



## تحلیل انتقال توان صوتی از طریق پنل‌های دوجداره کامپوزیت لایه‌ای با لایه متخلخل میانی تحت شرایط مرزی مختلف

محمدحسن شجاعی فرد<sup>۱</sup>، روح الله طالبی توتی<sup>۲\*</sup>، رضا احمدی<sup>۳</sup>، بهزاد رنجبر<sup>۴</sup>

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت، تهران

۴- کارشناس ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* rtalebi@iust.ac.ir، ۱۶۸۴۶ پستی

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۲

پذیرش: ۳۰ دی ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۱۵ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

ضریب افت انتقال صوت

مواد متخلخل

صفحات کامپوزیتی

پنل‌های دو جداره

تحلیل انرژی آماری

### چکیده

در این مقاله، رفتار صوتی پنل‌های دوجداره کامپوزیتی عایق صوت با یک لایه میانی متخلخل در چارچوب تئوری کلاسیک صفحات کامپوزیتی لایه-ای (CLPT) مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله، بررسی تحلیلی اثرات استفاده از شرایط مرزی مختلف بر روی لایه متخلخل و نیز شناسایی پارامترهای مؤثر بر روی انتقال توان صوتی از طریق این سازه‌ها است. بر این مبنای روابط کوپلینگ ویسکوز و اینرسی در معادلات دینامیک انتقال تنش و نیز کوپلینگ الاستیک در نوشتن معادلات تنش-کرنش مواد متخلخل، بر اساس تئوری بایوت مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، معادلات حاکم بر انتشار موج با توجه به معادلات کلاسیک ارتعاشات مواد کامپوزیت لایه‌ای، استخراج شده است. سپس با اعمال شرایط مرزی مختلف و حل همزمان معادلات، ضریب افت انتقال صوت ( $TL$ ) سازه محاسبه شده است. نتایج حل تحلیلی با نتایج عددی حاصل از تحلیل انرژی آماری (SEA) و نیز داده‌های آزمایشگاهی موجود در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفته و صحت‌گذاری شده‌اند. نهایتاً پارامترهای مؤثر بر روی ضریب  $TL$  این سازه‌ها و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند نحوه اتصال لایه متخلخل به صفحات کامپوزیتی (نوع شرایط مرزی) و نیز چیدمان لایه‌ها، نقش مهمی در کاهش انتقال توان صوتی از طریق این سازه‌ها دارند.

## Power sound transmission through double-walled laminated composite panel with intermediate porous layer considering different boundary conditions

Mohammad Hassan Shojaeefard<sup>1</sup>, Roohollah Talebitooti<sup>2\*</sup>, Reza Ahmadi<sup>3</sup>, Behzad Ranjbar<sup>4</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4- Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, rtalebi@iust.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 April 2013  
Accepted 01 January 2014  
Available Online 06 July 2014

### Keywords:

Sound Transmission Loss  
Porous Materials  
Laminated Composite Plates  
Double Panel  
Statistical Energy Analysis (SEA)

### ABSTRACT

In this paper, the sound behavior of a double walled composite with an intermediate porous layer has been conducted using the classical laminated plate theory (CLPT). The main objective of the paper is devoted to considering the analytical study of various boundaries on porous layers as well as parameter study on power transmission through the structure. Thus, viscous and inertia coupling in a dynamic equation, as well as stress transfer, thermal and elastic coupling of porous material are considered based on Biot theory. In addition, the equation of wave propagation are extracted according to vibration equation of composite layers. Then, with applying the various boundaries on the structures along with solving these equations simultaneously, the Transmission Loss ( $TL$ ) is calculated. The analytical results are compared with both numerical ones obtained from Statistical energy Analysis (SEA) as well as empirical results and an excellent agreement is observed. The parametric studies are presented to investigate the effects of boundary conditions on  $TL$ . The results indicate that the interface of porous-composite layers as well as stacking sequences of the composite layers would play an important role in reduction of power transmission through the structure.

### ۱- مقدمه

وسیع‌ی پیدا کرده‌اند و به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزار کنترل غیرفعال نویز به شمار می‌آیند. دلیل این امر پارامترهای متعددی مانند سبکی، قیمت مناسب، شکل-پذیری آسان، سادگی در اجرا و توان آن‌ها در کاهش انتقال صوت به ویژه در

مواد متخلخل<sup>۱</sup> امروزه در صنایع مختلف نظیر هوافضا، خودروسازی و غیره کاربرد

1- Elastic Porous Material

### Please cite this article using:

M.H. Shojaeefard, R. Talebitooti, R. Ahmadi, B. Ranjbar, Power sound transmission through double-walled laminated composite panel with intermediate porous layer considering different boundary conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 11-21, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جداره تقویت شده را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. در همین سال دانشجو و همکارانش با استفاده از روشی تحلیلی، خواص صوتی در پوسته‌های استوانه‌ای دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. شجاعی فرد و همکارانش، رفتار آکوستیکی صفحات ساندویچی دوجداره آلومینیومی با لایه متخلخل میانی را به منظور بررسی اثرات استفاده از شرایط مرزی مختلف بر روی لایه متخلخل تحلیل کرده [۱۸] و در ادامه به تحلیل و بهینه‌سازی پنل‌های چندلایه متشکل لایه‌های متخلخل، هوا و لایه‌های جامد پرداختند. آن‌ها برای پیش‌بینی رفتار آکوستیکی پنل‌های چندلایه، از روشی موسوم به روش ماتریس انتقال استفاده کردند [۱۹].

تاکنون پژوهش‌های متعددی با گستره وسیع و گوناگونی از فرضیات تسهیل کننده در مورد انتشار امواج در مواد متخلخل و مدل کردن آن‌ها (از جمله مدل فریم لیمپ و مدل فریم صلب)، انجام شده است. کامل‌ترین آن‌ها مدل فریم الاستیک است که بر اساس تئوری بایوت است. بر اساس این تئوری، سه نوع موج (دو موج طولی و یک موج برشی) در ماده متخلخل انتشار می‌یابند. امواج فریم به موج برشی و یکی از موج‌های طولی که به فاز فریم در ماده متخلخل نسبت داده می‌شود، اطلاق می‌گردد و نام موج طولی دیگر که به فاز سیال ارجاع داده می‌شود، موج فشاری آکوستیکی (هوا برد) است. 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 تعیین رفتار آکوستیکی آن‌ها دارد [۳-۴].

با وجود اینکه در سال‌های اخیر مدل‌های تحلیلی انتقال صوت بر مبنای تئوری صفحه نامحدود به طور قابل توجهی بسط و توسعه یافته‌اند، اما تاکنون رفتار آکوستیکی دیواره‌های دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی به روش تحلیلی و SEA و با شرایط مرزی متفاوت مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. از طرفی میزان تحریک هر سه موج انتشار یافته در لایه متخلخل به شرایط مرزی در سطح آن بستگی دارد، به همین دلیل تغییرات به ظاهر کوچک در شرایط مرزی نقش عمده‌ای در تعیین رفتار آکوستیکی آن‌ها دارد؛ بنابراین هدف اصلی این مقاله، بررسی اثرات شرایط مرزی مختلف بر روی افت انتقال صوت یک پنل دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی به دو روش تحلیلی و SEA و همچنین شناسایی پارامترهای مؤثر بر آن و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی متفاوت به ویژه در محدوده فرکانس بالا است.

## ۲- تشریح مسئله

شکل ۱ و ۲، نمای کلی مسئله مورد مطالعه را به همراه نحوه انتشار امواج در این سازه‌ها، تحت شرایط مرزی متفاوت نمایش می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود، یک موج صفحه‌ای با زاویه  $\gamma$  به یک پنل دوجداره کامپوزیتی لایه‌ای به ضخامت‌های  $h_{p1}$  و  $h_{p2}$  و با ابعاد عرضی نامحدود (نسبت به ضخامت آن) برخورد می‌کند.

همان طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد لایه متخلخل بین دو پنل کامپوزیتی کاملاً مقید شده است (حالت B-B)<sup>۵</sup>، اما در شکل ۲ یک فاصله هوایی بین لایه متخلخل و یکی از پنل‌ها وجود دارد (حالت B-U)<sup>۶</sup>. مشخصات فیزیکی و هندسی لایه متخلخل مورد استفاده بین دو پنل کامپوزیتی در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین خواص مواد به کار رفته در لایه‌های پنل کامپوزیتی در جدول ۲ ارائه شده است. ضخامت لایه‌ها  $1/25$  میلی‌متر و نحوه چیدمان آن‌ها به صورت  $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$  فرض شده است.

فرکانس‌های بالا است. این مواد شامل دو فاز جامد (فریم) و سیال می‌باشند که انرژی آکوستیکی را در اثر واکنش دو فاز جامد و سیال دفع می‌کنند. این فرایند توسط جریان بازگشت‌ناپذیر گرما از سیال به فریم، ویسکوزیته برشی سیال در نزدیکی سطح فریم و ویسکوزیته سازه‌های ناشی از تغییر شکل لایه‌های تشکیل‌دهنده فریم صورت می‌گیرد. از سوی دیگر در سال‌های اخیر، از پنل‌ها و پوسته‌های چند لایه کامپوزیتی در ساخت بدنه خودرو و هواپیما استفاده می‌شود به گونه‌ای که در این ورقه‌ها مواد متخلخل را بجای هوای موجود در بین دو لایه قرار می‌دهند؛ این موضوع باعث شده که مسئله تحلیل انتقال صوت چنین سازه‌هایی همواره مورد توجه مهندسين قرار گیرد [۱].

