به ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای اشاره کرد. بنابراین، هدف اصلی از انجام این پژوهش معرفی یک روش تئوری جهت مطالعه انتقال صوت از پوسته‌های مخروطی با لایه متخلخل است. همچنین اثرات چندین پارامتر کلیدی همچون شرایط مرزی مختلف در دو سر مخروط، زاویه رأس مخروط، زاویه موج صوتی برخوردی و جنس پوسته مخروطی بر ویژگی‌های انتقال صوت در این سازه‌های کاربردی بررسی می‌گردد. به علاوه، با در نظر گرفتن دو ساختار مختلف جهت کوپلینگ بین جداره پوسته و لایه متخلخل، اثر این جاذب‌های صوتی

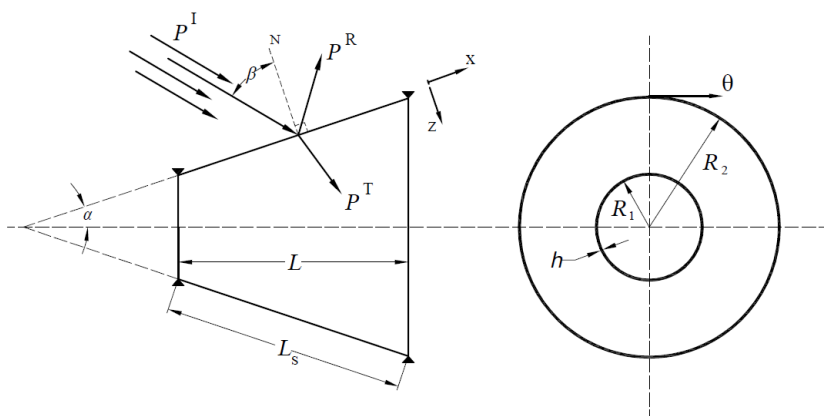


Fig. 1. A schematic sketch of sound transmission through truncated conical shell subjected to a plane acoustic wave

شکل ۱: یک نمایش شماتیک از انتقال صوت در پوسته مخروطی ناقص تحت تحریک یک موج صوتی صفحه‌ای

میدان آزاد^۳ واقع شده و محفظه داخلی آن بدون انعکاس صوت است.

بر افت انتقال صوت تعیین می‌گردد. این پژوهش کاربردی می‌تواند در طراحی صوتی پوسته‌های مخروطی مفید و موثر واقع شود.

۲-۳- معادله‌های دینامیکی حاکم بر حرکت پوسته مخروطی جدار نازک

۲- فرمول‌بندی تئوری مسئله ارتعاش-صوت

بر اساس تئوری لاو^۴ معادله‌های حاکم بر حرکت دینامیکی پوسته مخروطی به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۸]:

۲-۱- تعریف مسئله

پوسته مخروطی ناقص^۱ جدار نازک مورد بررسی در این پژوهش با شعاع کوچک R_1 ، شعاع بزرگ R_2 ، نصف زاویه رأس α ، ضخامت جداره h ، ارتفاع L و ارتفاع مایل^۲ L_s در شکل ۱ نشان داده شده است. جهت‌های x ، θ و z که به ترتیب در راستای مولد مخروط، راستای محیطی و عمود بر سطح مخروط می‌باشند، بیانگر دستگاه منحنی‌الخط هستند. نوع شرایط مرزی در دو سر پوسته ساده (مفصلی) است. موج صوتی صفحه‌ای با زاویه β نسبت به خط عمود N به سطح بیرونی پوسته برخورد می‌کند که در نتیجه آن بخشی از امواج منعکس و بخشی به محفظه داخلی پوسته انتقال می‌یابد. سیال در بیرون و محفظه داخلی از هوای محیط با دمای 20° درجه سانتی‌گراد است.

۲-۲- فرض‌های مسئله

پوسته مخروطی نشان داده شده در شکل ۱ همسانگرد و همگن فرض می‌شود. همچنین به منظور محاسبه خاصیت افت انتقال صوت سازه که بیانگر مقدار صدایی است که توسط آن ایزوله می‌شود، ضروری است میدان‌های صوتی بیرون و داخل پوسته بدون بازتاب صوت در نظر گرفته شوند. بنابراین فرض شده است که پوسته مخروطی در یک

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_{\theta x}}{\partial \theta} + \quad (1-f)$$

$$\frac{\sin \alpha}{R(x)} (N_{xx} - N_{\theta\theta}) = \rho_s h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial N_{x\theta}}{\partial x} + \frac{2 \sin \alpha}{R(x)} N_{\theta x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \quad (1-b)$$

$$\frac{\cos \alpha}{R(x)} Q_{\theta z} = \rho_s h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} Q_{xz} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial Q_{\theta z}}{\partial \theta} - \quad (1-p)$$

$$\frac{\cos \alpha}{R(x)} N_{\theta\theta} + \Delta P = \rho_s h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} M_{xx} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial M_{\theta x}}{\partial \theta} - \quad (1-t)$$

$$\frac{\sin \alpha}{R(x)} M_{\theta\theta} - Q_{xz} = 0$$

$$\frac{\partial M_{x\theta}}{\partial x} + \frac{2 \sin \alpha}{R(x)} M_{\theta x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial M_{\theta\theta}}{\partial \theta} - Q_{\theta z} = 0 \quad (1-th)$$

3 Free Field

4 Love

1 Truncated

2 Slant Height

و سختی خمشی پوسته مخروطی هستند. E مدول یانگ و μ نسبت پواسون پوسته است. در نهایت از جایگذاری روابط (۲) در روابط (۱) معادله‌های حاکم بر حرکت پوسته مخروطی جدار نازک بر حسب مولفه‌های جابجایی به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$L_1\{u, v, w\} = \rho_s h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (۳)$$

$$L_2\{u, v, w\} = \rho_s h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (۴)$$

$$L_3\{u, v, w\} + \Delta P = \rho_s h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (۵)$$

که L_1 ، L_2 و L_3 عملگرهای دیفرانسیلی هستند و در پیوست الف بیان شده‌اند.

۲-۴- مدل‌سازی اثر تداخل بین سیال و پوسته مخروطی ناقص

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به منظور محاسبه فشار امواج صوتی در سطح مشترک سیال و پوسته مخروطی، پوسته به بخش‌هایی تقسیم می‌شود. این بخش‌ها به اندازه‌ای باریک هستند که می‌توان مقدار فشار صوتی روی سطح هر بخش را برابر با مقدار فشار صوتی روی سطح سازه استوانه‌ای شکل با همان شعاع متوسط و ارتفاع در نظر گرفت. لازم به توضیح است که در این پژوهش از این مدل کارآمد تنها برای محاسبه فشار سیال در سطح پوسته مخروطی بهره گرفته شده است، چراکه همانطور در بخش ۶-۲ نشان داده خواهد شد، از معادله‌های حاکم بر پوسته مخروطی یعنی روابط (۳) تا (۵) جهت محاسبه مولفه‌های جابجایی پوسته مخروطی استفاده می‌شود. سپس نوارهای مخروطی شکل به واسطه معادله‌های حاکم بر شرایط مرزی در مرزهای مشترک با یکدیگر مرتبط می‌شوند.

بنابراین می‌توان معادله‌های امواج صوتی برخوردی، انعکاسی و انتقالی برای هر قسمت مخروطی را بر اساس روش برهم نهی مودها در مختصات استوانه‌ای [۱۹ و ۲۲] که معادله هلمهولتز را هم ارضاء می‌کنند، به ترتیب به فرم روابط زیر بیان کرد:

$$P_i^l(r, \theta, X, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p^l \varepsilon_n (-j)^n J_n(k_1 r) \quad (۶)$$

$$\cos(n\theta) e^{j(\omega t - k_1 X (X_1 + X))}$$

که u ، v و w مولفه‌های جابجایی سطح میانی پوسته مخروطی در راستاهای به ترتیب x ، θ و Z هستند. t زمان است. همچنین $R(x) = R_0 + x \sin \alpha$ که در آن $R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$ شعاع میانگین است. ρ_s چگالی پوسته مخروطی است. عبارت $\Delta P = (P^I + P^R) - P^T$ بیانگر اختلاف فشار موجود در دو طرف جداره پوسته است، که در آن P^I ، P^R و P^T به ترتیب فشارهای صوتی برخوردی، انعکاسی و انتقال یافته هستند. به علاوه، $N_{\theta x}$ ، $N_{x\theta}$ ، $N_{\theta\theta}$ ، N_{xx} نیرو و $M_{\theta x}$ ، $M_{x\theta}$ ، $M_{\theta\theta}$ ، M_{xx} منتجه‌های گشتاور بوده که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$N_{xx} = C \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \left(\frac{1}{R(x)} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} u + \frac{\cos \alpha}{R(x)} w \right) \right] \quad (۲-الف)$$

$$N_{\theta\theta} = C \left[\frac{1}{R(x)} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\sin \alpha}{R(x)} u + \frac{\cos \alpha}{R(x)} w + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (۲-ب)$$

$$N_{x\theta} = N_{\theta x} = C \left(\frac{1-\mu}{2} \right) \left[\frac{1}{R(x)} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\sin \alpha}{R(x)} v \right] \quad (۲-پ)$$

$$M_{xx} = D \left[-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \left(\frac{\cos \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\sin \alpha}{R(x)} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1}{R^2(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right] \quad (۲-ت)$$

$$M_{\theta\theta} = D \left[\frac{\cos \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{\sin \alpha}{R(x)} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1}{R^2(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (۲-ث)$$

$$M_{x\theta} = M_{\theta x} = D \left(\frac{1-\mu}{2} \right) \left[\frac{\cos \alpha}{R(x)} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2 \cos \alpha \sin \alpha}{R^2(x)} v + \frac{2 \sin \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{2}{R(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial x} \right] \quad (۲-ج)$$

