

بررسی اثرات شرایط مرزی مختلف بر رفتار آکوستیکی صفحات ساندویچی دو جداره با لایه متخلخل میانی

محمدحسن شجاعی فرد^۱، روح... طالبی^{۲*}، رضا احمدی^۳، مائده امیرپور ملا^۴

* نویسنده مسئول: rtalebi@iust.ac.ir

واژه‌های کلیدی

صفحات دوجداره، لایه متخلخل، افت انتقال صوت، تحلیل انرژی آماری، شرایط مرزی.

چکیده

در این مقاله تحلیل رفتار آکوستیکی صفحات ساندویچی دوجداره با لایه متخلخل میانی به منظور بررسی اثرات استفاده از شرایط مرزی مختلف بر روی لایه متخلخل و نیز شناسایی پارامترهای مؤثر بر روی افت انتقال صوت این سازه‌ها و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف به روش تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا بر اساس تئوری بایوت و با در نظر گرفتن اتصال لزجت و اینرسی در نوشتن معادلات دینامیک انتقال تنش و نیز اتصال گرمایی و الاستیک در نوشتن معادلات تنش-کرنش مواد متخلخل، معادلات حاکم بر انتشار موج به دست می‌آیند. سپس با اعمال شرایط مرزی مختلف و با استفاده از حل همزمان این معادلات و با نوشتن کد مربوطه در MATLAB، ضریب افت انتقال صوت (TL) سازه به روش تحلیلی محاسبه می‌شود. نتایج حل تحلیلی با نتایج حل تحلیل انرژی آماری (SEA) و داده‌های آزمایشگاهی موجود در این زمینه مقایسه شده و پس از اطمینان از صحت آنها، به شناسایی و بررسی سایر پارامترهای مؤثر بر روی افت انتقال صوت این سازه‌ها و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند نحوه اتصال لایه متخلخل به صفحه دوجداره و نوع شرایط مرزی آن نقش مهمی در چگونگی افت انتقال صوت و پارامترهای مؤثر بر آن خواهند داشت.

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از مواد متخلخل^۱ بعنوان عایق‌های صوتی در صنایع مختلف مانند هوافضا، خودروسازی و ... نقش بسیار مهمی در کاهش صدای محیط ایفا می‌کنند. این مواد که از دو فاز جامد (فریم) و سیال تشکیل شده‌اند، انرژی آکوستیکی را در اثر واکنش دو فاز جامد و سیال و از راه‌های گرمایی (جریان بازگشت ناپذیر گرما از سیال به فریم)، ویسکوزیته برشی سیال در نزدیکی سطح فریم و ویسکوزیته سازه‌ای (تغییر شکل لایه‌های تشکیل دهنده فریم) دفع می‌کنند. از طرفی در سالهای اخیر از صفحه‌ها^۲ و پوسته‌های چند لایه در ساخت ورقه‌های بدنه خودرو و هواپیما استفاده می‌شود به طوری که در آنها مواد متخلخل به جای هوای فاصل بین دو لایه بکار برده می‌شوند، لذا مسئله تحلیل انتقال صوت چنین سازه‌هایی همواره مورد توجه مهندسان بوده است [۱-۲].

اولین کار ارائه شده در مورد مدلسازی آکوستیکی مواد متخلخل توسط ریلی انجام شده است [۳]. در این مدل، فاز جامد ماده بدون حرکت فرض شده بود. زیکر و کاستن نیز سهم مهمی در ارتقای تئوری مواد متخلخل داشته‌اند [۴]. مدل ارائه شده توسط بایوت^۳، انتشار موج برشی مربوط به فاز جامد را نیز در بر می‌گرفت [۵ و ۶]. آتالا بر پایه معادلات اصلاح شده بایوت، روابط اجزا محدود برای تحلیل آکوستیکی مواد متخلخل را بازنویسی کرد [۷]. اسگارد و همکارانش نیز بر مبنای این روابط به محاسبه ضریب عبور یک مانع صوت چند لایه و بررسی تأثیر جنس و ضخامت لایه متخلخل بین دو لایه دیگر پرداختند [۸]. بولتون و همکارانش حالتی بین مدل صلب^۴ و الاستیک^۵ را در نظر گرفته و آن را مدل لیمپ^۶ نامیدند و ضمن بازنویسی معادلات برای مدل جدید، نحوه استفاده آن به همراه روش

ماتریس انتقال را شرح دادند. وی همچنین روشی تحلیلی بر اساس تئوری بایوت ارائه داد که در آن مواد پوروالاستیک به صورت یک ماده همگن فرض شده‌اند. این تئوری اجازه می‌داد تا هر سه نوع موج (دو موج طولی و یک موج برشی) در ماده پوروالاستیک انتشار یابند [۹-۱۱].

در مورد تحقیقاتی که اخیراً بر روی عملکرد صوتی پنل‌های تک و چند جداره به روش‌های مختلف آزمایشگاهی، تحلیلی و اجزای محدود صورت پذیرفته است می‌توان به مقالات زیر اشاره نمود. تادئو و همکارانش شاخص کاهش صوت را برای پنل‌های تک و دوجداره فولادی، بتنی و شیشه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. تائو و همکارانش نحوه بهینه‌سازی پنل‌های دوجداره با لایه متخلخل را به روش الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. گوس و همکارانش نتایج آزمایشگاهی اثرات پارامترهای ساختاری مؤثر بر افت انتقال صوت مواد متخلخل و میزان تأثیر آنها را ارائه نمودند [۱۴]. ژین و همکارانش افت انتقال صوت سازه‌های دوجداره تقویت شده را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. دانشجو و همکارانش نیز افت انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی را مورد بررسی قرار دادند [۱۶].

تاکنون کارهای متعددی با فرضیات ساده کننده متنوعی در مورد انتشار امواج در مواد متخلخل و مدل کردن آنها صورت گرفته است (از جمله مدل فریم لیمپ، مدل فریم صلب و ...). کامل‌ترین آنها مدل فریم الاستیک است که بر اساس تئوری بایوت است [۱۰-۱۱] و [۱۷-۱۹]. بر اساس این تئوری، سه نوع موج (دو موج طولی و یک موج برشی) در ماده متخلخل انتشار می‌یابد. موج برشی و یکی از موج‌های طولی، که به فاز فریم در ماده متخلخل نسبت داده می‌شود، امواج فریم و موج طولی دیگر که به فاز سیال ارجاع داده می‌شود، موج فشاری آکوستیکی (هوا برد) نامیده می‌شوند. میزان تحریک هر یک از این سه موج به شرایط مرزی در سطح ماده متخلخل بستگی دارد. به همین دلیل تغییرات به ظاهر کوچک در شرایط مرزی نقش عمده‌ای در

1- Elastic Porous Material (Poroelastic)

2- Panel

3- Biot

4- Rigid Model (Equivalent Fluid Model)

5- Elastic Model (Poroelastic Model)

6- Limp Model

همانطور که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود لایه متخلخل بین دو صفحه کاملاً مقید شده است (حالت B-B) اما در شکل (۲) یک فاصله هوایی بین لایه متخلخل و یکی از صفحه‌ها وجود دارد (حالت B-U). مشخصات فیزیکی لایه متخلخل مورد استفاده بین دو صفحه آلومینیومی در جدول (۱) و خواص ماده آلومینیوم در جدول (۲) آورده شده‌اند. هدف اصلی، محاسبه ضریب افت انتقال صوت (TL) این سازه‌ها به روش تحلیلی و بررسی پارامترهای فیزیکی مؤثر بر روی افت انتقال صوت آنها با شرایط مرزی مختلف است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی لایه متخلخل [۱۰] و [۱۹].