اولین کار ارائه شده در مورد مدل‌سازی آکوستیکی مواد متخلخل توسط ریلی انجام شد. در این مدل فرض شده بود که فاز جامد ماده بدون حرکت است [۲]. در سال ۱۹۵۶ مدل ارائه شده توسط بایوت، انتشار موج برشی مربوط به فاز جامد را نیز در بر می‌گرفت [۳-۴]. با اصلاح معادلات بایوت، آتالا و همکارانش، روش کارآمدتری برای حل عددی معادلات انتشار موج در مواد متخلخل الاستیک معرفی کردند. آن‌ها بر پایه معادلات اصلاح شده بایوت، روابط المان محدود را جهت تحلیل آکوستیکی مواد متخلخل به کار گرفتند [۵]. اسگارد و همکارانش نیز بر مبنای این روابط، ضریب عبور یک مانع صوت چند لایه را محاسبه نموده و سپس به بررسی تأثیر جنس و ضخامت لایه متخلخل بین دو لایه دیگر پرداختند [۶]. بولتون و همکارانش مدل جدیدی بنام مدل لیمپ<sup>۱</sup> را که حالتی بین مدل صلب<sup>۲</sup> و الاستیک<sup>۳</sup> بود، معرفی نمودند. آن‌ها ضمن بازنویسی معادلات برای مدل جدید، نحوه استفاده از آن را به همراه روش ماتریس انتقال، شرح دادند [۷]. در ادامه ایشان یک روش تحلیلی بر اساس تئوری بایوت ارائه دادند که در آن مواد متخلخل به صورت یک ماده همگن فرض شده‌اند. این تئوری هر سه نوع موج (دو موج طولی و یک موج برشی) انتشار یافته در ماده متخلخل را در نظر می‌گرفت [۸]. آلارد معادلات حاکم بر انتشار صوت در سیال، لایه متخلخل، مواد متخلخل بافریم صلب و مواد متخلخل الاستیک و تحلیل آن‌ها را ارائه نمود [۹].

سیمرمن و همکارانش در مدل‌سازی آکوستیکی خودرو از مدل SEA<sup>۴</sup> برای شبیه‌سازی رفتار مواد مانع صوت، به عنوان یکی از زیرسیستم‌های خودرو، استفاده کردند [۱۰]. البته در این مدل‌سازی آن‌ها از نتایج تجربی استفاده نمودند. در سال ۲۰۰۲، زنگ و همکارانش اثر پنل‌های فولادی لمینیت را بر روی سطح صدای داخل خودرو مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با تحلیل مدل کامل SEA یک خودرو و مطالعه تطبیقی افت انتقال صوت حاصل از پنل‌های لمینیت با پنل‌های معمولی، دریافتند که پنل‌های لمینیت بکار رفته در پنل داشبورد و قسمت جلوی سقف، بهتر می‌توانند نویز حاصل از صدای جاده و سیستم نیروی محرکه خودرو را کاهش دهند [۱۱]. در سال ۲۰۰۴ تادو و همکارانش به روش تحلیلی و آزمایشگاهی، شاخص کاهش صوت را برای سه دیواره تک و دوجداره از جنس‌های شیشه، فولاد و بتن بدست آوردند [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 نیز رفتار ارتعاشات آکوستیک سازه‌های دو جداره را مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. سپس در سال ۲۰۱۱ ژین و لو، افت انتقال صوت سازه‌های دو

1- Limp Model  
2- Rigid Model (Equivalent Fluid Model)  
3- Elastic Model (Poroelastic Model)  
4- Statistical Energy Analysis

5- Bounded-Bounded  
6- Bounded-Unbounded

و با در نظر گرفتن کوپلینگ لزجت و اینرسی<sup>۷</sup> در نوشتن معادلات دینامیک انتقال تنش و نیز در نظر گرفتن کوپلینگ 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 [۴-۵]:

$$\nabla^4 e_s + A_1 \nabla^2 e_s + A_2 e_s = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \bar{\omega} + \xi_4^2 \bar{\omega} = 0 \quad (2)$$

در معادلات فوق،  $e_s = \nabla \cdot \bar{u}$  کرنش حجمی فاز جامد ( $\bar{u}$  بردار جابجایی فاز جامد است)،  $\bar{\omega} = \nabla \times \bar{u}$  کرنش چرخشی فاز جامد<sup>۸</sup> و  $A_1$  و  $A_2$  به ترتیب از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آیند [۸]:

$$A_1 = \frac{\omega^2}{(\phi\mu - \chi^2)} (\hat{\rho}_{11}\mu + \hat{\rho}_{22}\phi - 2\hat{\rho}_{12}\chi) \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{\omega^4}{(\phi\mu - \chi^2)} (\hat{\rho}_{11}\hat{\rho}_{22} - \hat{\rho}_{12}^2) \quad (4)$$

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 هوا برد) است، به ترتیب از روابط (۵) و (۶) بدست می‌آیند:

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

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

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

$$\xi_4^2 = \left(\frac{\omega^2}{\delta}\right) [\hat{\rho}_{11} - (\hat{\rho}_{12})^2 / \hat{\rho}_{22}] \quad (7)$$

در روابط (۳) تا (۷)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $\delta$  مدول برشی و ضرایب  $\phi$ ،  $\chi$  و  $\mu$  با آزمایش‌هایی که توسط بایوت ارائه شده‌اند، به خواص الاستیک ماده متخلخل مربوط می‌شوند (نحوه محاسبه این پارامترها در مراجع [۸، ۱۷] به تفصیل آورده شده‌اند). همچنین پارامترهای  $\hat{\rho}_{11}$  و  $\hat{\rho}_{22}$  به ترتیب چگالی مؤثر دو فاز جامد و سیال ماده متخلخل و  $\hat{\rho}_{12}$  چگالی کوپلینگ جهت در نظر گرفتن اثر ویسکوزیته سیال است که از روابط (۸) تا (۱۰) بدست می‌آیند:

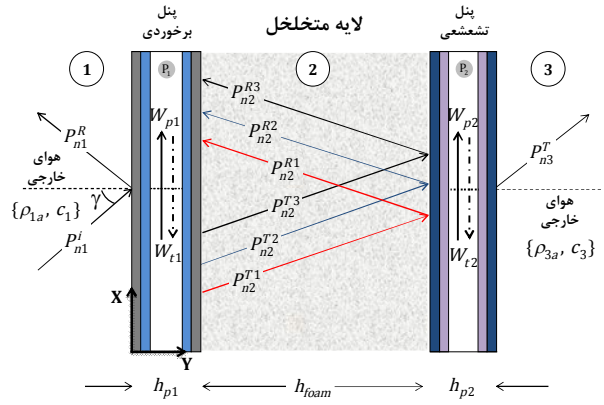
$$\hat{\rho}_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\sigma_r \varphi^2 \left( \frac{1}{\omega} + \frac{4j\alpha_{\infty}^2 k_v \rho_0}{\sigma_r^2 \Lambda^2 \varphi^2} \right) \quad (8)$$

$$\hat{\rho}_{22} = \rho_2 + \rho_a - j\sigma_r \varphi^2 \left( \frac{1}{\omega} + \frac{4j\alpha_{\infty}^2 k_v \rho_0}{\sigma_r^2 \Lambda^2 \varphi^2} \right) \quad (9)$$

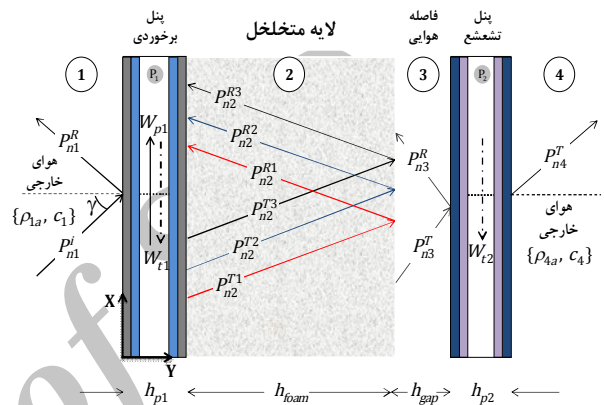
جدول ۲ مشخصات مواد به کار رفته در لایه‌های پنل کامپوزیتی [۱۷]

متغیرها	گرافیت اپوکسی <sup>۹</sup>	بورون	گلاس	آلومینیوم
مدول یانگ	۱۳۷/۹	۲۰/۶	۳۸/۶	۷۰
در راستای x (GPa)				
مدول یانگ	۸/۹۶	۲۰/۶	۸/۲۷	۷۰
در راستای z (GPa)				
مدول برشی (GPa)	۷/۱	۶/۸۹	۴/۱۴	۲۶/۳
چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	۱۶۰۰	۱۶۰۰	۱۹۰۰	۲۷۰۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۲۶	۰/۳۳

7- Viscous and Inertia Coupling  
8- Rotational Strain of the Solid Phase  
9- Graphite/Epoxy  
10- Boron/Epoxy  
11- Glass/Epoxy



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



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

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و هندسی لایه متخلخل [۸]

متغیرها	پلی یورتان
ضخامت (m)	۰/۰۲
تخلخل <sup>۱</sup>	۰/۹
مقاومت جریانی <sup>۲</sup> (Nm <sup>-4</sup> s)	۲۵۰۰۰
ضریب سازه <sup>۳</sup>	۷/۸
طول مشخصه ویسکوز <sup>۴</sup> (m)	۲/۲۶ × ۱۰ <sup>-۴</sup>
طول مشخصه حرارتی <sup>۵</sup> (m)	۲/۲۶ × ۱۰ <sup>-۴</sup>
چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	۳۰
مدول یانگ (MPa)	۰/۸
ضریب پواسن	۰/۴
میرایی سازه	۰/۲۶۵

هدف محاسبه ضریب افت انتقال صوت (TL) این دو سازه به روش تحلیلی و SEA و نیز بررسی پارامترهای فیزیکی مؤثر بر ضریب افت انتقال صوت سازه مورد نظر با توجه به شرایط مرزی موجود است.

