



کنترل غیرفعال امواج آکوستیکی گذرنده از یک پوسته دو انحنایی به کمک مواد پیزوالکتریک

روح‌الله طالبی توتی^{1*}، رحمت شهبازی گندمکاری²، حامد درویش گوهری³

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
3- دکتر، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
*rtalebi@iust.ac.ir, 16846-13114 صندوق پستی

چکیده

در کار حاضر کنترل صوت گذرنده از یک پوسته دوانحنایی لایه‌ای با استفاده از مدار شنت سلفی-مقاومتی مطالعه می‌شود. از این رو ابتدا معادلات ارتعاشی یک پوسته دوانحنایی به همراه چندلایه پیزوالکتریک با استفاده از اصل همپتون استخراج و با نتایج سایر محققان اعتبارسنجی می‌شود. در ادامه با اضافه نمودن یک مدار شنت موازی با یک صفحه پیزوالکتریک، تأثیر روش شنت رزونانسی جهت کنترل غیرفعال افت انتقال صوت گذرنده از این پوسته‌ها تحلیل می‌شود. با اضافه کردن مدار شنت به مجموعه مشخص می‌گردد، در فرکانس تشدید تنظیم شده این روش می‌تواند تا حدود مطلوبی دامنه صوت گذرنده از پوسته‌های دوانحنایی را در این فرکانس کاهش دهد. در انتها با به کارگیری سه مدار شنت که هر یک به صورت موازی با یک لایه پیزوالکتریک قرار گرفته می‌شود، کنترل غیرفعال افت انتقال صوت در پوسته‌های دوانحنایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی مشخص می‌گردد، استفاده از چند مدار شنت به صورت همزمان می‌تواند افت انتقال صوت سازه را در فرکانس تشدید به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد. در انتها با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدار شنت، کارایی این مدار افزایش داده می‌شود. نتایج بهبود عملکرد مدارهای بهینه شده بر روی کاهش انتقال صوت گذرنده از پوسته دو انحنایی در فرکانس تشدید تا حدود 80 دسی بل نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 دی 1396
پذیرش: 20 فروردین 1397
ارائه در سایت: 14 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
کنترل غیرفعال
پوسته دوانحنایی
مدار شنت
الگوریتم ژنتیک

Passive control of acoustic wave transmitted through a doubly curved shell by piezoelectric material

Roohallah Talebitooti*, Rahmat Shahbazi Gandomkari, Hamed Darvish Gohari

Department of Mechanical 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 08 January 2018
Accepted 09 April 2018
Available Online 04 May 2018

Keywords:

Passive control
Doubly curved shell
Shunt circuit
Genetic algorithm

ABSTRACT

In this work, transmitted sound power control through a doubly curved laminated shell by the aid of RL-shunt is investigated. Therefore, vibration equations of a doubly curved shell with piezoelectric layers are firstly derived utilizing Hamilton's principle. Then, the obtained equations are verified considering the results reported by other researchers. In addition, by applying a shunt circuit, which is parallel to the piezoelectric layer, the effect of resonant shunt method in passive control of the sound transmission loss of the shell is explored. It is indicated that with applying the shunt circuit, and then tuning the circuit with the resonance frequency, the amplitude of sound transmission loss has been significantly reduced. In next step, by applying three shunt circuits, parallel with one piezoelectric layer, it is found that passive control of this doubly curved structure can decrease the sound transmitted in resonant frequency. Finally, performance of these circuits is improved by using genetic algorithm to optimize RL-shunt circuit parameters. As a prominent result, it is shown that this method has an excellent effect on improvement of sound transmission loss up to 80dB.

شده تا به کنترل ارتعاشات و صوت گذرنده از این سازه‌ها اهمیت فراوانی بخشد.

کنترل صوت و ارتعاشات ناخواسته یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در طول سالیان گذشته به‌طور وسیع مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر استفاده از مواد هوشمند به عنوان یکی از روش‌های کاربردی در کنترل

1- مقدمه

پوسته‌های دوانحنایی، سازه‌هایی بسیار ساده اما با اهمیت هستند که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های مناسب اعم از کاربرد وسیع این سازه‌ها در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی، الکتریکی، مخازن تحت فشار، بال‌های هواپیما، پوشش خارجی راکت‌ها و موشک‌ها و جنبه‌های دیگر علوم مهندسی باعث

پنل آیروالاستیک که در همرفت با سیال است، مطالعه کرده‌اند. در این تحقیق، یک روش تحلیلی برای محاسبه‌ی اثر لایه میانی سیال بر روی انتقال صوت در طول یک پنل آیروالاستیک مستطیلی با تکیه‌گاه ساده به دست آمده است.

یو و همکاران [6] در مطالعاتی آزمایشگاهی کنترل فعال ارتعاشات مقطع مخروطی لایه‌ای پیزوالکتریک را با بازخورد وضعیت مثبت بررسی کردند. در این تحقیقات از تعدادی وصله، درون و بیرون پوسته مخروطی به عنوان حسگر و عملگر برای کنترل دو مود ارتعاشی اول استفاده شد. در این کار فرکانس‌های ارتعاشی کوچکتر و مدهای ارتعاشی پوسته مخروطی با آنالیز تابع پاسخ فرکانسی توسط نرم افزار مودال ویو⁷ به دست آمده است.

