بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در یک ورق مدرج تابعی با طول متناهی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند- هدفه

میلاد مهدوی‌فر، علی نوری*، سهراب آسترکی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

چکیده

در این مقاله، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در ورق‌های مدرج تابعی با طول- متناهی با استفاده از الگوریتم ژنیتک چند- هدفه مطالعه شده است. هدف اصلی این مقاله، شناسایی و بهینه نمودن شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) مؤثر برای تراگسیل توان صدای این سازه‌ها می‌باشد. در این راستا، ابتدا معادلات دینامیکی ورق، با استفاده از نظریه کلاسیک صفحات نازک به دست آمدند. سپس، معادلات حاکم بر انتشار موج با توجه به نظریه راسس استخراج شد. سپس، با اعمال شرایط مرزی ضریب افت تراگسیل (تی‌اِل) سازه محاسبه شد. اثرات شبه‌سنجه‌های مؤثر بر افت تراگسیل صدا به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا با استفاده از بکارگیری بهینه‌سازی چند- هدفه با استفاده از رتبه‌بندی غیر- مغلوب در الگوریتم ژنتیک (اِن‌اِس‌جی‌اِی) اجراء شد. هدف از بهینه‌سازی، بیشینه نمودن مقدار افت تراگسیل صدا در ورق مدرج تابعی هم‌زمان با کمینه‌سازی وزن آن است. بسامد بحرانی ورق نیز به عنوان قید مساله در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند جنس لایه‌های ورق مدرج تابعی، ضخامت ورق، ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها، ابعاد ورق، نمای قاعده توانی (توان حجمی) و زاویه موج برخوردی، نقش مهمی در کاهش تراگسیل توان صدا از طریق این سازه‌ها دارند.

کلیدواژه‌ها: افت تراگسیل صدا، ورق مدرج تابعی (اِف‌جی‌اِم)، نمای قاعده توانی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه مهندسی و مواد به همراه نیازمندی به ساخت سازه‌های با کیفیت، به کلاس جدیدی از مواد به نام مواد مدرج تابعی (اِف‌جی‌اِم)[1] منتهی شد. این این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده، مقاومت مکانیکی، مقاومت به سایش، سختی و ضریب هدایت حرارتی بالایی نسبت به مواد کامپوزیت دارند [۱]. تراکنش بین ارتعاشات پنل و محیط اطراف، یکی از موضوعات بسیار مهم در مهندسی سازه‌ها می‌باشد. پنل‌ها اغلب در بدنه و دیگر اجزای سازه‌ای هواپیماها و موشک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پنل‌ها نه تنها ملزومات استحکام سازه‌ای را برآورده می‌کنند، بلکه به عنوان عایق صوتی جهت کاهش صدای منتقل‌شده از محیط اطراف نیز عمل می‌کنند. بنابراین بهینه‌سازی رفتار ارتعاشاتی ناشی از صدای این پنل‌ها یکی از موارد بسیار مهم در طراحی سازه‌ها می‌باشد [۲]. الگوسازی رفتار صوتی این مواد با توجه به محدوده بسامدی عملکرد آن‌ها به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. در این ورق‌ها با ضخامت کم، تغییر شکل صفحه‌ای در راستای عرضی که از تنش برشی ناشی می‌گردد، قابل صرف نظر می‌باشد. بهینه‌سازی افت تراگسیل (تی‌اِل)[2] صدا در صفحات مدرج تابعی کم‌تر توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. هاشمی‌نژاد و همکاران شبیه‌سازی عددی عایق صوتی روی خواص مواد مدرج تابعی انجام دادند [۳]. هانگ و همکاران یک الگوی تحلیلی برای تراگسیل صدا در پنل‌های مدرج تابعی نامتناهی، براساس روش ماتریس گسترش دادند [۴]. دانشجو و همکاران یک حل تحلیلی برای تراگسیل صدا از ورق‌های ضخیم مدرج تابعی با استفاده از نظریه تغییر شکل مرتبه سوم پیشنهاد دادند [۵]. رنجی محاسبه ضریب افت تراگسیل صدای پانل‌های نامتناهی را با استفاده از نظریه مرتبه اول برشی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد [۶]. کومار و همکاران پاسخ ارتعاشی ناشی از صدای دیسک‌های مدرج تابعی بیضوی تحت بار حرارتی

* نویسنده پاسخگو: anouri@ssau.ac.ir

[1] FGM; Functionally Graded Materials

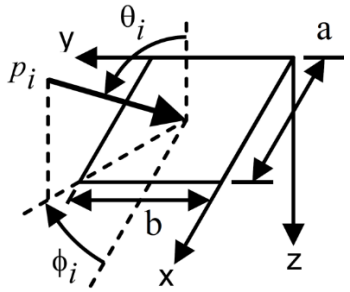
[2] TL; Transmission Loss

را بدست آوردند [۷]. راسس و همکاران افت تراگسیل صدا برای ورق مستطیلی متناهی با تکیه‌گاه ساده و سپر صوتی با طول بی‌نهایت را به‌صورت تحلیلی محاسبه نمودند [۸]. لانگ و دیم افت تراگسیل صدا به داخل ورق‌های ساندویچی را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. وانگ و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی وزن ورق ساندویچی را با بالانس نمودن خواص صوتی و مکانیکی انجام دادند [۱۰]. نوری و آسترکی در سال ۲۰۱۴، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در یک پوسته استوانه‌ای مدرج تابعی نازک را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱]. افت تراگسیل صدای پانل‌های لانه زنبوری مورد استفاده در سازه‌های دریایی توسط جونگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت آن‌ها از نظریه مور[1] برای پیش‌بینی افت تراگسیل صدا استفاده نموده و نتایج آن را با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار دادند [۱۲].

در این مقاله، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای ورق‌های مدرج تابعی با طول متناهی از طریق الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، در ابتدا ماده مدرج تابعی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با استفاده از نظریه کلاسیک صفحه‌ای، معادلات حرکت ورق مدرج تابعی با شرایط تکیه‌گاهی ساده بدست آمده و بسامدهای طبیعی حاصل، با نتایج دیگر محققان مورد مقایسه قرار گرفته است. معادلات ارتعاشی ورق با طول متناهی با معادلات صوتی جفت (کوپل) شده و با حل هم‌زمان معادلات، افت تراگسیل صدا به صورت تحلیلی با همگرا نمودن سری‌های بی‌نهایت محاسبه می‌گردد. در ادامه اثر شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) مختلف بر افت تراگسیل صدا مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا انجام گردیده است.