### ۳- تحلیل افت انتقال صوت سازه به روش تحلیلی

#### ۳-۱- معادلات انتشار موج

جهت تحلیل و محاسبه ضریب افت انتقال صوت (TL)<sup>۶</sup> پنل‌های دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی، ابتدا باید معادلات انتشار امواج در لایه متخلخل استخراج گردد. از این‌رو بر مبنای تئوری بایوت (مدل فریم الاستیک)

1- Porosity  
2- Flow Resistivity  
3- Tortuosity  
4- Viscous Characteristic Length  
5- Thermal Characteristic Length  
6- Transmission Loss

$$\begin{aligned}
& + (2\delta \frac{\xi_{\beta y}^2}{\xi_{\beta}^2} + A + b_2 \chi) p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y} \\
& + 2\delta \frac{\xi_{4y} \xi_x}{\xi_4^2} (p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} - p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y}) \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{t}_{xy} = e^{-j\xi_x x} \delta \left[ 2 \frac{\xi_{\alpha y} \xi_x}{\xi_{\alpha}^2} (p_{n2}^{T1} e^{-j\xi_{\alpha y} y} - p_{n2}^{R1} e^{j\xi_{\alpha y} y}) \right. \\
\left. + 2 \frac{\xi_{\beta y} \xi_x}{\xi_{\beta}^2} (p_{n2}^{T2} e^{-j\xi_{\beta y} y} - p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y}) \right. \\
\left. + \frac{(\xi_x^2 - \xi_4^2)}{\xi_4^2} (p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} + p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y}) \right] \quad (18)
\end{aligned}$$

مؤلفه‌های جابجایی در فاز سیال عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
\hat{U}_x = j\xi_x e^{-j\xi_x x} \left[ b_1 \frac{p_{n2}^{T1}}{\xi_{\alpha}^2} e^{-j\xi_{\alpha y} y} + b_1 \frac{p_{n2}^{R1}}{\xi_{\alpha}^2} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + j\xi_x e^{-j\xi_x x} \left[ b_2 \frac{p_{n2}^{T2}}{\xi_{\beta}^2} e^{-j\xi_{\beta y} y} + b_2 \frac{p_{n2}^{R2}}{\xi_{\beta}^2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right] \right. \\
\left. - jg \frac{\xi_{4y}}{\xi_4^2} e^{-j\xi_x x} \left[ p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} - p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y} \right] \right] \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{U}_y = je^{-j\xi_x x} \left[ b_1 \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} p_{n2}^{T1} e^{-j\xi_{\alpha y} y} - b_1 \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} p_{n2}^{R1} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + je^{-j\xi_x x} \left[ b_2 \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} p_{n2}^{T2} e^{-j\xi_{\beta y} y} - b_2 \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right] \right. \\
\left. + jg \frac{\xi_x}{\xi_4^2} e^{-j\xi_x x} \left[ p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} + p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y} \right] \right] \quad (20)
\end{aligned}$$

مؤلفه‌ی تنش در فاز سیال عبارت است از:

$$\hat{\sigma}^f = e^{-j\xi_x x} \left[ (\chi + b_1 \mu) p_{n2}^{T1} e^{-j\xi_{\alpha y} y} + (\chi + b_1 \mu) p_{n2}^{R1} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + (\chi + b_2 \mu) p_{n2}^{T2} e^{-j\xi_{\beta y} y} + (\chi + b_2 \mu) p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right] \quad (21)$$

ضرایب موجود در روابط (۱۵) تا (۲۱)، از طریق رابطه (۲۲) قابل محاسبه‌اند:

$$\begin{aligned}
\xi_{iy} = \sqrt{\xi_i^2 - \xi_x^2} \quad @ i = \alpha, \beta, 4 \\
\delta = \frac{E}{2(1+\nu)} \\
b_1 = \frac{\hat{\rho}_{11} - \hat{\rho}_{12}\chi}{\hat{\rho}_{22}\chi - \hat{\rho}_{12}\mu} - \frac{\phi\mu - \chi^2}{\omega^2(\hat{\rho}_{22}\chi - \hat{\rho}_{12}\mu)} \xi_{\alpha}^2 \\
b_2 = \frac{\hat{\rho}_{11} - \hat{\rho}_{12}\chi}{\hat{\rho}_{22}\chi - \hat{\rho}_{12}\mu} - \frac{\phi\mu - \chi^2}{\omega^2(\hat{\rho}_{22}\chi - \hat{\rho}_{12}\mu)} \xi_{\beta}^2 \\
A = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\
g = -\hat{\rho}_{12} / \hat{\rho}_{22} \quad (22)
\end{aligned}$$

که در رابطه (۲۲)،  $E$  و  $\nu$  به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته بالک و ضریب پواسون فاز جامد ماده متخلخل می‌باشند. همچنین قابل ذکر است که شش پارامتر مربوط به دامنه فشار لایه متخلخل متشکل از سه موج تابش  $(p_{n2}^{T1})$ ،  $(p_{n2}^{T2})$  و  $(p_{n2}^{T3})$  و سه موج بازتابش  $(p_{n2}^{R1})$ ،  $(p_{n2}^{R2})$  و  $(p_{n2}^{R3})$  مورد استفاده در روابط (۱۵) تا (۲۱)، با اعمال شرایط مرزی تعیین می‌شوند.

### ۳-۲- معادلات کلاسیک ارتعاشات کامپوزیت‌ها

با توجه به اینکه پل‌ها از مواد کامپوزیتی ساخته شده‌اند لذا در این قسمت روابط مهم مربوط به مواد کامپوزیت لایه‌ای و همچنین معادلات حرکت آنکه

$$\hat{\rho}_{12} = -\rho_a + j\sigma_r \varphi^2 \left( \frac{1}{\omega} + \frac{4j\alpha_{\infty}^2 k_v \rho_0}{\sigma_r^2 \Lambda^2 \varphi^2} \right) \quad (10)$$

که  $\rho_2$  و  $\rho_a$  به صورت روابط (۱۱) بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned}
\rho_2 = \rho_0 \varphi \\
\rho_a = \rho_2 (\alpha_{\infty} - 1) \quad (11)
\end{aligned}$$

در روابط (۸) تا (۱۱)،  $\rho_1$  چگالی بالک مربوط به فاز جامد،  $\rho_0$  چگالی مربوط به فاز سیال و  $\rho_a$  بیانگر کوپلینگ اینرسی موجود بین دو فاز جامد و سیال می‌باشند. همچنین در روابط بالا،  $\alpha_{\infty}$ ،  $\varphi$ ،  $\sigma_r$ ،  $\Lambda$  و  $k_v$  به ترتیب ضریب سازه، مقاومت جریانی، تخلخل، طول مشخصه ویسکوز و لزجت هوا می‌باشند.

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  $x-y$  است، پتانسیل موج برخوردی مطابق رابطه (۱۲) است:

$$\xi_i = e^{-j(\xi_x x + \xi_y y)} \quad (12)$$

که  $\xi_x$  و  $\xi_y$  به ترتیب با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) تعیین می‌شوند:

$$\xi_x = (\omega / c_1) \sin \gamma \quad (13)$$

$$\xi_y = (\omega / c_1) \cos \gamma \quad (14)$$

در معادلات (۱۳) و (۱۴)،  $c_1$  سرعت انتشار صوت در محیط برخورد و  $\gamma$  زاویه بین موج برخوردی و خط عمود بر سطح برخورد می‌باشند. همان طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود شش موج (سه موج جلو رونده و سه موج بازگشتی)، با مؤلفه طولی عدد موج یکسان، در لایه متخلخل با عمق محدود منتشر می‌شوند. با فرض یک پاسخ ساده برای کرنش فاز جامد و سیال ماده متخلخل، مؤلفه‌های جابجایی و تنش مربوط به دو فاز جامد و سیال در راستای  $x$  و  $y$  به صورت روابط (۱۵) تا (۲۱) محاسبه خواهند شد [۸]:

مؤلفه‌های جابجایی در فاز جامد عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
\hat{u}_x = j\xi_x e^{-j\xi_x x} \left[ \frac{p_{n2}^{T1}}{\xi_{\alpha}^2} e^{-j\xi_{\alpha y} y} + \frac{p_{n2}^{R1}}{\xi_{\alpha}^2} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + j\xi_x e^{-j\xi_x x} \left[ \frac{p_{n2}^{T2}}{\xi_{\beta}^2} e^{-j\xi_{\beta y} y} + \frac{p_{n2}^{R2}}{\xi_{\beta}^2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right] \right. \\
\left. - j \frac{\xi_{4y}}{\xi_4^2} e^{-j\xi_x x} \left[ p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} - p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y} \right] \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{u}_y = je^{-j\xi_x x} \left[ \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} p_{n2}^{T1} e^{-j\xi_{\alpha y} y} - \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} p_{n2}^{R1} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + je^{-j\xi_x x} \left[ \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} p_{n2}^{T2} e^{-j\xi_{\beta y} y} - \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right] \right. \\
\left. + j \frac{\xi_x}{\xi_4^2} e^{-j\xi_x x} \left[ p_{n2}^{T3} e^{-j\xi_{4y} y} + p_{n2}^{R3} e^{j\xi_{4y} y} \right] \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

مؤلفه‌های تنش در فاز جامد عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
\hat{\sigma}_y^s = e^{-j\xi_x x} \left[ (2\delta \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} + A + b_1 \chi) p_{n2}^{T1} e^{-j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + (2\delta \frac{\xi_{\alpha y}}{\xi_{\alpha}^2} + A + b_1 \chi) p_{n2}^{R1} e^{j\xi_{\alpha y} y} \right. \\
\left. + (2\delta \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} + A + b_2 \chi) p_{n2}^{T2} e^{-j\xi_{\beta y} y} \right. \\
\left. + (2\delta \frac{\xi_{\beta y}}{\xi_{\beta}^2} + A + b_2 \chi) p_{n2}^{R2} e^{j\xi_{\beta y} y} \right]
\end{aligned}$$

در رابطه (۲۹)،  $A_{ij}$  سفتی کششی ماده کامپوزیت در راستای عرضی،  $B_{ij}$  سفتی کوپلینگ کششی-خمشی ماده کامپوزیت در راستای عرضی،  $D_{ij}$  سفتی خمشی ماده کامپوزیت در راستای عرضی و تابع  $Y$  بیانگر ارتفاع هر لایه است و به ترتیب با روابط (۳۰) الی (۳۲) بدست می‌آیند:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^l \bar{Q}_{ij}^{(k)} (Y_{k+1} - Y_k), \dots, i, j=1,2,6 \quad (30)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \bar{Q}_{ij}^{(k)} (Y_{k+1}^2 - Y_k^2), \dots, i, j=1,2,6 \quad (31)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^l \bar{Q}_{ij}^{(k)} (Y_{k+1}^3 - Y_k^3), \dots, i, j=1,2,6 \quad (32)$$

همچنین  $\bar{Q}_{ij}^{(k)}$  برابر است با سختی دوبعدی لایه  $k$ ام ماده کامپوزیتی و روابط آن در مرجع [۲۰] آورده شده است.

