

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 سپر صوتی نامتناهی و تکیه‌گاه ساده مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور جلوگیری از کاهش سفتی ورق در حین فرآیند بهینه‌سازی، قید کماتش اعمال گردیده و از بسامدهای 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 به دلیل 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، سپر صوتی، ورق مرکب.

۱. مقدمه

بررسی افت تراگسیل^۱ صدای مواد مرکب^۲ به دلیل 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 دسته بسامد بالا و بسامد پایین دسته‌بندی می‌شوند. در بسامد بالا ابعاد دیواره در مقایسه با طول موج مربوطه بسیار بزرگ بوده، لذا دیواره را می‌توان الگویی با طول نامتناهی در نظر گرفت. الگوهای تحلیلی بسیاری بر مبنای نظریه طول نامتناهی برای ورق‌ها و پوسته‌های همسان‌گرد^۳، راست‌گرد^۴ و ناهمسان‌گرد^۵ توسعه یافته‌اند [۳-۷]. اما در بسامدهای پایین، ابعاد دیواره قابل مقایسه با طول موج بلند صدا بوده و لذا برای محاسبه افت تراگسیل صدای این ورق‌ها، الگوی تحلیلی بایستی دربرگیرنده شرایط مرزی دیواره نیز باشد.

بنابراین، توسعه نظریه 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 سپر صوتی^۶ 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 بسامد 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^۷، بهینه‌سازی وزن ورق ساندویچی را با متوازن^۸ نمودن خواص صوتی و مکانیکی انجام دادند. نوری و همکاران [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، افت تراگسیل صدای پوسته‌های^۹ 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

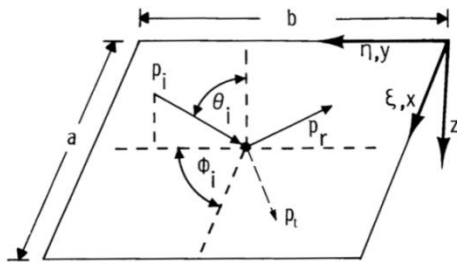
⁸ Balance

⁹ Shells

مبانی نظریه 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 سختی بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 4D_{12} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + 2(D_{13} + 2D_{22}) \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} \\ + 4D_{23} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + D_{33} \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} + C_D \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ = p_i(\xi, \eta, t) + p_r(\xi, \eta, t) - p_t(\xi, \eta, t) \end{aligned} \quad (1)$$

مطابق شکل ۱، p_i ، p_r و p_t به ترتیب فشار موج صوتی برخوردی، انعکاس یافته و تراگسیل شده می‌باشند.



شکل ۱ هندسه موج برخوردی به ورق [۸].

این سه فشار را می‌توان به صورت جمع فشار مسدودشده^۹ (فشار سمت موج برخوردی) و فشار تابیده شده (فشار ناشی از ارتعاش ورق) نوشت. به دلیل این که 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 صرف نظر است. فرض مذکور این امکان را می‌دهد که حل دقیقی روی ناحیه بسامدی گسترده به جز در نقاط نزدیک به بسامدهای بازآوایش^{۱۰} اصلی وجود داشته باشد. بنابراین تنها عبارت فشار مسدود شده به عنوان نیرو در رابطه ۱ وجود خواهد داشت.

$$\begin{aligned} D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 4D_{12} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + 2(D_{13} + 2D_{22}) \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} \\ + 4D_{23} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + D_{33} \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} + C_D \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p_b(\xi, \eta, t) \end{aligned} \quad (2)$$