۲. تشریح مسأله

شکل ۱ نمای کلی مسئله مورد مطالعه را به همراه نحوه انتشار امواج در این سازه‌ها نمایش می‌دهد. یک موج صفحه‌ای با زاویه θ به یک ورق مدرج تابعی به ضخامت h و با ابعاد عرضی a و b برخورد می‌کند.



شکل ۱ برخورد موج صفحه‌ای با یک پنل دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده.

مشخصات فیزیکی و هندسی ورق مدرج تابعی در جدول ۱ ارائه شده است. خواص مکانیکی مواد در نظر گرفته‌شده در لایه‌های ورق، در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ خواص فیزیکی و هندسی ورق مدرج تابعی.

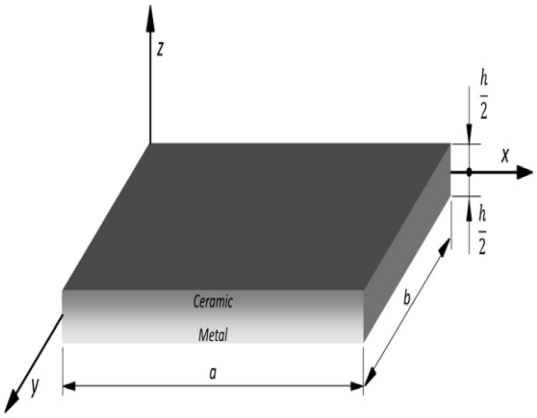
متغیر	شبه‌سنجه	مقدار	واحد
طول ورق	a	۰/۴	متر
عرض ورق	B	۰/۲۵	متر
ضخامت ورق	H	۰/۰۰۱	متر
ضریب میرایی	ξ	۰/۰۰۶	-
سرعت امواج صوتی در هوا	C	۳۴۳	متر/ثانیه
چگالی هوا	ρ	۱/۲۱	کیلوگرم/مترمکعب
زاویه موج برخوردی	θ ،φ	۰ و ۴۵ درجه	-
فشار موج برخوردی	P_i	۱	پاسکال
نمای قاعده توانی (توان حجمی)	N	۱۰	-

نحوه‌ی چینش لایه‌ها به‌صورت سرامیک-فلز در نظر گرفته شده‌اند، که سرامیک و فلز ماده مدرج تابعی به ترتیب آلومینا و فولاد هستند. هدف، محاسبه ضریب افت تراگسیل (تی‌اِل) صدای این سازه، بهینه‌سازی افت تراگسیل بدست آمده و نیز بررسی شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) فیزیکی مؤثر بر ضریب افت تراگسیل صدای سازه مورد نظر با توجه به شرایط مرزی موجود می‌باشد.

[1] Moor's theory

جدول ۲ خواص مکانیکی جنس ورق مورد استفاده.

متغیرها	آلومینا	فولاد	گرافیت اپوکسی	آلومینیوم
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۳۲۰/۲۴	۲۰۷/۸	(x)۱۳۷ (y)۱۰	۷۰
ضریب پواسون	۰/۲۶	۳/۰	۰/۳	۰/۳
چگالی (کیلوگرم/ مترمکعب)	۳۶۹۰	۸۱۶۶	۲۷۰۰	۱۵۵۰



شکل۲ هندسه ورق مستطیلی مدرج تابعی.

۳. موج صوتی برخوردی و دینامیک ورق

با توجه به نظریه کلاسیک ورق نازک، معادلات حرکت حاکم بر ارتعاشات خمشی ورق به صورت زیر خواهد بود [۱۳]:

$$D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial^4 w}+2(D_{12}+D_{22})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+D_{22}2(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4})+C_D\frac{\partial w}{\partial t}+m_p(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2})=2P_i(x,y) \quad (۱)$$

در رابطه فوق، m_p جرم در واحد سطح، C_D ثابت میرایی لزج (ویسکوز) و w جابجایی ورق است.

یک موج صفحه‌ای را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱ با یک پنل دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده برخورد می‌کند. موج فشاری ورودی دارای دامنه‌ی نوسان P_i بوده و پنل را تحت زاویای θ_i عمود بر ورق و ϕ_i در صفحه‌ی پنل مورد برخورد قرار می‌دهد. فشار موج برخوردی $P_i(x,y)$ را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۶]:

$$P_i(x,y)=P_i\exp[i(\omega t-kx\sin\theta_i\cos\phi_i-ky\sin\theta_i\sin\phi_i)] \quad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق، $k=\omega/c_0=2\pi f/c_0$ که عدد موج بوده و ω بسامد تحریک می‌باشد. هنگامی که موج صوتی برخوردکننده به پنل توسط سطح پنل انعکاس می‌یابد، فشار در سطح پنل دو برابر می‌گردد، این فشار را فشار انسداد یا فشار بلوکه نامیده و با p_b نشان می‌دهند و داریم، $P_b(x,y,t)=2P_i(x,y,t)$.

P_i نیز همان‌طور که گفته شد فشار موج برخوردی است که بر روی سطح پنل عمل می‌کند. از آن‌جایی که فشار برخوردی هماهنگ (هارمونیک) است، جابجایی پایدار ورق نیز هماهنگ خواهد بود، به طوری که:

$$w(x,y,t)=W(x,y)\exp(i\omega t) \quad (۳)$$

برای پنل با شرایط تکیه‌گاهی ساده، می‌توان دامنه جابه‌جایی $W(x,y)$ ورق را به صورت یک سری نامتناهی به صورت زیر نوشت:

$$W(x,y)=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}W_{mn}\sin(\frac{m\pi x}{a})\sin(\frac{n\pi y}{b}) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، a و b به ترتیب طول پنل در راستای x و y، و جابجایی کلی می‌باشند. از آن‌جایی که حل پایدار معادله ۳ باید شرایط مرزی را نیز ارضا نماید، معادله ۴ می‌تواند جهت بخش فضایی حل پایدار مورد استفاده قرار بگیرد، بنابراین فشار موج برخوردی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$2P_i\exp[-ik\sin\theta_i(x\cos\phi_i+y\sin\phi_i)]=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sin(\frac{m\pi x}{a})\sin(\frac{n\pi y}{b}) \quad (۵)$$