با جایگذاری روابط (۲۸) و (۲۹) در معادله کار مجازی و صفر قرار دادن ضرایب جایجایی مجازی در این معادله، معادلات حرکت، مطابق رابطه (۳۳)، بدست خواهند آمد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xz}}{\partial z} &= I_0 \frac{\partial^2 U_0}{\partial t^2} - I_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial W_0}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial N_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial N_{zz}}{\partial z} &= I_0 \frac{\partial^2 V_0}{\partial t^2} - I_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial W_0}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xz}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 M_{zz}}{\partial z^2} + q &= \\ I_0 \frac{\partial^2 W_0}{\partial t^2} + I_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial U_0}{\partial x} + \frac{\partial V_0}{\partial z} \right) & \quad (33) \end{aligned}$$

در روابط (۳۳)،  $q$  بیانگر کل بار عرضی و  $I_0$  و  $I_1$  ممان اینرسی جرمی می‌باشند که به ترتیب از رابطه (۳۴) و (۳۵) قابل محاسبه‌اند:

$$I_0 = \sum_{k=1}^l \rho^{(k)} (Y_{k+1} - Y_k) \quad (34)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \rho^{(k)} (Y_{k+1}^2 - Y_k^2) \quad (35)$$

که در این روابط،  $\rho^{(k)}$  چگالی ماده در لایه  $k$ ام است.

### ۳-۳- تعریف 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 جایجایی عرضی و جایجایی صفحه‌ای در محور خنثی که مطابق روابط (۳۶) و (۳۷) می‌باشند:

$$W_t(x, t) = W_t^0 e^{j(\omega t - \xi_x x)} \quad (36)$$

$$W_p(x, t) = W_p^0 e^{j(\omega t - \xi_x x)} \quad (37)$$

چهار شرط مرزی در سطح مشترک خواهیم داشت [۸، ۱۷] که مطابق روابط (۳۸) تا (۴۱) داریم:

$$V_y = j\omega W_t \quad (38)$$

$$\hat{u}_y = W_t \quad (39)$$

$$\hat{U}_y = W_t \quad (40)$$

$$\hat{u}_x = W_p(\pm)(h_p/2)(dW_t/dx) \quad (41)$$

و دو شرط دیگر، با توجه به رابطه (۳۳)، از معادلات حرکت پل کامپوزیتی

برای تحلیل آکوستیکی مسئله مورد نیاز است، بیان می‌گردد. در این مقاله برای تحلیل مواد کامپوزیتی از تئوری کلاسیک استفاده شده است که بر مبنای دو فرض اساسی زیر (فرضیات کِرشف<sup>۱</sup>) است [۲۰]:

۱- خط راست عمود بر نیم صفحه (نرمال عرضی) قبل و بعد از تغییر شکل شکل صفحه در همان راستا باقی می‌ماند.

۲- چرخش نرمال عرضی بعد از تغییر شکل، عمود بر نیم صفحه باقی می‌ماند. بر طبق فرض اول  $\varepsilon_{yy} = 0$  خواهد شد یا به عبارتی کرنش در جهت

ضخامت برابر صفر هست؛ اما بر مبنای فرض دوم  $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$  خواهند شد. روابط جابه‌جایی بر مبنای این تئوری به فرم رابطه (۲۳) است:

$$U = U_0 - y \frac{\partial W_0}{\partial x}, \quad V = V_0 - y \frac{\partial W_0}{\partial z}, \quad W = W_0 \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)،  $U_0$ ،  $V_0$  و  $W_0$  جابه‌جایی صفحه میانی  $x-z$  (معرف محور طولی و  $z$  معرف محور عرضی است) می‌باشند. از طرفی روابط کرنش برحسب جابه‌جایی به صورت روابط (۲۴) بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial V}{\partial z} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial W}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \\ \gamma_{yz} &= \left( \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right), \quad \gamma_{xz} = \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

با جایگذاری روابط (۲۳) در رابطه (۲۴)، رابطه (۲۵) حاصل می‌شود:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{(0)}\} + y\{\varepsilon^{(1)}\} \quad (25)$$

که در رابطه (۲۵)،  $\{\varepsilon^{(0)}\}$  و  $\{\varepsilon^{(1)}\}$  به ترتیب کرنش پوسته<sup>۲</sup> (غشاء) و کرنش خمشی<sup>۳</sup> می‌باشند (جزئیات بیشتر در مرجع [۲۰] آمده است).

رابطه برابری نیروها<sup>۴</sup> و گشتاورها<sup>۵</sup> برحسب تنش نیز طبق روابط (۲۶) و (۲۷) عبارت‌اند از:

$$\{N\}_{3 \times 1} = \int_{-h_p/2}^{h_p/2} \{\sigma\}_{3 \times 1} dy \quad (26)$$

$$\{M\}_{3 \times 1} = \int_{-h_p/2}^{h_p/2} \{\sigma\}_{3 \times 1} y dy \quad (27)$$

و رابطه تنش برحسب کرنش طبق رابطه (۲۸) عبارت است از:

$$\{\sigma\}_{3 \times 1} = [\bar{Q}]_{3 \times 3} \times \{\varepsilon\}_{3 \times 1} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸) ماتریس  $\bar{Q}$ ، ماتریس سختی یک ماده کامپوزیتی اورتوتروپیک عمومی در راستای محور مختصات پل است که مقادیر مربوط به آن در مرجع [۲۰] آورده شده است. حال با جایگزینی رابطه (۲۸) در روابط (۲۶) و (۲۷) و با لحاظ فرضیات مربوط به معادلات کلاسیک، معادلات نیرو و گشتاور برحسب کرنش به فرم معادله (۲۹) استخراج می‌گردند:

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{zz} \\ N_{xz} \\ M_{xx} \\ M_{zz} \\ M_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^{(0)} \\ \varepsilon_{zz}^{(0)} \\ \gamma_{xz}^{(0)} \\ \varepsilon_{xx}^{(1)} \\ \varepsilon_{zz}^{(1)} \\ \gamma_{xz}^{(1)} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

- 1- Kirchhoff Hypothesis
- 2- Transverse Normal
- 3- Membrane Strains
- 4- Flexural (Bending) Strains
- 5- Force Resultants
- 6- Moment Resultants

## ۳-۴- حل معادلات و محاسبه ضریب TL سازه

مطابق شکل ۱، در حالت (B-B)، ۱۳ دسته موج در این سازه انتشار می‌یابد. دو موج برخوردی و بازتابش آن به محیط ۱ ( $p_{n1}^R$  و  $p_{n1}^I$ )، چهار موج در صفحه‌ها (یک موج عرضی و یک موج برشی برای هر صفحه مجموعاً  $(W_{p2}^0, W_{t2}^0, W_{p1}^0, W_{t1}^0)$ )، سه موج تابش و سه موج بازتابش (مجموعاً شش موج) در لایه متخلخل ( $p_{n2}^{T3}, p_{n2}^{R2}, p_{n2}^{T2}, p_{n2}^{R1}, p_{n2}^{T1}$ ) 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 (۳۸) الی (۴۳) به دلیل وجود هشت شرط مرزی (مقید بودن ماده متخلخل در دو طرف) و چهار معادله حرکت، در مجموع ۱۲ معادله به فرم ماتریسی  $[H]_{12 \times 1} = \{H\}_{12 \times 1}$  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 پنل‌ها، در مجموع ۱۳ معادله به فرم  $[H]_{13 \times 1} = \{H\}_{13 \times 1}$  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  $\gamma$  محاسبه نمود.

با توجه به اینکه زوایای موج برخوردی به سازه در عمل معمولاً 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<sup>۳</sup>، ضریب افت توان میانگین،  $\bar{\tau}$ ، مطابق رابطه (۵۱) محاسبه می‌گردد [۲۱]:

$$\bar{\tau} = 2 \int_0^{\gamma_m} \tau(\gamma) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma \quad (51)$$

در معادله (۵۱)،  $\tau(\gamma)$  متناسب است با مجذور دامنه  $p_{n3}^T / p_{n1}^I$  و  $\gamma_m$  زاویه برخورد ماکزیمم است که معمولاً بین ۷۰ تا ۸۵ درجه، بسته به شرایط مسئله انتخاب می‌شود. (در اینجا مقدار  $\gamma_m$  برابر ۷۸ درجه انتخاب شده است [۲۲]). در نهایت با حل انتگرال معادله (۵۱) توسط روش عددی سیمپسون، ضریب افت انتقال صوت میانگین ( $TL_{avg}$ ) این سازه از رابطه (۵۲) بدست می‌آید:

$$TL_{avg} = 10 \log \left( \frac{1}{\bar{\tau}} \right) \quad (52)$$

قابل ذکر است که در ادامه، نتایج حاصل از نوشتن کد توسعه یافته توسط نرم‌افزار مطلب جهت حل معادلات ماتریسی فوق و نیز محاسبه ضریب TL سازه دوجداره تحت هر دو شرط مرزی (B-B) و (B-U)، به تفصیل ارائه شده است.

## 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 اجزاء محدود و المان مرزی در محدوده فرکانسی بالا عملاً کارایی نخواهند داشت، از روش SEA جهت بررسی صحت نتایج مدل تحلیلی استفاده شده است؛ بنابراین در این بخش، نحوه شبیه‌سازی مدل SEA یک پنل کامپوزیتی دوجداره با لایه میانی متخلخل توسط نرم‌افزار آتوسی<sup>۴</sup> ارائه شده است [۲۳].

بدست خواهند آمد که طبق روابط (۴۲) و (۴۳) خواهیم داشت:

$$\hat{\tau}_{xy}(\pm) = (A_{11}^{(i)} \xi_x^2 - I_0^{(i)} \omega^2) W_p + (j B_{11}^{(i)} \xi_x^3 - j I_1^{(i)} \omega^2 \xi_x) W_t \quad (42)$$

$$\begin{aligned} (\pm) P (\mp) \hat{\sigma}_y^s - j \xi_x (h_p / 2) \hat{\tau}_{xy} = \\ (D_{11}^{(i)} \xi_x^4 - I_0^{(i)} \omega^2) W_t + (j I_1^{(i)} \omega^2 \xi_x - j B_{11}^{(i)} \xi_x^3) W_p \end{aligned} \quad (43)$$

در معادلات (۳۸) تا (۴۳)،  $h_p$  ضخامت صفحه،  $I_0^{(i)}$  و  $I_1^{(i)}$  ممان اینرسی جرمی جداره  $i$  ام،  $A_{11}^{(i)}$  سفتی طولی صفحه در واحد عرض آن،  $B_{11}^{(i)}$  سفتی کوبلینگ کششی-خمشی در راستای عرضی و  $D_{11}^{(i)}$  سفتی خمشی صفحه در واحد سطح ماده کامپوزیت می‌باشند که در بخش قبل روابط مربوط به آن‌ها بیان گردید. همچنین،  $P$  فشار محیط آکوستیکی خارجی و  $V_y$  مؤلفه عمودی سرعت در سطح تماس می‌باشند. در شرایط مرزی فوق، علامت اول برای اتصال ماده متخلخل به طرف مثبت راستای  $y$  صفحه و علامت دوم برای اتصال ماده متخلخل به طرف منفی راستای  $y$  بکار می‌رود [۱۷].