که در آن $C = \frac{Eh}{1-\mu^2}$ و $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ به ترتیب سختی غشایی

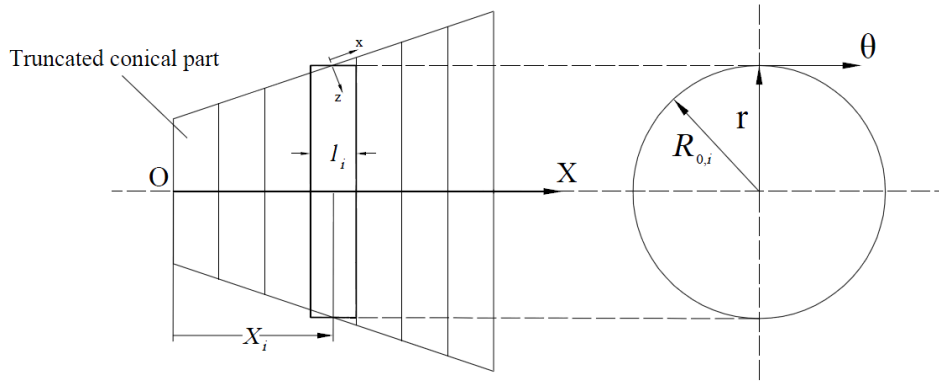


Fig. 2. A schematic sketch of fluid-conical shell interaction model

شکل ۲: یک نمایش شماتیک از مدل تداخل سیال و پوسته مخروطی

$$k_2 = \frac{\omega}{c_2} \quad (10)$$

$$k_{2r} = \left(k_2^2 - k_{2X}^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

که c_1 و c_2 سرعت صوت به ترتیب در سیال بیرون پوسته مخروطی و سیال محفظه داخلی است.

۲-۵- شرایط مرزی مسئله

معادله‌های حاکم بر بخش‌های مخروطی نمایش داده شده در شکل ۲ توسط هشت معادله پیوستگی در مرزهای مشترک با یکدیگر کوپل می‌گردند. این معادله‌ها که شامل پیوستگی مولفه‌های جابجایی و شیب، و همچنین تعادل بین منتجه‌های نیرو و ممان است به فرم روابط زیر نوشته می‌شوند:

$$u_i \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = u_{i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-الف})$$

$$v_i \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = v_{i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-ب})$$

$$w_i \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = w_{i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-پ})$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial x} \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = \frac{\partial w_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-ت})$$

$$N_{xx,i} \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = N_{xx,i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-ث})$$

$$N_{x\theta,i} \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = N_{x\theta,i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (11\text{-ج})$$

$$P_i^R(r, \theta, X, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{n,i}^R H_n^2(k_{1r}r) \cos(n\theta) e^{j(\omega t - k_{1X}X)} \quad (7)$$

$$P_i^T(r, \theta, X, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{n,i}^T H_n^1(k_{2r}r) \cos(n\theta) e^{j(\omega t - k_{2X}X)} \quad (8)$$

که در آن p^R ، p^T و p^1 به ترتیب دامنه امواج صوتی برخوردی، انعکاسی و انتقال یافته هستند. N که $i=1,2,3,\dots,N$ تعداد کل بخش‌های مخروطی است. n عدد مود محیطی و \mathcal{E}_n پارامتر نیومان است که برای $n=0$ برابر یک و برای سایر اعداد مود محیطی برابر دو است. r ، θ و X به ترتیب جهت‌های شعاعی، محیطی و طولی (محوری) در مختصات استوانه‌ای هستند. ω فرکانس زاویه‌ای موج برخوردی، $J_{\pm} = (-1)^{\pm j}$ ، J_n^1 و H_n^2 به ترتیب توابع بسل نوع اول، هنکل نوع اول و هنکل نوع دوم از مرتبه n هستند.

از آنجایی که امواج صوتی پیشرونده در کل سیستم ناشی از موج صوتی برخوردی است، بنابراین مولفه‌های اعداد موج در راستای طولی یکسان هستند [۶، ۷، ۲۲، ۲۶] یعنی $k_{2X} = k_{1X}$. از این رو، اعداد موج و مولفه‌های شعاعی متناظر به صورت روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\omega}{c_1} \\ k_{1X} &= k_1 \sin(\beta + \alpha) \\ k_{1r} &= k_1 \cos(\beta + \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

۲-۶- روش حل

مولفه‌های جابجایی پوسته مخروطی به فرم کلی زیر قابل بیان

هستند:

$$u(x, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} U(x) \cos(n\theta) e^{i\omega t} \quad (18)$$

$$v(x, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} V(x) \sin(n\theta) e^{i\omega t} \quad (19)$$

$$w(x, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} W(x) \cos(n\theta) e^{i\omega t} \quad (20)$$

که دامنه‌های $U(x)$ ، $V(x)$ و $W(x)$ در فرم سری توانی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$U(x) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^m \quad (21)$$

$$V(x) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m x^m \quad (22)$$

$$W(x) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m x^m \quad (23)$$

که a_m ، b_m و c_m ثوابت هستند.

با ترکیب روابط ارائه شده برای موج‌های صوتی (روابط (۶) تا (۱۸))، روابط مولفه‌های جابجایی پوسته مخروطی (روابط (۱۸) تا (۲۳)) و شرایط مرزی بین سیال و سازه (روابط (۱۳) و (۱۴)) و استفاده از آن‌ها در معادله‌های دینامیکی حاکم بر پوسته مخروطی (روابط (۳) تا (۵))، پس از انجام محاسبات ریاضی روابط زیر برای هر بخش مخروطی بدست می‌آید:

$$a_{m+2} = M_{1,1} a_{m+1} + M_{1,2} a_m + M_{1,3} a_{m-1} + M_{1,4} a_{m-2} + M_{1,5} b_{m+1} + M_{1,6} b_m + M_{1,7} c_{m+1} + M_{1,8} c_m \quad m = 2, 3, \dots \quad (24)$$

$$b_{m+2} = M_{2,1} a_{m+1} + M_{2,2} a_m + M_{2,3} a_{m-1} + M_{2,4} a_{m-2} + M_{2,5} b_{m+1} + M_{2,6} b_m + M_{2,7} b_{m-1} + M_{2,8} b_{m-2} + M_{2,9} b_{m-3} + M_{2,10} b_{m-4} + M_{2,11} c_{m+2} + M_{2,12} c_{m+1} + M_{2,13} c_m + M_{2,14} c_{m-1} + M_{2,15} c_{m-2}, \quad m = 4, 5, \dots \quad (25)$$

$$M_{xx,i} \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = M_{xx,i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (ج-۱۱)$$

$$V_{xz,i} \Big|_{x=\frac{l_{s,i}}{2}} = V_{xz,i+1} \Big|_{x=-\frac{l_{s,i+1}}{2}} \quad (خ-۱۱)$$

که در آن ارتفاع مایل مخروط $l_{s,i}$ است. منتجه‌های نیرو و ممان برای پوسته مخروطی در رابطه (۲) بیان شده‌اند. همچنین نیروی برشی کلومین-کیرشسف^۱ بوده که برابر است با [۲۹]:

$$V_{xz} = Q_{xz} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial M_{x\theta}}{\partial \theta} \quad (12)$$

همچنین در سطح مشترک بین سیال و پوسته مخروطی (یعنی $r = R_{0,i}$)، سرعت ذرات سیال در جهت z با سرعت پوسته در این جهت برابر است. بنابراین نوع دیگری از شرایط مرزی به فرم معادله‌های زیر قابل بیان هستند:

$$(V_{r,i}^I + V_{r,i}^R) \cos \alpha + (V_{X,i}^I + V_{X,i}^R) \sin \alpha = \frac{\partial w_i}{\partial t} \quad (13)$$

$$V_{r,i}^T \cos \alpha + V_{X,i}^T \sin \alpha = \frac{\partial w_i}{\partial t} \quad (14)$$

که V_r و V_X سرعت ذرات سیال به ترتیب در راستاهای شعاعی و طولی مختصات استوانه‌ای است.

به علاوه، شرایط مرزی در دو سر پوسته مخروطی برای سه نوع شرط مرزی ساده، گیردار و آزاد به شکل زیر بیان می‌شود:

شرط مرزی ساده^۲ (مفصلی):

$$v = 0 \quad w = 0 \quad N_{xx} = 0 \quad M_{xx} = 0 \quad (15)$$

شرط مرزی گیردار^۳ (ثابت):

$$u = 0 \quad v = 0 \quad w = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

شرط مرزی آزاد^۴:

$$N_{xx} = 0 \quad N_{x\theta} = 0 \quad M_{xx} = 0 \quad V_{xz} = 0 \quad (17)$$

1 Kelvin-Kirchhoff
2 Simply Support
3 Clamped
4 Free

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix}_{8N \times 1}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} -\mathbf{b}_1|_{x=-\frac{L_1}{2}} \\ \mathbf{c}_2|_{x=-\frac{L_2}{2}} - \mathbf{c}_1|_{x=\frac{L_1}{2}} \\ \vdots \\ \mathbf{c}_N|_{x=-\frac{L_N}{2}} - \mathbf{c}_{N-1}|_{x=\frac{L_{N-1}}{2}} \\ -\mathbf{b}_N|_{x=\frac{L_N}{2}} \end{bmatrix}_{8N \times 1}$$

که عناصر غیر صفر ماتریس‌های \mathbf{A} و \mathbf{b} در پیوست ب بیان شده‌اند.