^۹ Blocked

^{۱۰} Resonance

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 بسامدهای پایین انجام نشده است. هدف از این مقاله، به دست آوردن بیشترین افت تراگسیل صدا یک ورق مستطیلی مرکب با طول محدود با توجه به چیدمان و ضخامت لایه‌ها براساس توسعه روش مودال^۱ ارائه شده در منبع [۸] می‌باشد. برخلاف روش اولیه مودال که برای صفحه همسان‌گرد به کار رفته، این روش امکان محاسبه افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی ناهمسان‌گرد با تکیه‌گاه ساده و سیرصوتی نامتناهی را امکان‌پذیر نموده است. بهینه‌سازی الگوی تحلیلی در بسامدهای گسسته در بازه بسامدی ۱-۴ کیلوهرتز مطابق با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام^۲ 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. به منظور حفظ سختی^۳ و وزن ماده مرکب از بار کمانش^۴، مود^۵ اول و وزن ورق به عنوان قیود در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. به دلیل عدم وجود جواب تحلیلی برای کمانش ورق ناهمسان‌گرد، مود اول کمانش توسط روش عنصر متناهی^۶ متناهی^۷ و با استفاده از زبان ای‌پی‌دی‌ال^۸ نرم‌افزار آنسیس^۸ آنسیس^۸ محاسبه شده است. به دلیل 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 سختی بالا استفاده شود.

۲. تشریح الگوی تحلیلی

^۱ Modal

^۲ ASTM; American Society for Testing and Materials

^۳ Stiffness

^۴ Buckling

^۵ Mode

^۶ Finite element

^۷ APDL

^۸ ANSYS

$$\bar{I}_n = \begin{cases} \frac{-i}{\gamma} \operatorname{sgn}(\sin \theta_i \cos \phi_i) \left\{ \frac{(n\pi)^\gamma}{[\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega b / c)]^\gamma} \right\} \\ \frac{n\pi \{1 - (-1)^\gamma \exp[-i \sin \theta_i \cos \phi_i (\omega b / c)]\}}{(n\pi)^\gamma - [\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega b / c)]^\gamma} \left\{ \frac{(n\pi)^\gamma}{[\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega b / c)]^\gamma} \right\} \end{cases}$$

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

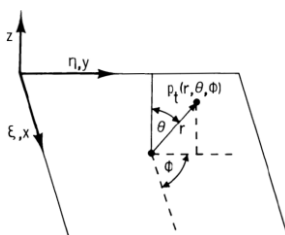
$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{m_p \left[\omega_{mn}^* - \omega^\gamma + \left(\frac{i C_D \omega}{m_p} \right) \right]} \quad (10)$$

که در آن، ω_{mn} بسامدهای 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.

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

$$I_m = \begin{cases} \frac{-i}{\gamma} \operatorname{sgn}(\sin \theta \cos \phi) \left\{ \frac{(m\pi)^\gamma}{[\sin \theta \cos \phi (\omega a / c)]^\gamma} \right\} \\ \frac{m\pi \{1 - (-1)^\gamma \exp[-i \sin \theta \cos \phi (\omega a / c)]\}}{(m\pi)^\gamma - [\sin \theta \cos \phi (\omega a / c)]^\gamma} \left\{ \frac{(m\pi)^\gamma}{[\sin \theta \cos \phi (\omega a / c)]^\gamma} \right\} \end{cases} \quad (11)$$

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



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

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

$$\Pi_t = \int_{\phi=0}^{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I^t r^\gamma \sin \theta d\theta d\phi \quad (12)$$

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:

$$p_i(\xi, \eta, t) = p_i \exp[i(\omega t - k\xi \sin \theta_i \cos \phi_i - k\eta \sin \theta_i \sin \phi_i)] \quad (3)$$

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

$$w(\xi, \eta, t) = W(\xi, \eta) \exp(i\omega t) \quad (4)$$

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

$$D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \gamma D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma (D_{12} + \gamma D_{22}) \frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + i C_D \omega \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \omega^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \gamma p_i \exp[ik \sin \theta_i (\xi \cos \phi_i - \eta \sin \phi_i)] \quad (5)$$

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

$$W(\xi, \eta) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right) \quad (6)$$

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

$$\gamma p_i \exp[ik \sin \theta_i (\xi \cos \phi_i - \eta \sin \phi_i)] = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \sin\left(\frac{m\pi\xi}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi\eta}{b}\right) \quad (7)$$

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

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

با انتگرال‌گیری از رابطه ۸ رابطه ۹ حاصل می‌شود.