مطابق شکل ۴، در حالی 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، مطابق روابط (۴۴) تا (۴۷)، بایستی ارضاء شوند:

$$\hat{\sigma}^f = -\varphi P \quad (44)$$

$$\hat{\sigma}_y^s = (\varphi - 1) P \quad (45)$$

$$V_y = j\omega(1 - \varphi) \hat{u}_y + j\omega\varphi \hat{U}_y \quad (46)$$

$$\hat{\tau}_{xy} = 0 \quad (47)$$

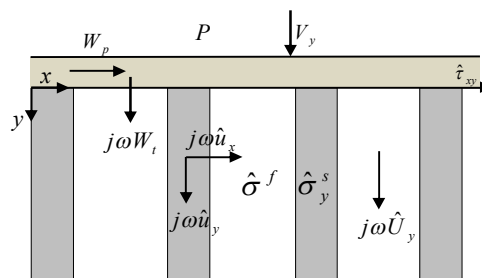
و در سطح مشترک بین صفحه و فاصله هوایی نیز سه شرط مرزی، مطابق روابط (۴۸) تا (۵۰)، بایستی صادق باشند:

$$V_{1y} = j\omega W_t \quad (48)$$

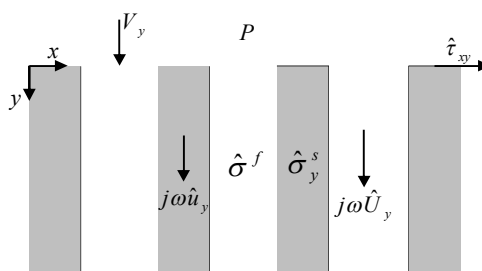
$$V_{2y} = j\omega W_t \quad (49)$$

$$P_1 - P_2 = (D_{11}^{(i)} \xi_x^4 - I_0^{(i)} \omega^2) W_t \quad (50)$$

در روابط (۴۴) تا (۵۰)،  $P_1$  و  $P_2$  فشار آکوستیکی فاصله هوایی و  $V_{1y}$  و  $V_{2y}$  مؤلفه عمودی سرعت صفحه در هر دو سمت سطح صفحه، در محل تماس می‌باشند.



شکل ۳ مقطع عرضی یک لایه متخلخل مقید شده توسط یک پنل [۸،۱۷]



شکل ۴ مقطع عرضی یک لایه متخلخل در مجاورت فاصله هوایی [۸،۱۷]

3- Paris Formula  
4- AutoSEA2

1- Bounded Case  
2- Unbounded Case

تشکیل می‌دهد. جاذب کنترل نویز اعمال شده به پنل کامپوزیتی، متشکل از دو لایه زیر است:

۱. یک لایه ۲۷ میلی‌متری از جنس ماده متخلخل (فوم)
۲. یک پنل کامپوزیتی به ضخامت ۱/۲۷ میلی‌متر به عنوان پنل تشعشعی
- ۳- اتاق گیرنده که به صورت یک اتاق غیر انعکاسی کاملاً جاذب فرض شده است. قابل ذکر است که علت انتخاب این ابعاد، وجود نتایج آزمایشگاهی برای این سازه‌ها در مرجع [۸] است.

بعد از ایجاد زیرسیستم‌ها بایستی آن‌ها را به یکدیگر متصل کرد. در مدل‌سازی انجام‌گرفته یک اتصال صفحه‌ای بین سطح پنل و سطوح مشترک آن با دو اتاق منبع و گیرنده ایجاد می‌گردد. با توجه به استاندارد ASTM E90، اتاق منبع توسط یک منبع تولیدکننده صوت (دیفیوز) تحریک می‌شود، لذا در اینجا نیز یک تحریک خارجی از نوع منبع پراکنده صوتی به زیرسیستم ۱ (اتاق منبع) اعمال می‌کنیم. محل اعمال این تحریک خارجی اهمیتی ندارد زیرا مدل SEA اتاق منبع به صورت یک زیرسیستم واحد در نظر گرفته شده است و نرم‌افزار 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.

در حالت کلی معادلات بالانس توان (تعادل توان) در حالت پایا برای این سه زیرسیستم به صورت رابطه (۵۳) خواهد شد [۲۴]:

$$\Pi_i^{in} = \Pi_i^{diss} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \Pi_{ji} \quad (53)$$

که در معادله (۵۳)،  $\Pi_i^{in}$ ، توان ورودی به زیرسیستم  $i$  ام،  $\Pi_i^{diss}$ ، توان اتلافی در زیرسیستم  $i$  ام و  $\Pi_{ij}$ ، توان انتقالی از زیرسیستم  $i$  ام به زیرسیستم  $j$  ام می‌باشند، که به صورت رابطه (۵۴) محاسبه می‌گردند:

$$\Pi_i^{diss} = \omega \eta_i E_i \quad , \quad \Pi_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad (54)$$

در رابطه (۵۴)،  $\eta_i$  ضریب اتلاف داخلی و  $\eta_{ij}$  ضریب اتلاف کوپلینگ می‌باشند. در ادامه با نوشتن معادلات بالانس توان برای هر یک از سه زیرسیستم و سپس با حل همزمان آن‌ها، افت انتقال صوت در بازه فرکانسی ۱۰۰ الی ۵۰۰۰ هرتز مطابق رابطه (۵۵) محاسبه خواهد شد [۲۴]:

$$TL = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left( \frac{\Pi_{inc}}{\Pi_{23} + \Pi_{13}} \right) \quad (55)$$

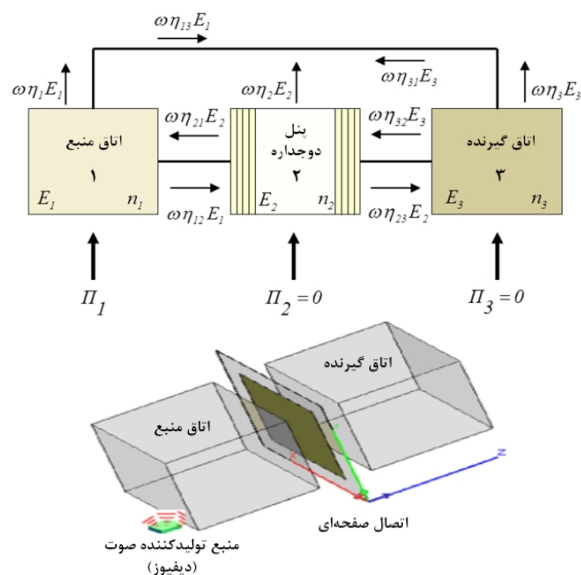
## ۵- نتایج، مقایسه و بحث

### ۵-۱- درستی سنجی

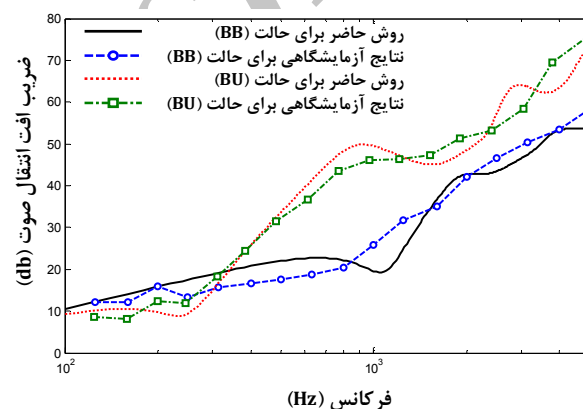
مطابق شکل‌های ۶ و ۷، برای نشان دادن درستی حل تحلیلی صورت گرفته برای یک پنل دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی در دو حالت (B-B) و (B-U)، نتایج بدست آمده از روش تحلیلی، به ترتیب با داده‌های آزمایشگاهی موجود [۸] و نتایج حل SEA، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

در شکل ۶، جنس پنل‌ها آلومینیوم و چیدمان لایه‌ها به صورت  $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$  در نظر گرفته شده‌اند.

حداکثر اختلاف بین نتایج حاصل از روش تحلیلی با روش آزمایشگاهی برای حالت (B-B) و (B-U) به ترتیب ۶/۹ و ۵/۹ دسی‌بل است. علت این اختلاف تأثیر بالای امواج سازه برد (از جمله: چگالی، بالک، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بالک) بر روی ضریب  $TL$  این سازه‌ها در هر دو حالت (B-U) و (B-B) است که این مسئله ناشی از اختلاف بین نحوه اعمال شرایط مرزی در محیط آزمایشگاهی و حل تحلیلی است؛ به عبارت دیگر، با توجه به شرایط



شکل ۵ مدل SEA پنل کامپوزیتی دوجداره با لایه متخلخل میانی به همراه جریان توان بین هر سه زیرسیستم



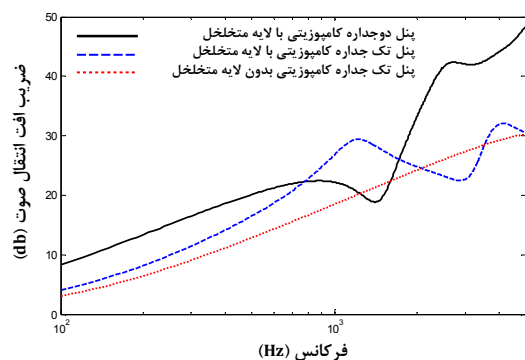
شکل ۶ مقایسه  $TL$  صفحه دوجداره به روش تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی [۸]

