بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای ورق مرکب با سپر صوتی نامتناهی

مرتضی باقری*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

چکیده

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توسعه روش راسس، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در یک ورق مرکب متقارن مستطیلی با سپرصوتی نامتناهی و تکیه‌گاه ساده مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور جلوگیری از کاهش سفتی ورق در حین فرآیند بهینه‌سازی، قید کمانش اعمال گردیده و از بسآمدهای گسسته بر مبنای افت تراگسیل صدا با ثابت وزنی استفاده شده است. لایه‌چینی براساس مواد مرسوم مرکب صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که در ناحیه جرم مهار، چیدمان لایه‌ها اثر چندانی در بهبود افت تراگسیل صدا به‌دلیل نزدیک بودن چگالی مواد مرکب ندارند. از طرف دیگر، افزایش افت تراگسیل صدا در ناحیه سفتی مهار صورت گرفته و مواد با سفتی بالاتر رفتار مناسب‌تری را در این زمینه نشان می‌دهند. براساس نتایج این تحقیق، بهینه‌سازی ضخامت ورق، اثر زیادی روی بهبود افت تراگسیل صدا دارد، اما ضروری است که امتیاز وزن کم ماده مرکب تحت تأثیر این فرآیند قرار نگیرد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مواد مرکب چند ماده، تنها به‌منظور افت تراگسیلی بیش‌تر صدا، در مقایسه با مواد یک ماده مقرون به صرفه نمی‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، افت تراگسیل، سپرصوتی، ورق مرکب.

۱. مقدمه

بررسی افت تراگسیل[1] صدای مواد مرکب[2] به‌دلیل استفاده در بدنه هواپیماها از الزامات طراحی محسوب می‌شود [۱-۲]. با این وجود، افزایش این مشخصه نباید کم بودن وزن مواد مرکب را تحت تأثیر قرار دهد. الگوهای تحلیلی متعددی برای پیش‌بینی افت تراگسیل صدای دیواره‌های مرکب معرفی شده‌اند. این الگوها عموماً به دو دستهٔ بسآمد بالا و بسآمد پایین دسته‌بندی می‌شوند. در بسآمد بالا ابعاد دیواره در مقایسه با طول‌موج مربوطه بسیار بزرگ بوده، لذا دیواره را می‌توان الگویی با طول نامتناهی در نظر گرفت. الگوهای تحلیلی بسیاری بر مبنای نظریهٔ طول نامتناهی برای ورق‌ها و پوسته‌های همسان‌گرد[3]، راست‌گرد[4] و ناهمسان‌گرد[5] توسعه یافته‌اند [۳-۷]. اما در بسآمدهای پایین، ابعاد دیواره قابل مقایسه با طول‌موج بلند صدا بوده و لذا برای محاسبه افت تراگسیل صدای این ورق‌ها، الگوی تحلیلی بایستی دربرگیرنده شرایط مرزی دیواره نیز باشد.

بنابراین، توسعه نظریهٔ افت تراگسیل صدا برای ورق با طول محدود مورد نیاز است. در روش تحلیلی برای ورق محدود، دیواره به صورت ورق مستطیلی با تکیه‌گاه ساده که دارای سپرصوتی[6] با طول نامتناهی می‌باشد، الگو می‌شود [۸]. موضوع بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای مواد مرکب با توجه به جنس و هندسه آن‌ها یکی از موضوعات مهم در تحقیقات دهه‌های اخیر است، که بیش‌تر این تحقیقات مربوط به الگوهای بسآمد بالا می‌باشند [۹-۱۲]. افت تراگسیل صدا درون ورق‌های ساندویچی به‌وسیله لانگ و دیم [۹] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها مدول یانگ، چگالی جرمی و ضخامت رویه‌ها و هسته را به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفتند. وانگ و همکاران [۱۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک[7]، بهینه‌سازی وزن ورق ساندویچی را با متوازن[8] نمودن خواص صوتی و مکانیکی انجام دادند. نوری و همکاران [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، افت تراگسیل صدای پوسته‌های[9] مدرج تابعی را بهینه‌سازی نمودند. تسای [۱۲] نیز با استفاده از روش

* نویسنده پاسخگو: bagheri@alborz.kntu.ac.ir

[1] Transmission loss
[2] Composite
[3] Isotropic
[4] Orthotropic
[5] Anisotropic
[6] Baffle
[7] Genetic algorithm
[8] Balance
[9] Shells

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ سال چهارم/ شماره ۱ / بهار و تابستان ۱۳۹۵

بهینه‌سازی گرادیان مزدوج، میزان افت تراگسیل صدای ورق مرکب را بهینه کرد.