که P_{mn} دامنه فشار موج برخوردی است و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P_{mn}=\frac{8P_i}{ab}\int_{x=0}^{a}\int_{y=0}^{b}\exp[-ik\sin\theta_i(x\cos\phi_i+y\sin\phi_i)]\sin(\frac{m\pi x}{a})\sin(\frac{n\pi y}{b})dx\,dy \quad (۶)$$

$$P_{mn}=8P_i\bar{I}_m\bar{I}_n \quad (۷)$$

که در رابطه فوق:

$$\alpha=ka\sin\theta_i\cos\phi_i,\quad \beta=kb\sin\theta_i\cos\phi_i \quad (۸)$$

$$\bar{I}_m=\begin{cases}\frac{-i}{2}\mathrm{sign}(\sin\theta_i\cos\phi_i) & \text{if } (m\pi)^2=\alpha^2\\ (m\pi)\frac{1-(-1)^m e^{-i\alpha}}{(m\pi)^2-\alpha^2} & \text{if } (m\pi)^2\neq\alpha^2\end{cases}$$

$$\bar{I}_n=\begin{cases}\frac{-i}{2}\mathrm{sign}(\sin\theta_i\cos\phi_i) & \text{if } (n\pi)^2=\beta^2\\ (n\pi)\frac{1-(-1)^n e^{-i\beta}}{(n\pi)^2-\beta^2} & \text{if } (n\pi)^2\neq\beta^2\end{cases} \quad (۹)$$

جابجایی مودال W_{mn}، با جای‌گذاری معادلات ۴ و ۵ در معادله ۶ به دست می‌آید:

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{m_p(\omega_{mn}^2 - \omega^2 + (\frac{iC_D\omega}{m_p})} \quad (۱۰)$$

که ω_{mn} بسامدهای طبیعی ورق می‌باشند.

بسامدهای طبیعی ورق با شرایط تکیه‌گاهی ساده از روابط زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\begin{aligned} C_{11} &= -A_{11}\alpha^2 - A_{66}\beta^2 \\ C_{12} &= C_{21} = -(A_{12} + A_{66})\alpha\beta \\ C_{22} &= -A_{66}\alpha^2 - A_{22}\beta^2 \\ C_{13} &= C_{31} = B_{11}\alpha^3 + (B_{12} + 2B_{66})\alpha\beta^2 \\ C_{23} &= C_{32} = B_{22}\beta^3 + (B_{12} + 2B_{66})\alpha^2\beta \\ C_{33} &= D_{11}\alpha^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})\alpha^2\beta^2 + D_{22}\beta^4 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{mn} \\ V_{mn} \\ W_{mn} \end{bmatrix} + \omega_{mn}^2 \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_1 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{mn} \\ V_{mn} \\ W_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

که در آن $\alpha = \frac{m\pi}{a}$، $\beta = \frac{n\pi}{b}$ و ω بسامد طبیعی ورق و A، B و D ضرایب سختی‌ها و I_1 متوسط چگالی جرم ورق در واحد سطح از صفحه میانی است [۱۳].

با معلوم بودن جابه‌جایی کلی و سرعت پنل می‌توان نیروی اعمال شده بر روی پنل را محاسبه نمود. فشار موج منتقل‌شده در نقطه‌ای دور از سطح پنل، با استفاده از انتگرال رایلی قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_t(r,\theta,\varphi) = \frac{-\omega^2\rho ab}{2\pi r}\exp\left\{i\omega\left[t - \frac{r}{c} - \frac{\sin\theta}{2c}(a\cos\phi + b\sin\phi)\right]\right\} \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} I_m I_n \quad (۱۳)$$

$$I_m = \begin{cases} \frac{-i}{2}\operatorname{sign}(\sin\theta_i\cos\phi_i) & \text{if } (m\pi)^2 = \alpha^2 \\ (m\pi)\frac{1-(-1)^m e^{-i\alpha}}{(m\pi)^2 - \alpha^2} & \text{if } (m\pi)^2 \neq \alpha^2 \end{cases}$$

$$I_n = \begin{cases} \frac{-i}{2}\operatorname{sign}(\sin\theta_i\cos\phi_i) & \text{if } (n\pi)^2 = \beta^2 \\ (n\pi)\frac{1-(-1)^n e^{-i\beta}}{(n\pi)^2 - \beta^2} & \text{if } (n\pi)^2 \neq \beta^2 \end{cases} \quad (۱۴)$$

شدت موج منتقل‌شده را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$I_t = \frac{\rho}{2c}\left(\frac{4P_i ab}{\pi r m_p}\right)\left|\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} Q_{mn}\right|^2 \quad (۱۵)$$

که در آن:

$$Q_{mn} = \frac{I_m I_n \bar{I}_m \bar{I}_n}{\left(\frac{f_{mn}}{f}\right)^2 - 1 + 2i\varsigma\frac{f_{mn}}{f}} \quad (۱۶)$$

$$\varsigma = \frac{C_D}{2m_p\omega_{mn}} \quad (۱۷)$$

در رابطه فوق ς نسبت میرایی بحرانی می‌باشد.

توان صدای منتقل‌شده (Π_t)، نیز با ادغام شدت صوتی بر روی یک میدان نیم‌کره‌ای موهومی محاسبه خواهد شد:

$$\Pi_t = \int_{\varphi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{2\pi} I_t r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (۱۸)$$

هم‌چنین توان موج صوتی برخوردکننده به سطح پنل از رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد:

$$\Pi_i = \frac{(P_i^2 ab\cos\theta_i)}{2\rho c} \quad (۱۹)$$

و در نهایت، افت تراگسیل (تی‌اِل) برای یک موج صفحه‌ای برخوردکننده به سطح پنل از رابطه‌ی ۲۰ قابل محاسبه خواهد بود [۱۵]:

$$TL = 10\log\left(\frac{\Pi_i}{\Pi_t}\right) \quad (۲۰)$$

در این مقاله، هدف بیشینه‌سازی مقدار افت تراگسیل صدای ورق مدرج تابعی با طول متناهی و کمینه‌سازی توأمان وزن آن بوده و بسامد بحرانی ورق نیز به عنوان قید مساله در نظر گرفته شده است. رابطه زیر بیان ریاضی تابع هدف را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} &\max \cdots \text{TransmissionLoss}_{(av)} = (1-\alpha)f(h,N,a/b) \\ &\min \cdots \text{Weight}/\text{Weight}_0 = (\alpha)f(h,N) \\ &\cdots\cdots\cdots F_{cr} \rangle 52,416\text{Hz} \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که Weight بیانگر وزن ورق، F_{cr} بسامد بحرانی ورق و α نیز یک ثابت وزنی می‌باشند که اهمیت هر کدام از توابع هدف را متناسب با شرایط و نیاز طراح نشان می‌دهند.