از حل معادله ماتریسی (۲۸)، مجهول‌های \mathbf{x} محاسبه می‌شوند. سپس از جایگذاری آنها در روابط (۲۱) تا (۲۳)، مولفه‌های جابجایی پوسته مخروطی بدست می‌آیند. در نهایت با استفاده از این مولفه‌ها، معادله اویلر [۳۰]، روابط امواج صوتی (روابط (۶) تا (۸)) و شرایط مرزی در روابط (۱۳) و (۱۴)، دامنه‌های امواج صوتی انعکاسی و انتقالی تعیین می‌شوند.

۲-۷- افت انتقال صوت

توان موج صوتی صفحه‌ای برخوردی به صورت زیر قابل بیان است [۲۶، ۲۲، ۶]:

$$W^I = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_S P^I V^{I*} dS \right\} \quad (30)$$

که $V^I = \frac{P^I}{\rho_1 c_1}$ سرعت ذرات سیال و ρ_1 چگالی سیال خارج از پوسته است. همچنین $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ و بالانویس (*) به ترتیب بخش حقیقی و مزدوج مختلط آرگومان را نشان می‌دهند. S تصویر سطح پوسته در راستای موج صوتی است. به دلیل این که این موج توان خود را در هر دو جهت شعاعی و محوری از پوسته مخروطی عبور می‌دهد، از این رو رابطه (۳۰) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$W^I = \frac{(p^I)^2}{2\rho_1 c_1} \left(S_1 \cos(\alpha + \beta) + S_2 \sin(\alpha + \beta) \right) \quad (31)$$

که در آن $S_1 = (R_1 + R_2)L$ و $S_2 = \frac{\pi}{4}(R_2^2 - R_1^2)$. همچنین، توان موج صوتی انتقال یافته به داخل پوسته مخروطی برابر است با:

$$W^T = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_S P^T \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^* dS \right\} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} c_{m+4} = & M_{3,1} a_{m+1} + M_{3,2} a_m + M_{3,3} a_{m-1} + \\ & M_{3,4} a_{m-2} + M_{3,5} b_{m+2} + M_{3,6} b_{m+1} + \\ & M_{3,7} b_m + M_{3,8} b_{m-1} + M_{3,9} b_{m-2} + \\ & M_{3,10} c_{m+3} + M_{3,11} c_{m+2} + M_{3,12} c_{m+1} + \\ & M_{3,13} c_m + M_{3,14} c_{m-1} + M_{3,15} c_{m-2} + \\ & M_{3,16} c_{m-3} + M_{3,17} c_{m-4} + M_{3,18}, \quad m = 4, 5, \dots \end{aligned} \quad (26)$$

که $a_2, a_3, b_2, b_3, b_4, b_5, c_4, c_5, c_6, c_7$ ثابت‌ها و $M_{1,k} (k=1,2,\dots,8)$ ، $M_{2,k} (k=1,2,\dots,15)$ و $M_{3,k} (k=1,2,\dots,18)$ ضرایبی هستند که به دلیل طولانی بودن عبارات آن‌ها در این مقاله ذکر نمی‌شود.

از جایگذاری روابط (۲۴) تا (۲۶) در روابط (۲۱) تا (۲۳) ملاحظه خواهد شد که دامنه‌های جابجایی پوسته مخروطی برحسب هشت ثابت مجهول $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1, c_2, c_3$ بدست می‌آید که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} U(x) \\ V(x) \\ W(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(x) & \dots & u_8(x) \\ v_1(x) & \dots & v_8(x) \\ w_1(x) & \dots & w_8(x) \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} u_0(x) \\ v_0(x) \\ w_0(x) \end{bmatrix} \quad (27)$$

که $\mathbf{x} = [a_0 \ a_1 \ b_0 \ b_1 \ c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ همچنین $u_k(x)$ ، $v_k(x)$ و $w_k(x) (k=0,1,\dots,8)$ توابعی هستند که در این مقاله بر اساس بسط دامنه‌های جابجایی تا ده جمله ($m=10$) محاسبه شده‌اند.

با استفاده از رابطه (۲۷) در شرایط مرزی بیان شده در رابطه‌های (۱۱) و (۱۵)، معادله ماتریسی به صورت رابطه زیر برای هر عدد مود محیطی n بدست می‌آید:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (28)$$

که در آن:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1|_{x=-\frac{L_1}{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_1|_{x=\frac{L_1}{2}} & -\mathbf{C}_2|_{x=-\frac{L_2}{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_2|_{x=\frac{L_2}{2}} & -\mathbf{C}_3|_{x=-\frac{L_3}{2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_{N-1}|_{x=\frac{L_{N-1}}{2}} & -\mathbf{C}_N|_{x=\frac{L_N}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{B}_N|_{x=\frac{L_N}{2}} & 0 \end{bmatrix}_{8N \times 8N} \quad (29)$$

تئوری معادله‌های حاکم بر انتشار موج‌های مذکور در ماده متخلخل همگن و همسانگرد به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\nabla^4 e_s + A_1 \nabla^2 e_s + A_2 e_s = 0 \quad (36)$$

$$\nabla^2 \varpi + k_t^2 \varpi = 0 \quad (37)$$

که در آن ∇ عملگر گرادیان است. همچنین e_s ، ϖ ، A_1 ، A_2 و k_t پارامترهایی هستند که روش تعریف و محاسبه آن‌ها به طور کامل در مراجع [۳] و [۳۱] بیان شده است. بنابراین از ذکر مجدد آن‌ها در این مقاله صرف نظر شده است.

در ادامه لی و همکاران [۳۲] مدلی را براساس تئوری بایو معرفی کردند که در آن موجی که دارای بیشترین انرژی است به عنوان موج غالب در نظر گرفته می‌شود و از مشارکت سایر امواج در مقایسه با آن صرف نظر می‌شود. این مدل که از پیچیدگی‌های ریاضی کمتری نسبت به مدل بایو برخوردار است، تاکنون نتایج قابل قبولی را از خود ارائه کرده است و از آن توسط محققین متعددی جهت پیاده‌سازی معادلات حاکم بر ماده متخلخل در انتقال صوت از ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای با لایه متخلخل بهره گرفته شده است [۲۲، ۲۶، ۳۳، ۳۴]. لازم به توضیح است که روش محاسبه انرژی‌های کرنش مربوط به جابجایی فاز جامد و جابجایی فاز سیال برای امواج هوا برد^۱ (موج غالب بر فاز سیال) و فریم^۲ (موج غالب بر فاز جامد) به تفصیل در مرجع [۳۲] ارائه گردیده است.

در این مقاله جهت بررسی انتقال صوت از پوسته مخروطی با لایه متخلخل دو پیکربندی به منظور کوپلینگ بین جداره پوسته و لایه متخلخل مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. در شکل ۳-الف لایه متخلخل به طور مستقیم به سطح داخلی پوسته متصل می‌شود (که پیکربندی B نامگذاری می‌شود) و در شکل ۳-ب لایه متخلخل به واسطه یک شکاف هوا از جداره پوسته جدا می‌شود (که پیکربندی U نامگذاری می‌شود).

شرایط مرزی که ناشی از پیوستگی سرعت نرمال پوسته، سیال و لایه متخلخل است، در حالت کلی برای دو ساختار فوق به فرم معادله‌های زیر بیان می‌شوند:

$$(V_{pr}^T + V_{pr}^R) \cos \alpha + (V_{pX}^T + V_{pX}^R) \sin \alpha = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (38)$$

که در آن $dS = (R_0 + x \sin \alpha) dx d\theta$ از جایگذاری روابط (۸) و (۲۳) در رابطه (۳۲)، توان انتقالی برای هر قسمت مخروطی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$W_n^T = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{2\pi \rho_2 \omega^2 H_n^1(k_{2r} R_0)}{\varepsilon_n \left(H_n''(k_{2r} R_0) k_{2r} \cos \alpha - j H_n^1(k_{2r} R_0) k_{1X} \sin \alpha \right)} \times \left[\int_{-l_s/2}^{l_s/2} W(x) (j\omega W(x))^* (R_{0,i} + x \sin \alpha) dx \right] \right\} \quad (33)$$

که ρ_2 چگالی سیال موجود در محفظه داخلی است. در نهایت، افت انتقال صوت به فرم رابطه زیر بیان می‌شود [۲۰] و [۲۲]:

$$TL = -10 \log \frac{\sum_{n=0}^{\infty} W_n^T}{W^I} \quad (34)$$

همچنین در یک میدان صوتی که در آن امواج با زوایای مختلف به سطح پوسته مخروطی برخورد می‌کنند، میانگین افت انتقال صوت به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

$$TL_{av} = -10 \log \left[2 \int_0^{\beta_{lim}} \left(\frac{\sum_{n=0}^{\infty} W_n^T}{W^I} \right) \sin \beta \cos \beta d\beta \right] \quad (35)$$

که β_{lim} زاویه حد موج صوتی برخوردی است، به طوری که فرض می‌شود امواج صوتی با زوایای بیشتر از آن به داخل پوسته منتقل نمی‌شوند. در این پژوهش زاویه حد ۸۰ درجه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۸- مدل سازی انتشار موج در ماده متخلخل

از تئوری بایو [۳۱] به عنوان شناخته شده‌ترین و کاملترین تئوری جهت مدل سازی انتشار موج در مواد متخلخل نام برده می‌شود. براساس این تئوری ماده متخلخل متشکل از دو فاز جامد و سیال در نظر گرفته شده که در فاز جامد دو موج طولی و یک موج برشی (عرضی) و در فاز سیال دو موج طولی انتشار می‌یابد. براساس این