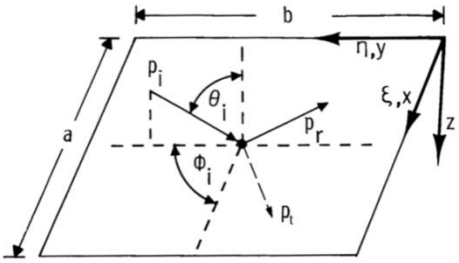
با وجود مطالعات یاد شده، تاکنون تحقیقات زیادی روی بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در بسآمدهای پایین انجام نشده است. هدف از این مقاله، به‌دست آوردن بیشترین افت تراگسیل صدا یک ورق مستطیلی مرکب با طول محدود با توجه به چیدمان و ضخامت لایه‌ها براساس توسعه روش مودال[1] ارائه شده در منبع [۸] می‌باشد. برخلاف روش اولیه مودال که برای صفحه همسان‌گرد به‌کار رفته، این روش امکان محاسبه افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی ناهمسان‌گرد با تکیه‌گاه ساده و سپرصوتی نامتناهی را امکان‌پذیر نموده است. بهینه‌سازی الگوی تحلیلی در بسآمدهای گسسته در بازه بسآمدی ۱-۴ کیلوهرتز مطابق با استاندارد اِی‌اِس‌تی‌اِم[2] صورت گرفته است [۱۳-۱۴]. فرآیند بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده و چیدمان، ضخامت و مواد هر لایه به عنوان پارامتر طراحی لحاظ می‌شوند. به‌منظور حفظ سفتی[3] و وزن ماده مرکب از بار کمانش[4]، مود[5] اول و وزن ورق به عنوان قیود در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. به‌دلیل عدم وجود جواب تحلیلی برای کمانش ورق ناهمسان‌گرد، مود اول کمانش توسط روش عنصر متناهی[6] متناهی[6] و با استفاده از زبان اِی‌پی‌دی‌اِل[7] نرم‌افزار آنسیس[8] آنسیس[8] محاسبه شده است. به‌دلیل نزدیکی چگالی مواد مرکب، نتایج نشان می‌دهند که در ناحیه جرم کنترل، بهینه‌سازی پارامترهای طراحی نظیر ضخامت، زاویه و مواد لایه‌ها اثر چندانی روی افت تراگسیل صدا ندارد. بنابراین برای بهبود افت تراگسیل صدای مواد مرکب در فرآیند بهینه‌سازی، ضروری است که از مواد با سفتی بالا استفاده شود.

۲. تشریح الگوی تحلیلی

مبانی نظریهٔ استفاده شده در این تحقیق براساس الگوی تحلیلی راسس [۸] می‌باشد. در این الگو، افت تراگسیل صدا برای ورق همسان‌گرد با تکیه‌گاه‌های ساده، توسط روش جمع مودال انجام می‌گیرد. لذا ضروری است که این مطالعه برای مواد ناهمسان‌گرد نیز بسط داده شود. در این راستا، ابتدا معادلات حرکتی ورق ناهمسان‌گرد با در نظر گرفتن تمامی عبارات سفتی بازنویسی می‌شود:

$$D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^3 \partial \eta}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2}$$
$$+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi\, \partial \eta^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4}+C_D\frac{\partial w}{\partial t}+m_p\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (۱)$$
$$=p_i(\xi,\eta,t)+p_r(\xi,\eta,t)-p_t(\xi,\eta,t)$$

مطابق شکل ۱، p_i، p_r و p_t به‌ترتیب فشار موج صوتی برخوردی، انعکاس‌یافته و تراگسیل‌شده می‌باشند.



شکل ۱ هندسه موج برخوردی به ورق [۸].

این سه فشار را می‌توان به‌صورت جمع فشار مسدودشده[9] (فشار سمت موج برخوردی) و فشار تابیده شده (فشار ناشی از ارتعاش ورق) نوشت. به‌دلیل این‌که موج تابیده شده از ورق، تابع نامعینی از جابه‌جایی پوسته می‌باشد، راسس فرض نمود که فشار موج تابیده شده در مقایسه با فشار مسدود شده قابل صرف‌نظر است. فرض مذکور این امکان را می‌دهد که حل دقیقی روی ناحیه بسآمدی گسترده به‌جز در نقاط نزدیک به بسآمدهای بازآوایش[10] اصلی وجود داشته باشد. بنابراین تنها عبارت فشار مسدود شده به‌عنوان نیرو در رابطه ۱ وجود خواهد داشت.

$$D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^3 \partial \eta}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2}$$
$$+4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial \xi\, \partial \eta^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4}+C_D\frac{\partial w}{\partial t}+m_p\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=p_b(\xi,\eta,t) \quad (۲)$$

[1] Modal
[2] ASTM; American Society for Testing and Materials
[3] Stiffness
[4] Buckling
[5] Mode
[6] Finite element
[7] APDL
[8] ANSYS
[9] Blocked
[10] Resonance

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

در رابطه ۲، می‌توان فشار مسدود شده را دو برابر فشار موج برخوردی در نظر گرفت [۱۵]. فشار موج برخوردی که به‌طور مایل به ورق برخورد می‌کند، به‌صورت تابع همساز رابطه ۳ در نظر گرفته می‌شود:

$$p_i(\xi,\eta,t)= p_i \exp\left[i(\omega t - k\xi \sin\theta_i \cos\phi_i - k\eta \sin\theta_i \sin\phi_i)\right] \quad (۳)$$

که در آن، k عدد موج و ω بسآمد زاویه‌ای است. با توجه به این‌که فشار صوتی به‌صورت هم‌ساز می‌باشد، جابه‌جایی ورق نیز هم‌ساز خواهد بود:

$$w(\xi,\eta,t)=W(\xi,\eta)\exp(i\omega t) \quad (۴)$$

با جای‌گذاری روابط ۳ و ۴ در رابطه ۲ و تقسیم طرفین بر $\exp(i\omega t)$ رابطهٔ ۵ حاصل می‌شود:

$$D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^4}+4D_{16}\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^3\partial\eta}+2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4 w}{\partial\xi^2\partial\eta^2} +4D_{26}\frac{\partial^4 w}{\partial\xi\,\partial\eta^3}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial\eta^4}+iC_D\omega\frac{\partial w}{\partial t}+m_p\omega^2\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 2p_i\exp\left[ik\sin\theta_i(\xi\cos\phi_i-\eta\sin\phi_i)\right] \quad (۵)$$

برای یک ورق با تکیه‌گاه ساده، جابه‌جایی ورق را می‌توان به‌صورت مجموع نامتناهی عبارت مودهای ارتعاشی در ضریب مشارکت مودال مربوطه نوشت:

$$W(\xi,\eta)= \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}\sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{m\pi\eta}{b}\right) \quad (۶)$$

بدین ترتیب فشار صوتی نیز به‌صورت یک توالی[1] نامتناهی از توابع ویژه مودال نوشته می‌شود:

$$2p_i\exp\left[ik\sin\theta_i(\xi\cos\phi_i-\eta\sin\phi_i)\right]= \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} p_{mn}\sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{m\pi\eta}{b}\right) \quad (۷)$$