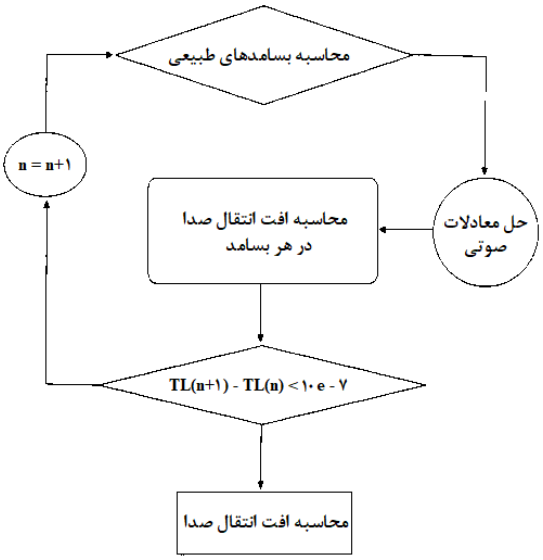
۴. نتایج عددی

به منظور بدست آوردن نتایج عددی، یک ورق مدرج تابعی مستطیلی شکل از جنس آلومینا_آلومینیوم با شرایط مرزی ساده مطابق با مشخصات جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نامتناهی بودن سری‌ها، ابتدا همگرایی سری‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس به اعتبارسنجی و اثر پارمترهای مختلف روی افت تراگسیل صدا پرداخته شده است. در پایان نیز نتایج بهینه‌سازی ارائه شده است.

۴-۱. همگرایی

لازم است از تعداد مودهای کافی در تحلیل‌ها استفاده گردد، در غیر این‌صورت مقدار افت تراگسیل صدای محاسبه‌شده دست بالا خواهد بود. شکل ۳ الگوریتم همگرایی در این تحلیل را نشان می‌دهد. برای برقراری این الگوریتم در هر بسامد، یک حلقه همگرایی در نظر گرفته

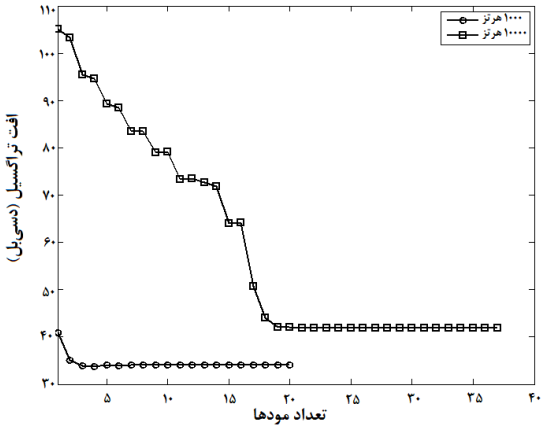
می‌شود. بنابراین در هر بسامد، از مود اول، دستگاه معادلات ارتعاشات صوتی را حل نموده و مجهولات را یافته و مقدار افت تراگسیل صدا را در آن مود به دست می‌آورد، سپس مقدار به‌دست آمده را با مقدار افت حاصل از مود قبلی مقایسه می‌کند، اگر اختلاف بین دو مقدار کم‌تر از $۱۰^{-۷}$ دسی‌بل نباشد، مسیر برای مود بعدی تکرار می‌شود. این امر تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف مقدار افت در مود n+۱ از n، کم‌تر $۱۰^{-۷}$ دسی‌بل گردد. در این‌صورت شرط همگرایی ارضاء گردیده و مقدار افت تراگسیل صدا به‌دست آمده، مقدار مربوط به بسامد خاص در شکل مود مربوطه می‌باشد و این روند حل برای بسامدهای مورد نظر مسئله تکرار می‌شود.



شکل ۳ الگوریتم همگرایی محاسبه افت تراگسیل صدا.

شکل ۴ نمودار همگرایی را برای یک ورق مدرج تابعی در بسامدهای ۱۰۰۰ هرتز و ۱۰,۰۰۰ هرتز نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش بسامد تعداد مودهای مورد نیاز برای همگرایی نیز زیاد می‌گردند.



شکل ۴ منحنی همگرایی برای ورق تخت مدرج تابعی در بسامد ۱۰۰۰ و ۱۰,۰۰۰ هرتز.

۴-۲. اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج ارائه‌شده در این تحقیق، بسامدهای طبیعی بدست آمده با نتایج بسامدهای طبیعی دیگر محققان مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که نتایج با یکدیگر هم‌خوانی بسیار خوبی دارند. این نتایج به همراه درصد خطاها در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

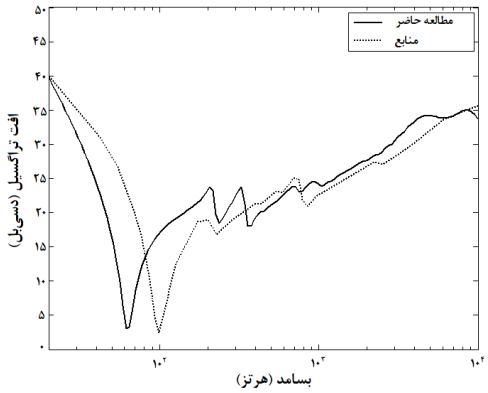
هم‌چنین به منظور صحت‌سنجی، افت تراگسیل صدای بدست آمده در این تحقیق با نتایج راسس برای ورق آلومینیومی در شکل ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. که نشان‌دهنده هم‌خوانی خوب آن‌ها با هم‌دیگر است.

۴-۳. اثر جنس ماده مدرج تابعی

در این قسمت تأثیر جنس ماده انتخاب‌شده بر روی ضریب افت تراگسیل صدا مورد بررسی قرار گرفته است.

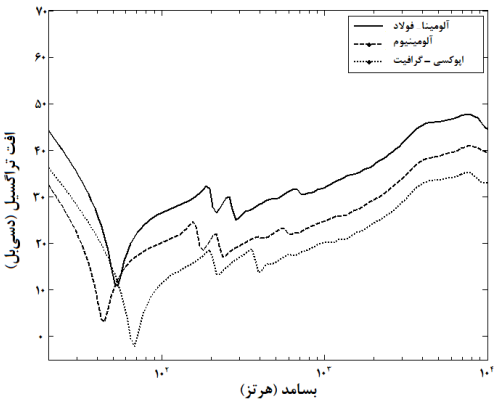
جدول ۳ مقایسه بسامدهای طبیعی بدست آمده با نتایج دیگر محققان.