یکی دیگر راهکارهای استفاده مواد پیزوالکتریک در کنترل صوت و ارتعاشات سازه‌های مکانیکی، استفاده این مواد در کنار یک مدار شنت خارجی می‌باشد. این روش به خاطر سادگی، پایداری بالا و هزینه کم نسبت به روش‌های کنترل فعال می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. مدارهای شنت به انواع مقاومتی، اندوکتانسی، خازنی و سوئیچی تقسیم می‌شوند. عملکرد مدار شنت مقاومتی همانند مواد ویسکوالاستیک و مدار شنت اندوکتانسی همانند جاذب‌های ارتعاشی می‌باشد. مدار شنت خازنی نیز دارای قابلیت تغییر سختی پیزوالکتریک‌ها می‌باشد و در نهایت درباره مدار شنت سوئیچی می‌توان گفت، قابلیت کنترل ارتعاشات سیستم ضمن مقاومت در برابر تغییرات سیستم را دارد [7]. کنترل ارتعاشات با استفاده از مدار شنت رزونانسی پیزوالکتریک برای اولین بار توسط هوگود و فولوتو [8] مورد بررسی قرار گرفت، که پس از بیان وابستگی امپدانس مکانیکی سیستم به امپدانس الکتریکی مدار شنت، پارامترهای بهینه مدار شنت برای یک سیستم یک درجه آزادی بدون میرا کننده را به دست آوردند. آنها با تنظیم بهینه فرکانس رزونانس یک تیر توانستند به‌صورت عملی دامنه ارتعاشات متناظر با آن مود ارتعاشی را کاهش دهند. یامادا [9] نیز پارامترهای بهینه مدار شنت رزونانسی پیزوالکتریک متصل به تیر یکسر گیردار را برای کاهش جابجایی، سرعت و شتاب محاسبه نمود. لازم به ذکر است که مدار شنت اندوکتانسی در مقایسه با جاذب‌های مکانیکی وابستگی کمتری به دما دارد. مدار شنت اندوکتانسی موردنظر یک مدار خازنی سلفی ایجاد می‌کند، پس اگر این مدار خصوصیات رزونانسی سیستم مکانیکی را دارا باشد می‌تواند به‌عنوان جاذب ارتعاشی به کار رود

مدارهای شنت را می‌توان برای میرایی غیرفعال به همراه وصله پیزوالکتریک استفاده کرد. همچنین می‌توان میرایی به کمک مدار شنت و وصله پیزوالکتریک را با استفاده از مدارهای الکتریکی پیچیده‌تر که از ترکیب چندین مقاومت، سلف و خازن تشکیل می‌شوند به کنترل چندین مود از یک سازه بسط داد [10, 11].

در کار حاضر کنترل صوت گذرنده از یک پوسته دوانحنایی چندلایه با استفاده از مدار شنت مقاومتی-القایی مطالعه می‌شود. در استخراج معادلات ارتعاشی از اصل همیلتون و تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی برای پوسته‌های جدار نازک استفاده می‌شود. سپس با قرار دادن یک مدار مقاومتی-القایی اثر آن بر روی کاهش صوت گذرنده از پوسته بررسی می‌شود. در قدم بعدی، سه مدار شنت که هر کدام موازی با یک لایه پیزوالکتریک هستند، را در نظر گرفته و اثر آن بر افت انتقال صوت سازه بررسی می‌گردد. در انتها، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی پارامترهای مدار شنت برای بهبود در ضریب افت انتقال صوت گذرنده از پوسته استفاده می‌شود و تاثیر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

صوت و ارتعاشات در سازه‌های مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مهمترین و پرکاربرد ترین مواد هوشمند می‌توان به پیزوالکتریک‌ها اشاره کرد. این مواد به علت دارا بودن عکس‌العمل سریع نسبت به تنش‌های مکانیکی و ولتاژ خارجی این امکان را به مهندسان می‌دهند تا از آن‌ها به عنوان عملگر و یا حسگر در سیستم‌های کنترل صوت و ارتعاشات استفاده کنند.

از جمله پژوهش‌های اخیر که در زمینه کنترل صوت و ارتعاشات پوسته‌ها با استفاده از پیزوالکتریک صورت گرفته است، می‌توان به مطالعه لقمانی و همکارانش [1] در سال 2015 اشاره کرد که به صورت تحلیلی و تجربی کنترل فعال سیلندر استوانه‌ای با استفاده از دیسک‌های پیزوالکتریک را بررسی کردند. یک روش کنترلی تطبیقی بر اساس روش بیشترین کاهش¹ بر روی یک کامپیوتر برای کنترل ارتعاش معین بکار گرفته شده است. با این روش نشان داده شده است که سیستم کنترلی در نظر گرفته شده که شامل دیسک‌های پیزوالکتریک و یک کنترل‌کننده تطبیقی می‌باشد در کاهش ارتعاشات و نویز آکوستیکی تابش شده موثر می‌باشد.

در سال 2015 هی و چن [2] مکان یابی یکپارچه بهینه سازه‌ی و کنترل ارتعاشات برای پوسته استوانه‌ای پیزوالکتریک دار بر اساس الگوریتم ژنتیک را موردبررسی قرار دادند. یک استراتژی بهینه‌سازی ترکیبی برای طراحی مکان یابی یکپارچه بهینه سازه‌ی پوسته استوانه‌ای پیزوالکتریک دار در نظر گرفته شده است. روش موردنظر الگوریتم ژنتیک و تئوری خطی درجه دوم تنظیم‌کننده² برای بهینه کردن عملکرد کوپلینگ سیستم سازه-کنترل می‌باشد. الگوریتم ژنتیک برای انتخاب مکان یابی بهینه سازه و تعداد و مکان‌های محرک‌ها و پارامترهای کنترل استفاده شده است، تئوری خطی درجه دوم تنظیم‌کننده برای طراحی کنترل‌کننده برای سرکوب ارتعاشات سازه بهینه تحت تحریک سینوسی، استفاده شده است. علاوه براین اپراتورهای سازه‌شناسی³ برای اصلاح مکان یابی سازه قطع شده استفاده شده‌اند. نتایج شبیه سازی عددی و محاسبات نشان داد که روش پیشنهادی موثر و عملی، با عملکرد مناسب برای بهینه‌سازی و کوپلینگ سازه پوسته استوانه‌ای و سیستم کنترلی است.

لیو و همکاران [3] بر روی کنترل ارتعاشات فعال پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی مدرج عملکردی⁴ تقویت شده با نانوتیوب کربنی⁵ کار کردند، در این تحقیق از مواد پیزوالکتریک استفاده شده است. وصله‌های پیزوالکتریک بر روی سطوح بیرونی و درونی پوسته ی استوانه‌ای قرار گرفته‌اند و به ترتیب به عنوان عملگر و حسگر عمل می‌کنند. در این کار همچنین اثرات دمایی نیز در نظر گرفته شده است. آن‌ها از تئوری مرتبه بالای تغییر شکل برشی ردی بر روی مدل ساختاری استفاده کرده‌اند. میدان جا به جایی عملگر و حسگر پیزوالکتریک، بر اساس روابط تغییر شکل هندسی داده شده است.

