# بهینهسازی افت تراگسیل صدای ورق مرکب با سپر صوتی نامتناهی

**مر تضی باقری**\* دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

## چکیدہ

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 مواد یک مورت گرفته و مواد با

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

#### ۱. مقدمه

بررسی افت تراگسیل<sup>۱</sup> صدای مواد مرکب<sup>۲</sup> بهدلیل استفاده در بدنه هواپیماها از الزامات طراحی محسوب می شود [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 می شوند. در بسآمد بالا ابعاد دیواره در مقایسه با طول موج مربوطه بسیار بزرگ بوده، لذا الگوهای تحلیلی بسیاری بر مبنای نظریهٔ طول نامتناهی برای ورق ها و پوستههای همسان گرد<sup>7</sup>، راست گرد<sup>7</sup> و ناهمسان گرد<sup>6</sup> توسعه یافتهاند [۳–۷]. اما در بسآمدهای پایین، ابعاد دیواره قابل مقایسه با طول موج بلند صدا بوده و لذا برای محاسبه افت تراگسیل صدای این ورق ها، الگوی

- <sup>2</sup> Composite
- <sup>3</sup> Isotropic <sup>4</sup> Orthotropic

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 تکیه گاه ساده که دارای سپرصوتی<sup>5</sup> با طول نامتناهی می باشد، الگو می شود [۸]. موضوع بهینه سازی افت تراگسیل صدای مواد مرکب با توجه به جنس و هندسه آنها یکی از موضوعات مهم در تحقیقات دهههای اخیر است، که بیشتر این تحقيقات مربوط به الگوهاي بسآمد بالا مي باشند [۹-۱۲]. افت تراگسیل صدا درون ورق های 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] بـا اســتفاده از الگــوریتم ژنتیــک<sup>۷</sup>، بهینــهسـازی وزن ورق ساندویچی را با متوازن^ نمودن خواص صوتی و مکانیکی انجام دادند. نوری و همکاران [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، افت تراگسیل صدای پوسته های مدرج تابعی را بهینهسازی نمودند. تسای [۱۲] نیز با استفاده از روش

<sup>6</sup> Baffle

<sup>\*</sup> نویسنده پاسخگو: bagheri@alborz.kntu.ac.ir

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Transmission loss

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Anisotropic

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Genetic algorithm <sup>8</sup> Balance

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Shells

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

$$D_{11} \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial \xi^{\mathsf{T}}} + \mathsf{F} D_{1\varphi} \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial \xi^{\mathsf{T}} \partial \eta} + \mathsf{T} (D_{1\mathsf{T}} + \mathsf{T} D_{\varphi\varphi}) \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial \xi^{\mathsf{T}} \partial \eta^{\mathsf{T}}} + \mathsf{F} D_{\varphi\varphi} \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial \xi \partial \eta^{\mathsf{T}}} + D_{\varphi\varphi} \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial \eta^{\mathsf{T}}} + C_D \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \frac{\partial^{\mathsf{T}} w}{\partial t^{\mathsf{T}}} = p_i (\xi, \eta, t) + p_r (\xi, \eta, t) - p_i (\xi, \eta, t)$$
(1)

مطابق شـکل ۱، p<sub>r</sub> ،<sub>p</sub>t و بـهترتيـب فشـار مـوج صـوتی برخوردی، انعکاسيافته و تراگسيلشده میباشند.



این سه فشار را میتوان به صورت جمع فشار مسدودشده<sup>۲</sup> (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 جابه جایی پوسته میباشد، راسس فرض نمود که فشار موج تابیده شده در مقایسه با فشار مسدود شده قابل صرفنظر است. فرض مذکور این امکان را می دهد که حل دقیقی روی ناحیه بسآمدی گسترده به جز در نقاط نزدیک به بسآمدهای بازآوایش <sup>۱۰</sup> اصلی وجود داشته باشد. بنابراین تنها عبارت فشار مسدود شده به عنوان نیرو در رابطه ۱ وجود خواهد داشت.