که در آن، p_{mn} فشار مودال تعمیم‌یافته بوده و از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$p_{mn}=\frac{8p_i}{ab}\int_{\xi=0}^{a}\int_{\eta=0}^{b}\exp\left[ik\sin\theta_i(\xi\cos\phi_i-\eta\sin\phi_i)\right] \sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right)d\eta\,d\xi \quad (۸)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۸ رابطهٔ ۹ حاصل می‌شود.

$$p_{mn}=8P_i\overline{I_m}\,\overline{I_n}$$

$$\overline{I_m}= \begin{cases} \frac{-i}{2}\,sgn(\sin\theta_i\cos\phi_i)\begin{cases}(m\pi)^2\\ =\left[\sin\theta_i\cos\phi_i(\omega a/c)\right]^2\end{cases}\\ \frac{m\pi\left\{1-(-1)^m\exp\left[-i\sin\theta_i\cos\phi_i(\omega a/c)\right]\right\}}{(m\pi)^2-\left[\sin\theta_i\cos\phi_i(\omega a/c)\right]^2}\begin{cases}(m\pi)^2\\ \neq\left[\sin\theta_i\cos\phi_i(\omega a/c)\right]^2\end{cases}\end{cases} \quad (۹)$$

[1] Series

در نتیجه ضریب مشارکت مودال را می‌توان با جای‌گذاری روابط ۷ و ۸ در رابطه ۵ به‌دست آورد.

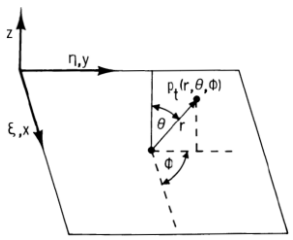
$$W_{mn}=\frac{p_{mn}}{m_p\left[\omega_{mn}^2-\omega^2+\left(\frac{iC_D\omega}{m_p}\right)\right]} \quad (۱۰)$$

که در آن، ω_{mn} بسآمدهای طبیعی ورق ناهمسان‌گرد با تکیه‌گاه ساده بوده و می‌توان مقادیر آن را از معادلهٔ ارائه‌شده توسط برت [۱۶] محاسبه نمود. بدین ترتیب، معادله ارتعاشی ورق کامل می‌شود. هم‌چنین، مطابق شکل ۲، فشار تراگسیل‌شده به نقطه‌ای خارج از ورق (ناشی از ارتعاشات ورق) با استفاده از انتگرال ریلی و به‌صورت معادله ۱۹ محاسبه می‌گردد.

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

$$I_m= \begin{cases} \frac{-i}{2}\,sgn(\sin\theta\cos\phi)\begin{cases}(m\pi)^2\\ =\left[\sin\theta\cos\phi(\omega a/c)\right]^2\end{cases}\\ \frac{m\pi\left\{1-(-1)^m\exp\left[-i\sin\theta\cos\phi(\omega a/c)\right]\right\}}{(m\pi)^2-\left[\sin\theta\cos\phi(\omega a/c)\right]^2}\begin{cases}(m\pi)^2\\ \neq\left[\sin\theta\cos\phi(\omega a/c)\right]^2\end{cases}\end{cases} \quad (۱۱)$$

$$I_n= \begin{cases} \frac{-i}{2}\,sgn(\sin\theta\cos\phi)\begin{cases}(n\pi)^2\\ =\left[\sin\theta\cos\phi(\omega b/c)\right]^2\end{cases}\\ \frac{n\pi\left\{1-(-1)^n\exp\left[-i\sin\theta\cos\phi(\omega b/c)\right]\right\}}{(n\pi)^2-\left[\sin\theta\cos\phi(\omega b/c)\right]^2}\begin{cases}(n\pi)^2\\ \neq\left[\sin\theta\cos\phi(\omega b/c)\right]^2\end{cases}\end{cases}$$



شکل ۲ هندسه موج انعکاسی از ورق ارتعاشی [۸].

توان موج تراگسیل‌شده ($\prod_t$) را می‌توان با انتگرال‌گیری عددی از شدت موج تراگسیل‌شده داخل یک نیم‌کره محاسبه نمود:

$$\prod_t=\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi/2} I^t r^2\sin\theta\,d\theta\,d\phi \quad (۱۲)$$

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

$$I^t = \left|\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} p_t\right|^2 \Big/ (2\rho c) \quad (۱۳)$$

در انتها نیز افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$TL = 10 log \frac{\prod_i}{\prod_t} \quad (۱۴)$$

که در آن، $\prod_i$ توان موج صوتی برخوردی است:

$$\prod_i = \frac{p_i^2 ab \cos\theta_i}{2\rho c} \quad (۱۵)$$

بنابراین، محاسبهٔ افت تراگسیل صدا را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱) محاسبه فشار تعمیم یافته با استفاده از رابطه ۹.

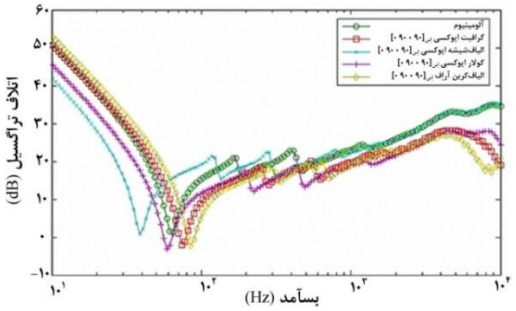
۲) محاسبه توان موج برخوردی با استفاده از رابطه ۱۵.

۳) محاسبه پاسخ ارتعاشی ورق با استفاده از رابطه ۱۰ و منبع [۱۶].

۴) محاسبه فشار، شدت و توان موج تابشی با روابط ۱۲-۱۳.

۵) محاسبه افت تراگسیل صدا با استفاده از رابطه ۱۴.