N		(m,n)	تحقیق حاضر	منبع [۱۱]	منبع [۱۲]	درصد خطا	درصد خطا
۰	h=۰/۰۵	(۱و۱)	۴۴۰	۴۶۰	۴۶۵	٪۴	٪۵
	h=۰/۱	(۱و۱)	۸۸۰	۹۱۰	۹۰۴	٪۳	٪۲
		(۲و۲)	۳۴۸۰	۳۳۶۳	۳۲۸۳	-٪۳	-٪۶
۱۰	h=۰/۰۵	(۱و۱)	۲۷۵	۲۹۰	۲۸۸	٪۵	٪۴,۵
	h=۰/۱	(۱و۱)	۵۴۶	۵۷۵	۵۷۰	٪۴,۵	٪۴,۲
		(۲و۲)	۲۱۷۰	۲۰۷۵	۲۰۴۶	٪۴,۵	-٪۶



شکل ۵ مقایسه افت تراگسیل صدای بدست‌آمده برای ورق آلومینیومی.

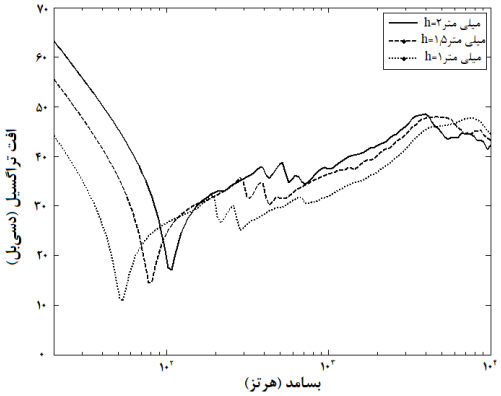
جنس ورق‌ها از سه ماده مدرج تابعی (آلومینا-فولاد)، کامپوزیت (گرافیت-اپوکسی) و آلومینیوم انتخاب شده‌اند. مشخصات فیزیکی و هندسی مسأله در جدول ۱ و مشخصات مربوط به این سه ماده در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با تغییر جنس ورق مشاهده می‌شود که تغییراتی در افت تراگسیل صدا صورت می‌پذیرد، از جمله آن‌که افت تراگسیل صدا در مواد با سختی و چگالی بالا، بیش‌تر می‌باشد (شکل ۶). تغییرات ضریب پواسون بر افت تراگسیل صدا ناچیز می‌باشد و بیش‌ترین اثر را مدول یانگ و چگالی در افت تراگسیل صدا دارند به گونه‌ای که ماده مدرج تابعی، بیش‌ترین مقدار افت تراگسیل صدا را نسبت به دو ماده دارد. آلومینیوم در محدوده جرم کنترل، میزان افت تراگسیل صدای بیش‌تری نسبت به کامپوزیت دارد و کامپوزیت هم در محدوده سختی کنترل، شرایط بهتری نسبت به آلومینیوم خواهد داشت.



شکل ۶ مقایسه افت تراگسیل صدای سه ماده مختلف.

۴-۴. اثر ضخامت ورق

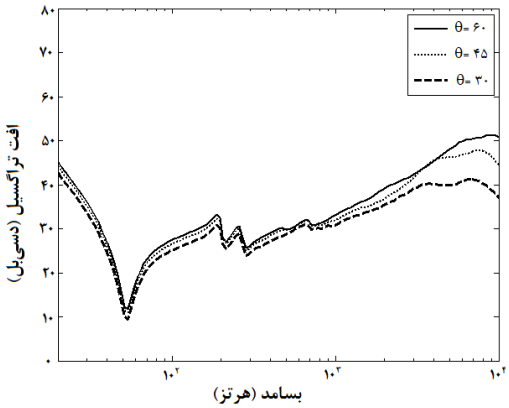
به منظور مقایسه، افت تراگسیل صدا برای ورق مدرج تابعی با سه ضخامت مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت در ورق مدرج تابعی موجب انعکاس بیش‌تر امواج صوتی برخوردی به این سازه شده و در نتیجه موجب بهبود ضریب افت تراگسیل صدای آن می‌گردد.



شکل ۷ افت تراگسیل صدا در ورق مدرج تابعی بر حسب ضخامت آن.

۴-۵. اثر زاویه برخورد موج

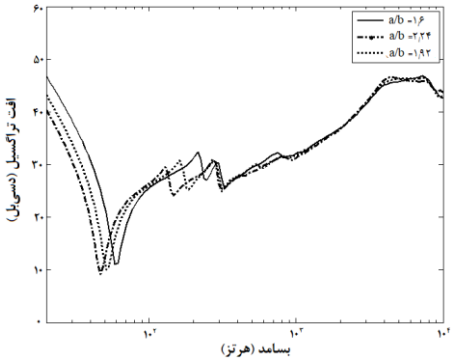
در شکل ۸ اثر زاویه موج برخوردی به ورق مدرج تابعی بر روی عملکرد صوتی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش سه زاویه به صورت ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه برای مقایسه در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش زاویه موج برخوردی روی ورق، میزان افت تراگسیل صدا افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه موجب بهبود ضریب تی‌اِل آن می‌گردد.



شکل ۸ افت تراگسیل صدا در ورق مدرج تابعی بر حسب زاویه برخوردی.

۴-۶. اثر ابعاد ورق

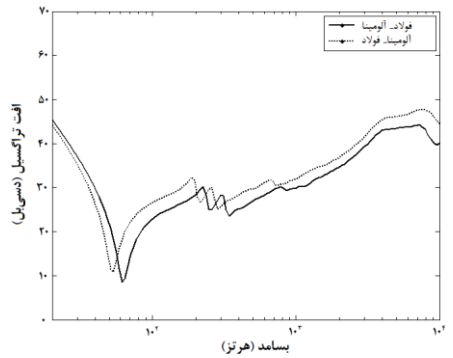
به منظور بررسی اثر ابعاد ورق بر افت تراگسیل صدا، سه اندازه مختلف از نسبت طول به عرض ورق در نظر گرفته شده که در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. افزایش ابعاد ورق، باعث کاهش میزان افت تراگسیل در ورق می‌شود، علت این است که با افزایش ابعاد، صلبیت ماده کاهش می‌یابد. این وضعیت به خصوص در بسامدهای پایین محسوس‌تر می‌باشد، اما در بسامدهای بالاتر اثر افزایش ابعاد بر ورق ناچیز می‌شود.



شکل ۹ افت تراگسیل صدا در ورق مدرج تابعی بر حسب ابعاد ورق.