متغیرها	پلی یورتان
ضخامت (m)	۰/۰۲۷
تخلخل	۰/۹
مقاومت جریان ($Nm^{-۲}s$)	۲۵×۱۰^{-۳}
ضریب سازه	۷/۸
طول مشخصه ویسکوز (m)	$۲/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$
طول مشخصه حرارتی (m)	$۲/۲۶ \times ۱۰^{-۴}$
چگالی ($kg/m^۳$)	۳۰
مدول یانگ (Pa)	۸×۱۰^۵
ضریب پواسن	۰/۴
میرایی سازه	۰/۲۶۵

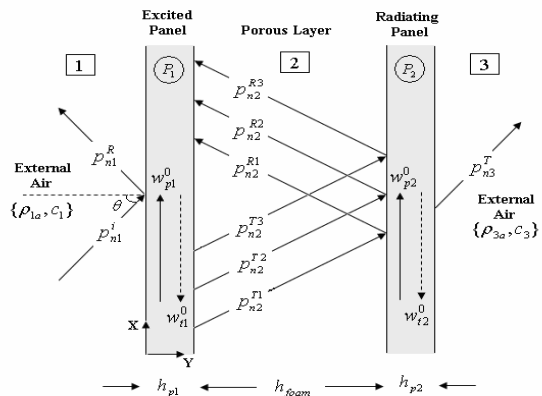
جدول (۲) مشخصات ماده آلومینیوم [۱۰] و [۱۹]

متغیرها	آلومینیوم
چگالی ($kg/m^۳$)	۲۷۰۰
مدول یانگ (Pa)	$۷/۱ \times ۱۰^۱۰$
ضریب پواسن	۰/۳۳

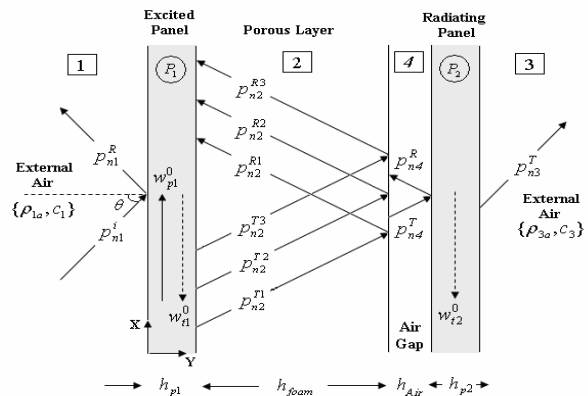
تعیین رفتار آکوستیکی آنها دارد [۱۰-۱۱]. هدف از این پژوهش، بررسی اثرات شرایط مرزی مختلف بر روی افت انتقال صوت یک صفحه ساندویچی دوجداره آلومینیومی با یک لایه متخلخل میانی به روش تحلیلی و SEA و همچنین شناسایی پارامترهای مؤثر بر آن و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی متفاوت می‌باشد.

۲- تشریح مسئله

شکل‌های (۱) و (۲) نمای مسئله مورد مطالعه تحت شرایط مرزی متفاوت را به همراه نحوه انتشار امواج در آنها نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها یک موج صفحه‌ای با زاویه θ به یک دیواره (صفحه) آلومینیومی دوجداره با ضخامت‌های h_{p1} و h_{p2} که به ترتیب برابر $۱/۲۷$ و $۰/۷۶۲$ میلی‌متر و با ابعاد عرضی نامحدود هستند، برخورد می‌کند.



شکل (۱) انتشار امواج در صفحه متخلخل دوجداره در حالت (B-B).



شکل (۲) انتشار امواج در صفحه متخلخل دوجداره در حالت (B-U).

۳- تحلیل افت انتقال صوت سازه به روش تحلیلی ۳-۱- معادلات انتشار موج

نخستین گام برای تحلیل و محاسبه TL در سازه‌های چند جداره با لایه میانی متخلخل، مدل کردن رفتار امواج در مواد متخلخل است. بر اساس کامل‌ترین مدل (فریم الاستیک) ارائه شده در این زمینه که بر مبنای تئوری بایوت است [۵ و ۶]، با در نظر گرفتن جفت شدگی لزجت و اینرسی^۱ در نوشتن معادلات دینامیک انتقال تنش و نیز در نظر گرفتن اتصال گرمایی و الاستیک در نوشتن معادلات تنش- کرنش مواد متخلخل، معادلات حاکم بر انتشار موج در این مواد بر حسب خواص فیزیکی آنها از طریق روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه‌اند:

$$\nabla^2 e_s + A_1 \nabla^2 e_s + A_2 e_s = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \omega + k_f^2 \omega = 0 \quad (2)$$

در معادلات فوق، $e_s = \nabla \cdot \bar{u}$ کرنش حجمی فاز جامد (\bar{u}) بردار جابه‌جایی فاز جامد است، $\omega = \nabla \times \bar{u}$ کرنش چرخشی فاز جامد^۳ و A_1 و A_2 به ترتیب از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند [۱۰ و ۱۶]:

$$A_1 = \frac{\omega^2}{(PR - Q^2)} (P\bar{\rho}_{12} + R\bar{\rho}_{11} - 2Q\bar{\rho}_{12}) \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{\omega^2}{(PR - Q^2)} (\bar{\rho}_{11}\bar{\rho}_{22} - \bar{\rho}_{12}^2) \quad (4)$$

معادله (۱) مربوط به انتشار دو موج طولی (فشاری) در ماده متخلخل است. عدد موج مربوط به فاز جامد (عدد موج فریم) و عدد موج دیگر که مربوط به انتشار موج در فاز سیال (موج هوابرد) می‌باشد، به ترتیب از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند:

$$k_1^2 = (A_1 + \sqrt{A_1^2 - 4A_2})/2 \quad (5)$$

$$k_2^2 = (A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2})/2 \quad (6)$$

از معادله (۲) نیز که مربوط به انتشار موج برشی در فاز جامد است، عدد موج برشی (چرخشی) طبق رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد:

$$k_f^2 = (\omega^2 / N) (\bar{\rho}_{11} - (\bar{\rho}_{12})^2 / \bar{\rho}_{22}) \quad (7)$$

در روابط بالا، N مدول برشی، پارامترهای $\bar{\rho}_{11}$ و $\bar{\rho}_{22}$ به ترتیب چگالی مؤثر دو فاز جامد و سیال ماده متخلخل و $\bar{\rho}_{12}$ چگالی اتصال برای در برگرفتن اثر ویسکوزیته سیال می‌باشد که از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۰ و ۱۶]:

$$\bar{\rho}_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\sigma\phi^2 G_J(\omega) / \omega \quad (8)$$

$$\bar{\rho}_{12} = -\rho_a + j\sigma\phi^2 G_J(\omega) / \omega \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_{22} = \phi\rho_o + \rho_a - j\sigma\phi^2 G_J(\omega) / \omega \quad (10)$$