در مطالعه ای دیگر عبید و همکاران [4] روشی سریع و آسان که به کاربر اجازه بهبود پارامترهای مواد ویسکوالاستیک برای عایق سازی آکوستیکی پنل‌های چند لایه را می‌دهد گسترش دادند. ساخت مواد صلب و غیرصلب با اثر میرایی بالا و عایق‌سازی آکوستیکی با استفاده از پنل‌های چندلایه مواد ویسکوالاستیک امکان‌پذیر است. در این تحقیق، مدلی بر اساس روش ماتریس انتقال⁶ با محاسبات شکست برای مواد ویسکوالاستیک ارائه شد. همچنین ژین و همکاران [5] بر روی مدل تحلیلی از انتقال صوت یک

¹ steepest descent method

² linear-quadratic-regulator (LQR)

³ Morphology

⁴ FGM

⁵ Carbon nanotube (CNT)

⁶ Transfer Matrix Method (TMM)

⁷ Modal VIEW

2- تعریف مسئله

در شکل 1 جزئیاتی که به تعریف مسئله می‌پردازد را می‌توان مشاهده نمود. در این پژوهش افت انتقال صوت از یک پوسته‌ی دوانحنایی چند لایه با طول بینهایت و با شعاع‌های انحنای R_1 و R_2 به ترتیب در جهات α و β ، مورد بررسی قرار گرفته شده است. موج برخوردی به پوسته با زاویه γ به سطح پوسته تابیده می‌شود. چگالی و سرعت در محیط‌های آکوستیکی نیز به صورت ρ_i و c_i فرض می‌شود. لازم به ذکر است که در آن $i = (1, 2)$ مربوط محیط‌های داخلی و بیرونی می‌باشد. مولفه‌های α ، β و η_3 بیانگر محورهای مختصات منحنی الخط می‌باشند. که می‌توان گفت η_3 منطبق بر جهت z می‌باشد که مربوط به ضخامت پوسته است. در این مسئله چند لایه پیزوالکتریک در بالا و پایین پوسته قرار داده شده است. لایه میانی نیز از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شده است. همچنین، R_{shunt} و L_{shunt} به ترتیب نمایانگر مقادیر مربوط به مقاومت و اندوکتانس مدار شنت هستند. مشخصات سازه، محیط آکوستیکی و پیزوالکتریک در جدول 1 شرح داده شده است.

همچنین ضرایب خواص پیزوالکتریک در جدول 2 آمده است.

3- استخراج معادلات

در این بخش معادلات ارتعاشی یک پوسته دوانحنایی به همراه صفحات پیزوالکتریک استخراج می‌شود. در به دست آوردن معادلات حرکت از اصل همیلتون و تئوری تغییر شکل برشی برای پوسته‌های جدار نازک¹ استفاده شده است.

استخراج معادلات حرکت

در این مقاله از اصل همیلتون برای استخراج معادلات حرکت استفاده شده است، رابطه (1) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\int_{t_0}^t [\delta(T - V) + \delta W_{ext}] dt = 0 \quad (1)$$

در رابطه (1)، δT ، δV ، δW_{ext} به ترتیب ورودش‌های مجازی در انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل و کار انجام شده توسط نیروی ناپایستار خارجی می‌باشد. انرژی جنبشی کل مجموعه که متشکل از انرژی لایه‌های پیزوالکتریک به همراه پوسته است، در رابطه (2) آورده شده است.

$$\delta T = \int \left(\int_{-h/2}^{h/2} \rho_0^k [\dot{u}\dot{u} + \dot{v}\dot{v} + \dot{w}\dot{w}] dz \right) d\alpha d\beta \quad (2)$$

که در آن k شماره لایه‌های تشکیل دهنده پوسته است انرژی پتانسیل پوسته دوانحنایی و لایه‌های پیزوالکتریک را به صورت رابطه (3) می‌توان بیان نمود.

$$\delta V = \int_V \delta V dv = \int \left(\int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{\alpha\alpha}^k \delta \epsilon_{\alpha\alpha} + \sigma_{\beta\beta}^k \delta \epsilon_{\beta\beta} + \sigma_{\alpha\beta}^k \delta \gamma_{\alpha\beta} - \mathcal{D}_{\alpha}^k \delta \epsilon_{\alpha}^k - \mathcal{D}_{\beta}^k \delta \epsilon_{\beta}^k - \mathcal{D}_z^k \delta \epsilon_z^k) dz \right) d\alpha d\beta \quad (3)$$

در این رابطه (3)، σ بیانگر تنش مکانیکی، ϵ کرنش مکانیکی، $\mathcal{D}$ جابه‌جایی دی‌الکتریک و $\mathcal{E}$ میدان الکتریکی است [12].

روابط کرنش مکانیکی و الکتریکی حاکم بر پیزوالکتریک در رابطه (4) آمده است.

$$\begin{aligned} \sigma^k &= Q^k \epsilon^k - e^k \mathcal{E}^k \\ \mathcal{D}^k &= e^k \epsilon^k + \epsilon^k \mathcal{E}^k \end{aligned} \quad (4)$$

1 SDST

که می‌توان مؤلفه‌های بردار میدان و جابه‌جایی الکتریکی را به صورت رابطه (5) نوشت.

$$\mathcal{E}^k = \begin{Bmatrix} \mathcal{E}_{\alpha} \\ \mathcal{E}_{\beta} \\ \mathcal{E}_z \end{Bmatrix}, \quad \mathcal{D}^k = \begin{Bmatrix} \mathcal{D}_{\alpha} \\ \mathcal{D}_{\beta} \\ \mathcal{D}_z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

کرنش‌ها در هر نقطه از پوسته دوانحنایی را می‌توان بر حسب ترم‌های جابجایی، انحنای و چرخش صفحه میانی پوسته به صورت رابطه (6) بیان نمود. در این رابطه همچنین روابط تنش‌های مکانیکی و الکتریکی نیز دیده می‌شود که بر حسب مقادیر صفحه میانی نوشته شده است.

جدول 1 ویژگی‌های هندسی و محیطی.

Table 1 Environmental and geometrical properties.

مواد	آلومینیوم	پیزوالکتریک	هوا
چگالی ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	2760	7850	1.21
مدول یانگ (Pa)	72	210	
ضریب پواسون	0.3	0.3	
سرعت صوت (m/s)			343
ضخامت (mm)	1.59	0.159	
زاویه برخورد (degree)	45		

جدول 2 ویژگی‌های پیزوالکتریک.