1 Airborne
2 Frame

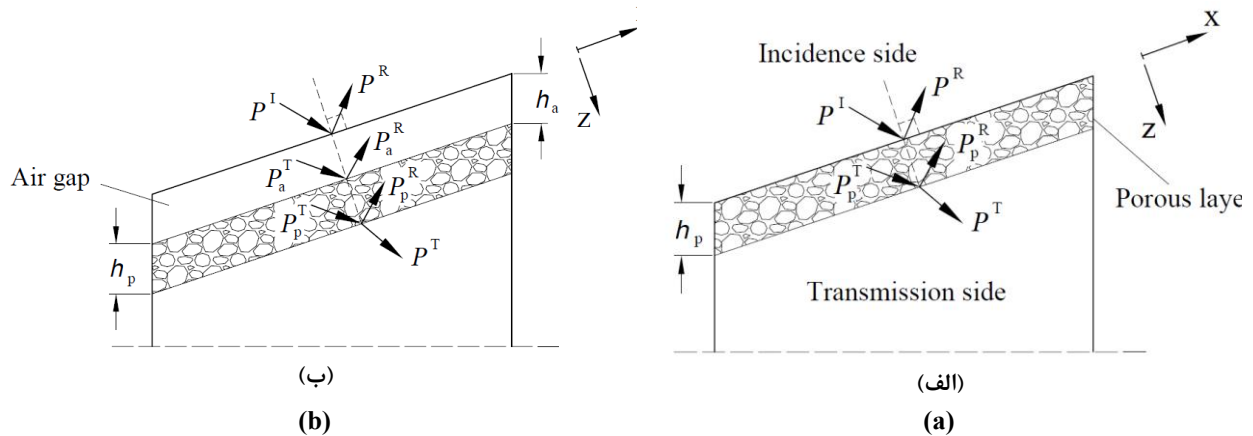


Fig. 3. Different configurations for coupling the porous layer to the shell: a) *B* Configuration: The porous layer is directly attached to the shell; b) *U* Configuration: The porous layer is separated from the shell by an air gap

شکل ۳: پیکربندی‌های مختلف برای اتصال لایه متخلخل به پوسته: الف) پیکربندی B: لایه متخلخل مستقیم به جداره پوسته متصل گردیده است؛ ب) پیکربندی U: لایه متخلخل با یک شکاف هوا از پوسته جدا شده است

برخوردار است. با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش یک الگوریتم تکرارپذیر مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم تا وقتی که مقدار اختلاف افت انتقال صوت در دو تکرار متوالی کمتر از دقت ۰/۰۱ دسی‌بل نباشد، تکرار می‌گردد. شکل ۴ تغییرات افت انتقال صوت برحسب n را در فرکانس‌های ۲۰۰ هرتز، ۲۰۰۰ هرتز و ۲۰۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش n دامنه افت انتقال کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت می‌رسد. از این‌رو، اگر تعداد مود کافی در تحلیل لحاظ نشود، نتایج از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس تحریک، تعداد مودهای همگرایی افزایش داشته است.

۳-۱- اعتبارسنجی نتایج

شکل ۵ نتایج میانگین افت انتقال صوت را با نتایج تجربی ویپرمن و همکاران [۲۷] برای پوسته مخروطی با شعاع کوچک ۰/۱۹ متر، شعاع بزرگ ۰/۳۰۵ متر، نصف زاویه رأس ۱۱/۵° و ارتفاع ۰/۵۶ متر مقایسه می‌کند. لازم به توضیح است که در مطالعات آزمایشگاهی، ویپرمن با استفاده از روش کاهش نویز^۱ مقدار اتلاف صوت پوسته مخروطی را اندازه‌گیری کرد. همانطور که در مرجع [۲۷] اشاره شده است، این روش اندازه‌گیری بیشتر به اندازه‌گیری انرژی صوت مرتبط است تا توان آن (که در رابطه (۳۴) این مقاله مورد استفاده قرار

$$(V_{ar}^T + V_{ar}^R) \cos \alpha + (V_{ax}^T + V_{ax}^R) \sin \alpha = \quad (39)$$

$$(V_{pr}^T + V_{pr}^R) \cos \alpha + (V_{px}^T + V_{px}^R) \sin \alpha$$

$$(V_{pr}^T + V_{pr}^R) \cos \alpha + (V_{px}^T + V_{px}^R) \sin \alpha = \quad (40)$$

$$V_r^T \cos \alpha + V_x^T \sin \alpha$$

۳- نتایج و بحث

در این قسمت پس از اعتبارسنجی نتایج، اثر چندین پارامتر مهم طراحی و همچنین اثر مواد متخلخل بر افت انتقال صوت از پوسته‌های مخروطی بررسی می‌گردد که می‌توانند در بحث طراحی صوتی این سازه‌های کاربردی مفید و موثر واقع شوند.

جدول ۱ خواص فیزیکی پوسته مخروطی فولادی و هوای محیط

مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. موج صوتی با دامنه ۱ پاسکال و زاویه ۴۵° نسبت به نرمال بر سطح به پوسته برخورد می‌کند. شرایط مرزی در دو سر پوسته مخروطی ناقص از نوع ساده در نظر گرفته شده است. همچنین سیال در داخل و بیرون پوسته هوای محیط با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود.

همانطور که ملاحظه می‌شود روابط مربوط به مولفه‌های جابجایی پوسته مخروطی (روابط (۱۸) تا (۲۰))، امواج صوتی (روابط (۶) تا (۸)) و افت انتقال صوت (رابطه (۳۴)) به فرم سری بیان شده‌اند. بنابراین استفاده از تعداد مود کافی هم از جهت اطمینان از دقت نتایج حاصل شده و هم کاهش زمان محاسبات از اهمیت بسزایی

1 Noise Reduction (NR)

جدول ۱: خصوصیات پوسته مخروطی ناقص و هوای محیط

Table 1. Properties of the truncated conical shell and ambient air

مقدار	توضیحات	علائم
خواص پوسته مخروطی فولادی		
۷۸۵۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ρ_s
200×10^9	مدول یانگ (پاسکال)	E
۰/۳	ضریب پواسون	μ
۰/۱	شعاع کوچک (متر)	R_1
۰/۱۴۴	شعاع بزرگ (متر)	R_2
5°	نصف زاویه راس مخروط	α
۰/۰۰۱	ضخامت جداره (متر)	h
۰/۵	ارتفاع مخروط (متر)	L
خواص هوای محیط با دمای 20°C		
۱/۲۱	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ρ_a
۳۴۳/۲	سرعت صوت (متر بر ثانیه)	c_0
۰/۷۱	عدد پرانتل	Pr
۱/۴	نسبت گرمای ویژه	λ

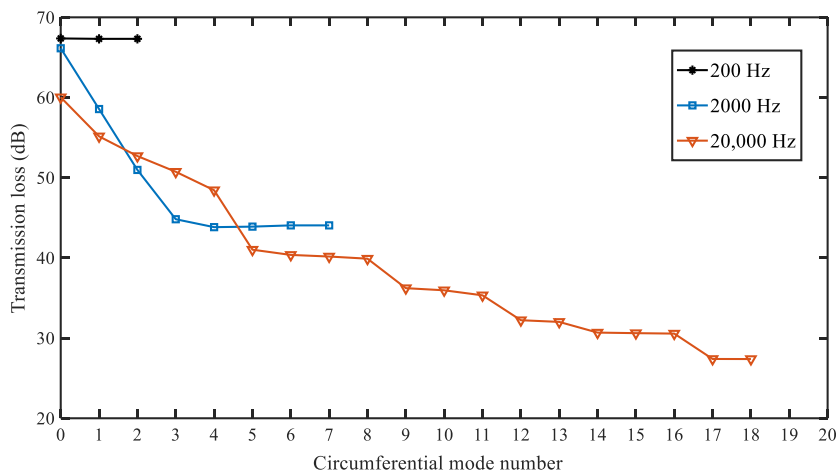


Fig. 4. Convergence checking for sound transmission loss of truncated conical shell

شکل ۴: بررسی همگرایی افت انتقال صوت پوسته مخروطی ناقص

است محفظه داخلی منعکس کننده صوت است. این در حالی است که در مدل تحلیلی حاضر یک موج صوتی صفحه‌ای پوسته را تحریک کرده و همچنین محفظه داخلی بدون انعکاس صوت فرض شده است. با توجه به توضیحات فوق، انتظار می‌رود که در مدل تجربی و پیرمن انتقال صوت بیشتری به داخل سازه اندازه‌گیری شود، یا به عبارت دیگر اتلاف صوت کمتری محاسبه شود. بنابراین، انجام این مقایسه بهتر است از جنبه کیفی صورت پذیرد، که در این رابطه مشاهده

گرفته است). از طرفی دیگر همانطور که محققان [۳۵ و ۳۶] از رابطه $NR = TL - 10 \cdot \log\left(\frac{1}{U} - \frac{3}{4}\right)$ (که U ضریب جذب متوسط سازه و محفظه داخلی است و عموماً مقداری کمتر از ۰/۱ دارد) جهت تبدیل نتایج افت انتقال صوت و نتایج کاهش صوت به یکدیگر استفاده کردند، مقادیر روش کاهش صوت کمتر از نتایج مدل حاضر پیش‌بینی می‌شوند. به علاوه، آن‌ها در مدل تجربی خود از چهار بلندگو برای تولید امواج صوتی در اطراف پوسته مخروطی استفاده کردند و همانطور که روشن

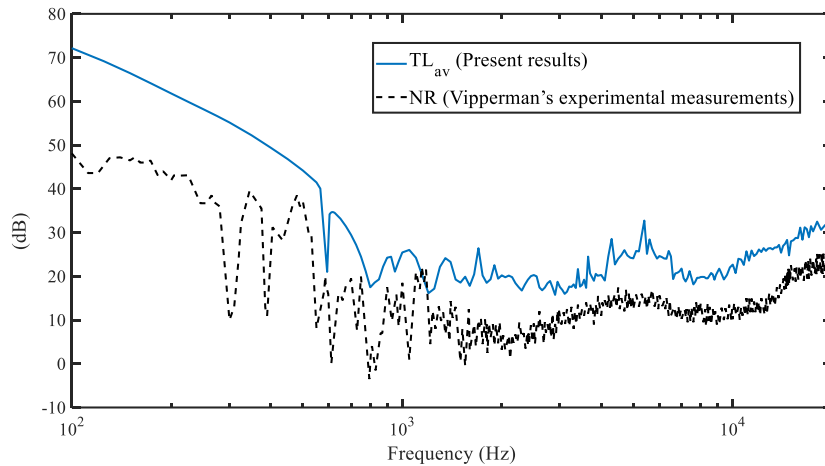


Fig. 5. Comparison of the present results with the experimental results of Viperman et al. [27]