بطوری که:

$$\rho_a = \phi\rho_o(\alpha_\infty - 1) \quad (11)$$

$$G_J^2(\omega) = 1 + (4j\alpha_\infty^2 \eta \rho_o \omega / \sigma^2 \Lambda^2 \phi^2) \quad (12)$$

در روابط بالا، ρ_1 چگالی بالک مربوط به فاز جامد، ρ_o چگالی مربوط به فاز سیال و ρ_a بیانگر اتصال اینرسی موجود بین دو فاز جامد و سیال است که به ترتیب برابر ۳۰، ۱/۲۱۳ و ۷/۴۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در روابط بالا α_∞ ، η ، Λ ، σ و ϕ به ترتیب ضریب سازه^۴، لزجت هوا، طول مشخصه لزجت^۵، مقاومت جریان^۶ و تخلخل^۷ می‌باشند. ضرایب Q ، P و R با آزمایشهایی^۸ که توسط بایوت ارائه شده‌اند به خواص الاستیک ماده متخلخل مربوط می‌شوند. نحوه محاسبه این پارامترها در مراجع [۱۰ و ۱۶] به تفصیل آورده شده‌اند.

مطابق شکل‌های (۱) و (۲)، برای یک مسئله انتشار دو بعدی موج در یک ماده متخلخل (در صفحه $x-y$)، با فرض تحریک سیستم توسط یک موج صفحه‌ای با دامنه واحد که جهت انتشار آن موازی با صفحه $x-y$ می‌باشد، پتانسیل موج برخوردی برابر است با:

$$\Phi_i = e^{-j(k_x x + k_y y)} \quad (13)$$

در معادله فوق $k = \omega/c$ ، $k_y = k \cos \theta$ ، $k_x = k \sin \theta$ سرعت انتشار صوت در محیط برخورد و θ زاویه برخورد (زاویه بین موج برخوردی و خط عمود بر سطح برخورد) است. همانطور

4- Tourtosity
5- Viscous Characteristic Length
6- Flow Resistivity
7- Porosity
8- Gedanken Experiments

1- Viscous and Inertia Coupling
2- Solid Volumetric Strain
3- Rotational Strain of the Solid Phase

$$\Psi(i) = k_{iy} / k_i^\gamma, \Psi'(i) = k_x / k_i^\gamma \quad @ i = 1, 2, t$$

$$\Delta(i) = \nu N k_{iy} \Psi(i) + A + b_i Q \quad @ i = 1, 2$$

$$\Gamma(i) = e^{-jk_{iy}y}, \Gamma'(i) = e^{jk_{iy}y} \quad @ i = 1, 2, t$$

$$\Re(i) = p_{n\gamma}^{Ti} \Gamma(i), \Re'(i) = p_{n\gamma}^{Ri} \Gamma'(i) \quad @ i = 1, 2, t$$

$$b_1 = \frac{\bar{\rho}_{11} - \bar{\rho}_{12} Q}{\bar{\rho}_{22} Q - \bar{\rho}_{12} R} - \frac{PR - Q^\gamma}{\omega^\gamma (\bar{\rho}_{22} Q - \bar{\rho}_{12} R)} k_1^\gamma \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{\bar{\rho}_{11} - \bar{\rho}_{12} Q}{\bar{\rho}_{22} Q - \bar{\rho}_{12} R} - \frac{PR - Q^\gamma}{\omega^\gamma (\bar{\rho}_{22} Q - \bar{\rho}_{12} R)} k_2^\gamma$$

$$A = \nu E_1 / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$$

$$g = -\bar{\rho}_{12} / \bar{\rho}_{22}$$

سایر جزئیات در مراجع [۱۰، ۱۶، ۱۹] آمده است. شش پارامتر $p_{n\gamma}^{R1}, p_{n\gamma}^{T1}, p_{n\gamma}^{R2}, p_{n\gamma}^{T2}, p_{n\gamma}^{R3}, p_{n\gamma}^{T3}$ در روابط بالا با اعمال شرایط مرزی تعیین می‌شوند.

۳-۲- اعمال شرایط مرزی

مطابق شکل (۳)، اگر لایه متخلخل توسط یک صفحه همسانگرد الاستیک مقید شده باشد (حالت B)، شش شرط مرزی وجود خواهد داشت. با فرض جابه‌جایی عرضی به صورت $w_t(x, t) = W_t(x)e^{j\omega t}$ و جابه‌جایی صفحه‌ای در محور خنثی به صورت $w_p(x, t) = W_p(x)e^{j\omega t}$ ، چهار شرط مرزی به صورت زیر در سطح مشترک خواهیم داشت:

$$V_y = j\omega W_t \quad (22)$$

$$u_y = W_t \quad (23)$$

$$U_y = W_t \quad (24)$$

$$u_x = W_p(\pm)(h_p / \nu)(dW_t / dx) \quad (25)$$

و دو شرط دیگر از معادلات حرکت به دست می‌آیند:

$$(\pm)\tau_{yx} = (D_p k_x^\gamma - \omega^\gamma m_s) W_p \quad (26)$$

$$(27)$$

$(\pm)P(\pm)q_p - jk_x(h_p / \nu)\tau_{xy} = (Dk_x^\gamma - \omega^\gamma m_s)W_t$
 در معادلات فوق، h_p ضخامت صفحه، m_s جرم صفحه در واحد سطح، $D = Eh_p^3 / 12(1 - \nu^2)$ سفتی خمشی صفحه در واحد سطح، $D_p = Eh_p / 1 - \nu^2$ سفتی طولی صفحه در واحد عرض آن، E مدول الاستیسیته صفحه، ν ضریب پواسون صفحه، P فشار محیط آکوستیکی خارجی در سطح

که در شکل‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود به دلیل انتشار سه موج در مواد متخلخل، شش موج رونده (سه موج جلو رونده و سه موج بازگشتی) در لایه متخلخل با عمق محدود منتشر می‌شوند که همگی دارای مؤلفه طولی عدد موج یکسان‌اند. با فرض یک پاسخ ساده برای کرنش فاز جامد و سیال ماده متخلخل، مؤلفه‌های جابه‌جایی و تنش مربوط به دو فاز جامد و سیال در راستای x و y به صورت زیر محاسبه می‌شود:

مؤلفه‌های جابه‌جایی در فاز جامد عبارتند از:

$$(14)$$

$$u_x = je^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} \Psi'(i)(\Re(i) + \Re'(i)) - \Psi(t)(\Re(t) - \Re'(t)) \right] \quad (15)$$

$$u_y = je^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} \Psi(i)(\Re(i) - \Re'(i)) + \Psi'(t)(\Re(t) + \Re'(t)) \right]$$