Table 2 Piezoelectric properties.

ماده	پیزوالکتریک
e_{31} (m/F)	-5.05×10^8
e_{32} (m/F)	-5.05×10^8
ϵ_{33} (N/C)	7.7×10^7

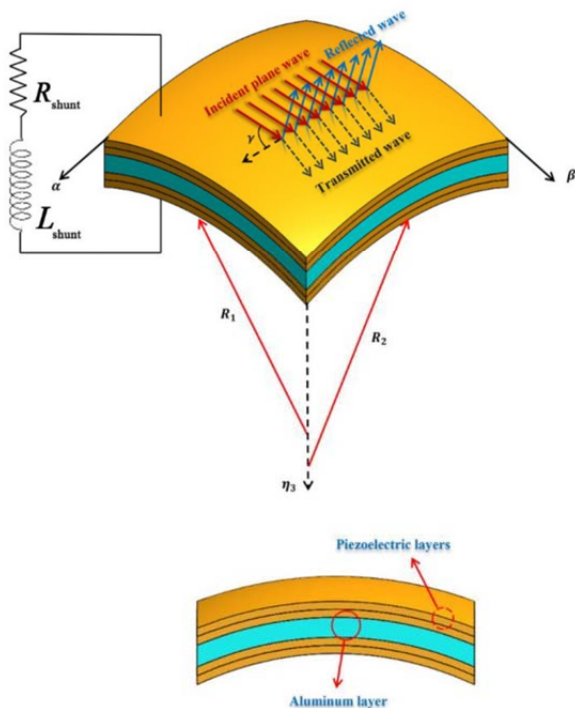


Fig. 1 Schematic of a laminated doubly curved shell geometry with shunt circuit

شکل 1 نمایی از هندسه پوسته دوانحنایی لایه‌ای با مدار شنت

$$c_2^2 \nabla^2 p_2^T - \frac{\partial^2 p_2^T}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

توجه شود که q_n در رابطه (7) نشان دهنده فشار آکوستیکی می‌باشد که به صورت رابطه (12) در نظر گرفته می‌شود.

$$q_n = [0, 0, (P_1^I + P_1^R) - P_2^T, 0, 0] \quad (12)$$

با توجه به اینکه، در جهت عمودی شتاب هر جزء از سیال باید برابر با شتاب عمودی پوسته میانی باشد، در مرز سازه و سیال باید همواره معادله اوایلر برقرار گردد [13].

$$\begin{aligned} \frac{\partial(P_1^I + P_1^R)}{\partial z} &= -\rho_1 \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \nabla \right)^2 w_0 \\ \frac{\partial(P_2^T)}{\partial z} &= -\rho_2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (13)$$

موج برخوردی نشان داده شده در شکل 1 را می‌توان به صورت رابطه (14) در نظر گرفت تا معادله موج را ارضا کند [14].

$$P_1^I(\alpha, \beta, z, t) = P_0^I e^{i(\omega t - k_{1a}\alpha - k_{1b}\beta - k_{1z}z)} \quad (14)$$

بعد از برخورد موج تابیده شده به یک موج بازتاب شده (P_1^R) و یک موج انتقال یافته (P_2^T) تقسیم می‌شود، که به شکل رابطه (13) می‌تواند بیان شوند.

$$\begin{aligned} P_1^R(\alpha, \beta, z, t) &= P_0^R e^{i(\omega t - k_{1a}\alpha - k_{1b}\beta - k_{1z}z)} \\ P_2^T(\alpha, \beta, z, t) &= P_0^T e^{i(\omega t - k_{2a}\alpha - k_{2b}\beta - k_{2z}z)} \end{aligned} \quad (15)$$

این نکته قابل ذکر است که در رابطه (14) و (15) نشان دهنده فرکانس زاویه‌ای و P_0 مربوط به اندازه‌ی موج تابیده شده است. عدد موج در محیط متحرک خارجی نیز در رابطه (16) آمده است.

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1} \left(\frac{1}{1 + M \sin \varphi} \right) \quad (16)$$

همچنین k_{1a} ، k_{1b} و k_{1z} نشان دهنده‌ی اعداد موج به ترتیب در جهت α ، β و z است که به صورت رابطه (17) آمده است.

$$\begin{aligned} k_{1a} &= k_1 \cos \varphi \cos \beta \\ k_{1b} &= k_1 \cos \varphi \sin \beta \\ k_{1z} &= k_1 \sin \varphi \end{aligned} \quad (17)$$

همانطور که روشن است، موج برخوردی به داخل پوسته دو انتحایی انتقال داده می‌شود از این رو عدد موج در جهت z باید در کل سیستم سازگار شود.

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{\omega}{c_2}; \quad k_{2a} = k_{1a}; \quad k_{2b} = k_{1b}; \\ k_{2z} &= \sqrt{k_2^2 - (k_{2a}^2 + k_{2b}^2)} \end{aligned} \quad (18)$$

از آنجا که تحریک اعمالی به سازه یک موج هارمونیک است، باید جایجایی‌ها و عبارات چرخش صفحه میانی نیز به صورت معادله (19) هارمونیک در نظر گرفته شوند.

$$\begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} iU \\ iV \\ W \\ i\psi_{1a} \\ i\psi_{2a} \end{Bmatrix} \exp(i(\omega t - k_{1a}\alpha - k_{1b}\beta)) \quad (19)$$

پس از آن، در این بخش، با جایگذاری معادلات (14) و (15) و معادله (19) در معادلات دوانحنایی و همچنین قرار دادن دو شرط مرزی (معادله (13))، در نهایت می‌توان اندازه دامنه فشار موج تابیده شده را محاسبه کرد. در نهایت معادلات ویبرو-آکوستیکی پوسته به صورت سیستم خطی 7×7 بیان می‌شوند.