$$p_{mn} = \gamma P_i \bar{I}_m \bar{I}_n$$

$$\bar{I}_m = \begin{cases} \frac{-i}{\gamma} \operatorname{sgn}(\sin \theta_i \cos \phi_i) \left\{ \frac{(m\pi)^\gamma}{[\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega a / c)]^\gamma} \right\} \\ \frac{m\pi \{1 - (-1)^\gamma \exp[-i \sin \theta_i \cos \phi_i (\omega a / c)]\}}{(m\pi)^\gamma - [\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega a / c)]^\gamma} \left\{ \frac{(m\pi)^\gamma}{[\sin \theta_i \cos \phi_i (\omega a / c)]^\gamma} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

¹ Series

$$I^t = \frac{\left| \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_t \right|^2}{(2\rho c)} \quad (13)$$

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

$$TL = 10 \log \frac{\Pi_i}{\Pi_t} \quad (14)$$

که در آن، Π_i توان موج صوتی برخوردی است:

$$\Pi_i = \frac{p_i^2 ab \cos \theta_i}{2\rho c} \quad (15)$$

بنابراین، محاسبه افت تراگسیل صدا را می‌توان به صورت 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.

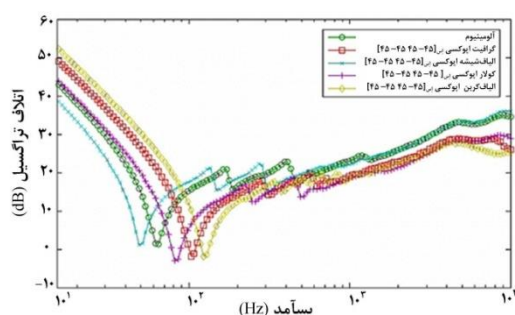
(۵) محاسبه افت تراگسیل صدا با استفاده از رابطه ۱۴.

این روش را می‌توان در طراحی اولیه تراگسیل صدای ورق‌های مستطیلی ناهمسان گرد مرتعش با تحریک امواج صوتی به کار گرفت. شکل ۳ اثر جنس مواد بر روی افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی به ابعاد 20×36 سانتی‌متر با تکیه‌گاه ساده را نشان می‌دهد. ضخامت هر لایه ماده مرکب برابر با 0.125 میلی‌متر می‌باشد [۱۷].

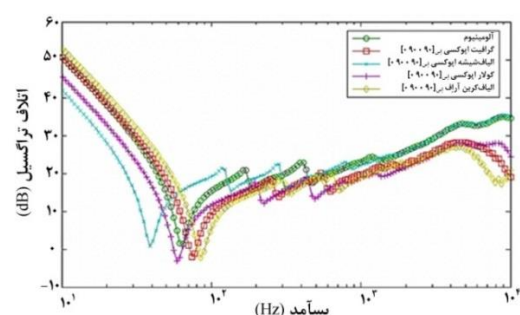
جدول ۱ خواص مکانیکی مواد مرکب مورد استفاده.

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 بسامدهای بالا، و الیاف کربن در بسامدهای پایین بسیار مؤثرتر از سایر مواد می‌باشند. این نتیجه به دلیل 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 می‌شود، زاویه چیدمان لایه‌ها تأثیر قابل توجهی بر روی بسامد اول پایه و در نتیجه افت تراگسیل صدا و هم‌چنین ناحیه مهار (کنترل) سفتی دارد. اما، در بسامدهای 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.



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

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

مواد مرکب مورد نظر شامل گرافیت اپوکسی^۱، الیاف شیشه^۲، کولار^۳ و الیاف کربن^۴ می‌باشند که خواص مکانیکی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