مؤلفه‌های جابه‌جایی در فاز سیال عبارتند از:

$$(16)$$

$$U_x = je^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} b_i \Psi'(i)(\Re(i) + \Re'(i)) - g \Psi(t)(\Re(t) - \Re'(t)) \right] \quad (17)$$

$$U_y = je^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} b_i \Psi(i)(\Re(i) - \Re'(i)) + g \Psi'(t)(\Re(t) + \Re'(t)) \right]$$

مؤلفه‌های تنش در فاز جامد عبارتند از:

$$(18)$$

$$\sigma_y = e^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} \Delta(i)(\Re(i) + \Re'(i)) + \nu N k_x \Psi(t)(\Re(t) - \Re'(t)) \right] \quad (19)$$

$$\tau_{xy} = e^{-jk_x x} N \left[\sum_{i=1,2} \nu k_x \Psi(i)(\Re(i) - \Re'(i)) + (k_x \Psi'(t) - k_{ty} \Psi(t))(\Re(t) + \Re'(t)) \right]$$

مؤلفه تنش در فاز سیال عبارت است از:

$$s = e^{-jk_x x} \left[\sum_{i=1,2} (Q + b_i R)(\Re(i) + \Re'(i)) \right] \quad (20)$$

جایی که:

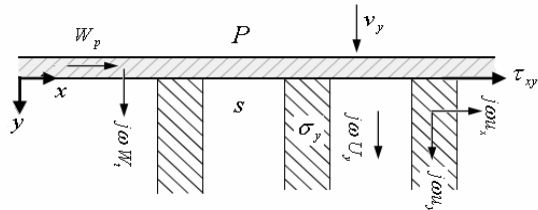
۳-۳- حل معادلات و محاسبه ضریب TL سازه

مطابق شکل (۱)، درحالت (B-B)، ۱۳ دسته موج در این سازه انتشار می‌یابد. دو موج برخوردی و بازتابش آن به محیط ۱ (p_{n1}^i و p_{n1}^R)، چهار موج در صفحه‌ها (یک موج عرضی و یک موج برشی برای هر صفحه $(w_{p1}^o, w_{p1}^o, w_{p2}^o, w_{p2}^o)$)، سه موج تابش و سه موج بازتابش (مجموعاً شش موج) در لایه متخلخل ($p_{n2}^R, p_{n2}^T, p_{n2}^R, p_{n2}^T, p_{n2}^R, p_{n2}^T$) و یک موج انتقالی به محیط ۳ (p_{n3}^T) این ۱۳ دسته موج را تشکیل می‌دهند. ضمناً شرایط یک محیط غیر انعکاسی برای محیط ۳ (محیط انتقال) در نظر گرفته شده است. طبق روابط (۲۱) الی (۲۶) به دلیل وجود هشت شرط مرزی (مقید بودن ماده متخلخل در دو طرف) و چهار معادله حرکت، در مجموع ۱۲ معادله به صورت ماتریسی $\{\bar{h}\}_{12 \times 12} \{\bar{p}\}_{12 \times 1} = \{\bar{\lambda}\}_{12 \times 1}$ حاصل می‌شود. همچنین مطابق شکل (۲) در حالت (B-U)، ۱۴ دسته موج منتشر می‌شوند که با اعمال شرایط مرزی طبق روابط مذکور در هر دو سمت صفحه‌ها، در مجموع ۱۳ معادله به صورت $\{\bar{h}\}_{13 \times 13} \{\bar{p}\}_{13 \times 1} = \{\bar{\lambda}\}_{13 \times 1}$ نتیجه می‌شود. بنابراین در هر دو حالت فوق، از حل همزمان این معادلات دامنه کلیه موج‌ها را می‌توان به صورت تابعی از ثابت موج ورودی p_{n1}^i ، فرکانس و زاویه برخورد θ محاسبه نمود. معمولاً زوایای موج برخوردی به سازه در عمل به صورت کاملاً اتفاقی رخ می‌دهد. به همین منظور از یک مقیاس ضریب افت انتقال میانگین به عنوان یک پارامتر عملی و مورد ارزیابی در مقیاس تجربی استفاده می‌شود. این پارامتر وابستگی ضریب انتقال صوت به زاویه موج برخوردی را مرتفع می‌سازد. بر طبق فرمول پاریس^۱ ضریب افت توان میانگین به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$\bar{\tau} = \int_0^{\theta_m} \tau(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (35)$$

در معادله فوق $\tau(\theta)$ متناسب است با مجذور p_{n3}^T / p_{n1}^i و θ_m زاویه برخورد ماکزیمم است که معمولاً بین ۷۰ تا ۸۵ درجه، بسته به شرایط، انتخاب می‌شود. در اینجا مقدار θ_m برابر ۷۸ انتخاب شده است [۲۱]. انتگرال معادله (۳۵) توسط روش عددی سیمپسون محاسبه شده است. معمولاً در بازه

تماس، V_y مؤلفه عمودی سرعت در سطح تماس و q_p نیروی عمود بر واحد سطح صفحه است که توسط ماده متخلخل اعمال می‌شود ($q_p = -\sigma_y - s$). در شرایط مرزی فوق، علامت اول برای اتصال ماده متخلخل به طرف مثبت راستای y صفحه و علامت دوم برای اتصال ماده متخلخل برای طرف منفی راستای y به کار می‌رود.



شکل (۳) مقطع عرضی یک لایه متخلخل مقید شده توسط یک صفحه (حالت Bounded) [۱۰] و [۱۹].

مطابق شکل (۴)، در حالتی که یک فاصله هوایی بین لایه متخلخل و یکی از صفحه‌ها وجود دارد، در سطح مشترک لایه متخلخل و فاصله هوایی (حالت U)، چهار شرط مرزی زیر باید ارضاء شوند:

$$-\phi \times P = s \quad (28)$$

$$-(1-\phi) \times P = \sigma_y \quad (29)$$

$$V_y = j\omega(1-\phi)u_y + j\omega\phi U_y \quad (30)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (31)$$

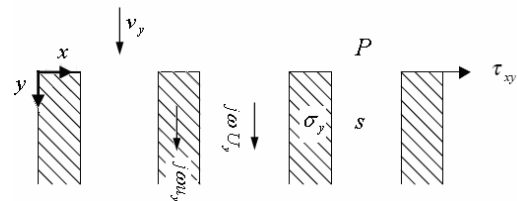
همچنین در سطح مشترک بین صفحه و فاصله هوایی، سه شرط مرزی زیر باید صادق باشند [۱۹و۱۰]:

$$V_{1y} = j\omega W_t \quad (32)$$

$$V_{2y} = j\omega W_t \quad (33)$$

$$P_1 - P_2 = (Dk_x^2 - \omega^2 m_s) W_t \quad (34)$$

در روابط بالا، P_1 و P_2 فشار آکوستیکی فاصله هوایی در هر دو سمت صفحه و V_{1y} و V_{2y} مؤلفه عمودی سرعت صفحه در هر دو سمت سطح صفحه در محل تماس‌اند.



شکل (۴) مقطع عرضی یک لایه متخلخل در مجاورت فاصله هوایی (حالت Unbounded) [۱۰] و [۱۹].

اتاق منبع به صورت یک اتاق پژواک^۲ و اتاق گیرنده یک اتاق غیرانعکاسی^۳ فرض می‌شوند.