این روش را می‌توان در طراحی اولیه تراگسیل صدای ورق‌های مستطیلی ناهمسان‌گرد مرتعش با تحریک امواج صوتی به کار گرفت. شکل ۳ اثر جنس مواد بر روی افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی به ابعاد ۲۰ × ۳۶ سانتی‌متر با تکیه‌گاه ساده را نشان می‌دهد. ضخامت هر لایه ماده مرکب برابر با ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۷].



شکل ۳ افت تراگسیل صدا در مواد مرکب [۱۷].

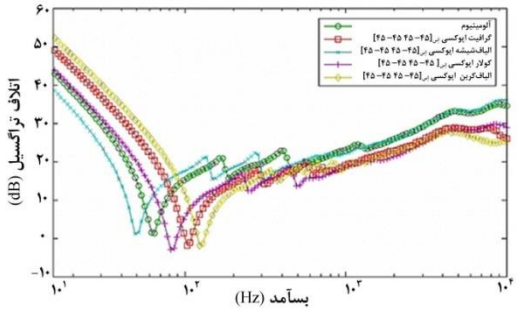
مواد مرکب مورد نظر شامل گرافیت اپوکسی[1]، الیاف‌شیشه[2]، کولار[3] و الیاف‌کربن[4] می‌باشند که خواص مکانیکی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

[1] Graphite epoxy

جدول ۱ خواص مکانیکی مواد مرکب مورد استفاده.

مواد	E_{11} (GPa)	E_{12} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m^3)
آلومینیوم	۷۰	۷۰	۲۶/۹	۰/۳۳	۲۷۶۰
گرافیت اپوکسی	۱۳۷	۱۰	۵	۰/۳	۱۵۵۰
الیاف شیشه اپوکسی	۳۹	۹	۲	۰/۳۴	۲۱۹۰
کولار اپوکسی	۷۶	۶	۲	۰/۳	۱۳۶۰
الیاف کربن	۲۰۶	۵/۱۷	۲/۵۸	۰/۲۵	۱۵۲۰

مطابق شکل ۳ استفاده از آلومینیوم در افزایش افت تراگسیل صدای بسآمدهای بالا، و الیاف کربن در بسآمد-های پایین بسیار مؤثرتر از سایر مواد می‌باشند. این نتیجه به‌دلیل بالا بودن چگالی آلومینیوم و سفتی الیاف کربن قابل انتظار است. شکل ۴ اثر جهت الیاف را روی افت تراگسیل صدا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می-شود، زاویه چیدمان لایه‌ها تأثیر قابل توجهی بر روی بسآمد اول پایه و در نتیجه افت تراگسیل صدا و هم‌چنین ناحیهٔ مهار (کنترل) سفتی دارد. اما، در بسآمدهای بالا، افت تراگسیل صدا از قانون جرم پیروی کرده و سفتی ناشی از جهات الیاف ورق، اثر چندانی روی افت تراگسیل صدا در این ناحیه ندارند.



شکل ۴ تأثیر زاویه چیدمان لایه‌ها در افت تراگسیل صدا.

اگرچه زاویه قرارگیری الیاف اثری روی افت تراگسیل صدا در ناحیه جرم مهار ندارد، ولی بار کمانش و بسآمد بحرانی،

[2] Fiberglass
[3] Kevlar
[4] Fibercarbon

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

مود اول را به شدت تحت تأثیر قرار داده و لذا مهار این دو مشخصه به‌عنوان قیود بهینه‌سازی، مانع از نرمی فزاینده ورق می‌شود. جدول ۲ اثر زاویه الیاف را بر عبارات خمشی، بسآمد طبیعی و بار کمانش مود اول نشان می‌دهد.

۲-۱. بهینه‌سازی

به‌منظور دست‌یابی به بیش‌ترین میزان افت تراگسیل صدا در یک سازه، لازم است از بهینه‌سازی غیرخطی با قیدهای چندگانه استفاده شود. در این صورت شکل ریاضی مسئله بهینه‌سازی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min f(X) = -STL(X) \qquad (۱۶)$$
$$X = [x_1, x_2, ...x_n],\ X \in R^n$$

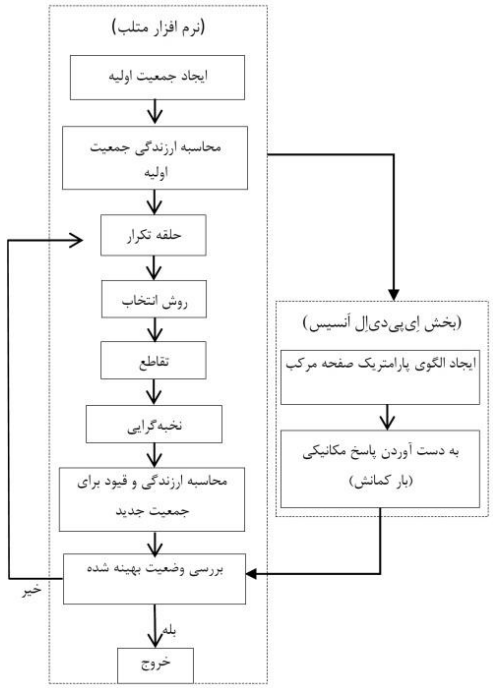
$$s.t.\ \ g_i(X) = 0 \quad i = 1,...,m \qquad (۱۷)$$

$$c_i(X) \le 0 \quad i = m+1,...,p \qquad (۱۸)$$

که در آن‌ها، g_i و c_i قیدهای مسئله و $f(x)$، تابع هدف است که بایستی نسبت به بردار متغیرهای طراحی x کمینه شود. در این مقاله، به‌منظور بهینه‌سازی، یک ورق هشت لایه مرکب متقارن در نظر گرفته شده است. متغیرهای طراحی برای این مسئله زاویه الیاف، ضخامت لایه و جنس لایه‌ها می‌باشند.