شکل ۵: مقایسه نتایج حاضر با نتایج تجربی ویپرمن و همکاران [۲۷]

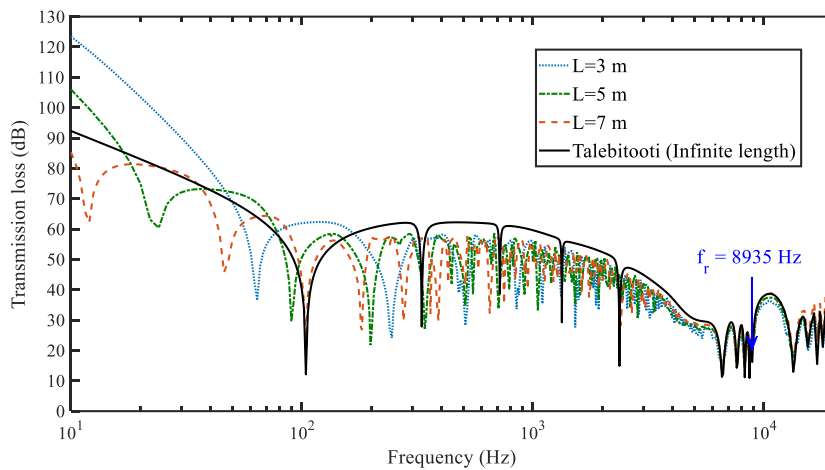


Fig. 6. Comparison of the present results with the analytical results of Talebitooti et al. [23]

شکل ۶: مقایسه نتایج حاضر با نتایج تحلیلی طالبی توتی و همکاران [۲۳]

در مطالعات خود طول پوسته را نامحدود فرض کرده است لذا اثر شرایط مرزی دو سر سازه لحاظ نشده است. از آنجایی که مدل ارائه شده در این پژوهش طول پوسته را محدود در نظر می‌گیرد، نتایج برای طول‌های ۳، ۵ و ۷ متر محاسبه شده است. همچنین شرایط مرزی از نوع ساده در دو سر پوسته فرض شده است.

شکل ۶ تطابق خوب نتایج را بخصوص در فرکانس‌های میانی و فرکانس‌های بالا و همچنین در تعیین مکان فرکانس رینگ نشان داده است. با این حال، به دلیل این که مدل طالبی توتی برای پوسته با طول نامحدود ارائه شده است، بنابراین قادر به پیش‌بینی دقیق افت انتقال صوت به خصوص در فرکانس‌های خیلی کم (کمتر از ۱۰۰ هرتز) یعنی جایی که اثر شرایط مرزی اهمیت بیشتری دارد، نیست. بنابراین وجود کمی اختلاف بین نتایج مدل حاضر با نتایج مدل نامحدود به

می‌شود مقدار اتلاف صوت در روش ویپرمن کمتر بدست آمده است و همچنین رفتار منحنی‌ها به ویژه در فرکانس‌های میانی و فرکانس‌های بالا به یکدیگر شبیه است.

از آنجایی که افت انتقال صوت در پوسته‌های مخروطی به ندرت مورد توجه محققین قرار گرفته است، در شکل ۶ نتایج مدل حاضر با نتایج تحلیلی انتقال صوت از پوسته استوانه فولادی مورد مطالعه توسط طالبی توتی و همکاران [۲۳] مقایسه می‌گردد. لازم به توضیح است از جایگذاری $\alpha = 0^\circ$ در معادله‌های حاکم بدست آمده در بخش ۲، معادله‌های حاکم بر مسئله ارتعاش-صوت برای پوسته‌های استوانه‌ای بدست می‌آید. خواص پوسته فولادی عبارتند از: چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول یانگ ۲۱۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳، شعاع ۰/۱ متر و ضخامت جداره ۱ میلی‌متر. طالبی توتی

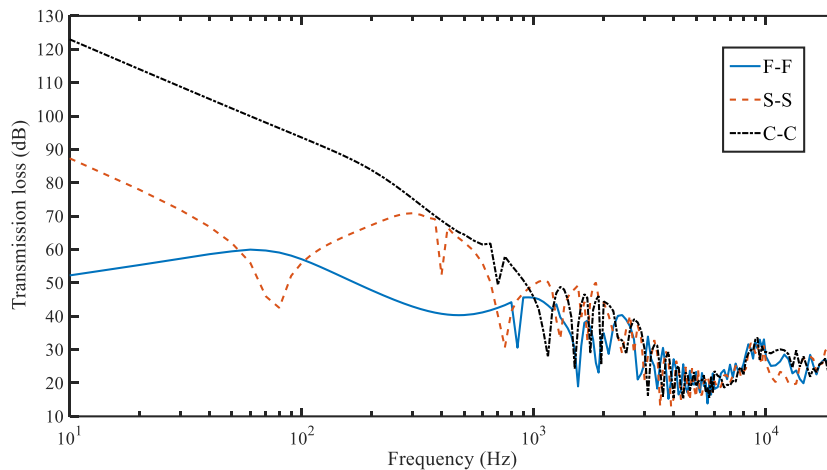


Fig. 7. Effect of the boundary conditions on the characteristics of sound transmission through truncated conical shell

شکل ۷: اثر شرایط مرزی بر ویژگی‌های انتقال صوت در پوسته مخروطی ناقص

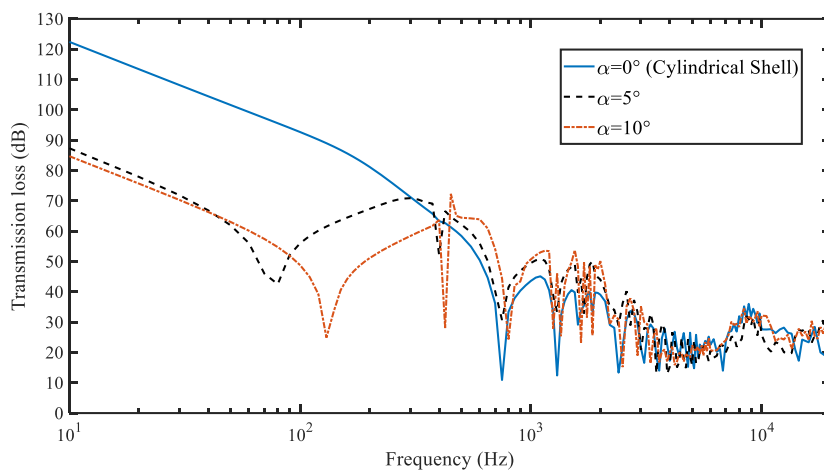


Fig. 8. Effect of the cone vertex angle on the characteristics of sound transmission through truncated conical shell

شکل ۸: اثر زاویه رأس مخروط بر ویژگی‌های انتقال صوت در پوسته مخروطی ناقص

۳-۲- اثر شرایط مرزی در دو سر پوسته مخروطی

در شکل ۷، مقادیر افت انتقال صوت برای شرایط مرزی مختلف در دو انتهای پوسته مخروطی با یکدیگر مقایسه شده است. سه نوع شرط مرزی کاملاً آزاد (F-F)، دو سر ساده (S-S) و دو سر گیردار (C-C) در نظر گرفته می‌شود. مشاهده می‌شود که اثر شرایط مرزی از طریق تغییر سختی پوسته در ناحیه فرکانس پایین (کمتر از ۱۰۰۰ هرتز) قابل ملاحظه است. بطوریکه بیشترین و کمترین دامنه افت انتقال به ترتیب برای شرط مرزی دو سر گیردار و شرط مرزی کاملاً آزاد بدست آمده است. با این حال ملاحظه می‌شود در محدوده فرکانس‌های میانی (از فرکانس ۱۰۰۰ هرتز تا ۵۰۰۰ هرتز) و فرکانس‌های بالا

خصوص در فرکانس‌های پایین امری بدیهی است. همچنین ملاحظه می‌شود با افزایش طول پوسته و کاهش اثرات مرزی نتایج مدل حاضر به نتایج پوسته با طول نامحدود نزدیک می‌شود. علاوه بر این، به این دلیل که مدل کنونی چگالی مودال بیشتری در فرکانس‌های میانی دارد، بنابراین در منحنی افت انتقال، رزونانس‌های متناظر با فرکانس‌های طبیعی پوسته در طیف فرکانسی بیشتری نسبت به مدل طالبی توتی اتفاق می‌افتد، که این مهم باعث کاهش دامنه افت انتقال در این فرکانس‌ها می‌شود. لازم به توضیح است که مشابه نتایج فوق راژین و همکاران [۶ و ۷] در مقایسه نتایج پانل با ابعاد محدود و پانل با ابعاد نامحدود مشاهده کرده‌اند.