در حالت کلی معادلات بالانس توان (تعادل توان) در حالت پایا برای این سه زیرسیستم به صورت زیر خواهد شد:

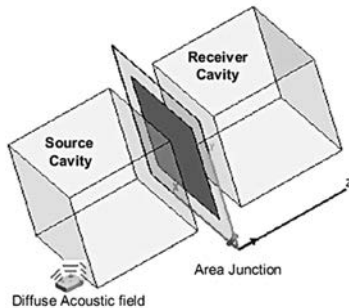
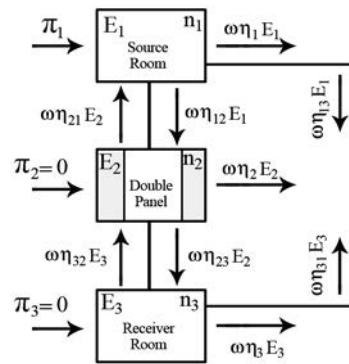
$$\Pi_i^{in} = \Pi_i^{diss} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ji} \quad (37)$$

در معادلات فوق Π_i^{in} توان ورودی به زیرسیستم i ام، Π_i^{diss} توان اتلافی در سیستم i ام و Π_{ij} ، توان انتقالی از زیرسیستم i ام به زیرسیستم j ام می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Pi_i^{diss} = \omega \eta_i E_i, \quad \Pi_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad (38)$$

با نوشتن معادلات بالانس توان برای هر یک از سه زیرسیستم و پس از حل همزمان آنها، افت انتقال صوت در بازه فرکانسی ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ هرتز مطابق رابطه (۳۹) محاسبه خواهد شد.

$$TL = 10 \log(1/\tau) = 10 \log\left(\frac{\Pi_{inc}}{\Pi_{23} + \Pi_{13}}\right) \quad (39)$$



شکل (۵) مدل SEA سازه پنل دوجداره با لایه متخلخل میانی به همراه جریان توان بین هر سه زیرسیستم.

۱/۳ اکتاو به محاسبه ضرایب انتقال صوت کلی سازه پرداخته می‌شود. در نهایت ضریب افت انتقال صوت (TL) این سازه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TL = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (36)$$

قابل ذکر است که در ادامه، نتایج حاصل از نوشتن کد توسعه یافته مربوط به حل معادلات ماتریسی مذکور توسط نرم‌افزار مطلب جهت محاسبه ضریب TL سازه دوجداره با اعمال هر دو شرط مرزی (B-B) و (B-U) ارائه شده‌اند.

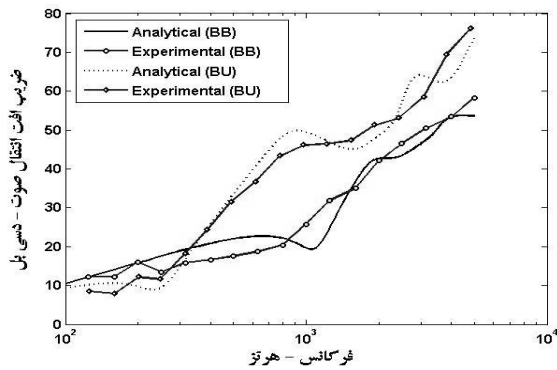
۴- تحلیل افت انتقال صوت سازه به روش SEA

با توجه به اینکه تحلیل مسئله مورد نظر در محدوده فرکانسی بالا (تا ۵۰۰۰ هرتز) مورد مطالعه قرار گرفته است و به دلیل اینکه روشهای اجزا محدود و اجزا مرزی در محدوده فرکانسی بالا عملاً کارایی نخواهند داشت، لذا روش تحلیل انرژی آماری^۱ (SEA) مناسب‌ترین تکنیک برای تحلیل مدل مذکور جهت بررسی صحت نتایج مدل تحلیلی است. بنابراین در این بخش، نحوه شبیه‌سازی مدل SEA یک پنل ساندویچی دوجداره با لایه میانی پوروالاستیک و نحوه محاسبه ضریب افت انتقال صوت (TL) آن توسط نرم‌افزار AutoSEA2 ارائه شده است. به دلیل قابلیت مدل‌سازی انواع فوم‌های (مواد پوروالاستیک) مورد استفاده در سازه‌های مختلف و نیز توانایی تحلیل رفتار ارتعاشی و اثرات آکوستیکی آنها به روش SEA توسط نرم‌افزار AutoSEA2، از این نرم‌افزار جهت تحلیل استفاده شده است [۲۲].

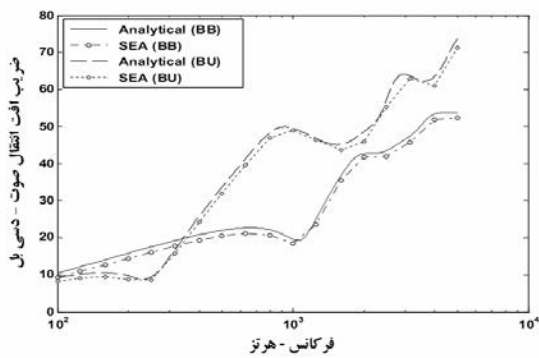
در مدل‌سازی سیستم فوق به روش SEA، سیستم مذکور شامل سه زیرسیستم می‌باشد. زیرسیستم اول اتاق منبع صوتی (چشمه صوت)، زیرسیستم دوم دیواره دوجداره متشکل از دو پنل آلومینیومی با لایه متخلخل میانی و زیرسیستم سوم، اتاق دریافت کننده می‌باشد و تنها زیرسیستم اول است که تحت تأثیر منبع صوتی خارجی قرار دارد. شکل (۵) مدل SEA ایجاد شده توسط نرم‌افزار AutoSEA2، به همراه جریان توان بین هر سه زیرسیستم را در حالت پایا نمایش می‌دهد. برای مدل‌سازی آکوستیکی چنین سازه‌ای، طبق استاندارد ASTM E90، از دو اتاق آکوستیکی (منبع و گیرنده) استفاده می‌شود به طوری که

2- Reverberant Room
3- Anechoic Room

1- Statistical Energy Analysis



شکل (۶) مقایسه ضریب TL صفحه دوجداره با لایه متخلخل میانی به روش تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی [۱۰] و [۱۹]



شکل (۷) مقایسه ضریب TL صفحه دوجداره با لایه متخلخل میانی به روش تحلیلی با روش SEA.

همانطور که ملاحظه می‌شود در محدوده فرکانسی بالا (بالتر از ۳۵۰ هرتز)، استفاده از صفحات دوجداره با شرط مرزی (B-U) عملکرد مناسبتری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-B) خواهند داشت و بالعکس، در فرکانس‌های پایین، کاربرد این صفحات در حالت (B-B) اثر مطلوبتری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-U) خواهند داشت.

۵-۲- بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر TL سازه

پس از صحنه‌گذاری بر روی نتایج تحلیلی، در این بخش از مقاله به شناسایی و بررسی سایر پارامترهای مؤثر بر روی افت انتقال صوت سازه مذکور و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف پرداخته شده است.