درمدل‌سازی سیستم فوق به روش SEA، سیستم مذکور شامل سه زیرسیستم است. زیرسیستم اول، اتاق منبع صوتی (چشمه‌ی صوت)، زیرسیستم دوم، پنل دوجداره کامپوزیتی با لایه متخلخل میانی و زیرسیستم سوم، اتاق دریافت کننده است. همچنین تنها زیرسیستم اول است که تحت تأثیر صوتی خارجی قرار دارد. شکل ۵ مدل SEA ایجاد شده، 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 بطوریکه اتاق منبع به صورت یک اتاق پژواک<sup>۱</sup> و گیرنده یک اتاق غیرانعکاسی<sup>۲</sup> فرض می‌شوند. با توجه به دوبعدی بودن مسئله مورد بحث، ابعاد اتاق‌ها و پنل نسبت به ضخامت کل دیواره دوجداره بسیار بزرگ در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، می‌توان زیرسیستم‌های مدل SEA سازه مذکور را به صورت زیر بیان نمود:

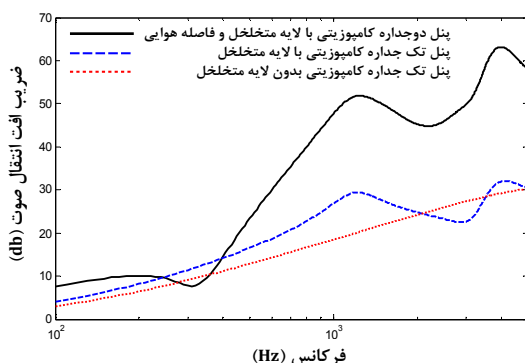
۱- اتاق منبع که به صورت یک اتاق پژواک با ضریب میرایی ۱٪ فرض شده است.

۲- پنل کامپوزیتی برخوردی به ضخامت ۱/۲۷ میلی‌متر که با اعمال یک جاذب کنترل نویز (NCT) دو لایه به آن، زیرسیستم ۲ (دیواره دوجداره) را

1- Reverberant Room  
2- Anechoic Room



شکل ۸ مقایسه ضریب TL یک پنل کامپوزیتی دوجداره با لایه متخلخل میانی، یک پنل تک جداره با و بدون لایه متخلخل در حالت (B-B)



شکل ۹ مقایسه ضریب TL یک پنل کامپوزیتی دوجداره با لایه متخلخل میانی، یک پنل تک جداره با و بدون لایه متخلخل در حالت (B-U)

همان طور که ملاحظه می‌شود استفاده از مواد متخلخل به عنوان یک لایه مابین دو جداره کامپوزیتی در بیشتر محدوده‌های فرکانسی، به ویژه در فرکانس‌های بالا و برای هر دو حالت (B-B) و (B-U) عملکرد مناسب‌تری نسبت به پنل تک جداره با و بدون لایه متخلخل میانی دارد.

#### ۲-۲-۵- بررسی تأثیر پارامترهای مرتبط با لایه متخلخل بر روی TL

در این بخش تلاش شده تا میزان حساسیت ضریب TL سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با لایه متخلخل مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای مرتبط با لایه متخلخل را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم نمود:

- دسته اول شامل ضخامت لایه متخلخل است.
- دسته دوم پارامترهای مرتبط با فاز سیال لایه متخلخل می‌باشند. این پارامترها عبارتند از: تخلخل، مقاومت جریانی و ضریب سازه.
- دسته سوم پارامترهای مرتبط با فاز جامد لایه متخلخل می‌باشند که عبارتند از: ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و چگالی بالک.

در ابتدا به عنوان اولین گزینه جهت بهبود رفتار آکوستیکی یک ماده عایق صوت، تأثیر افزایش ضخامت لایه متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب اثر افزایش ضخامت ماده متخلخل بر روی ضریب TL پنل دوجداره کامپوزیتی را در دو حالت (B-B) و (B-U) نمایش می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود افزایش ضخامت لایه متخلخل به دلیل کاهش طول موج امواج صوتی در مقایسه با فاصله میان دوجداره در برگیرنده لایه متخلخل، مخصوصاً در محدوده فرکانسی بالا، می‌تواند موجب بهبود عملکرد صوتی سازه گردد.

همچنین قابل ذکر است که مابین فرکانس بحرانی سازه و ضخامت لایه متخلخل رابطه عکس وجود دارد، به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه متخلخل، فرکانس بحرانی سازه در فرکانس‌های پایین‌تری رخ خواهد داد.

خاص آزمایشگاهی، هر میزان که تأثیر امواج هوا برد (از جمله تخلخل، مقاومت جریانی و ضریب سازه) بر روی انتقال صوت سازه بیشتر گردد اختلاف بین نتایج حاصل از روش تحلیلی با روش آزمایشگاهی کاهش پیدا می‌کند. با این حال، روند نتایج حاصله از روش حاضر و داده‌های آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

همچنین جهت مقایسه روش تحلیلی با شبیه‌سازی SEA، مطابق شکل ۷، پنل‌های کامپوزیتی به صورت ۱۰ لایه و از جنس پنل‌ها گرافیت اپوکسی و با چیدمان لایه‌ای  $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$  انتخاب شده‌اند.

همان طور که ملاحظه می‌شود در محدوده فرکانسی بالاتر از ۴۰۰ هرتز، استفاده از پنل‌های دوجداره کامپوزیتی با شرایط مرزی (B-U) عملکرد مناسب‌تری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-B) خواهند داشت و بالعکس، در فرکانس‌های پایین، کاربرد این پنل‌ها در حالت (B-B) اثر مطلوب‌تری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-U) خواهند داشت.

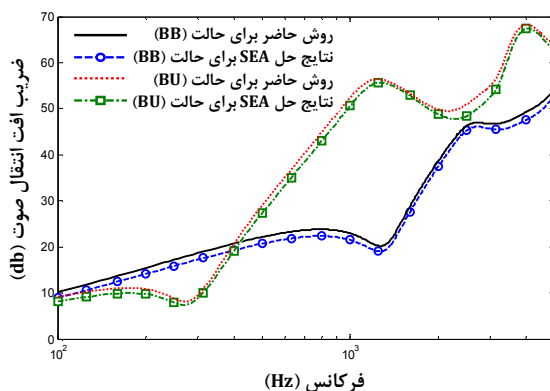
#### ۲-۲-۵- بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر TL سازه

در این بخش از مقاله، به شناسایی و بررسی پارامترهای مؤثر بر روی افت انتقال صوت سازه مذکور و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف پرداخته شده است. لذا ابتدا تأثیر وجود لایه متخلخل مابین پنل دوجداره کامپوزیتی بر روی ضریب افت انتقال صوت سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور کلیه پارامترها بر مبنای دو دسته زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- پارامترهای مرتبط با لایه متخلخل که شامل پارامترهای مرتبط با فاز سیال لایه متخلخل (تخلخل، مقاومت جریانی و ضریب سازه) و پارامترهای مرتبط با فاز جامد لایه متخلخل (چگالی بالک، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته بالک) می‌باشند.
- پارامترهای مرتبط با پنل‌های کامپوزیتی لایه‌ای که شامل ضخامت جداره‌های کامپوزیتی، جنس جداره‌ها و چیدمان لایه‌ها می‌باشند.

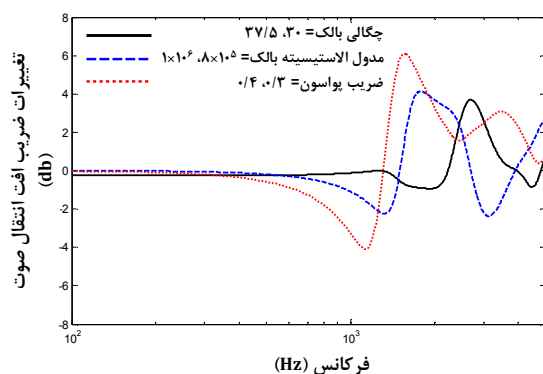
#### ۲-۲-۵-۱- تأثیر استفاده از لایه متخلخل بر روی TL

به منظور بررسی اثرات وجود لایه متخلخل بر روی ضریب TL سازه مذکور، مطابق شکل‌های ۸ و ۹، ضریب TL یک پنل کامپوزیتی دوجداره ساخته شده از گرافیت اپوکسی با لایه متخلخل میانی در دو حالت (B-B) و (B-U)، با یک پنل کامپوزیتی تک جداره با و بدون لایه متخلخل میانی به طور همزمان مقایسه شده است. مشخصات فیزیکی مربوط به پنل‌های کامپوزیتی در جدول ۲ آورده شده‌اند. چیدمان لایه‌ها به صورت  $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$  در نظر گرفته شده است.

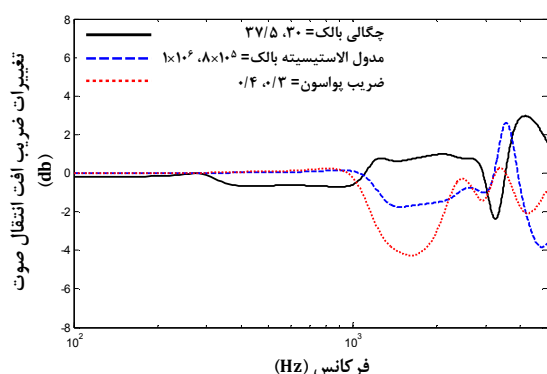


شکل ۷ مقایسه ضریب TL صفحه دوجداره با لایه متخلخل میانی به روش تحلیلی با روش SEA





شکل ۱۴ حساسیت ضریب  $TL$  سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با فاز جامد (فریم) لایه متخلخل در حالت (B-B)

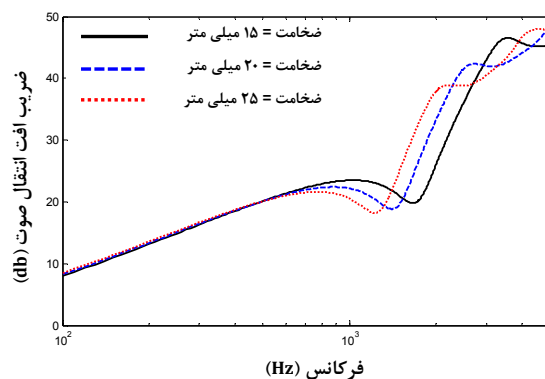


شکل ۱۵ حساسیت ضریب  $TL$  سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با فاز جامد (فریم) لایه متخلخل در حالت (B-U)