$$X = [\theta_i, h_i, m_i],\ \ i = 1,...,4 \qquad (۱۹)$$
$$X_{lb} \le X \le X_{ub}$$

که در آن، بردارهای X_{lb} و X_{ub}، کران‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی را نشان می‌دهند. به‌دلیل اهمیت وزن و بار کمانش سازه، این الزامات به‌صورت قیدهای غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مسائل مختلف وجود دارد. در این تحقیق، برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این روش، برای حل مسائل مقید و غیرمقید به کار گرفته می‌شود و در زمره‌ی فرآیندهای ارزیابی زیست‌شناختی (بیولوژیک) محسوب می‌گردد [۱۸]. با توجه به عدم وجود حل تحلیلی برای مواد ناهمسان‌گرد در تحلیل کمانش، تحلیل پایداری با استفاده از بخش اِی‌پی‌دی‌اِل نرم‌افزار آنسیس انجام گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵ روندنمایی فرآیند بهینه‌سازی.

۲-۲. بازه‌های بسآمدی

بدیهی است که افت تراگسیل صدا، وابستگی شدیدی به بسآمد دارد. بنابراین برای اندازه‌گیری آن، روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شده که هر کدام از این روش‌ها یک دسته مختلف از بسآمدها را لحاظ می‌کنند. در عمل، بازه

جدول ۲ اثر چینش لایه‌ها بر عبارات خمشی و بسآمد طبیعی و بار کمانش مود اول مواد مرکب مختلف.

مواد	زاویه لایه چینی	D_{11}	D_{12}	D_{16}	D_{22}	D_{26}	D_{66}	بسآمد (هرتز)	بار کمانش (N)
گرافیت	اِس[۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۸٫۱۶	۰٫۲۵	۰	۴٫۱۷	۰	۰٫۴۲	۷۴٫۷۷	۳۴۸۴
	اِس[۴۵- ۴۵ ۴۵- ۴۵]	۳٫۶۲	۲٫۷۹	۰٫۹۹	۳٫۶۲	۰٫۹۹	۲٫۹۵	۱۰۳٫۶۹	۵۰۶۸
کولار	اِس[۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۴٫۵۵	۰٫۱۷	۰	۲٫۳۴	۰	۰٫۱۷	۵۹٫۲۱	۲۰۸۷
	اِس[۴۵- ۴۵ ۴۵- ۴۵]	۱٫۹۷	۱٫۶۴	۰٫۵۵	۱٫۹۷	۰٫۵۵	۱٫۶۴	۸۲٫۵۵	۲۷۳۱
الیاف شیشه	اِس[۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۲٫۵۲	۰٫۲۲	۰	۱٫۵۶	۰	۰٫۱۷	۳۸٫۹۴	۱۳۵۵
	اِس[۴۵- ۴۵ ۴۵- ۴۵]	۱٫۳۰	۰٫۹۷	۰٫۲۴	۱٫۳۰	۰٫۲۴	۰٫۹۱	۴۹٫۶۱	۱۷۶۹
الیاف کربن	اِس[۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۱۱٫۹۵	۰٫۱۱	۰	۵٫۶۷	۰	۰٫۲۱	۸۵٫۳	۵۰۳۱
	اِس[۴۵- ۴۵ ۴۵- ۴۵]	۴٫۶۷۵	۴٫۲۵	۱٫۵۷	۴٫۶۷	۱٫۵۷	۴٫۳۵	۱۲۴٫۹۷	۶۳۸۹

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

شنوایی انسان از ۱۶ هرتز تا حدود ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد که حساسیت شنوایی نسبت به بسآمدهای پایین چندان زیاد نمی‌باشد. در واقع، ناحیه بسآمدی حساس گوش از ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، از بازه بسآمدی ۱-۴ کیلوهرتز با هفت بسآمد گسستهٔ استاندارد ۱۰۰۰، ۱۲۵۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۱۵۰ و ۴۰۰۰ استفاده شده است [۱۹-۲۰]. بدین ترتیب، تابع هدف با در نظر گرفتن ثوابت وزنی به‌صورت روابط ۲۰-۲۱ بازنویسی می‌گردد.

$$min\ f(X) = -10 log_{10} |\tau_{avg}(X)| \quad (20)$$

$$\tau_{avg}(X) = \sum_{i=1}^{N_f} \overline{\beta_i} \frac{\prod_i}{\prod_t} \quad (21)$$

که در آن، $\overline{\beta_i}$ ثوابت وزنی و N_f تعداد بسآمدها می‌باشند. ثوابت وزنی $\overline{\beta_i}$ معمولاً با تابع وزنی A مرتبط می‌باشند. قابل ذکر است که با توابع وزنی A، اندازه‌گیری سطح فشار صوتی حساسیت کم‌تری به بسآمدهای کم‌تر از ۱۰۰۰ هرتز و بالاتر از ۴۰۰۰ هرتز دارد [۱۳، ۱۹]. ثوابت وزنی $\overline{\beta_i}$ در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳ ثوابت وزنی A.

بسآمد (هرتز)	ثابت وزنی (دسی‌بل)	ضریب $10^{dB(A)/10}$	پارامتر β_i
۱۰۰۰	۰	۱	۰٫۱۱۵۶
۱۲۵۰	۰٫۶	۱٫۱۴۸	۰٫۱۳۲۷
۱۶۰۰	۱	۱٫۲۵۹	۰٫۱۴۵۵
۲۰۰۰	۱٫۲	۱٫۳۱۸	۰٫۱۵۲۴
۵۰۰	۱٫۳	۱٫۳۴۹	۰٫۱۵۵۹
۳۱۵۰	۱٫۲	۱٫۳۱۸	۰٫۱۵۲۴
۴۰۰۰	۱	۱٫۲۵۹	۰٫۱۴۵۵

۳. نتایج

جدول ۴، خواص مکانیکی و شرایط محیطی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی ورق مرکب را نشان می‌دهد. مطابق با شکل‌های ۳ و ۴، مواد کربن اپوکسی و الیاف کربن به‌دلیل داشتن افت تراگسیل صدای بالاتر، به‌عنوان انتخاب اول در میان مواد جدول ۱ برای ادامه محاسبات برگزیده شده‌اند. در این مقاله، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدا در دو بخش لایه‌های هم‌جنس و لایه‌هایی با جنس متفاوت بررسی شده است.