۴-۷. اثر تغییر لایه‌ها

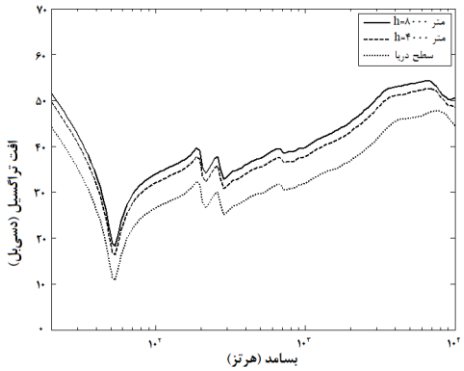
اثر تغییر لایه بالایی و پایینی ورق مدرج تابعی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به اینکه آلومینا سختی بیش‌تری دارد، مطابق شکل ۱۰، در صورت استفاده از سرامیک به عنوان لایه بالایی، افت تراگسیل صدای بیش‌تری در محدوده سختی کنترل رخ می‌دهد. هم‌چنین به دلیل پایین بودن چگالی آلومینا نسبت به فولاد، در صورت استفاده از فلز به عنوان لایه بالایی، افت تراگسیل صدای بیش‌تری در محدوده جرم کنترل ایجاد می‌شود.



شکل ۱۰ افت تراگسیل صدا در ورق مدرج تابعی برحسب جابجایی لایه‌ها.

۴-۸. اثر ارتفاع

اثر افزایش ارتفاع بر افت تراگسیل صدا مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع، چگالی و سرعت جریان خارجی کاهش می‌یابد و میزان افت تراگسیل صدا نیز افزایش پیدا می‌کند. یعنی در ارتفاعات بالاتر، میزان تراگسیل صدا از ورق که بیش‌تر به ناحیه جرم کنترل مربوط می‌شود، کم‌تر است و می‌توان با تغییر در خصوصیات مربوط به جرم، طراحی‌های مربوطه را برای شرایط مناسب صوتی انجام داد. هم‌چنین با افزایش ارتفاع، ناهمگونی مقاومت ظاهری (امپدانس) صوتی نیز افزایش پیدا می‌کند و محیط نیز در مقابل انتشار امواج صوتی مقاومت می‌کند.



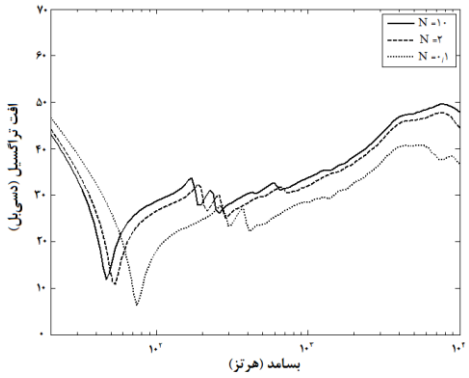
شکل ۱۱ بررسی تغییر ارتفاع بر افت انتقال صدای ورق.

۴-۹. اثر نمای قاعده توانی (توان حجمی) ماده مدرج تابعی

شکل ۱۲ اثر نمای قاعده توانی‌های (توان حجمی‌های) مختلف بر روی افت تراگسیل صدای ورق تخت را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش نمای قاعده توانی، میزان افت تراگسیل صدا در ورق افزایش پیدا می‌کند. بررسی شکل نشان می‌دهد که با افزایش نمای قاعده توانی ماده، سختی ماده بیش‌تر می‌شود، بنابراین باعث افزایش افت تراگسیل صدا در ورق خواهد شد.

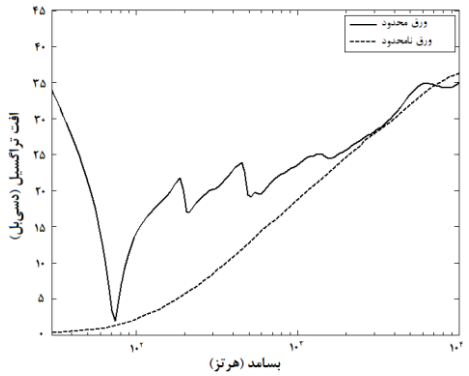
۴-۱۰. مقایسه الگوی متناهی و نامتناهی

شکل ۱۳ میزان افت تراگسیل صدا برای آلومینیوم در دو حالت نظریه ورق متناهی و نامتناهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، دو نمودار در بسامدهای بالای ۲۰۰۰ هرتز هم‌خوانی خوبی با یکدیگر



شکل ۱۲ بررسی تغییر نمای قاعده توانی بر افت تراگسیل صدا.

دارند و در بسامدهای پایین یا ناحیه سختی کنترل، اختلافات زیادی دارند، و آن به خاطر این است که نظریه ورق نامتناهی فقط برای نواحی بسامد بالا مناسب است، در حالی‌که نظریه ورق متناهی هم برای نواحی بسامد بالا و هم نواحی بسامد پایین مناسب است.



شکل ۱۳ مقایسه نظریه ورق متناهی با ورق نامتناهی.

۵. بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا

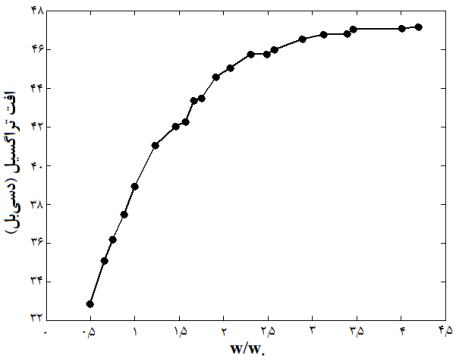
هر مسأله بهینه‌سازی شامل متغیرهایی در الگوی ارائه شده است، که با تنظیم آن‌ها می‌توان به پاسخی مطلوب از الگو دست یافت. در این بهینه‌سازی هدف بیشینه‌سازی مقدار افت تراگسیل صدای ورق هم‌زمان با کمینه‌سازی وزن ورق بوده است. بسامد بحرانی ورق نیز به عنوان قید مساله در نظر گرفته شده است که بسامد بحرانی ورق بهینه شده نباید از بسامد بحرانی ورق اولیه کم‌تر باشد. پس از بررسی تأثیر شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) مختلف بر میزان افت تراگسیل صدا و شناسایی متغیرهای مؤثر بر میزان افت تراگسیل، شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) ضخامت، نسبت طول به عرض و نمای قاعده توانی (توان حجمی) به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. بنابراین متغیرهای ضخامت، نسبت طول به عرض و نمای قاعده توانی ورق، به عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر افت تراگسیل صدای ورق و وزن ورق متأثر از ضخامت و نمای قاعده توانی می‌باشند. بنابراین متغیرهای طراحی ما از نوع متغیرهای پیوسته می‌باشند.