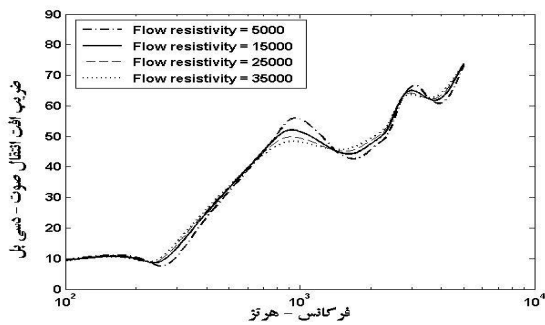
حال برای مدلسازی سازه مورد نظر، ابتدا یک پنل آلومینیومی (پنل برخوردی) و دو محفظه آکوستیکی جهت مدلسازی دو اتاق منبع و گیرنده ایجاد می‌شوند که به ترتیب زیرسیستم‌های ۱ و ۲ و ۳ مدل SEA را تشکیل می‌دهند. سپس یک جاذب کنترل نویز دو لایه متشکل از یک لایه ماده متخلخل و یک لایه پنل آلومینیومی (پنل بازتابش) بعنوان جداره دوم دیواره به پنل برخوردی، در جهتی که با اتاق گیرنده متصل است، اعمال می‌کنیم تا زیرسیستم ۲ یک دیواره دوجداره را تشکیل دهد. با توجه به اینکه فرض بر این است که طول پنل‌ها نامحدود می‌باشد، لذا ابعاد اتاقها و پنل نسبت به ضخامت کل دیواره دوجداره بسیار بزرگ در نظر گرفته شده‌اند. بعد از ایجاد زیرسیستم‌ها باید آنها را به یکدیگر متصل کرد. در مدلسازی انجام گرفته یک اتصال صفحه‌ای بین سطح پنل و سطوح مشترک آن با دو اتاق منبع و گیرنده ایجاد می‌شود. با توجه به استاندارد ASTM E 90، اتاق منبع توسط یک منبع پراکنده صوتی (دیفیوز) تحریک می‌شود، لذا در اینجا نیز یک تحریک خارجی از نوع منبع پراکنده صوتی به زیرسیستم ۱ (اتاق منبع) اعمال می‌شود. محل اعمال این تحریک خارجی اهمیتی ندارد، زیرا مدل SEA اتاق منبع به صورت یک زیرسیستم واحد در نظر گرفته شده است و نرم افزار تفاوتی بین نقاط مختلف یک زیرسیستم قائل نمی‌شود. شکل (۵) اتصال صفحه‌ای ایجاد شده بین هر سه زیرسیستم و نحوه اعمال منبع پراکنده صوتی را نشان می‌دهد. کلیه تحلیل‌ها در بازه فرکانسی ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ هرتز و بر اساس باندها ۱/۳ اکتاو انجام شده‌اند.

۵- نتایج، مقایسه و بحث

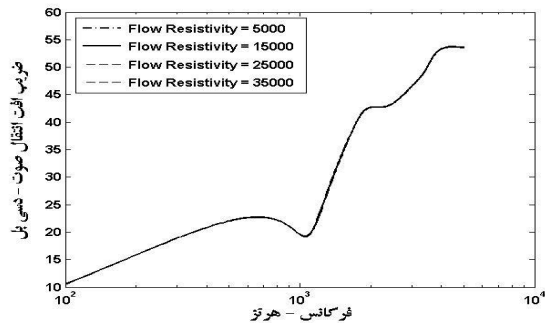
۵-۱- درستی سنجی

شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب مقایسه نتایج حاصل از حل تحلیلی یک صفحه دوجداره با لایه میانی متخلخل در دو حالت (B-B) و (B-U) با داده‌های آزمایشگاهی بولتون [۱۰ و ۱۹] و نتایج روش SEA را نمایش می‌دهند. این مقایسه‌ها همخوانی مناسب نتایج تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی و روش SEA را نشان می‌دهند.

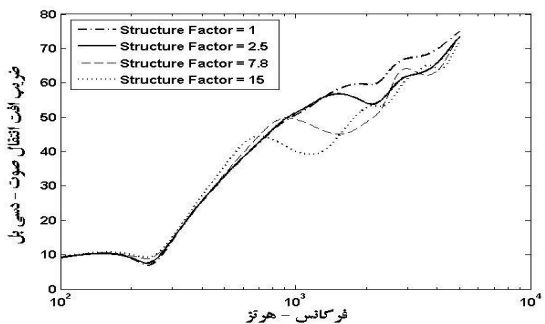
از آنجا که برای اغلب مواد پوروالاستیک، مقدار تخلخل در یک رنج معینی بین ۰/۹ الی ۰/۹۹ تغییر می کند و تغییرات آن در این محدوده تأثیری چندانی بر TL نخواهد داشت، لذا تخلخل را جزء پارامترهای مؤثر در نظر گرفته نمی شود. بنابراین در ادامه نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مقاومت جریانی و ضریب سازه بر روی TL این سازه مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل های (۱۰) الی (۱۳) تأثیر دو پارامتر مقاومت جریانی و ضریب سازه که هر دو مرتبط با فاز سیال ماده متخلخل می باشند، بر روی ضریب TL صفحه دوجداره در دو حالت (B-B) و (B-U) بررسی شده است.



شکل (۱۰) اثر مقاومت جریانی بر TL در حالت (B-U).

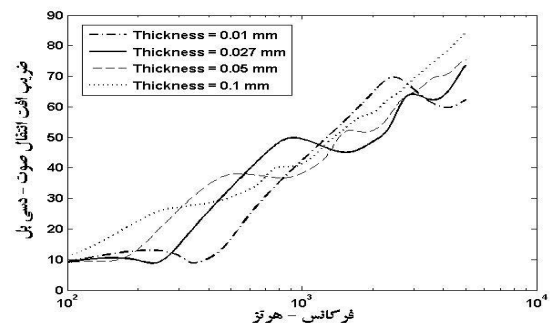


شکل (۱۱) اثر مقاومت جریانی بر TL در حالت (B-B).

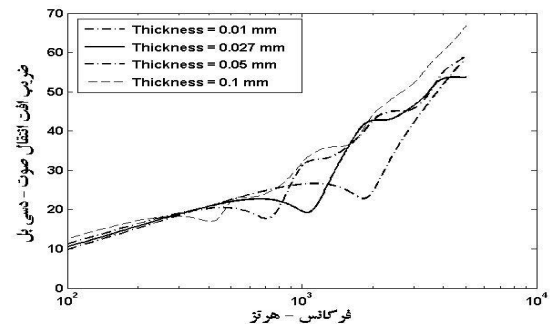


شکل (۱۲) اثر ضریب سازه بر TL در حالت (B-U).