جدول ۴ خواص مکانیکی مواد انتخابی و شرایط محیطی.

مواد	محیط	الیاف کربن	کربن اپوکسی
ρ (kg/m^3)	۲٫۹	۱۵۲۳	۱۵۵۰
E_{11} (GPa)	–	۲٫۶	۱۳۷
E_{12} (GPa)	–	۵٫۱۷	۱۰
G_{12} (GPa)	–	۲٫۵۸	۵
نسبت پواسون ν	–	۰٫۲۵	۰٫۳
سرعت صدا (m/s)	۳۴۰	–	–
زاویه (درجه)	۶۰		
ابعاد صفحه (متر)	۰٫۳۶ × ۰٫۲		
ضخامت صفحه (میلی‌متر)	۱ یا متغیر		

۳-۱. لایه‌های هم‌جنس

بیشینه نمودن مقدار افت تراگسیل صدا با تغییر جهات لایه‌ها و ضخامت آن‌ها برای تعداد لایه‌های مشخص، از اهداف این بخش می‌باشد. برای این منظور، از یک لمینت هشت لایه متقارن استفاده شده است. جهت قرار گرفتن لایه‌ها را به‌عنوان متغیرهای طراحی، می‌توان به صورت بردار زیر در نظر گرفت. بهینه‌سازی چیدمان لایه‌ها همراه با بار کمانش و بسآمد طبیعی مود اول در جدول ۵ قرار دارد. منحنی افت تراگسیل صدا با جهات بهینه‌شده لایه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

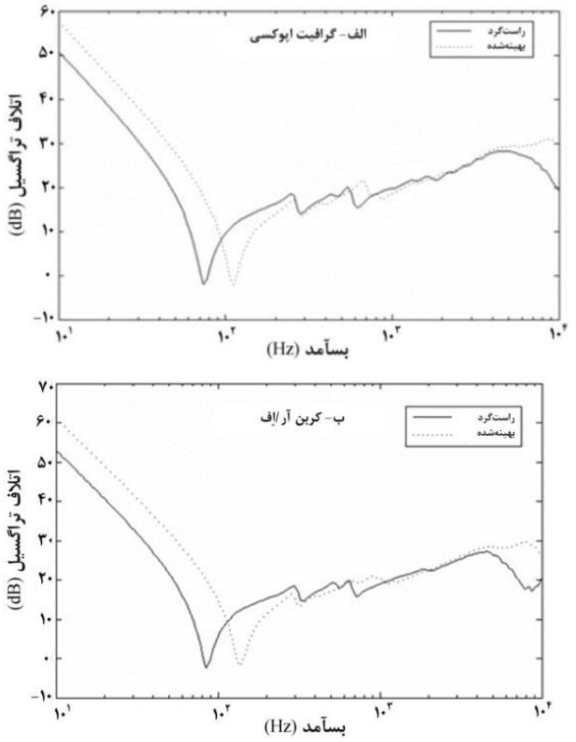
جدول ۵ جهات لایه‌های بهینه‌شده برای یک ورق مرکب با ضخامت لایه‌های ثابت.

مواد	گرافیت اپوکسی	الیاف کربن
زاویه لایه‌چینی* بهینه (درجه)	اِس[۸ ۶۲ -۵۲ ۵۵]	اِس[۱۸ ۶۲ -۵۶ ۶۰]
بار کمانش (N)	۵۱٫۱	۶۳۰۷
بسآمد (هرتز)	۱۰۰٫۸۷	۱۲۲٫۸۶
چگالی سطحی (kg/m^2)	۱٫۵۹	۱٫۵۲

* Stacking

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]



شکل ۶ منحنی افت تراگسیل صدا با جهات بهینه‌شده لایه‌ها، (الف) گرافیت اپوکسی، (ب) کربن آرامِف.

نتایج حاکی از آن است که جهات بهینه‌شده افزایش ۲۵ درصدی بسآمد پایه اول گرافیت اپوکسی و ۳۰ درصدی الیاف‌کربن را سبب می‌شوند. بدیهی است که این افزایش بسآمد پایه، افت تراگسیل صدای بالاتری را در ناحیه سفتی مهار ایجاد می‌کند. در ناحیه جرم مهار نیز به‌دلیل یکسان بودن وزن ورق‌ها، منحنی‌های افت تراگسیل به یکدیگر نزدیک می‌شوند و فرآیند بهینه‌سازی تأثیری بر رفتار این منحنی‌ها ندارد.

لذا، برای تصحیح این رفتار از تغییر ضخامت لمینت، به‌عنوان دیگر پارامتر طراحی استفاده شده است. با این وجود، ضروری است که مهار وزن لمینت به‌عنوان قید طراحی در فرآیند بهینه‌سازی به‌صورت رابطه ۲۳ لحاظ شود.

$$c_2 = \sum_{i=1}^{8} h_i \rho_i - m_0 \le 0 \qquad (۲۳)$$

که در آن، $m_0 = 1.8\ kg/m^2$ جرم بر واحد سطح می‌باشد. در این حالت متغیرهای طراحی به صورت رابطه ۲۴ انتخاب می‌شوند:

$$x_i = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, h_1, h_2, h_3, h_4]_s \quad -90 \le \theta_i \le 90$$
$$0.1^{mm} \le h_i \le 0.2^{mm} \qquad (۲۴)$$

نتایج بهینه‌سازی این حالت در جداول ۶ و ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ۶ جهات و ضخامت‌های بهینه‌شده برای ورق مرکب.