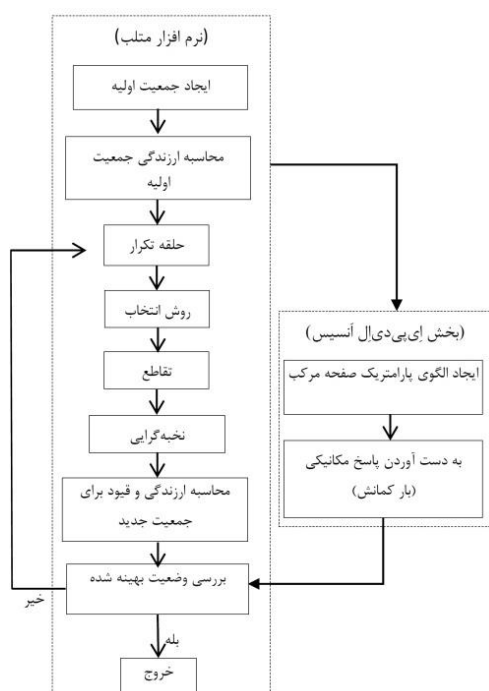
² Fiberglass

³ Kevlar

⁴ Fibercarbon

¹ Graphite epoxy

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 ای‌پی‌دی‌ال نرم‌افزار آنسیس انجام گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵ روندنمایی فرآیند بهینه‌سازی.

۲-۲. بازه‌های بسامدی

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

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

۲-۱. بهینه‌سازی

به منظور 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 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min f(X) = -STL(X) \quad (16)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n], X \in R^n \quad (17)$$

$$s.t. \quad g_i(X) = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$c_i(X) \leq 0 \quad i = m+1, \dots, p \quad (19)$$

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، به منظور 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.

$$X = [\theta_i, h_i, m_i], i = 1, \dots, 4 \quad (19)$$

$$X_{lb} \leq X \leq X_{ub}$$

که در آن، بردارهای X_{ub} و X_{lb} کران‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی را نشان می‌دهند. به دلیل اهمیت وزن و بار کمانش سازه، این الزامات به صورت 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

جدول ۲ اثر چینش لایه‌ها بر عبارات خمشی و بسامد 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}	بسامد (هرتز)	بار کمانش (N)
گرافیت	ایس [۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۸/۱۶	۰/۲۵	۰	۴/۱۷	۰	۰/۴۲	۷۴/۷۷	۳۴۸۴
	ایس [۴۵ -۴۵ ۴۵ -۴۵]	۳/۶۲	۲/۷۹	۰/۹۹	۳/۶۲	۰/۹۹	۲/۹۵	۱۰۳/۶۹	۵۰۶۸
کولار	ایس [۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۴/۵۵	۰/۱۷	۰	۲/۳۴	۰	۰/۱۷	۵۹/۲۱	۲۰۸۷
	ایس [۴۵ -۴۵ ۴۵ -۴۵]	۱/۹۷	۱/۶۴	۰/۵۵	۱/۹۷	۰/۵۵	۱/۶۴	۸۲/۵۵	۲۷۳۱
الیاف شیشه	ایس [۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۲/۵۲	۰/۲۲	۰	۱/۵۶	۰	۰/۱۷	۳۸/۹۴	۱۳۵۵
	ایس [۴۵ -۴۵ ۴۵ -۴۵]	۱/۳۰	۰/۹۷	۰/۲۴	۱/۳۰	۰/۲۴	۰/۹۱	۴۹/۶۱	۱۷۶۹
الیاف کربن	ایس [۰ ۹۰ ۰ ۹۰]	۱۱/۹۵	۰/۱۱	۰	۵/۶۷	۰	۰/۲۱	۸۵/۳	۵۰۳۱
	ایس [۴۵ -۴۵ ۴۵ -۴۵]	۴/۶۷۵	۴/۲۵	۱/۵۷	۴/۶۷	۱/۵۷	۴/۳۵	۱۲۴/۹۷	۶۳۸۹

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 ^۳)	۲٫۹	۱۵۲۳	۱۵۵۰
$E_{۱۱}$ (GPa)	-	۲٫۶	۱۳۷
$E_{۱۲}$ (GPa)	-	۵٫۱۷	۱۰
$G_{۱۲}$ (GPa)	-	۲٫۵۸	۵
نسبت پواسون ν	-	۰٫۲۵	۰٫۳
سرعت صدا (m/s)	۳۴۰	-	-
زاویه (درجه)	۶۰		
ابعاد صفحه (متر)	$۰٫۳۶ \times ۰٫۲$		
ضخامت صفحه (میلی‌متر)	۱ یا متغیر		

۳-۱. لایه‌های هم‌جنس

بهینه‌سازی 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 کماتش 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))	۵۵-۵۲-۶۲-۸ [۵۵-۵۲-۶۲-۸]°	۶۰-۵۶-۶۲-۱۸ [۶۰-۵۶-۶۲-۱۸]°
بار کماتش (N)	۵۱٫۱	۶۳٫۰۷
بسآمد (هرتز)	۱۰۰٫۸۷	۱۲۲٫۸۶
چگالی سطحی (kg/m ^۲)	۱٫۵۹	۱٫۵۲

* Stacking

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 گسسته 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.