در مقاله حاضر، با توجه به اینکه مسأله بهینه‌سازی حاضر، یک بهینه‌سازی چند هدفی می‌باشد، بنابراین نسخه چند هدفی الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب - (اِن‌اِس‌جی‌اِی- II)[1] مورد استفاده قرار گرفته است خروجی الگوریتم اِن‌اِس‌جی‌اِی- II، مجموعه‌ای از نقاط پرتو می‌باشد که از دید بهینه‌بودن با هم تفاوتی ندارند به‌طوری‌که هر نقطه اگر از دید یک تابع هدف از سایر نقاط شرایط بدتری داشته باشد، حتما از نظر تابع هدف دوم شرایط بهتری دارد. داشتن این نتایج از فرآیند بهینه‌سازی به طراح قدرت انتخاب می‌دهد که در شرایط مختلف، متناسب با نیاز، بهترین ورق را انتخاب کند. سپس از بین نقاط حاصله از بهینه‌سازی، نقطه‌ای به‌عنوان نقطه برتر انتخاب خواهد شد [۱۶].

هدف اصلی از این فرآیند بهینه‌سازی آن است که به این پرسش پاسخ داده شود که بهترین ترکیب از ضخامت، نسبت طول به عرض و نمای قاعده توانی (توان‌حجمی) ورق برای رسیدن به ورقی که بیش‌ترین افت تراگسیل صدا و در عین حال کم‌ترین وزن ورق را داشته باشد، چیست؟ از آن‌جا که در عمل بسامدهای صوتی تنها یک مقدار خاص ندارند، بلکه بازه‌ای از بسامدها را شامل می‌شوند، بنابراین در این کار، متوسط افت تراگسیل صدا در یک بازه بسامدی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است، تا خروجی حاصل از فرآیند بهینه‌سازی به حالت واقعی نزدیک‌تر باشد. بازه بسامدی مد نظر ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد که گوش بیش‌ترین حساسیت را در این بازه دارد. تعداد جمعیت اولیه و نسل به‌ترتیب ۶۰ و ۲۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. حد پایین و بالا نیز برای متغیرهای ضخامت، نسبت طول به عرض و نمای قاعده توانی (توان حجمی) به‌ترتیب ۰٫۰۰۰۵ تا ۰٫۰۰۴ ، ۱ تا ۴

[1] NSGA; Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

و ۰/۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. نمودار پرتو حاصل از بهینه‌سازی مسأله که به کمک الگوریتم ژنتیک چند- هدفه (اِن‌اِس‌جی‌اِی- II) بدست آمده، در شکل ۱۴ نشان داده شده است، که با افزایش وزن افت تراگسیل صدای ورق افزایش می‌یابد، این روند تا جایی ادامه دارد که وزن به حدود ۲/۸ کیلوگرم می‌رسد، از آن‌جا به بعد افزایش وزن تاثیر آن‌چنانی بر میزان افت تراگسیل صدا نخواهد داشت. از طرفی با کاهش وزن از حدود ۳۳۰ گرم به شدت میزان افت تراگسیل صدا کاهش می‌یابد، بنابراین نقطه بهینه مورد نظر در همین بازه خواهد بود.



شکل ۱۴ نمودار پرتوی نقاط حاصل از بهینه‌سازی.

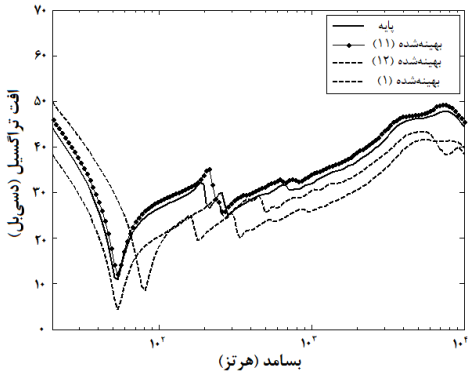
به منظور انتخاب یک نقطه طراحی از بین نقاط نمودار پرتو، از روش تاپسیس[1] استفاده شده است. این روش به عنوان یک فنّ برتر رده‌بندی ترجیحات براساس مشابهت به راه‌حل آرمانی، استفاده شده است، که با توجه به مقادیر ثابت وزنی، به نظر می‌رسد نقاطی که در حدود کم‌تر از وزن یک کیلوگرم روی نمودار پرتو مناسب باشد، صفحات ۱۱، ۱۲ و ۱ خواهند بود که مشخصات صفحات انتخاب‌شده در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

هم‌چنین از مقایسه ورق مدرج تابعی پایه (جدول ۲) با ورق‌های بهینه‌شده که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، طراح می‌تواند با توجه به شرایط و متناسب نیاز، مقادیر ثابت وزنی را برای هر کدام از توابع هدف تغییر و ورق مورد نظر خود را انتخاب کند. هم‌چنین با توجه به شکل ۱۶، در حالت وزن یکسان، ورق مدرج تابعی بهینه‌شده در بازه بسامدی مورد نظر افت تراگسیل صدای بالاتری نسبت به ورق پایه دارا می‌باشد.

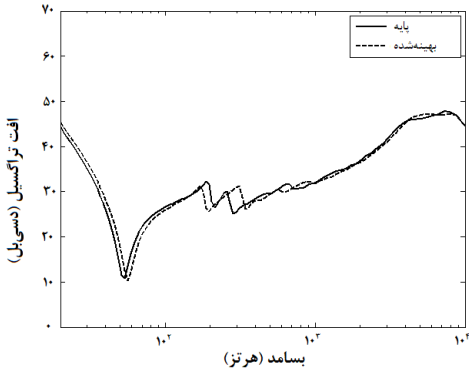
[1] Topsis

جدول۵ مشخصات صفحات انتخاب شده.

نقطه	۱۱	۱۲	۱
α	۰/۳	۰/۵	۰/۷
ضخامت (متر)	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۷۲۸
طول به عرض	۱/۴۰۱۶	۲/۰۳۰۲	۲/۰۱۵۸
نمای قاعده توانی (توان حجمی)	۴/۴۸۷۶	۰/۲۵۷۴	۰/۲۲۹۱
وزن (کیلوگرم)	۰/۸۱۸	۰/۵۰۱	۰/۳۳
متوسط افت تراگسیل (دسی‌بل)	۴۱/۰۵۳	۳۶/۱۵۸	۳۲/۸۲۴



شکل ۱۵ مقایسه افت تراگسیل صدای ورق پایه و ورق‌های بهینه‌شده.