مواد	گرافیت اپوکسی	الیاف کربن
زاویه لایه‌چینی بهینه (درجه)	اِس[۵۳ -۶۷ ۵۹ ۶۰]	اِس[۳۳- ۶۳ ۸۳- ۶۱]
ضخامت بهینه لایه‌ها (میلی‌متر)	[۰٫۱۳۲ ۰٫۱۳۸ اِس[۰٫۱۲۴ ۰٫۱۷۲]	[۰٫۱۷۰ ۰٫۱۱۱ اِس[۰٫۱۳۱ ۰٫۱۷۹]
بار کمانش (N)	۵۱۱۷٫۹	۶۳۲۲٫۸
بسآمد (هرتز)	۱۱۴٫۳۲	۱۴۳٫۷۶
چگالی سطحی (kg/m^2)	۱٫۷۹۶	۱٫۷۹۶

جدول ۷ پارامترهای بهینه‌شده در ورق مرکب با مواد مختلف.

زاویه لایه‌چینی بهینه (درجه)	اِس[۳۹ -۵۹ ۶۸ ۶۳]	
ضخامت بهینه لایه‌ها (میلی‌متر)	اِس[۰٫۱۱۹ ۰٫۱۷۵ ۰٫۱۶۴ ۰٫۱۳۳]	
بسآمد (هرتز)	۱۴۳٫۱	
چگالی سطحی (kg/m^2)	۱٫۸۰۲	
چگالی بهینه مواد لایه‌ها	لایه اول	۱۵۲۰
	لایه دوم	۱۵۲۰
	لایه سوم	۱۵۲۰
	لایه چهارم	۱۵۲۰

مطابق شکل ۷، نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که افت تراگسیل صدا در هر دو ناحیه جرم و سفتی مهار با افزایش ضخامت ورق افزایش می‌یابد. این افزایش به‌ترتیب برای گرافیت اپوکسی و الیاف‌کربن نسبت به ورق راست‌گرد حدود ۶ و ۱۱ دسی‌بل در ناحیه سفتی مهار می‌باشد.

۳-۲. مواد چندگانه

در این بخش، توانایی روش پیشنهادی جهت بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای یک ورق متشکل از چندین ماده مرکب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای طراحی برای این حالت عبارتند از:

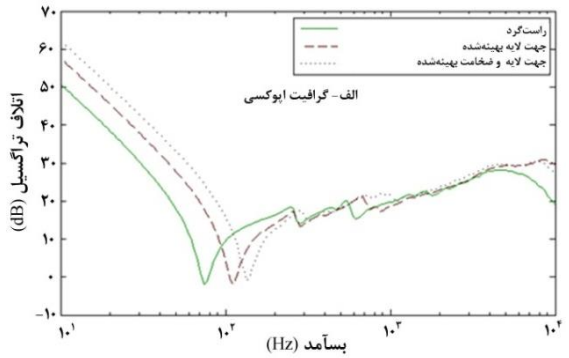
$$x_i = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, h_1, h_2, h_3, h_4, n_1, n_2, n_3, n_4]_s \qquad (۲۵)$$

که، n نشان‌دهنده نوع ماده انتخابی مطابق با جدول ۲ است. قیود بهینه‌سازی نیز همانند قبل، شامل کمانش مود

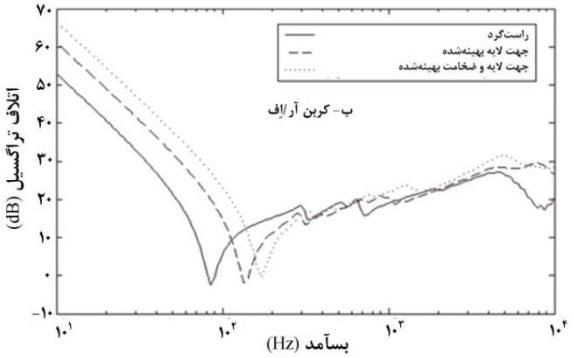
[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/ سال چهارم/ شماره ۱ / بهار و تابستان ۱۳۹۵

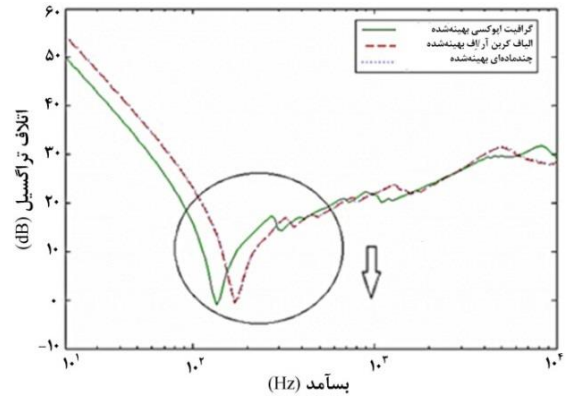


(الف)



(ب)

شکل ۷ منحنی افت تراگسیل صدای بهینه‌شده، (الف) گرافیت اپوکسی، (ب) کربن آر/اف.



شکل ۸ مقایسه افت تراگسیل صدای مواد مرکب یک ماده با چند ماده.