$$\begin{split} & D_{_{11}} \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial \xi^{^{*}}} + {^{*}} D_{_{12}} \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial \xi^{^{*}} \partial \eta} + {^{*}} (D_{_{17}} + {^{*}} D_{_{55}}) \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial \xi^{^{*}} \partial \eta^{^{*}}} \\ & + {^{*}} D_{_{75}} \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial \xi \partial \eta^{^{*}}} + D_{_{77}} \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial \eta^{^{*}}} + C_{_D} \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \frac{\partial^{^{*}} w}{\partial t^{^{*}}} = p_b(\xi, \eta, t) \end{split}$$

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 لایها براساس توسعه روش مـودال ( ارائـه شـده در منبـع [۸] مــیباشـد. برخلاف روش اولیه مودال که برای صفحه همسان گرد به کار رفته، این روش امکان محاسبه افت تراگسیل صدای ورق مستطیلی ناهمسان گرد با تکیه گاه ساده و سپرصوتی نامتناهی را امکان پذیر نموده است. بهینهسازی الگوی تحلیلی در بسآمدهای گسسته در بازه بسآمدی ۱-۴ کیلوهرتز مطابق با استاندارد ای استی ام<sup>۲</sup> صورت گرفته است [17-1۳]. فرآيند بهينهسازي توسط الگوريتم ژنتيک انجام شده و چیدمان، ضخامت و مواد هر لایه به عنوان يارامتر طراحي لحاظ مي شوند. به منظور حفظ سفتي و وزن ماده مرکب از بار کمانش ، مود اول و وزن ورق به عنوان قیود در فرآیند بهینهسازی استفاده شده است. بهدليل عدم وجود جواب تحليلي براي كمانش ورق ناهمسان گرد، مود اول کمانش توسط روش عنصر متناهی متناهی<sup>2</sup> و با استفاده از زبان ای یی دیال<sup>۷</sup> نرمافزار آنسیس<sup>۸</sup> اَنسیس ^ محاسبه شده است. بهدلیل نزدیکی چگالی مواد مرکب، نتایج نشان میدهند که در ناحیه جرم کنترل، بهینه سازی پارامترهای طراحی نظیر ضخامت، زاویه و مواد لايهها 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. تشريح الگوى تحليلى

- <sup>4</sup> Buckling
- <sup>5</sup> Mode
- <sup>6</sup> Finite element <sup>7</sup> APDL
- <sup>8</sup> ANSYS

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Blocked

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Resonance

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Modal

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ASTM; American Society for Testing and Materials

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Stiffness

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:

$$p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t)$$

$$p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i}(\xi,\eta,t) = p_{i$$

 $w(\xi,\eta,t) = W(\xi,\eta) \exp(i\omega t)$ <sup>(\*)</sup>

با جایگذاری روابط ۳ و ۴ در رابطه ۲ و تقسیم طرفین بر (exp(iwt رابطهٔ ۵ حاصل میشود:

$$D_{\tau\tau} \frac{\partial^{\tau} w}{\partial \xi^{\tau}} + {}^{\tau} D_{\tau \varphi} \frac{\partial^{\tau} w}{\partial \xi^{\tau} \partial \eta} + {}^{\tau} (D_{\tau \tau} + {}^{\tau} D_{\varphi \varphi}) \frac{\partial^{\tau} w}{\partial \xi^{\tau} \partial \eta^{\tau}} + {}^{\tau} D_{\tau \varphi} \frac{\partial^{\tau} w}{\partial \xi \partial \eta^{\tau}} + D_{\tau \tau} \frac{\partial^{\tau} w}{\partial \eta^{\tau}} + i C_D \omega \frac{\partial w}{\partial t} + m_p \omega^{\tau} \frac{\partial^{\tau} w}{\partial t^{\tau}}$$
$$= {}^{\tau} n \exp[ik \sin\theta (\xi \cos\phi - n \sin\phi)]$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{nn} \sin(\frac{m\pi\xi}{a}) \sin(\frac{m\pi\eta}{b})$$
(9)