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

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

که در آن، $\bar{\beta}_i$ ثوابت وزنی و N_f تعداد بسآمدها می‌باشند. ثوابت وزنی $\bar{\beta}_i$ 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 [۱۹، ۱۳]. ثوابت وزنی $\bar{\beta}_i$ در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳ ثوابت وزنی A .

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

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

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)	۵۳-۶۷ / ۵۹-۶۰	۳۳-۶۳ / ۶۱-۸۳
ضخامت بهینه لایه‌ها (میلی‌متر)	۰/۱۳۲-۰/۱۳۸ / ۰/۱۲۴-۰/۱۷۲	۰/۱۷۰-۰/۱۱۱ / ۰/۱۳۱-۰/۱۷۹
بار کماتش (N)	۵۱۱۷/۹	۶۳۲۲/۸
بسامد (هرتز)	۱۱۴/۳۲	۱۴۳/۷۶
چگالی سطحی (kg/m ^۲)	۱/۷۹۶	۱/۷۹۶

جدول ۷ پارامترهای بهینه‌شده در ورق مرکب با مواد مختلف.

زاویه لایه چینی بهینه (درجه)	[۳۹ ۵۹ - ۶۸ ۶۳] ایس	
ضخامت بهینه لایه‌ها (میلی‌متر)	[۰٫۱۶۴ ۰٫۱۷۵ ۰٫۱۱۹] ایس [۰٫۱۳۳]	
بسامد (هرتز)	۱۴۳٫۱	
چگالی سطحی (kg/m ^۲)	۱٫۸۰۲	
چگالی بهینه مواد لایه‌ها	لایه اول	۱۵۲۰
	لایه دوم	۱۵۲۰
	لایه سوم	۱۵۲۰
	لایه چهارم	۱۵۲۰

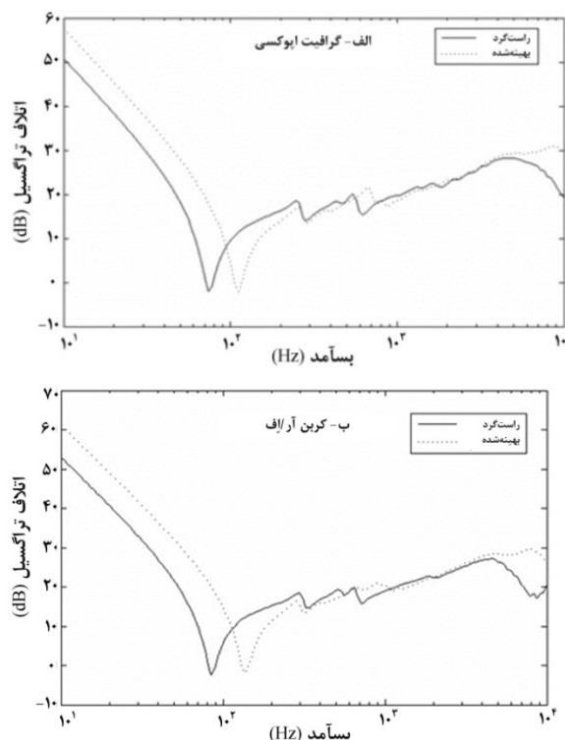
مطابق شکل ۷، نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که افت تراگسیل صدا در هر دو ناحیه جرم و سفتی مهار با افزایش ضخامت ورق افزایش می‌یابد. این افزایش به‌ترتیب برای گرافیت اپوکسی و الیاف کربن نسبت به ورق راست‌گرد حدود ۶ و ۱۱ دسی‌بل در ناحیه سفتی مهار می‌باشد.