اول و وزن ورق می‌باشند. همانند حالت قبل نیز نتایج نشان می‌دهند که اثر سفتی مواد در مقایسه با جرم آن‌ها در دست‌یابی به افت تراگسیل بیشینه، با اهمیت‌تر می‌باشد؛ به‌طوری‌که لایه‌های اول تا سوم را الیاف‌کربن و لایه چهارم را کربن اپوکسی تشکیل می‌دهند. با این وجود و مطابق با شکل ۸، افت تراگسیل صدای ورق با مواد مختلف، اختلاف چندانی با الیاف‌کربن بهینه‌شده ندارد. لذا، پیشنهاد استفاده از مواد مرکب چند ماده‌ای تنها به‌خاطر افزایش افت تراگسیل صدا مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای ورق مرکب مستطیلی با طول محدود مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، با توسعه الگوی تحلیلی راسس، امکان محاسبه افت تراگسیل صدا با سپرصوتی نامتناهی فراهم شد. بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفت و بسآمدهای گسسته بر مبنای افت تراگسیل با ثابت وزن دهی A انتخاب شدند. به‌منظور جلوگیری از اثر نرم شدن ناشی از بهینه‌سازی، قید پایداری سازه با استفاده از اِی‌پی‌دی‌اِل نرم‌افزار آنسیس انجام پذیرفت. چندین ماده مرکب مرسوم نیز برای این تحقیق در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می‌دهند که موادی همانند گرافیت اپوکسی و الیاف‌کربن به‌دلیل سفتی بیش‌تر از افت تراگسیل صدای مناسب‌تری برخوردارند. هم‌چنین، فرآیند بهینه‌سازی اثر چندانی روی افت تراگسیل صدا در ناحیه جرم مهار نداشت؛ چراکه این مواد دارای چگالی نزدیک به یکدیگر می‌باشند. اگرچه استفاده از ضخامت لمینت به‌عنوان متغیر طراحی، اثر قابل توجه‌ی در افت تراگسیل صدا دارد، اما می‌تواند امتیاز وزن کم مواد مرکب را تحت تأثیر قرار دهد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهند که بهینه‌سازی ورق مرکب متشکل از چندین ماده صرفاً جهت افزایش افت تراگسیل صدا مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۵. فهرست منابع

[1] N.W. Hagood, E.F. Crawley, “Experimental investigation of passive enhancement of damping for space structures,” Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 14, no. 6, pp. 1100-1109, 1991.

[2] S.T. Griffin, K.K. Denoyer, A. Das, “Passive vibration isolation for payload containers,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 10, no. 1, pp. 83-87, 1999.

[3] J.P.W. Smith, “Sound transmission through thin cylindrical shells,” Journal of

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

Acoustical Society of America, vol. 29, pp. 712-729, 1957.

[4] P. White, “Sound transmission through a finite, closed, cylindrical shell,” Journal of Acoustical Society of America, vol. 40, pp. 1124-1130, 1966.

[5] L.R. Koval, “Sound transmission into a laminated composite cylindrical shell,” Journal of Sound and Vibration, vol. 71, no. 4, pp. 523-530, 1980.

[6] A. Blaise, C. Lesuer, M. Gotteland, M. Barbe, “On sound transmission into an orthotropic infinite shell: Comparison with Koval’s results and understanding of phenomena,” Journal of Sound and Vibration, vol. 150, pp. 233-243, 1991.

[7] J.H. Lee, J. Kim, “Study on sound transmission characteristics of a cylindrical shell using analytical an experimental models,” Applied Acoustic, vol. 64, pp. 611-632, 2003.

[8] L.A. Roussos, “Noise transmission loss of a rectangular plate in an infinite baffle,” NASA Technical Paper 2398, 1985.

[9] M.A. Lang, C.L. Dym, “Optimal acoustic design of sandwich panels,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 57, pp. 1481-1487, 1974.

[10] T. Wang, S. Li, S.R. Nutt, “Optimal design of acoustical sandwich panels with a genetic algorithm”, Journal of 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 Journal, Article ID 814682, pp. 1-10, 2014.

[12] Y.T. Tsai, S.J. Pawar, J. Huang, “Optimizing material properties of composite plates for sound transmission problem,” Journal of Sound and Vibration, vol. 335, pp. 174-186, 2015.

[13] C.L. Dym, M.A. Lang, “Transmission of sound through sandwich panels,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 56, pp. 1523-1532, 1974.

[14] M.J. Crocker, “Handbook of Acoustics,” John Wiley and Sons, New York, USA, 1998.

[15] T. Roy, D. Chakraborty, “Optimal vibration control of smart fiber-reinforced composite shell structures using an improved genetic algorithm,” Journal of Sound and Vibration, vol. 319, pp. 15-40, 2009.

[16] R.M. Jones, “Mechanics of Composite Materials,” Second Edition, Taylor & Francis publication, USA, 1999.

[17] A. David Bies, H. Colin Hansen, “Engineering Noise Control: Theory and Practice,” Spon Press, London, UK, Fourth Edition, 2009.

[18] C.W. Bert, “Optimal design of composite material plate to maximize its fundamental frequency,” Journal of Sound and Vibration, vol. 50, no. 2, pp. 229-237, 1977.

[19] Global optimization Toolbox™ User's Guide, The Math Works, Inc, 2014.

[20] C.L. Dym, M.A. Lang, “Transmission of sound through sandwich panels,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 56, pp. 1523-1532, 1974.

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 4, No. 1, 2016

Optimization of sound transmission loss of a composite rectangular plate with infinite baffle

M. Bagheri*
Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Air Univ.

Abstract

In this paper, by development of the Roussos' method and using the generic algorithm, the optimization of sound transmission loss for a finite rectangular simply supported panel with infinite baffle was considered. Appropriate constraints were imposed to prevent softening effect occurrence due to optimization and the discrete frequencies were chosen based upon the sound transmission class with weighting constant for optimization. Several traditional composite materials were employed for the investigation. The results indicate that, in the mass control region, the optimization of stacking sequence and optimal thickness do not effectively contribute to improvement of the transmission loss due to the close densities of composite materials. In other words, composite plate optimization made of a stiffer materials, has better transmission loss characteristics. The results also show that, the lamina thickness optimization has an important effect to improve the transmission loss but the advantage of low weight composite material is compromised by optimization.

Keywords: Optimization, Transmission loss, Baffle, Composite panel.

pp. 61-69 (In Persian)

[Downloaded from joasi.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.1.6.3]

* Corresponding author E-mail: bagheri@alborz.kntu.ac.ir