به عنوان اولین گزینه برای بهبود رفتار آکوستیکی یک ماده عایق صوت، تأثیر افزایش ضخامت لایه متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل های (۸) و (۹) به ترتیب اثر افزایش ضخامت ماده متخلخل بر افت انتقال صوت (TL) صفحه ساندویچی دوجداره را در دو حالت (B-B) و (B-U) نمایش می دهد. همانطور که انتظار می رفت هر چقدر لایه متخلخل ضخیم تر می شود، افت انتقال صوت افزایش می یابد. ضمن اینکه در فرکانس های بالاتر و پس از عبور از ناحیه سفتی کنترل، این افزایش بهتر دیده می شود. علت این است که در فرکانس های بالا، طول موج امواج در مقایسه با فاصله میان دوجداره ناچیز خواهد بود. بنابراین در طراحی دیواره های دوجداره، افزایش پارامتر ضخامت تا آنجا که محدودیت وزنی برای سازه وجود ندارد، باعث افزایش افت انتقال صوت می شود. نکته ای که باید بدان توجه نمود این است که فرکانس بحرانی سازه با ضخامت نسبت عکس دارد، لذا با افزایش ضخامت دیواره، فرکانس بحرانی (همزمانی) سازه کاهش می یابد که این مطلب در نمودارهای فوق کاملاً مشهود است.

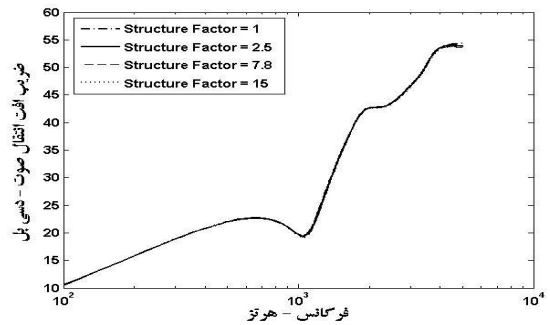


شکل (۸) اثر ضخامت لایه متخلخل بر TL در حالت (B-U).



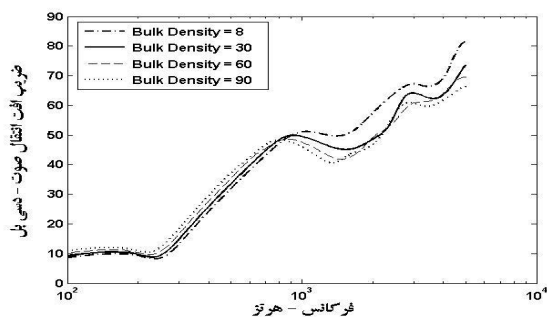
شکل (۹) اثر ضخامت لایه متخلخل بر TL در حالت (B-B).

دو صفحه کاملاً مقید شده است، بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج فریم انتقال می‌یابند، بنابراین تغییر این دو پارامتر تأثیر بسزایی بر روی ضریب TL سازه خواهند داشت. نتایج نشان می‌دهند که در حالت (B-B) و در فرکانس‌های بالا، کاهش در مقدار چگالی بالک موجب افزایش افت انتقال صوت خواهد شد. علت اینکه پارامتر چگالی بالک در فرکانس‌های بالا اثرات بیشتری دارد این است که محدوده فرکانسی بالا ناحیه جرم کنترل است و تغییرات جرمی سازه در فرکانس‌های بالا به شدت بر روی TL سازه اثر خواهد گذاشت.

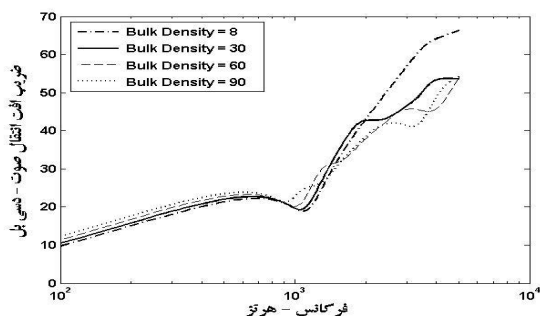


شکل (۱۳) اثر ضریب سازه بر TL در حالت (B-B)

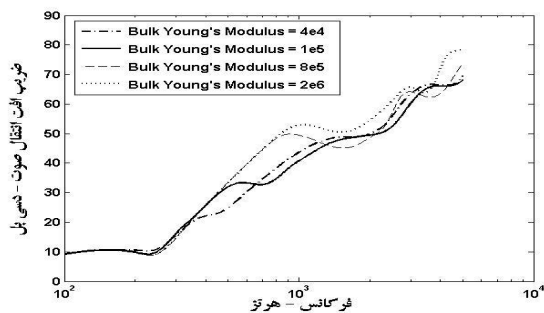
نتایج نشان می‌دهند که در حالت (B-B) تغییر این دو پارامتر تقریباً هیچ تغییری در افت انتقال صوت (TL) سازه ایجاد نمی‌کند. اما در حالت (B-U) تغییر این دو پارامتر بر روی TL بویژه در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز تأثیرگذار است و با افزایش مقاومت جریانی و نیز کاهش ضریب سازه، مقدار ضریب افت انتقال صوت سازه افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴) اثر چگالی بالک بر TL در حالت (B-U).



شکل (۱۵) اثر چگالی بالک بر TL در حالت (B-B).



شکل (۱۶) اثر مدول الاستیسیته بالک بر TL در حالت (B-U).

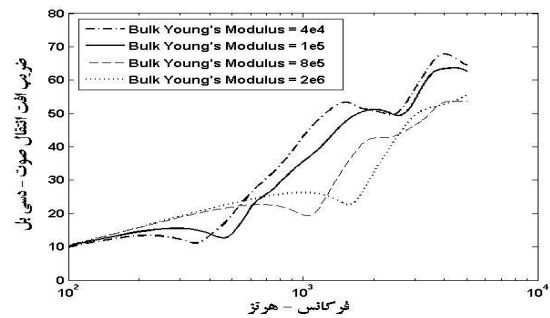
علت اینکه تغییر این دو پارامتر تنها بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-U) تأثیر دارد این است که در این حالت بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج هوارد انتقال می‌یابند و لذا پارامترهایی از مواد متخلخل که بر روی امواج هوارد مؤثر هستند، بیشترین تأثیر را بر روی ضریب TL سازه می‌گذارند. لذا از آنجا که دو پارامتر مذکور مرتبط با فاز سیال ماده متخلخل می‌باشند، لذا تنها بر روی امواج هوارد اثر محسوسی خواهند داشت، به همین دلیل تغییر این دو پارامتر تأثیر چندانی بر روی TL سازه در حالت (B-B) ندارد.

شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) تأثیر پارامترهای مرتبط با فاز جامد لایه متخلخل یعنی چگالی بالک و مدول الاستیسیته بالک^۱ را بر روی ضریب TL صفحه دوجداره در دو حالت (B-B) و (B-U) نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییر این دو پارامتر بیشترین اثر را بر روی افت انتقال صوت سازه دوجداره در حالت (B-B) دارند. زیرا این دو پارامتر مذکور مرتبط با فاز جامد (فریم) ماده متخلخل می‌باشند و بر روی امواج فریم اثرات محسوسی می‌گذارند. به همین دلیل با توجه به شرایط مرزی ماده متخلخل در حالت (B-B) که بین

صفحه‌های متخلخل دوجداره با شرط مرزی (B-U) عملکرد مناسبتری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-B) خواهند داشت و بالعکس، در فرکانس‌های پایین جهت کاهش انتقال صوت، به کارگیری این صفحه‌ها در حالت (B-B) پیشنهاد می‌شود. علاوه بر اثرات مطلوب این سازه‌ها در کنترل صدا بویژه در فرکانس‌های بالا، نتایج نشان می‌دهند که در حالتی که لایه متخلخل بین دو صفحه مقید شده است، به عبارت دیگر حالت (B-B)، بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج فریم انتقال می‌یابند. لذا تغییر پارامترهای مرتبط با فاز جامد (فریم) ماده متخلخل از جمله مدول الاستیسیته و چگالی بالک بیشترین تأثیر را بر روی ضریب TL دارند. حال آنکه در حالت (B-U) که یک فاصله هوایی نیز بین دو صفحه تعبیه شده است، بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج هوا برد منتقل می‌شوند. بنابراین پارامترهایی مانند مقاومت جریان و ضریب سازه که با فاز سیال ماده متخلخل ارتباط نزدیکی دارند و بر روی امواج هوا برد اثر محسوسی دارند و در این وضعیت بیشترین تأثیر را بر روی افت انتقال صوت سازه می‌گذارند.

۷- مراجع

- [1] Bolton J. S., Shiau N. M. and Kang Y. J., , Sound Transmission Through Multi-Panel Structures Lined with Elastic porous Materials, *J. of Sound and Vibration*, 191(3-4), 1996, pp. 317-347.
- [2] Fahy F. J., , Foundation of Engineering Acoustics, Academic Press, 2001.
- [3] Rayleigh J. W. S., The Theory of Sound, Vol. II, Art. 351, Dover Publication, New York, 1945.
- [4] Zwicker C. and Kosten C. W., Sound Absorbing Materials, Elsevier Press, Amsterdam, 1949.
- [5] Biot M. A., , Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Structural porous Solid I, Low Frequency Range, *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 2, 1956, pp. 168-178.
- [6] Biot M. A., Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Structural porous Solid II, High Frequency Range, *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 2, 1956, pp. 179-191.



شکل (۱۷) اثر مدول الاستیسیته بالک بر TL در حالت (B-B).

در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) ملاحظه می‌شود که در حالت (B-U) با افزایش مدول الاستیسیته بالک ضریب TL افزایش می‌یابد، اما در حالت (B-B) و در فرکانس‌های بالای ۸۰۰ هرتز، کاهش سفتی سازه از طریق کاهش مقدار مدول الاستیسیته بالک ماده متخلخل، موجب بهبود افت انتقال صوت سازه می‌شود. علت این امر این است که کاهش سفتی خمشی سازه به افزایش انعطاف‌پذیری سازه و در نتیجه پایین آمدن فرکانس‌های رزونانس (همزمانی)^۱ آن منجر می‌شود. بنابراین کاهش سفتی خمشی سازه باعث کاهش یافتن افت انتقال صوت در فرکانس‌های بالا می‌شود، اما در فرکانس‌های پایین‌تر از ۸۰۰ هرتز، به دلیل وجود ناحیه سفتی کنترل، دقیقاً این روند بالعکس می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از تشریح نحوه به‌دست آوردن معادلات حاکم بر انتشار موج در مواد متخلخل بر مبنای تئوری بایوت، با در نظر گرفتن اتصالات ویسکوز، اینرسی، الاستیک و گرمایی بین دو فاز جامد و سیال، یک مدل تحلیلی جهت محاسبه افت انتقال صوت از صفحه‌های دوجداره با لایه متخلخل میانی با شرایط مرزی مختلف ارائه شد. همچنین در نرم‌افزار مطلب کد نرم‌افزاری جهت محاسبه ضریب افت انتقال صوت (TL) سازه مذکور در دو حالت (B-B) و (B-U) نوشته شد تا علاوه بر صحت‌گذاری بر روی نتایج حل تحلیلی از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در این زمینه و نیز نتایج حل تحلیل انرژی آماری (SEA)، تأثیر پارامترهای مؤثر بر افت انتقال صوت این سازه‌ها و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف پرداخته شود. نتایج نشان می‌دهند که بطور کلی در فرکانس‌های بالا، استفاده از

- [15] Xin, F.X., Lu, T.J., Transmission loss of orthogonally rib-stiffened double-panel structures with cavity absorption, *J. of Acoustical Society of America*, 129, 2011, pp. 1919-1934.
- [16] Daneshjou K., Ramezani H., Talebitooti R., Wave transmission through laminated composite double-walled cylindrical shell lined with porous materials, *Applied Mathematics and Mechanics*, 32(6), 2011, pp. 701-718.
- [17] Allard J.F., Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing materials, Elsevier Science Publishers LTD., 1993.
- [18] Kang Y. J. & Bolton J. S., A finite element model for sound transmission through foam-lined double-panel structures, *J. of Acoustical Society of America*, 99, 1996, pp. 2755-2765.
- [19] Lee J.H. and Kim J., Simplified method to solve sound transmission through structures lined with porous material, *J. of Acoustical Society of America*, 110, 2001, pp. 2282-2294.
- [20] A. D. Pierce, 1981, Acoustics, New York: McGraw Hill.
- [21] Mulholland K. A., Parbrook H. D. and Cummings A., The Transmission Loss of Double Panels, *J. Sound and Vib.*, 6, 1967, pp. 324-334.
- [22] AutoSEA2 User's Guide, ESI Group., July 2004.
- [7] Atalla N., Panneton R. and Deberdue P., A Mixed Displacement-Pressure Formulation for Poroelastic Materials, *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 104, No. 3, 1998, pp. 1444-1452.
- [8] Segard F. C., Atalla N. and Nicolas J., A Numerical Model for the Low Frequency Diffuse Field Sound Transmission Loss of Double-wall Sound Barriers with Elastic Porous Linings, *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 6, 2000, pp. 2865-2872.
- [9] Bolton J. S. and Green E. R., Normal incidence sound transmission through double-panel systems lined with relatively stiff, reticulated polyurethane foam, *Applied Acoustics*. 39, 1993, pp. 23-51.
- [10] Bolton J. S. and Kang Y. J., *Elastic porous materials for sound absorption and transmission control*, Proceedings of SAE Noise and Vibration Conference, 971878, 1997, pp. 77-91.
- [11] Bolton J. S., Heng-Yi Lai, katragadda S. and Alexander J. H., *Layered Fibrous Treatment for a Sound Absorption and Transmission Control*, SAE 971878, 1997, pp. 2576-2590.
- [12] Tadeu A., Antonio J., Mateus D., Sound insulation provided by single and double panel walls, a comparison of analytical solutions versus experimental results, *Applied Acoustics*, 65, 2004, pp. 15-29.
- [13] Tanneau O., Casimir J. B. and Lamary P., Optimization of multilayered panels with poroelastic components for an acoustical transmission objective, *J. of Acoustical Society of America*, 120 (3), 2006, pp. 1227-1238.
- [14] Ghosh A.K., Williams A.D., Zucker J.M., Mathews J.L., Spinhirne N. , An Experimental Investigation into the Acoustic Characteristics of Fluid-filled Porous Structures-A Simplified Model of the Human Skull Cancellous Structure, *Experimental Mechanics*, 48, 2008, pp. 139-152.