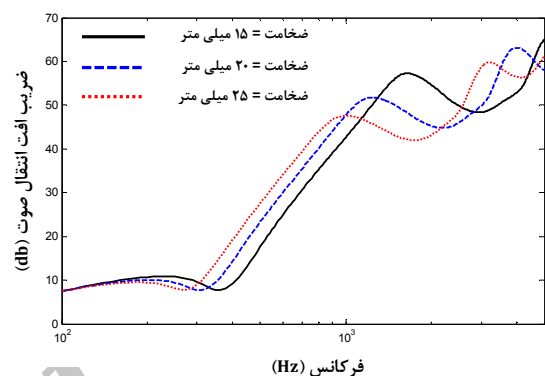
نتایج نشان می‌دهند که در حالت (B-B) تغییرات پارامترهای مرتبط با فاز سیال تقریباً هیچ تأثیری در افت انتقال صوت سازه ایجاد نمی‌کنند. در حالی که در حالت (B-U) تغییر این پارامترها بر روی ضریب  $TL$ ، به ویژه در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز، تأثیرگذار است. دلیل این امر نوع شرایط مرزی تعریف شده برای این دو حالت است؛ به عبارت دیگر، در حالت (B-U) به دلیل وجود یک فاصله هوایی مابین لایه متخلخل و پنل کامپوزیتی، بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج هوارد انتقال می‌یابند و لذا پارامترهایی از مواد متخلخل که بر روی امواج هوارد مؤثر هستند، تأثیر زیادی را بر روی ضریب  $TL$  سازه در مقایسه با حالت (B-B) خواهند گذاشت.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، میزان حساسیت ضریب  $TL$  سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با فاز جامد (فریم) لایه متخلخل در دو حالت (B-B) و (B-U) آورده شده است. به دلیل آنکه پارامترهای مرتبط با فاز جامد از قبیل مدول الاستیسیته بالک، چگالی بالک و ضریب پواسون، بر روی امواج سازه‌برد تأثیرگذارند، لذا افزایش و یا کاهش این پارامترها تأثیر بالایی را بر روی ضریب  $TL$  سازه در حالت (B-B) خواهند داشت و با انتخاب مناسب این پارامترها تقریباً تا ۸ دسی‌بل می‌توان عملکرد صوتی سازه را بهبود داد. دلیل این امر نوع شرایط مرزی تعریف شده برای ماده متخلخل در حالت (B-B) است، به عبارت دیگر در این حالت ماده متخلخل بین دو پنل کاملاً مقید شده است و از این رو بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج فریم انتقال می‌یابند، بنابراین تغییر این سه پارامتر تأثیر بسزایی بر روی ضریب  $TL$  سازه در این حالت نسبت به حالت (B-U) خواهند داشت.

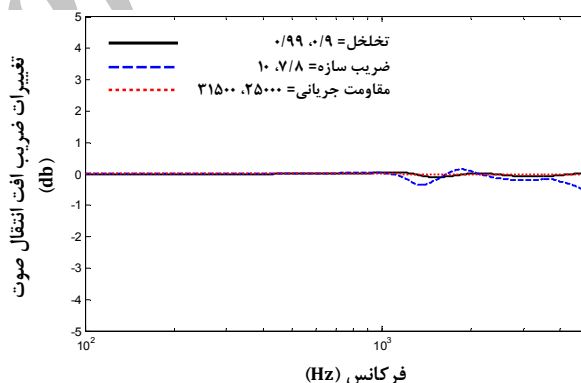
۵-۲-۳- بررسی تأثیر پارامترهای مرتبط با پنل کامپوزیتی بر روی  $TL$  در این بخش تأثیر سه پارامتر ضخامت، جنس مواد کامپوزیت بکار رفته در پنل‌ها



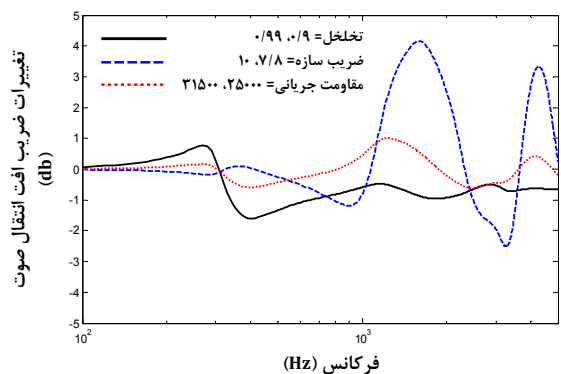
شکل ۱۰ اثر ضخامت لایه متخلخل بر روی ضریب  $TL$  سازه در حالت (B-B)



شکل ۱۱ اثر ضخامت لایه متخلخل بر روی ضریب  $TL$  سازه در حالت (B-U)

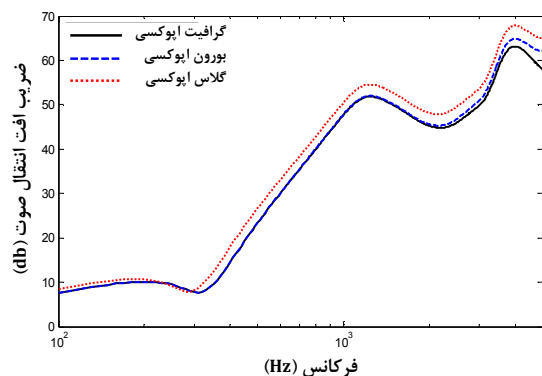


شکل ۱۲ حساسیت ضریب  $TL$  سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با فاز سیال لایه متخلخل در حالت (B-B)

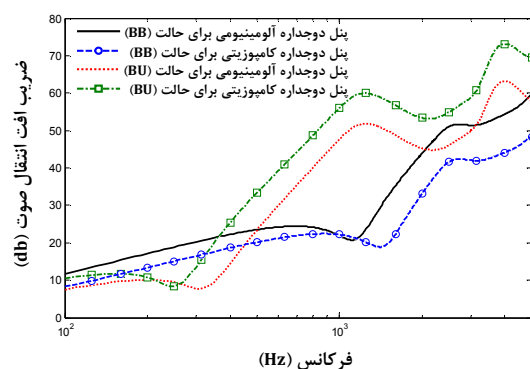


شکل ۱۳ حساسیت ضریب  $TL$  سازه نسبت به پارامترهای مرتبط با فاز سیال لایه متخلخل در حالت (B-U)

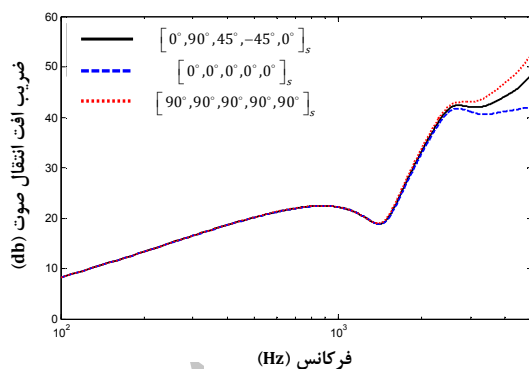
شکل‌های ۱۲ و ۱۳، میزان تأثیر پارامترهای فاز سیال ماده متخلخل بر روی ضریب  $TL$  سازه در دو حالت (B-B) و (B-U) را نشان می‌دهند.



شکل ۱۹ تأثیر جنس ماده کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-U)



شکل ۲۰ مقایسه ضریب TL پنل دوجداره کامپوزیتی با پنل دوجداره آلومینیومی با ضخامت یکسان



شکل ۲۱ تأثیر نحوه‌ی چیدمان لایه‌های پنل کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-B)

همچنین مقایسه بین ضریب TL یک پنل دوجداره کامپوزیتی با پنل دوجداره آلومینیومی با ضخامت‌های یکسان در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

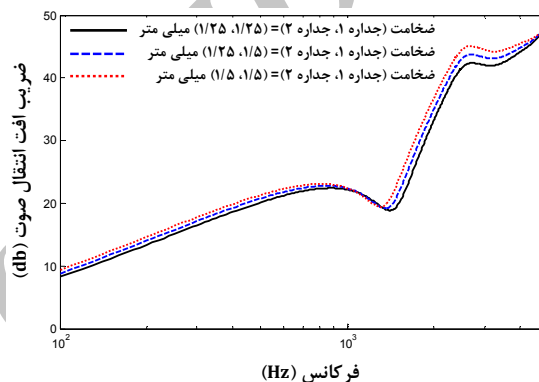
همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پنل دوجداره آلومینیومی با لایه متخلخل میانی در هر دو حالت (B-B) و (B-U)، به دلیل داشتن چگالی - همچنین ایزتروپ بودن آن در مقایسه با پنل دوجداره کامپوزیتی - گرافیت اپوکسی - عملکرد صوتی مناسب‌تری دارد، اما باید به این نکته نیز توجه گردد که استفاده از پنل دوجداره آلومینیومی به طور قابل توجهی وزن سازه را افزایش می‌دهد.

مطابق شکل‌های ۲۱ و ۲۲، تأثیر نحوه چیدمان (زوایای الیاف) هر یک از لایه‌های پنل‌های کامپوزیتی بر روی عملکرد صوتی سازه، به ترتیب برای هر دو حالت (B-B) و (B-U)، آورده شده است. در این بخش، سه نوع نحوه چیدمان به صورت  $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ ،  $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_s$  و  $[90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 90^\circ]_s$  برای مقایسه در نظر گرفته شده‌اند.

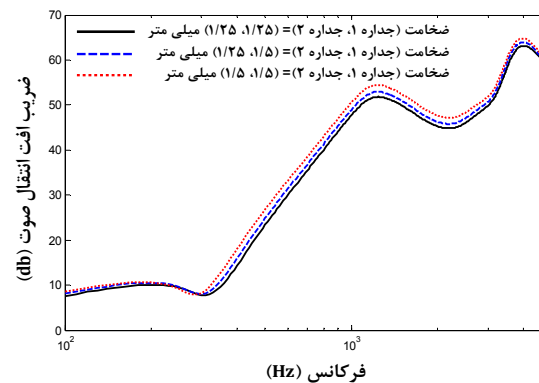
و نحوه چیدمان لایه‌ها بر روی ضریب TL سازه مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان اولین پارامتر، اثر ضخامت پنل کامپوزیتی بر روی عملکرد صوتی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است، برای هر دو حالت (B-B) و (B-U)، افزایش ضخامت پنل کامپوزیتی موجب انعکاس بیشتر امواج صوتی برخوردی به این سازه شده و در نتیجه موجب بهبود ضریب TL آن می‌گردند.