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \sin(\frac{m\pi\xi}{a}) \sin(\frac{m\pi\eta}{b})$$
(Y)

$$p_{mn} = \lambda P_i \overline{I_m} \overline{I_n}$$

$$\overline{I_m} = \left\{ \frac{-i}{\tau} sgn(sin \theta_i \cos \phi_i) \begin{cases} (m\pi)^{\tau} \\ = [sin \theta_i \cos \phi_i(\omega a/c)]^{\tau} \end{cases} \right\}$$

$$\frac{m\pi \left\{ 1 - (-1)^m \exp[-i \sin \theta_i \cos \phi_i(\omega a/c)]^{\tau} \\ (m\pi)^{\tau} - [sin \theta_i \cos \phi_i(\omega a/c)]^{\tau} \end{cases} \left\{ (m\pi)^{\tau} \\ \neq [sin \theta_i \cos \phi_i(\omega a/c)]^{\tau} \right\}$$

$$(9)$$

$$\frac{-i}{\tau} sgn(sin\theta_{i} \cos\phi_{i}) \begin{cases} (n\pi)^{v} \\ = [sin\theta_{i} \cos\phi_{i}(\omega b / c)]^{v} \end{cases}$$

$$\frac{n\pi \{v - (-v)^{n} \exp[-i \sin\theta_{i} \cos\phi_{i}(\omega b / c)]^{v}}{(n\pi)^{v} - [sin\theta_{i} \cos\phi_{i}(\omega b / c)]^{v}} \begin{cases} (n\pi)^{v} \\ \neq [sin\theta_{i} \cos\phi_{i}(\omega b / c)]^{v} \end{cases}$$

$$\frac{f(\omega b / c)^{v}}{\tau} \end{cases}$$

$$\frac{f(\omega b / c)^{v}}{\tau} = sin\theta_{i} \cos\phi_{i}(\omega b / c)^{v}$$

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{m_p \left[\omega_{mn}^{\mathsf{r}} - \omega^{\mathsf{r}} + \left(\frac{iC_D\omega}{m_p}\right)\right]} \tag{1.1}$$

که در آن، ۵٫٫۵ بسآمدهای طبیعی ورق ناهمسان گرد با تکیه گاه ساده بوده و می توان مقادیر آن را از معادلهٔ ارائه شده توسط برت [۱۶] محاسبه نمود. بدین ترتیب، معادله ارتعاشی ورق کامل می شود. هم چنین، مطابق شکل ۲، فشار تراگسیل شده به نقطه ای خارج از ورق (ناشی از ارتعاشات ورق) با استفاده از انتگرال ریلی و به صورت معادله ۱۹ محاسبه می گردد.

$$p_{t}(r,\theta,\phi) = \frac{-\omega\rho ab}{\tau \pi r}$$

$$exp\left\{i\omega\left[t - \frac{r}{c} - \frac{\sin\theta}{\tau c}(a\cos\phi + b\sin\phi)\right]\right\} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}I_{m}I_{n}$$

$$I_{m} = \left\{\frac{-i}{\tau} sgn(sin\theta\cos\phi) \left\{\frac{(m\pi)^{\tau}}{=[sin\theta\cos\phi(\omega a/c)]^{\tau}}\right\}$$

$$\frac{m\pi\left\{1 - (-1)^{m} exp[-i\sin\theta\cos\phi(\omega a/c)]\right\}}{(m\pi)^{\tau} - [sin\theta\cos\phi(\omega a/c)]^{\tau}} \left\{\frac{(m\pi)^{\tau}}{\neq [sin\theta\cos\phi(\omega a/c)]^{\tau}}\right\}$$

$$I_{n} = \left\{\frac{-i}{\tau} sgn(sin\theta\cos\phi) \left\{\frac{(n\pi)^{\tau}}{=[sin\theta\cos\phi(\omega b/c)]^{\tau}}\right\}$$

$$\frac{n\pi\left\{1 - (-1)^{n} exp[-i\sin\theta\cos\phi(\omega b/c)]^{\tau}\right\}}{(n\pi)^{\tau} - [sin\theta\cos\phi(\omega b/c)]^{\tau}} \left\{\frac{(n\pi)^{\tau}}{\neq [sin\theta\cos\phi(\omega b/c)]^{\tau}}\right\}$$



توان موج تراگسیل شده (∏) را می توان با انتگرال گیری عددی از شدت موج تراگسیل شده داخل یک نیم کره محاسبه نمود:

$$\prod_{t} = \int_{\phi=\cdot}^{t\pi} \int_{\theta=\cdot}^{\pi/t} I^{t} r^{\mathsf{x}} \sin\theta d\theta d\phi \tag{17}$$