$$[L]\{R\} = [B] \quad (20)$$

در این معادله، بردار R شامل 7 ضریب مجهول به صورت رابطه (21) است.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0\alpha} &= \frac{\partial u_0}{\partial \alpha} + \frac{w_0}{R_\alpha}, & \varepsilon_{0\beta} &= \frac{\partial v_0}{\partial \beta} + \frac{w_0}{R_\beta} \\ \varepsilon_{0\alpha\beta} &= \frac{\partial v_0}{\partial \alpha} + \frac{w_0}{R_{\alpha\beta}}, & \varepsilon_{0\beta\alpha} &= \frac{\partial u_0}{\partial \beta} + \frac{w_0}{R_{\alpha\beta}} \\ \gamma_{0\alpha z} &= \frac{\partial w_0}{\partial \alpha} + \psi_\alpha, & \gamma_{0\beta z} &= \frac{\partial w_0}{\partial \beta} + \psi_\beta \\ \kappa_\alpha &= \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial \alpha}, & \kappa_\beta &= \frac{\partial \psi_\beta}{\partial \beta} \\ \kappa_{\alpha\beta} &= \frac{\partial \psi_\beta}{\partial \alpha}, & \kappa_{\beta\alpha} &= \frac{\partial \psi_\alpha}{\partial \beta} \\ \mathcal{E}_\alpha^k &= \mathcal{E}_\alpha^{k(0)} + z \mathcal{E}_\alpha^{k(1)} \\ \mathcal{E}_\beta^k &= \mathcal{E}_\beta^{k(0)} + z \mathcal{E}_\beta^{k(1)} \\ \mathcal{E}_z^k &= \mathcal{E}_z^{k(0)} \end{aligned} \quad (6)$$

که در رابطه فوق u_0, v_0, w_0 به ترتیب جایجایی‌های تار خنثی در راستاهای α, β, z می‌باشند. در نهایت با جایگذاری معادلات تنش و کرنش رابطه (6) و انرژی جنبشی و پتانسیل پوسته در رابطه (1) و استفاده از تئوری مرتبه اول برشی در پوسته‌های جدارنازک معادلات حرکت را به صورت روابط (7) می‌توان نوشت.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} (N_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta} (N_{\beta\alpha}) + q_\alpha &= I_1 \ddot{u}_0^2 + I_2 \ddot{\psi}_\alpha^2; \\ \frac{\partial}{\partial \beta} (N_\beta) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (N_{\alpha\beta}) + q_\beta &= I_1 \ddot{v}_0^2 + I_2 \ddot{\psi}_\beta^2; \\ - \left(\frac{N_\alpha}{R_\alpha} + \frac{N_\beta}{R_\beta} + \frac{N_{\alpha\beta} + N_{\beta\alpha}}{R_{\alpha\beta}} \right) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (Q_\alpha) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \beta} (Q_\beta) + q_n - 2e_{31}^k \left(\frac{\mathcal{E}_z^k}{R_\alpha} \right) - 2e_{32}^k \left(\frac{\mathcal{E}_z^k}{R_\beta} \right) = I_1 \ddot{w}_0^2; \\ \frac{\partial}{\partial \alpha} (M_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta} (M_{\beta\alpha}) - Q_\alpha + m_\alpha &= I_2 \ddot{u}_0^2 + I_3 \ddot{\psi}_\alpha^2; \\ \frac{\partial}{\partial \beta} (M_\beta) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (M_{\alpha\beta}) + Q_\beta + m_\beta &= I_2 \ddot{v}_0^2 + I_3 \ddot{\psi}_\beta^2. \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن Q_α, Q_β نیروهای برشی عرضی و m_α, m_β ممان‌های گسترده حول صفحه میانی پوسته‌ی دوانحنایی هستند. q_α, q_β مربوط به نیروهای خارجی در راستای α, β هستند. همچنین e_{31}^k و e_{32}^k ثوابت پیزوالکتریک در لایه k است. I_i نشان دهنده‌ی ممان اینرسی حول صفحه میانی است که در رابطه (8) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} I_i &= \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} \rho^k z^{i-1} dz \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ \bar{I}_i &= \left(I_i + I_{i+1} \left(\frac{1}{R_\alpha} + \frac{1}{R_\beta} \right) + \frac{I_{i+2}}{R_\alpha R_\beta} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که ρ^k نشان دهنده‌ی چگالی k امین لایه پوسته دوانحنایی است. در نهایت می‌توان معادلات حرکت را به صورت معادله (9) نوشت.

$$\begin{aligned} M_t \ddot{q}_t + K_t q_t - \varphi_{at} q_a &= F_t \\ -\varphi_{at}^T q_t + \psi_{at} q_a &= v_a \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه فوق q_t بردار دامنه مودهای ارتعاشی و q_a بار الکتریکی عملگر است.

معادلات آکوستیکی

فشار موج در داخل و بیرون پوسته معادله موج را ارضا خواهد کرد [13].

$$c_1^2 \nabla^2 (p_1^I + p_1^R) - \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \nabla \right)^2 (p_1^I + p_1^R) = 0 \quad (10)$$

در این معادلات، p_1^I, p_1^R به ترتیب نشان دهنده‌ی فشار آکوستیکی موج‌های تابیده شده و منعکس شده هستند. موج انتقال یافته به سطح داخلی پوسته (p_2^T) نیز باید در رابطه (11) صدق کند.

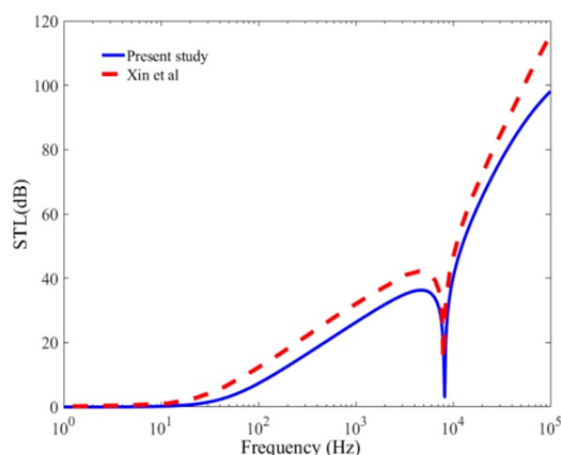


Fig. 3 Sound transmission loss comparison between present formulation and results of Xin and Lu[5].