پارامتر بعدی که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تأثیر نوع ماده کامپوزیت انتخاب شده بر روی ضریب TL سازه برای هر دو حالت (B-B) و (B-U)، است. برای این حالت سه ماده گرافیت اپوکسی، بورون اپوکسی و گلاس اپوکسی انتخاب شده‌اند. مشخصات مربوط به این سه ماده در جدول ۲ آورده شده است.

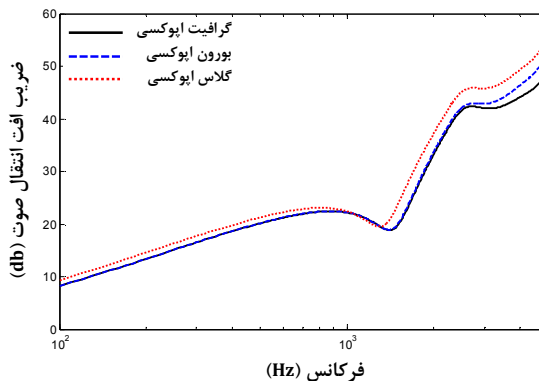
همان گونه که مشاهده می‌شود، برای هر دو حالت (B-B) و (B-U) ماده گلاس اپوکسی به دلیل داشتن چگالی بالاتر، نسبت به دو ماده دیگر دارای ضریب افت انتقال صوت مناسب‌تری است.



شکل ۱۶ اثر ضخامت پنل کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-B)



شکل ۱۷ اثر ضخامت پنل کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-U)

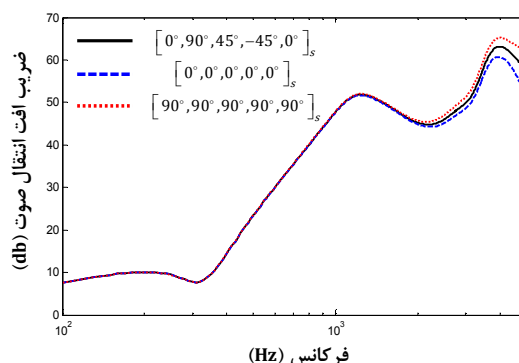


شکل ۱۸ تأثیر جنس ماده کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-B)

الیاف)، موجب بهبود عملکرد صوتی سازه در هر دو حالت (B-B) و (B-U)، به ویژه در محدوده فرکانسی بالا، می‌گردند.

## ۷- مراجع

- [1] F. J. Fahy, *Foundation of engineering acoustics*, Academic Press, London, 2001.
- [2] J. W. S. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover Publication, Vol. 2, pp. 351-355, New York, USA, 1945.
- [3] M. A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-structural porous solid I: low frequency range, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 2, pp. 168-178, 1956.
- [4] M. A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-structural porous solid II: high frequency range, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 28, No. 2, pp. 179-191, 1956.
- [5] N. Atalla, R. Panneton, P. Deberdue, A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No. 3, pp. 1444-1452, 1998.
- [6] F. C. Segard, N. Atalla, J. Nicolas, A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 6, pp. 2865-2872, 2000.
- [7] J. S. Bolton, E. R. Green, Normal incidence sound transmission through double-panel systems lined with relatively stiff, reticulated polyurethane foam, *Applied Acoustics*, Vol. 39, No. 1, pp. 23-51, 1993.
- [8] 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*, Vol. 191, No. 3, pp. 317-347, 1996.
- [9] J. F. Allard, N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing materials*, Second Edition, Elsevier Applied Science, New York, USA, 2009.
- [10] B. Cimerman, P. Bremner, Yang, Qian, J.A. Van Buskirk, Incorporating layered acoustic trim materials in body structural-acoustic models, *SAE 951307*, pp. 2289-2294, 1995.
- [11] X. Zeng, J. Woo, H. Tang, The effects of laminated steel body panels on vehicle interior noise, *Proceedings of the Second International Auto SEA Users Conference*, Michigan, USA, 2002.
- [12] A. Tadeu, J. Antonio, D. Mateus, Sound insulation provided by single and double panel walls-a comparison of analytical solutions versus experimental results, *Applied Acoustics*, Vol. 65, No. 1, pp. 15-29, 2004.
- [13] O. Tanneau, J. B. Casimir, P. Lamary, Optimization of multilayered panels with poroelastic components for an acoustical transmission objective, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, No. 3, pp. 1227-1238, 2006.
- [14] A.K. Ghosh, A.D. Williams, J.M. Zucker, J.L. Mathews, N. Spinhirne, An experimental investigation into the acoustic characteristics of fluid-filled porous structures-a simplified model of the human skull Cancellous Structure, *Experimental mechanics*, Vol. 48, No. 2, pp. 139-152, 2008.
- [15] F. Xin, T. Lu, C. Chen, Vibroacoustic behavior of clamp mounted double-panel partition with enclosure air cavity, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 6, pp. 3604-3612, 2008.
- [16] F. Xin, T. Lu, Transmission loss of orthogonally rib-stiffened double-panel structures with cavity absorption, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, No. 4, pp. 1919-1934, 2011.
- [17] K. Daneshjoui, H. Ramezani, R. Talebitooti, Wave transmission through laminated composite double-walled cylindrical shell lined with porous materials, *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 32, No. 6, pp. 701-718, 2011.
- [18] M.H. Shojaeefard, R. Talebitooti, R. Ahmadi, M. Amirpour Molla, Study of the effects of various boundary conditions on the acoustical treatments of double-panel structures lined with poroelastic materials, *Journal of Solid Mechanical Engineering*, Vol. 2, pp. 1-12, 2010. (In Persian)
- [19] M.H. Shojaeefard, R. Talebitooti, M. Torabi, R. Ahmadi, Optimization of power transmission interaction of multilayered panel using genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, 2013. (In Persian)
- [20] J.N. Reddy, *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*, Second Edition, CRC Press, Boca Raton, 2004.
- [21] A.D. Pierce, *Acoustics*, New York: McGraw Hill, 1981.
- [22] K.A. Mulholland, H.D. Parbrook, A. Cummings, The transmission loss of double panels, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 6, No. 3, pp. 324-334, 1967.
- [23] AutoSEA2 User's Guide, *ESI Group*, 2004.
- [24] R. J. M. Craik, Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis, *Applied Acoustics*, Vol. 64, No. 3, pp. 325-341, 2003.



شکل ۲۲ تأثیر نحوه‌ی چیدمان لایه‌های پنل کامپوزیتی بر روی ضریب TL سازه در حالت (B-U)

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، نحوه چیدمان لایه‌ها موجب تغییر میزان سفتی پنل‌های کامپوزیتی و در نتیجه سازه مورد بحث می‌گردد، بنابراین همانطور که انتظار می‌رود، تغییر در نحوه چیدمان لایه‌ها در فرکانس‌های بالا موجب بهبود عملکرد صوتی سازه می‌گردد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از تشریح نحوه بدست آوردن معادلات حاکم بر انتشار موج در مواد متخلخل بر مبنای تئوری بایوت، یک مدل تحلیلی جهت محاسبه افت انتقال صوت این سازه بر مبنای شرایط مرزی مختلف و با فرض تحریک سازه توسط امواج صفحه‌ای، ارائه شد. در این مقاله ابتدا نحوه استخراج معادلات حاکم بر انتشار موج در مواد متخلخل بر مبنای تئوری بایوت تشریح شده است. سپس با در نظر گرفتن کوپلینگ ویسکوز و اینرسی در نوشتن معادلات دینامیک انتقال تنش و نیز کوپلینگ الاستیک در نوشتن معادلات تنش-کرنش مواد متخلخل و با استفاده از معادلات ارتعاشی مواد کامپوزیت لایه‌ای، افت انتقال توان صوتی از طریق پنل‌های دوجداره کامپوزیت لایه‌ای با لایه متخلخل میانی تحت شرایط مرزی مختلف بیان گردید. سپس به شبیه‌سازی سازه مذکور توسط روش SEA پرداخته شد و نتایج حل تحلیلی و SEA با یکدیگر مقایسه شدند. تطابق مناسب بین این نتایج و نیز نتایج آزمایشگاهی موجود در این زمینه، صحت مدل تحلیلی ارائه شده را نشان دادند. در ادامه، تأثیر پارامترهای مؤثر بر افت انتقال صوت چنین سازه‌هایی و میزان تأثیر هر یک در شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند استفاده از پنل‌های دوجداره کامپوزیتی با شرایط مرزی (B-B) به ویژه در فرکانس‌های پایین، عملکرد مناسب‌تری در افت انتقال صوت نسبت به حالت (B-U) خواهند داشت، حال آنکه در فرکانس‌های بالا، استفاده از پنل‌های دوجداره کامپوزیتی با شرایط مرزی (B-U) جهت کاهش انتقال صوت، پیشنهاد می‌گردد. همچنین در حالت (B-B) یعنی حالتی که لایه متخلخل بین دو پنل کامپوزیتی مقید شده است، بیشترین مقدار انرژی صوتی توسط امواج فریم انتقال می‌یابند، لذا تغییر پارامترهای مرتبط با فاز جامد (فریم) ماده متخلخل از جمله ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و چگالی بالک بیش‌ترین تأثیر را بر روی ضریب TL خواهند داشت. حال آنکه بیش‌ترین مقدار انرژی صوتی در حالت (B-U) که یک فاصله هوایی نیز بین دو پنل کامپوزیتی تعبیه شده است، توسط امواج هوا برد منتقل می‌شوند و لذا پارامترهایی مانند مقاومت جریان و ضریب سازه که با فاز سیال ماده متخلخل ارتباط نزدیکی دارند و بر روی امواج هوا برد اثر محسوس خواهند داشت، بیش‌ترین اثر را بر روی TL سازه خواهند داشت. در نهایت نیز نشان داده شده است که جنس پنل‌های کامپوزیتی و نحوه چیدمان لایه‌های آن‌ها (زوایای