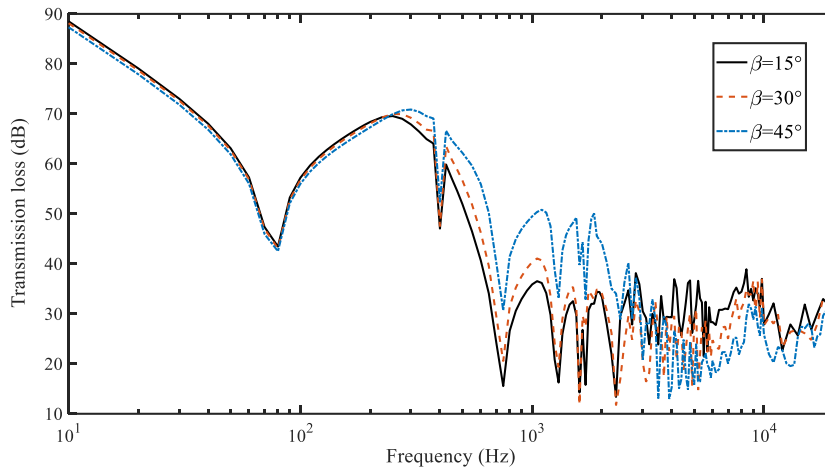


Fig. 9. Effect of the incident sound wave angle on the characteristics of sound transmission through truncated conical shell

شکل ۹: اثر زاویه موج صوتی برخوردی بر ویژگی‌های انتقال صوت در پوسته مخروطی ناقص

تحت تاثیر سختی آن است، بنابراین کاهش سختی پوسته مخروطی با افزایش زاویه رأس می‌تواند دلیل اصلی کاهش افت انتقال صوت در فرکانس‌های پایین باشد. همچنین مشاهده می‌شود اولین رزونانس در منحنی افت انتقال صوت به فرکانس‌های کمتر منتقل می‌شود.

۴-۳- اثر زاویه موج صوتی برخوردی

شکل ۹ اثر زاویه موج صوتی برخوردی را بر رفتار انتقال صوت سازه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد در فرکانس‌های زیر ۲۵۰ هرتز و فرکانس‌های بالای ۲۸۰۰ هرتز با کاهش زاویه برخورد دامنه افت انتقال به مقدار کمی افزایش داشته است. ولی در بین فرکانس‌های ۲۵۰ هرتز تا ۲۸۰۰ هرتز افت انتقال کاهش زیادی داشته است. علاوه بر این، همانطور که انتظار می‌رفت رزونانس‌های متناظر با فرکانس‌های طبیعی پوسته با تغییر زاویه برخورد تغییر نکرده‌اند.

۵-۳- اثر جنس پوسته مخروطی

اثر جنس پوسته مخروطی ناقص بر نتایج انتقال صوت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به این منظور سه نوع جنس آلومینیوم (با مدول یانگ ۶۹ گیگاپاسکال، چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون ۰/۳۳)، فولاد و برنج (با مدول یانگ ۱۰۴ گیگاپاسکال، چگالی ۸۵۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون ۰/۳۷) در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد به‌طور کلی در فرکانس‌های پایین و فرکانس‌های میانی کمترین توان صوتی به پوسته فولادی منتقل شده است اما در فرکانس‌های بالا پوسته برنجی کمترین

(از فرکانس ۵۰۰۰ هرتز تا ۲۰۰۰۰ هرتز) با کاهش اثرات مرزی، از اختلاف بین نتایج کاسته می‌شود و منحنی‌ها رفتار مشابهی از خود نمایش می‌دهند.

در بررسی رفتار انتقال صوت سازه‌ها توجه به رزونانس‌های منحنی افت انتقال از اهمیت بسزایی برخوردار است. چرا که در این رزونانس‌ها (که عموماً به دلیل رزونانس‌های پوسته و یا رزونانس‌های صوتی محفظه داخلی پوسته اتفاق می‌افتند) توان صدای منتقل شده به داخل سیستم به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. در شکل ۷ مشاهده می‌شود به دلیل تاثیر شرایط مرزی پوسته مخروطی بر محل فرکانس‌های طبیعی آن، تعدادی از رزونانس‌های منحنی افت انتقال با تغییر شرایط مرزی تغییر می‌کنند.

۳-۳- اثر زاویه رأس مخروط

افت انتقال صوت در پوسته مخروطی برای زوایای $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که $\alpha = 0^\circ$ متناظر با پوسته استوانه‌ای با شعاع ۰/۱۲۲ متر بوده که برابر شعاع متوسط مخروط با خواص هندسی داده شده در جدول ۱ است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه رأس مخروط، دامنه افت انتقال تا فرکانس حدود ۴۰۰ هرتز کاهش می‌یابد ولی در فرکانس‌های بالاتر افزایش جزئی داشته است که ممکن است از دلایل اصلی آن افزایش جرم سازه و در نتیجه میرایی آن باشد. همچنین کاهش افت انتقال در فرکانس‌های پایین در مقایسه بین پوسته استوانه‌ای و پوسته مخروطی قابل توجه است. از آنجایی که در فرکانس‌های پایین رفتار صوتی سازه

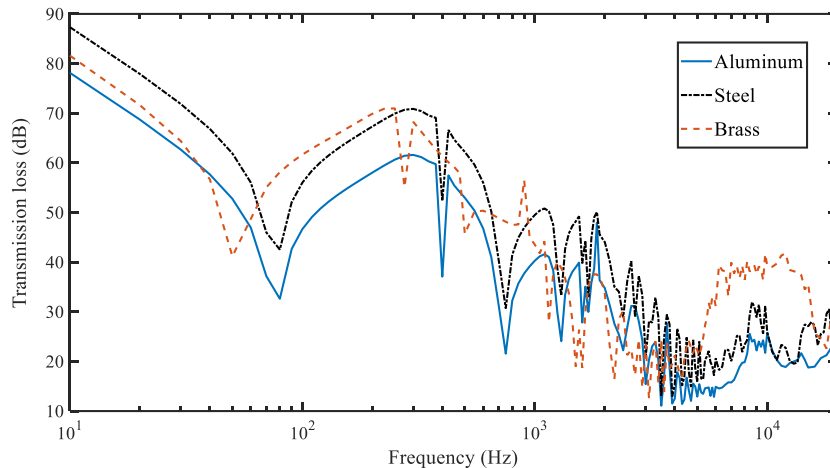


Fig. 10. Effect of the material of truncated conical shell on the characteristics of sound transmission through it

شکل ۱۰: اثر جنس پوسته مخروطی بر ویژگی‌های انتقال صوت در آن

اثر اضافه کردن لایه متخلخل به جداره پوسته مخروطی ناقص در شکل ۱۲ بررسی شده است. ملاحظه می‌گردد در فرکانس‌های کمتر از ۲۵۰ هرتز اثر مواد متخلخل بر انتقال صوت از سازه بسیار ناچیز است که می‌تواند به دلیل ثابت ماندن سختی کل سازه بدلیل سختی اندک ماده متخلخل باشد. اما در فرکانس‌های بالاتر استفاده از لایه متخلخل به عنوان جاذب صوت عملکرد بسیار مطلوبی را نشان داده است. همچنین مشاهده می‌شود استفاده از شکاف هوا در ساختار پوسته مخروطی با لایه متخلخل در کل مطلوب‌ترین عملکرد را در عایق‌بندی صدا از پوسته مخروطی در تمام طیف فرکانسی فراهم می‌آورد. با این حال، زمانی که لایه متخلخل به صورت مستقیم به جداره پوسته متصل شده است، رزونانس‌های منحنی افت انتقال صوت به صورت قابل توجهی کاهش داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش تحلیلی جهت محاسبه افت انتقال صوت پوسته‌های مخروطی ناقص که تحت تحریک موج صوتی صفحه‌ای قرار می‌گیرند، معرفی شد. معادله‌های دینامیکی پوسته مخروطی همسانگرد و جدارنازک با استفاده از تئوری لایه پیاده‌سازی شد و با استفاده از یک روش حل همگرا بر پایه سری‌های توانی، مولفه‌های جابجایی پوسته به صورت دقیق محاسبه گردیدند. از مدل سیال معادل لی بر پایه تئوری بایو به منظور مدل‌سازی انتشار موج در ماده متخلخل بهره گرفته شد. ابتدا نتایج مدل حاضر با نتایج مطالعات قبلی اعتبارسنجی شدند، سپس اثر چندین پارامتر مهم همچون

توان صوتی را به داخل انتقال داده است. از دلایل عمده این مهم می‌توان به سختی زیاد فولاد و جرم زیاد برنج اشاره کرد. با این حال در بحث عایق‌بندی صدا آلومینیوم بدترین عملکرد را داشته است. بنابراین بدون توجه به سایر محدودیت‌های طراحی مانند وزن، هزینه و ساخت، از فولاد و برنج برای کاهش انتقال صوت در بازه فرکانسی هدف می‌توان بهره برد.