شکل 3 مقایسه افت انتقال صوت کار حاضر با نتایج ژین و همکاران [5]

در ادامه برای اعتبارسنجی بهتر مدل‌سازی انجام شده، نمودار افت انتقال صوت گذرنده از یک پوسته دو انحنایی را با نتایج پژوهش طالبی و همکاران [16] در شکل 4 مقایسه می‌شود. آن‌ها در این پژوهش افت انتقال صوت در پوسته‌های دو انحنایی را مورد مطالعه قرار دادند. همانطور که در نتایج مشاهده می‌شود، میزان افت انتقال صوت بدست آمده تطبیق بسیار مناسبی با مدل‌های تحقیقاتی قبل دارد که نشانگر دقت مناسب مدل‌سازی است.

5- معادلات مدار شنت

در این قسمت با اضافه نمودن مدار شنت-القاهر به مجموعه، معادلات ارتعاشی پوسته دوانحنایی بازنویسی شده و اثر آن بر ارتعاشات سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات حاکم بر یک مدار شنت-القاهر که ولتاژ دوسر آن برابر با v_a می‌باشد را می‌توان به صورت رابطه (25) بیان نمود.

$$L_1 \ddot{q}_a + R_1 \dot{q}_a = v_a \quad (25)$$

با جاگذاری v_a در معادلات آورده شده در رابطه (7) می‌توان v_a را از این معادلات حذف نمود. از آنجا که مدار شنت فقط در یک بازه فرکانسی محدود می‌تواند رفتار بهینه خود را به نمایش بگذارد، در این قسمت برای عملکرد بهینه مدار شنت، فرکانس تشدید اتلافی مدار شنت را بر روی

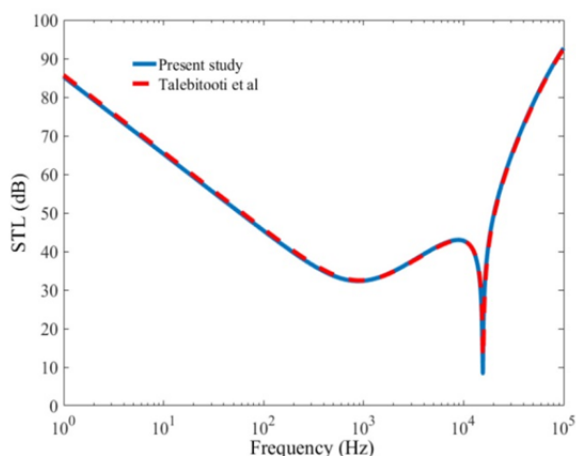


Fig. 4 Sound transmission loss comparison between present formulation and results of Talebitooti et al[16].

شکل 4 مقایسه افت انتقال صوت کار حاضر با نتایج طالبی توتی و همکاران [16]

$$R = [U, V, W, \psi_{1a}, \psi_{2a}, P_0^R, P_0^T] \quad (21)$$

و L ماتریس ضرایب 7×7 است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & 0 & 0 \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & 0 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} & L_{37} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & 0 & 0 \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{63} & 0 & 0 & L_{66} & 0 \\ 0 & 0 & L_{73} & 0 & 0 & 0 & L_{77} \end{bmatrix} \quad (22)$$

محاسبه‌ی صوت کاهش یافته

برای محاسبه فشار آکوستیکی انتقال یافته به داخل پوسته، نسبت توان انتقال یافته به توان برخوردی به عنوان ضریب انتقال τ به دست آورده می‌شود [15].

$$\tau = \frac{I_{\text{Transmitted}}}{I_{\text{Incident}}} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \left| \frac{P_0^T}{P_0^I} \right|^2 \quad (23)$$

ضریب افت انتقال صوت گذرنده از پوسته را نیز می‌توان به صورت رابطه لگاریتمی (24) بیان نمود.

$$STL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (24)$$

4- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، از نتایج ارائه شده در تحقیقات گذشته استفاده شده است. یکی از هندسه‌هایی که می‌توان برای اعتبارسنجی از آن‌ها کمک گرفت صفحه می‌باشد. از این‌رو برای تطابق افت انتقال صوت گذرنده از یک پوسته دوانحنایی با نتایج یک پوسته صفحه‌ای، باید شعاع‌های انحنای پوسته را به سمت بینهایت میل داد. بدین منظور نمودار افت انتقال صوت بدست آمده با شعاع بی‌نهایت برای پوسته دوانحنایی را با نتایج پژوهش‌های عبید [4]، ژین [5] مقایسه شده است. در شکل 2 نتایج پژوهش حاضر با کار عبید و همکارانش مشاهده می‌شود. آن‌ها از یک پوسته تمام استیل استفاده کرده‌اند. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود منحنی افت انتقال صوت و همچنین مقدار فرکانس تشدید تطابق خوبی با یک پوسته با هندسه صفحه‌ای دارد. در مقایسه‌ای دیگر در شکل 3 تئوری به کار رفته (تئوری تغییر شکل برشی صفحات جدار نازک) با تئوری کلاسیک مقایسه می‌شود که اختلاف به وجود آمده به دلیل دقت بالاتر تئوری به کار رفته است.

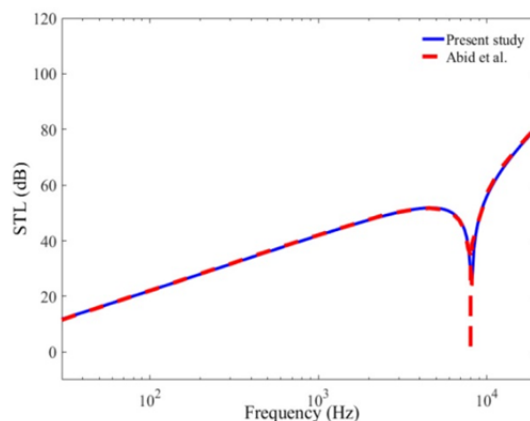


Fig. 2 Sound transmission loss comparison between present formulation and results of Abid et al[4].