۲-۳. 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:

$$x_i = [\theta_i, \theta_r, \theta_f, \theta_s, h_i, h_r, h_f, h_s, n_i, n_r, n_f, n_s]_s \quad (25)$$

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



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

نتایج حاکی از آن است که جهات بهینه‌شده افزایش ۲۵ درصدی بسامد پایه اول گرافیت اپوکسی و ۳۰ درصدی الیاف کربن را سبب می‌شوند. بدیهی است که این افزایش بسامد 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.

$$c_r = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i - m_r \leq 0 \quad (23)$$

که در آن، $m_r = 1/8 \text{ kg/m}^2$ جرم بر واحد سطح می‌باشد. در این حالت متغیرهای طراحی به صورت رابطه ۲۴ انتخاب می‌شوند:

$$x_i = [\theta_i, \theta_r, \theta_f, \theta_s, h_i, h_r, h_f, h_s]_s \quad -90 \leq \theta_i \leq 90 \quad (24)$$

$$0.1^{mm} \leq h_i \leq 0.3^{mm}$$

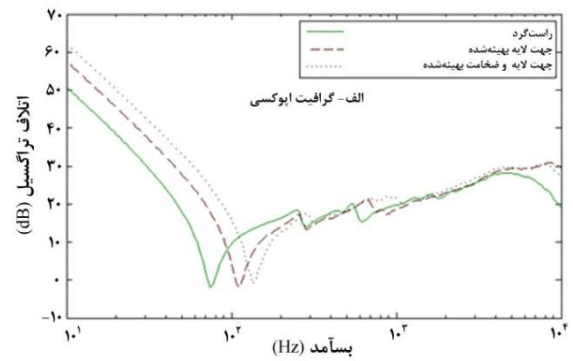
مختلف، اختلاف چندانی با الیاف کربن بهینه‌شده ندارد. لذا، پیشنهاد استفاده از مواد مرکب چند ماده‌ای تنها به‌خاطر افزایش افت تراگسیل صدا مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

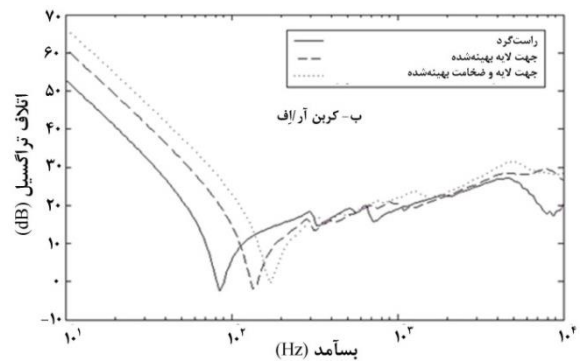
در این تحقیق، بهینه‌سازی افت تراگسیل صدای ورق مرکب مستطیلی با طول محدود مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، با توسعه الگوی تحلیلی راسس، امکان محاسبه افت تراگسیل صدا با سپر صوتی نامتناهی فراهم شد. بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفت و بسامدهای گسسته بر مبنای افت تراگسیل با ثابت وزن دهی A انتخاب شدند. به‌منظور جلوگیری از اثر نرم شدن ناشی از بهینه‌سازی، قید پایداری سازه با استفاده از EI پی‌دی‌ال 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 الیاف کربن 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

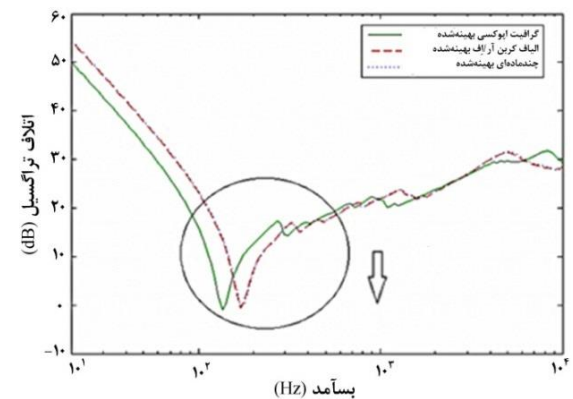


(الف)



(ب)

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



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 الیاف کربن و لایه چهارم را کربن اپوکسی تشکیل می‌دهند. با این وجود و مطابق با شکل ۸، افت تراگسیل صدای ورق با مواد

- 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.
- 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

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)

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