۳-۶- اثر لایه متخلخل

شکل‌های ۱۱- الف و ۱۱- ب نسبت انرژی کرنش امواج فریم و برشی به موج هوا برد را در دو فاز جامد و سیال براساس روش لی [۳۲] به ترتیب برای ساختارهای نمایش داده شده در شکل‌های ۳- الف و ۳- ب نشان می‌دهد. لایه متخلخل از جنس پلی‌اورتان با حفره‌های پر شده از هوای محیط بوده که خواص آن در جدول ۲ ارائه شده است. در ساختار B ضخامت لایه متخلخل ۴۰ میلی‌متر است، اما در ساختار U ضخامت آن ۳۰ میلی‌متر و ضخامت شکاف هوا ۱۰ میلی‌متر لحاظ شده است. در شکل ۱۱- الف مشاهده می‌شود انرژی کرنش امواج هوا برد در مقایسه با امواج فریم بسیار ناچیز است. این در حالی است که در شکل ۱۱- ب این امواج فریم هستند که انرژی کرنش ناچیزی در مقایسه با امواج هوا برد دارند. بنابراین براساس روش لی در موردی که لایه متخلخل به جداره پوسته متصل شده است امواج فریم به عنوان امواج غالب شناخته می‌شوند و در موردی که لایه متخلخل با شکاف هوا از جداره پوسته جدا می‌شود امواج هوا برد بر رفتار صوتی لایه پلی‌اورتان غالب می‌باشند. در ادامه با استفاده از نتایج شکل ۱۱،

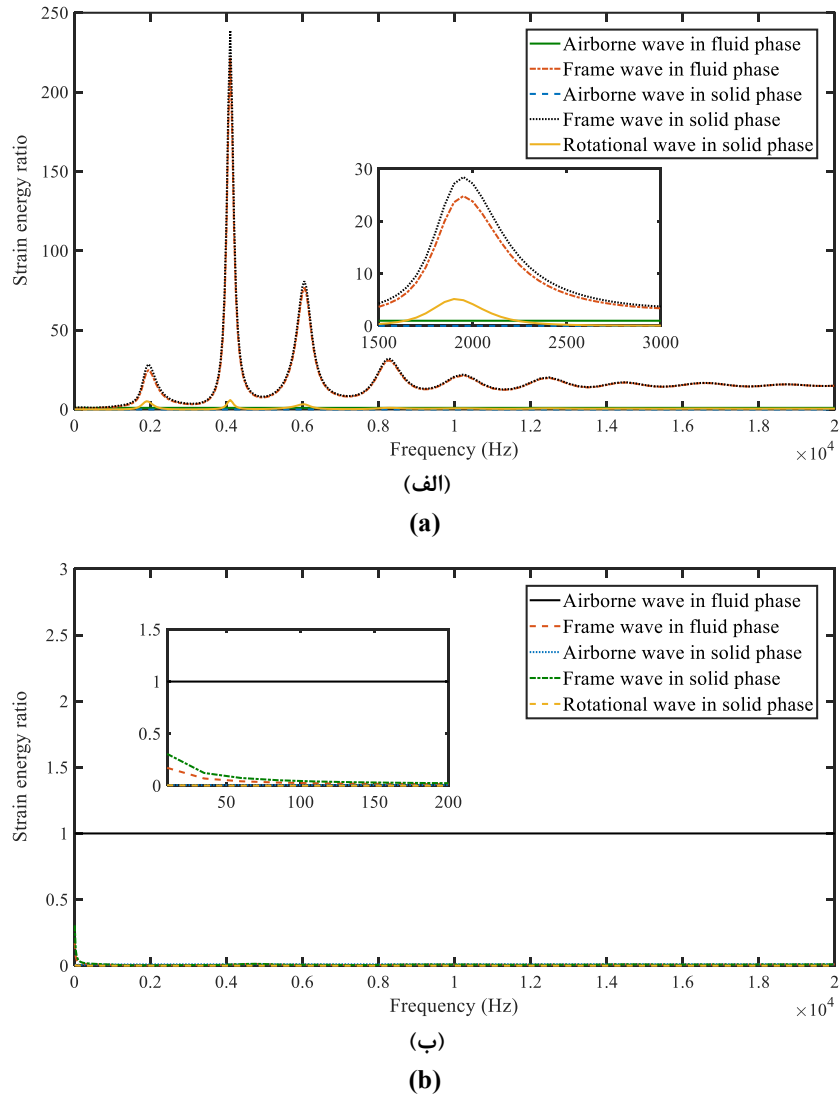


Fig. 11. Ratios of the strain energy of the frame wave and shear wave to the airborne wave in the porous medium: a) The porous layer is directly attached to the shell; b) The porous layer is separated from the shell by an air gap

شکل ۱۱: نسبت‌های انرژی کرنش موج فریم و موج برشی به موج هوآبرد در محیط متخلخل: الف) لایه متخلخل مستقیم به پوسته متصل گردیده است؛ ب) لایه متخلخل با یک شکاف هوا از پوسته جدا شده است

جدول ۲: خصوصیات لایه متخلخل (پلی‌اورتان)

Table 2. Properties of the porous layer (Polyurethane)

مقدار	توضیحات	علائم
۳۰	چگالی فاز جامد (کیلوگرم بر متر مکعب)	ρ_p
۸×10^5	مدول یانگ (پاسکال)	E_p
۰/۴	نسبت پواسون	ν
۲۵۰۰۰	مقاومت جریانی (پاسکال-ثانیه بر متر مربع)	σ
۰/۲۶۵	ضریب اتلاف	η
۰/۹	تخلخل	H
۷/۸	ضریب هندسی	ε'

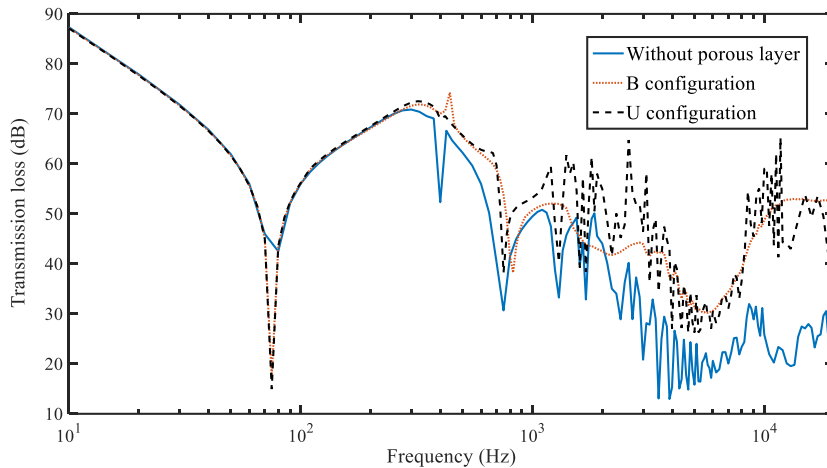


Fig.12 . Effect of the porous materials on the characteristics of sound transmission through truncated conical shell

شکل ۱۲: اثر مواد متخلخل بر ویژگی‌های انتقال صوت در پوسته مخروطی ناقص

وسیع‌تری از فرکانس‌ها (به استثناء فرکانس‌های خیلی کم که تغییرات ناچیز بود) بسیار موثر است. با بررسی دو پیکربندی مختلف نشان داده شد اضافه کردن شکاف هوا در ساختار سازه مطلوب‌ترین حالت جهت افزایش توانایی عایق‌بندی سیستم است. اگرچه در موردی که لایه متخلخل به جداره پوسته به صورت مستقیم متصل می‌شود، بیشتر رزونانس‌های منحنی افت انتقال حذف می‌گردد.

پژوهش حاضر می‌تواند در طراحی صوتی پوسته‌های مخروطی مفید و موثر واقع شود.

پیوست الف: عملگرهای دیفرانسیلی براساس تئوری پوسته لاو

$$L_1\{u, v, w\} = C \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{C(1-\mu)}{2R^2(x)} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{C \sin \alpha}{R(x)} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{C \sin^2 \alpha}{R^2(x)} u + \frac{C(1+\mu)}{2R(x)} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + \frac{C \sin \alpha (\mu - 3)}{2R^2(x)} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{C \mu \cos \alpha}{R(x)} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{C \sin \alpha \cos \alpha}{R^2(x)} w \quad (الف.۱)$$

$$L_2\{u, v, w\} = \left[\frac{C(1+\mu)}{2R(x)} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \left[\frac{C \sin \alpha (3-\mu)}{2R^2(x)} \right] \frac{\partial u}{\partial \theta} + \left[\frac{C(1-\mu)}{2} + \frac{D \cos^2 \alpha (1-\mu)}{2R^2(x)} \right] \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} +$$

شرایط مرزی انتهای پوسته، زاویه رأس مخروط، زاویه موج صوتی برخوردی، جنس پوسته و همچنین اثر اضافه کردن لایه متخلخل به ساختار سازه بر ویژگی‌های انتقال صوت پوسته‌های مخروطی بررسی گردید که نتایج آن به صورت خلاصه در زیر بیان می‌شود:

۱- مشاهده شد که اثر شرایط مرزی انتهای سازه بر رفتار صوتی آن در فرکانس‌های پایین قابل توجه است. به طوری که بیشترین کمترین افت انتقال صوت به ترتیب برای شرط مرزی دو سر گیردار و شرط مرزی دو سر آزاد حاصل می‌شود. با این حال با افزایش فرکانس اثر شرایط مرزی کاهش می‌یابد و رفتارهای صوتی سازه با شرایط مرزی گوناگون به یکدیگر شبیه است. همچنین رزونانس‌های منحنی افت انتقال به نوع شرایط مرزی بستگی دارد.

۲- با افزایش زاویه رأس مخروط مقادیر افت انتقال صوت در فرکانس‌های پایین کاهش و در فرکانس‌های میانی و فرکانس‌های بالا افزایش می‌یابد.

۳- با کاهش زاویه برخورد موج صوتی، مقدار صوت انتقال یافته به داخل پوسته در فرکانس‌های میانی افزایش دارد ولی در محدوده‌های فرکانسی پایین و بالا کاهش می‌یابد. همچنین عموماً محل رزونانس‌های منحنی افت انتقال تغییر نمی‌کند.

۴- از بررسی اثر جنس پوسته مخروطی مشخص شد پوسته فولادی بیشترین مقدار افت انتقال صوت را در محدوده‌های فرکانسی پایین و میانی دارد و پوسته ساخته شده از برنج در فرکانس‌های بالا بیشترین مقدار افت انتقال را نمایش می‌دهد.