شکل ۱۶ مقایسه افت تراگسیل صدای ورق پایه و ورق بهینه شده.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای نخستین بار، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در ورق نازک مدرج تابعی با استفاده از روش تحلیلی و با به کارگیری نظریه کلاسیک صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. پس از اعتبارسنجی الگوی ارائه شده و بررسی اثر شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) مختلف روی افت تراگسیل صدا، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت

ورق، میزان صدای منتقل شده به داخل ورق تخت کاهش می‌یابد. با افزایش شبه‌سنجه‌های نمای قاعده توانی (توان حجمی) ماده و ارتفاع و هم‌چنین با افزایش زاویه موج برخوردی با ورق، میزان افت تراگسیل صدا در ورق افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ابعاد ورق، میزان افت تراگسیل صدای آن کاهش می‌یابد. موادی که سختی زیادتری دارند، افت تراگسیل صدای بیش‌تری خواهند داشت. در صورتی که سرامیک به عنوان لایه بالایی ورق استفاده شود، در این صورت افت تراگسیل صدای بیش‌تری در محدوده سختی کنترل ایجاد می‌شود. ماده مدرج تابعی در مقایسه با کامپوزیت و آلومینیوم، میزان افت تراگسیل صدای بیش‌تری خواهد داشت. در نهایت، در فرآیند بهینه‌سازی دوهدفی شبه‌سنجه‌های (پارامترهای) بهینه ضخامت ورق، ابعاد ورق و نمای قاعده توانی (توان حجمی) برای ورق مدرج تابعی بدست آمد که این ورق بهینه‌شده از نظر رفتار صوتی و هم از نظر وزن سازه، در شرایط مطلوب‌تری نسبت به ورق پایه قرار دارد. که بر این اساس ورق بهینه‌شده‌ی ۱۱ در هر دو ناحیه شرایط مطلوبی نسبت به ورق پایه خواهد داشت. هم‌چنین در حالت وزن یکسان، ورق بهینه‌شده نسبت به ورق پایه در بازه بسامدی مورد نظر، شرایط بهتری خواهد داشت.

۷. فهرست منابع

[1] C.T. Loy, K.Y. Lam, J.N. Reddy, “Vibration of functionally graded cylindrical shells,” International Journal of Mechanical Sciences, vol. 41, no. 3, pp. 309-324, 1999.

[2] N. Chandra, S. Raja, K.V. Nagendra Gopal, “Vibro-acoustic response and sound transmission loss analysis of functionally graded plates,” Journal of Sound and Vibration, vol. 333, no. 22, pp. 5786-5802, 2014.

[3] S.M. Hasheminejad, M. Shabanimotlagh, “Sound insulation characteristics of functionally graded panels,” Acta Acustica United with Acustica, vol. 94, no. 2, pp. 290-300، 2008.

[4] C. Huang, S. Nutt, “An analytical study of sound transmission through unbounded panels of functionally graded materials,” Journal of Sound and Vibration, vol. 330, no. 6, pp. 1153-1169، 2011.

[5] K. Daneshjo, M.M. Shokrieh, M. Ghorbani, “Analytical model of sound transmission through relatively thick cylindrical shells considering third order shear deformation theory,” Composite Structures, vol. 93, no. 1, pp. 67-78 ،2010.

[6] K. Renji, “Sound transmission loss of unbounded panels in bending vibration considering transverse shear deformation,” Journal of Sound and Vibration, vol. 283, no. 1, pp. 478-486, 2005.

[7] B.R. Kumar, N. Ganesan, R. Sethuraman, “Vibro-acoustic analysis of functionally graded elliptic disc under thermal environment,” Mechanics of Advanced Material and Structures, vol. 16, no. 2, pp. 160-172, 2009.

[8] L.A. Roussos, “Noise transmission loss of a rectangular plate in an infinite baffle,” The Journal of the Acoustical Society of America, 1985.

[9] M.A. Lang, C.L. Dym, “Optimal acoustic design of sandwich panels,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 57, no. 6, pp. 1481–1487, 1974.

[10] T. Wang, S. Li, S.R. Nutt, “Optimal design of acoustical sandwich panels with a genetic algorithm,” Applied Acoustics, vol. 70, no. 3, pp. 416–425, 2009.

[11] A. Nouri, S. Astaraki, “Optimization of sound transmission loss through a thin functionally graded material cylindrical shell,” Shock and Vibration, vol. 2014, 2014.

[12] J.D. Jung, S.Y. Hong, J.H. Song, H.W. Kwon, “A study on transmission loss characteristics of honeycomb panel for offshore structures,” Applied Mathematics and Physics, vol. 3, no. 2, pp. 172-176, 2015.

[13] M.S. Qatu, “Vibration of Laminated Shells and Plates,” Elsevier Academic press, 2004.

[14] H. Shyang, C. Yen-Ling, “Mechanical behavior of functionally graded materials under transverse load-part I: Analysis,” International Journal of Solids and Structures, vol. 43, no. 13, pp. 3657-3674, 2006.

[15] H. Changzheng, N. Steven, “An analytical study of sound transmission through unbounded panels of functionally grade materials,” Journal of Sound and Vibration, vol. 330, no. 6, pp.1153-1169، 2011.

[16] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, “A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II,” International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, vol. 1917, pp. 849-858, 2000.

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 5, No. 2, 2018

Optimization of sound transmission loss in a finite-length FGM plate using multi-objective genetic algorithm

M. Mahdavifar, A. Nouri*, S. Astarki

Aerospace Engineering Department, Shahid Sattry Aeronautical University of Science and Technology

Abstract

In this paper, the optimization of sound transmission through finite-length Functionally Graded Materials (FGM) plates by the use of genetic algorithm is studied. The main objective of this paper is to identify and optimize the effective parameters for sound power transmission of these structures. In this regard, at first, the dynamic equations of the plate are obtained using the classic theory of thin plates, then the wave propagation governing equations are extracted according to the Roussos theory. Next, the Transmission Loss coefficient (TL) of the structure is calculated by applying the boundary conditions. The effect of parameters effective on sound transmission loss is numerically investigated and optimization of sound transmission loss is executed by applying multi-objective optimization using Non-dominated Sorting in Genetic Algorithm (NSGA). The purpose of optimization is to maximize the sound transmission loss of FGM plate with minimization of its weight simultaneously, and the critical frequency of the plate is also considered as the problem constraint. The results show that the FGM material, plate thicknesses, layers layout, plate dimensions, power law exponent and the angle of incidence play an important role in reducing the sound power transmission through these structures.

Keywords: Sound transmission loss, FGM plate, Power law exponent, Genetic algorithm, Optimization.

pp. 12-21 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: anouri@ssau.ac.ir