شکل 2 مقایسه افت انتقال صوت کار حاضر با نتایج عبید و همکاران [4]

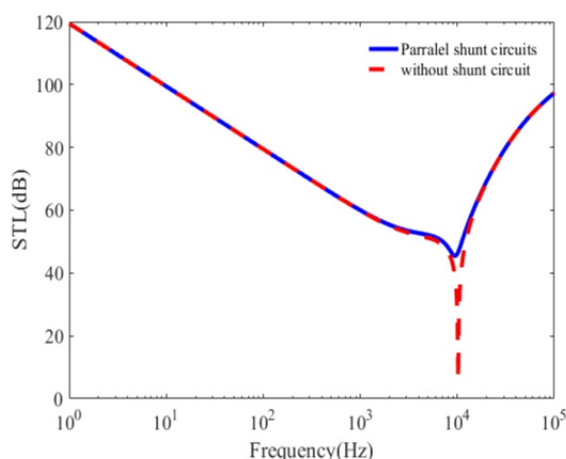


Fig. 6 Sound transmission loss comparison before and after using multi shunt circuits.

شکل 6 نمودار افت انتقال صوت قبل و بعد از استفاده از چند مدار شنت

وزنی در نظر گرفته شده برای توابع بهینه ساز می‌باشند که در رابطه (29) بیان شده‌اند.

$$w_1 = 1, w_2 = 0.5 \quad (29)$$

نمودار همگرایی مقدار افت انتقال صوت گذرنده از پوسته در فرایند بهینه‌سازی را می‌توان در شکل 7 مشاهده کرد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در کمتر از حدود 20 تکرار نتایج به مقدار مطلوب همگرا شده است. مقادیر بهینه بدست آمده از الگوریتم ژنتیک در رابطه (30) آورده شده است.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.0435 \text{ ohm}, L_1 = 0.0241 \\ R_2 &= 15.5778 \text{ ohm}, L_2 = 0.0261 \\ R_3 &= 1.4788 \text{ ohm}, L_3 = 0.0228 \end{aligned} \quad (30)$$

با استفاده از پارامترهای مدار شنت بهینه شده نمودار افت انتقال صوت گذرنده از سازه در شکل 8 رسم شده است.

همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود این بهینه سازی باعث افزایش افت انتقال صوت در فرکانس تشدید تا بیش از 80 دسی بل می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدارهای شنت موازی می‌تواند اثربخشی مطلوبی داشته باشد.

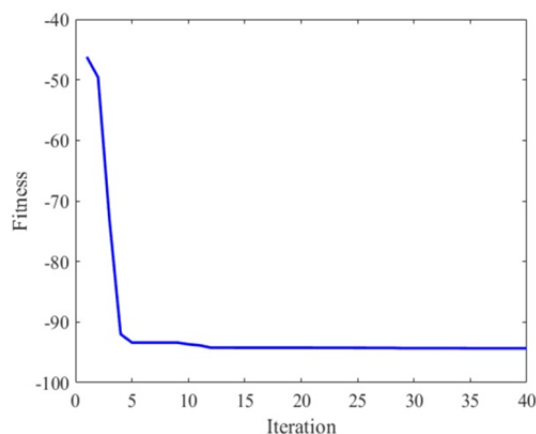


Fig. 7 Convergence procedure in optimization by GA.

شکل 7 روند همگرایی در بهینه سازی به وسیله الگوریتم ژنتیک

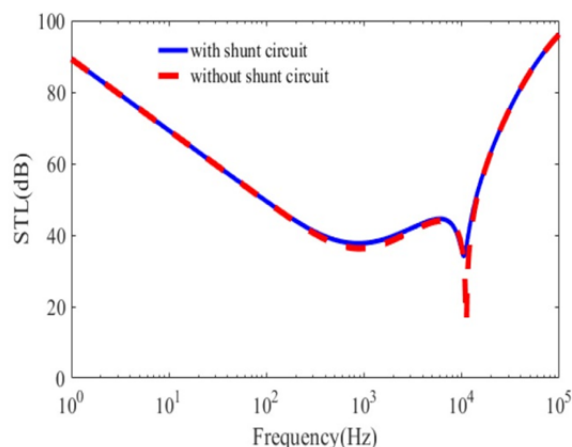


Fig. 5 Sound transmission loss comparison before and after using a shunt circuit.

شکل 5 مقایسه پاسخ فرکانسی پوسته دوانحنایی قبل و بعد از اضافه کردن مدار شنت رزونانسی

فرکانس تشدید ارتعاشات پوسته دوانحنایی تنظیم شده است. مقادیر اولیه زیر برای شنت-القاگر در نظر گرفته شده است.

$$R_1 = 1000 \text{ ohm}, L_1 = 0.02 \quad (26)$$

برای بررسی اثر مدار شنت بر سازه، نمودار افت انتقال صوت گذرنده از سازه برای حالتی که مدار شنت بر سر راه لایه پیزوالکتریک قرار دارد، رسم شده و با حالتی که هیچ مدار شنتی در مدار قرار ندارد مقایسه شده است.

در شکل 5 مشاهده می‌شود که مدار شنت توانسته است، در فرکانس تشدید، انرژی سازه را دفع و افت انتقال صوت گذرنده از سازه را به خوبی کاهش دهد.

6- استفاده از مدارهای شنت موازی

همانطور که مشاهده شد مدار شنت در فرکانس تشدید می‌تواند کارایی بهینه خود را به نمایش بگذارد. از این رو برای افزایش کارایی این مدار در کنترل افت انتقال صوت پوسته دوانحنایی، می‌توان استفاده از مدارهای شنت موازی را پیشنهاد داد. در این مقاله 3 مدار شنت که هر کدام به صورت موازی با یک صفحه پیزوالکتریک در نظر گرفته شده، روی فرکانس تشدید پوسته دوانحنایی تنظیم شده است. مقادیر اولیه در این مدارهای شنت به صورت رابطه (27) در نظر گرفته شد.

$$\begin{aligned} R_1 &= 1000 \text{ ohm}, L_1 = 0.02 \\ R_2 &= 1000 \text{ ohm}, L_2 = 0.02 \\ R_3 &= 1000 \text{ ohm}, L_3 = 0.02 \end{aligned} \quad (27)$$

در شکل 6 افت انتقال صوت گذرنده از پوسته، با به کارگیری سه مدار شنت موازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، به وسیله الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه برای پارامترهای مدار شنت سلفی-مقاوتی به دست آورده می‌شود. در این بهینه سازی از 40 تکرار و جمعیت 500 استفاده شده است. تابع هزینه استفاده شده در این بهینه سازی در رابطه (28) آورده شده است.

$$Z = -(w_1 * f_1 + w_2 * f_2) \quad (28)$$

که در آن f_1 کمترین مقدار ضریب افت انتقال صوت¹ و f_2 میانگین مقادیر ضریب افت انتقال صوت² می‌باشد. در رابطه (28) w_1, w_2 ضرایب

¹ min (TL)

² mean(TL)

پوسته‌های دوانحنایی در فرکانس‌های تشدید، پایداری بالا و عدم نیاز آن‌ها به هرگونه هزینه اضافی و منبع ولتاژ خارجی این روش این قابلیت را دارا می‌باشد تا برای کنترل ارتعاشات پوسته‌های دوانحنایی در کنار سایر روش‌های کنترل فعال و غیرفعال بیشتر مورد استفاده قرار بگیرد.