۵- مشاهده شد که اضافه کردن لایه متخلخل به جداره پوسته مخروطی ناقص در کاهش توان صوتی منتقل شده به داخل در طیف

$$C_i = \begin{bmatrix} u_{1,i}(x) & \cdots & u_{8,i}(x) \\ v_{1,i}(x) & \cdots & v_{8,i}(x) \\ w_{1,i}(x) & \cdots & w_{8,i}(x) \\ \frac{\partial w_{1,i}}{\partial x}(x) & \cdots & \frac{\partial w_{8,i}}{\partial x}(x) \\ N_{xx,1,i}(x) & \cdots & N_{xx,8,i}(x) \\ N_{x\theta,1,i}(x) & \cdots & N_{x\theta,8,i}(x) \\ M_{xx,1,i}(x) & \cdots & M_{xx,8,i}(x) \\ V_{xz,1,i}(x) & \cdots & V_{xz,8,i}(x) \end{bmatrix}_{8 \times 8}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (۲.ب)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} v_{0,i}(x) \\ w_{0,i}(x) \\ N_{xx,0,i}(x) \\ M_{xx,0,i}(x) \end{bmatrix}_{4 \times 1}, \quad i=1,N$$

$$c_i = \begin{bmatrix} u_{0,i}(x) \\ v_{0,i}(x) \\ w_{0,i}(x) \\ \frac{\partial w_{0,i}}{\partial x}(x) \\ N_{xx,0,i}(x) \\ N_{x\theta,0,i}(x) \\ M_{xx,0,i}(x) \\ V_{xz,0,i}(x) \end{bmatrix}_{8 \times 1}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (۳.ب)$$

منابع

- [1] L.L. Beranek, G.A. Work, Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets, Journal of the Acoustical Society of America, 21 (1949) 419-428.
- [2] L.R. Koval, Effect of airflow, panel curvature, and internal pressurization on field-incidence transmission loss, Journal of the Acoustical Society of America, 59 (1976) 1379-1385.
- [3] J.S. Bolton, N.M. Shiau, Y.J. Kang, Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials, Journal of Sound and Vibration, 191 (1996) 317-347.
- [4] T.W. Wu, A. Dandapani, A boundary element solution for sound transmission through thin plates, Journal of Sound and Vibration, 171 (1994) 145-157.
- [5] B. Liu, L. Feng, A. Nilsson, Influence of overpressure on

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C}{R^2(x)} + \frac{D \cos^2 \alpha}{R^4(x)} \right] \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \\ & \left[\frac{C \sin \alpha (1-\mu)}{2R(x)} - \frac{D \cos^2 \alpha \sin \alpha (1-\mu)}{2R^3(x)} \right] \frac{\partial v}{\partial x} - \\ & \left[\frac{C \sin^2 \alpha (1-\mu)}{2R^2(x)} \right] v - \\ & \frac{D \cos \alpha}{R^4(x)} \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} - \frac{D \cos \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial \theta} - \\ & \frac{D \cos \alpha \sin \alpha}{R^3(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta} + \frac{C \cos \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial w}{\partial \theta} \\ \\ & L_3 \{u, v, w\} = -\frac{\mu C \cos \alpha}{R(x)} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{C \cos \alpha \sin \alpha}{R^2(x)} u - \\ & D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{2D \sin \alpha}{R(x)} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{D \sin^2 \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \\ & \frac{D \sin^3 \alpha}{R^3(x)} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{D}{R^4(x)} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} - \\ & \frac{4D \sin^2 \alpha}{R^4(x)} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \left(\frac{4D \sin^2 \alpha \cos \alpha}{R^4(x)} - \frac{C \cos \alpha}{R^2(x)} \right) \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{2D}{R^2(x)} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial \theta^2} - \frac{C \cos^2 \alpha}{R^2(x)} w + \\ & \frac{2D \sin \alpha}{R^3(x)} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial \theta^2} + \frac{D \cos \alpha}{R^4(x)} \frac{\partial^3 v}{\partial \theta^3} - \\ & \frac{3D \sin \alpha \cos \alpha}{R^3(x)} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + \frac{D \cos \alpha}{R^2(x)} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial \theta} \end{aligned} \quad (۳.الف)$$

پیوست ب: مولفه‌های معادله ماتریسی

$$B_i = \begin{bmatrix} v_{1,i}(x) & \cdots & v_{8,i}(x) \\ w_{1,i}(x) & \cdots & w_{8,i}(x) \\ N_{xx,1,i}(x) & \cdots & N_{xx,8,i}(x) \\ M_{xx,1,i}(x) & \cdots & M_{xx,8,i}(x) \end{bmatrix}_{4 \times 8}, \quad i=1,N \quad (۱.ب)$$

- 3-D orthotropic multilayered infinite cylindrical shell. Part I: Formulation of the problem, *Journal of Sound and Vibration*, 171 (1994) 651-664.
- [18] A. Blaise, C. Lesueur, Acoustic transmission through a 3-D orthotropic multilayered infinite cylindrical shell. Part II: Validation and numerical exploitation for large structures, *Journal of Sound and Vibration*, 171 (1994) 665-680.
- [19] J.H. Lee, J. Kim, Analysis and measurement of sound transmission through a double-walled cylindrical shell, *Journal of Sound and Vibration*, 251 (2002) 631-649.
- [20] J.H. Lee, J. Kim, Study on sound transmission characteristics of a cylindrical shell using analytical and experimental models, *Applied Acoustics*, 64 (6) (2003) 611-632.
- [21] H. Denli, J.Q. Sun, Structural-acoustic optimization of sandwich cylindrical shells for minimum interior sound transmission, *Journal of Sound and Vibration*, 316 (2008) 32-49.
- [22] J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang, The effect of external mean flow on sound transmission through double-walled cylindrical shells lined with poroelastic material, *Journal of Sound and Vibration*, 333 (2014) 1972-1990.
- [23] R. Talebitooti, K. Daneshjou, M. Kornokar, Three dimensional sound transmission through poroelastic cylindrical shells in the presence of subsonic flow, *Journal of Sound and Vibration*, 363 (2016) 380-406.
- [24] P. Oliazadeh, A. Farshidianfar, Analysis of different techniques to improve sound transmission loss in cylindrical shells, *Journal of Sound and Vibration*, 389 (2017) 276-291.
- [25] P. Oliazadeh, A. Farshidianfar, M.J. Crocker, Experimental and analytical investigation on sound transmission loss of cylindrical shells with absorbing material, *Journal of Sound and Vibration*, 434 (2018) 28-43.
- [26] M. Golzari, A.A. Jafari, Sound transmission loss through triple-walled cylindrical shells with porous layers, *Journal of the Acoustical Society of America*, 143 (2018) 3529-3544.
- [27] J.S. Viperman, D. Li, I. Avdeev, S.A. Lane, Investigation of the sound transmission into an advanced grid-stiffened sound transmission through curved panels, *Journal of Sound and Vibration*, 302 (2007) 760-776.
- [6] F.X. Xin, T.J. Lu, C.Q. Chen, Vibroacoustic behavior of clamp mounted double-panel partition with enclosure air cavity, *Journal of the Acoustical Society of America*, 124 (2008) 3604-3612.
- [7] F.X. Xin, T.J. Lu, Analytical and experimental investigation on transmission loss of clamped double panels: Implication of boundary effects, *Journal of the Acoustical Society of America*, 125 (2009) 1506-1517.
- [8] Y. Liu, A. Sebastian, Effects of external and gap mean flows on sound transmission through a double-wall sandwich panel, *Journal of Sound and Vibration*, 344 (2015) -399 415.
- [9] A.A. Mana, V.R. Sonti, Sound transmission through a finite perforated panel set in a rigid baffle: A fully coupled analysis, *Journal of Sound and Vibration*, 414 (2018) -126 156.
- [10] J.P.W. Smith, Sound transmission through thin cylindrical shells, *Journal of the Acoustical Society of America*, 29 (1957) 721-729.
- [11] L.R. Koval, On sound transmission into a thin cylindrical shell under "flight Conditions", *Journal of Sound and Vibration*, 48 (1976) 265-275.
- [12] L.R. Koval, Effects of cavity resonance on sound transmission into a thin cylindrical shell, *Journal of Sound and Vibration*, 59 (1978) 23-33.
- [13] L.R. Koval, On sound transmission into a stiffened cylindrical shell with rings and stringers treated as discrete elements, *Journal of Sound and Vibration*, 71 (1980) -511 521.
- [14] L.R. Koval, On sound transmission into an orthotropic shell, *Journal of Sound and Vibration*, 63 (1979) 51-59.
- [15] L.R. Koval, Sound transmission into a laminated composite cylindrical shell, *Journal of Sound and Vibration*, 71 (1980) 523-530.
- [16] A. Blaise, C. Lesueur, Acoustic transmission through a 2-D orthotropic multilayered infinite cylindrical shell, *Journal of Sound and Vibration*, 155 (1992) 95-109.
- [17] A. Blaise, C. Lesueur, Acoustic transmission through a

- solve sound transmission through structures lined with elastic porous material, *Journal of the Acoustical Society of America*, 110 (5) (2001) 2282-2294.
- [33] Y. Liu, and C. He, Diffuse field sound transmission through sandwich composite cylindrical shells with poroelastic core and external mean flow, *Composite Structures* 135 (2016) 383-396.
- [34] Y. Liu, Sound transmission through triple-panel structures lined with poroelastic materials, *Journal of Sound and Vibration*, 339 (2015) 376-395.
- [35] L.L. Beranek, *Acoustics*, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [36] E. Szechenyi, Sound transmission through cylinder walls using statistical considerations, *Journal of Sound and Vibration*, 19 (1971) 83-94.
- structure, *Journal of vibration and Acoustics*, 125 (2003) 257-266.
- [28] S.S. Rao, *Vibration of Continuous Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- [29] W. Leissa, *Vibration of Shells*, NASA, Washington, D.C., 1973.
- [30] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, fourth ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [31] M.A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-frequency range. II. Higher frequency range, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2(28) (1956) 168-191.
- [32] J. H. Lee, J. Kim, and H. J. Kim, Simplified method to

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. A. Jafari, M. Golzari, *Sound Transmission Loss of Truncated Conical Shells with Porous Materials*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(2) (2021) 923-942.

DOI: [10.22060/mej.2019.16179.6301](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16179.6301)