8- مراجع

- [1] A. Loghmani, M. Danesh, M. Keshmiri, M. M. Savadi, Theoretical and experimental study of active vibration control of a cylindrical shell using piezoelectric disks, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 34, No. 3, pp. 269-287, 2015.
- [2] J. He, X. Chen, Integrated topology optimization of structure/vibration control for piezoelectric cylindrical shell based on the genetic algorithm, *Shock and Vibration*, Vol. 2015, 2015.
- [3] Z. Song, L. Zhang, K. Liew, Active vibration control of CNT-reinforced composite cylindrical shells via piezoelectric patches, *Composite Structures*, Vol. 158, pp. 92-100, 2016.
- [4] M. Abid, M. Abbas, J. Chazot, L. Hammemi, et al., Acoustic response of a multilayer panel with viscoelastic material, *International Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. 17, No. 2, pp. 82, 2012.
- [5] F. X. Xin, T. J. Lu, Analytical modeling of sound transmission across finite aeroelastic panels in convected fluids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 128, No. 3, pp. 1097-107, Sep. 2010.
- [6] H. Yue, Y. Lu, Z. Deng, H. Tzou, Experiments on vibration control of a piezoelectric laminated paraboloidal shell, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 82, pp. 279-295, 2017.
- [7] F. A. C. Viana, V. Steffen Jr, Multimodal vibration damping through piezoelectric patches and optimal resonant shunt circuits, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 293-310, 2006.
- [8] N. W. Hagood, A. von Flotow, Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, No. 2, pp. 243-268, 1991.
- [9] K. Yamada, H. Matsuhisa, H. Utsuno, K. Sawada, Optimum tuning of series and parallel LR circuits for passive vibration suppression using piezoelectric elements, *Journal of sound and vibration*, Vol. 329, No. 24, pp. 5036-5057, 2010.
- [10] J. J. Hollkamp, Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonant shunts, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 5, No. 1, pp. 49-57, 1994.
- [11] D. Niederberger, A. Fleming, S. R. Moheimani, M. Morari, Adaptive multi-mode resonant piezoelectric shunt damping, *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 5, pp. 1025, 2004.
- [12] E. Carrera, S. Brischetto, P. Nali, *Plates and shells for smart structures: classical and advanced theories for modeling and analysis*: John Wiley & Sons, 2011.
- [13] M. S. Howe, *Acoustics of fluid-structure interactions*: Cambridge university press, 1998.
- [14] P. M. Morse, K. U. Ingard, *Theoretical acoustics*: Princeton university press, 1968.
- [15] J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang, Sound transmission through a double-panel construction lined with poroelastic material in the presence of mean flow, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 16, pp. 3724-3734, 2013.
- [16] R. Talebitooti, M. Zarastvand, H. Gohari, Investigation of power transmission across laminated composite doubly curved shell in the presence of external flow considering shear deformation shallow shell theory, *Journal of Vibration and Control*, pp. impress1077546317727655, 2017.

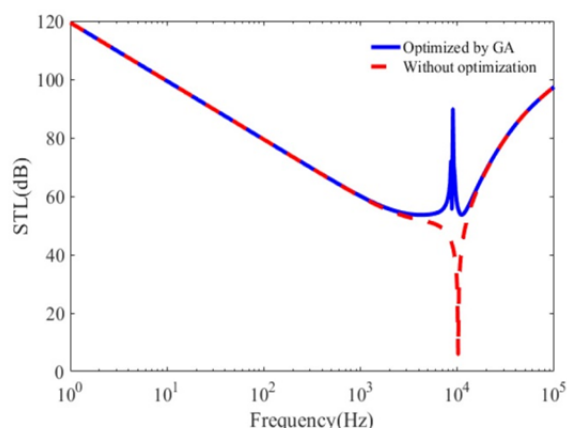


Fig. 8 Sound transmission loss comparison before and after optimizing by GA.

شکل 8 مقایسه پاسخ فرکانسی پوسته دوانحنایی قبل و بعد از استفاده از الگوریتم ژنتیک

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر یک پوسته دو انتحایی کوپل شده با محیط سیال به همراه چندلایه پیزوالکتریک استخراج و با نتایج کارهای دیگر محققان اعتبارسنجی شد. در ادامه با اضافه نمودن یک مدار شنت به معادلات ارتعاشی پوسته دوانحنایی تأثیر روش شنت رزونانسی جهت کنترل غیرفعال ارتعاشات مورد تحلیل قرار گرفت. با تنظیم فرکانس تشدید مدار شنت بر روی فرکانس طبیعی مجموعه، مشخص گردید این روش قادر است تا حد قابل قبولی دامنه صوت گذرنده از پوسته دوانحنایی را در فرکانس تشدید کاهش دهد. در نهایت با به کارگیری 3 مدار شنت که هر کدام به صورت موازی با یک لایه پیزوالکتریک قرار می‌گیرند، تأثیر این روش بر کنترل غیرفعال سازه‌های دوانحنایی مورد ارزیابی قرار گرفت. با به کارگیری این مدارات شنت به صورت موازی با لایه‌های پیزوالکتریک مشاهده گردید عملکرد سازه در کاهش افت انتقال صوت گذرنده از پوسته‌های دوانحنایی به صورت قابل قبولی افزایش یافت. پس از آن با بهینه‌سازی پارامترهای مدار شنت به کمک الگوریتم ژنتیک مشخص گردید مقدار ضریب افت انتقال صوت گذرنده از پوسته در فرکانس تشدید بیش از 80 دسی‌بل افزایش یافته است. به طور کلی با توجه به توانایی روش شنت رزونانسی در کاهش ارتعاشات