Downloaded from joasi.ir on 2025-09-01

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

ە.	<b>جدول ۱</b> خواص مکانیکی مواد مرکب مورد استفاده.						
ρ (kg/m <sup>°</sup> )	$\nu_{17}$	G <sub>17</sub> (GPa)	E <sub>17</sub> (GPa)	E <sub>11</sub> (GPa)	مواد		
778.	۰٫۳۳	۲۶,٩	٧٠	٧٠	آلومينيوم		
100.	٣	۵	١.	١٣٧	گرافیت اپوکسی		
719.	•,٣۴	٢	٩	٣٩	الياف شيشه اپوكسي		
1880	٣	٢	۶	٧۶	كولار اپوكسى		
107.	۵۲٬۰	۲٬۵۸	۵,۱۷	7.9	الياف كربن		

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. همان طور که مشاهده می-شود، زاویه چیدمان لایه ها تأثیر قابل توجهی بر روی نسود، زاویه چیدمان لایه ها تأثیر قابل توجهی بر روی 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.



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

$$I^{t} = \frac{\left|\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}p_{t}\right|^{\mathsf{T}}}{(\mathsf{T}\rho c)}$$
(117)

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

$$TL = 1 \cdot \log \frac{\prod_{i}}{\prod_{t}} \tag{14}$$

که در آن، <sub>۱</sub>٫ توان موج صوتی برخوردی است:

$$\prod_{i} = \frac{p_{i}^{\mathsf{x}} ab \cos \theta_{i}}{\mathsf{x} \rho c} \tag{10}$$

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

محاسبه فشار تعميم يافته با استفاده از رابطه ٩.

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 می توان 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 ۲۰ × ۳۶ سانتیمتر با تکیه گاه ساده را نشان میدهد. ضخامت هر لایه ماده مرکب برابر با ۱۲۵/۰ میلیمتر میباشد [۱۷].



مــواد مرکـب مــورد نظــر شــامل گرافیــت اپوکســی<sup>۱</sup>، الیافشیشه<sup>۲</sup>، کولار<sup>۳</sup> و الیافکربن<sup>۴</sup> میباشـند کـه خـواص مکانیکی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Fiberglass

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kevlar

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Fibercarbon

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Graphite epoxy

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

گرفتــه مــیشـود و در زمـرهی فرآینــدهـای ارزیـابی زیستشناختی (بیولوژیک) محسوب می گردد [۱۸]. با

توجه به عدم وجود حل تحلیلی برای مواد ناهمسان گرد در

تحليل كمانش، تحليل پايداري با استفاده از بخش

(نرم افزار متلب)

ايجاد جمعيت اوليه

 $\mathbf{V}$ محاسبه ارزندگی جم

اوليه  $\downarrow$ حلقه تكرار

 $\mathbf{V}$ روش انتخاب

 $\downarrow$ 

تقاطع  $\mathbf{V}$ 

نخبه گرایی

حاسبه ارزندگی و قیود برای

جمعيت جديد  $\mathbf{v}$ 

بررسى وضعيت بهينه شده

بله

خروج

ای یی دی ال نرمافزار انسیس انجام گرفته است (شکل ۵).

مود اول را به شدت تحت تأثير قرار داده و لذا مهار اين دو مشخصه بهعنوان قيود بهينهسازي، مانع از نرمي فزاينده ورق می شود. جدول ۲ اثر زاویه الیاف را بر عبارات خمشی، بسآمد طبيعي و بار كمانش مود اول نشان ميدهد.

## ۱-۲. 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:

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

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n], X \in \mathbb{R}^n$$
(19)

$$s.t. \quad g_i(X) = \cdot \quad i = 1, \dots, m \tag{1Y}$$

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

که در آنها، g<sub>i</sub> و c<sub>i</sub> 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 لايەھا مىباشند.

$$\begin{split} X = \begin{bmatrix} \theta_i, h_i, m_i \end{bmatrix}, & i = 1, \dots, \texttt{F} \\ X_{lb} \leq X \leq X_{ub} \end{split} \tag{19}$$

که در آن، بردارهای X<sub>lb</sub> و X<sub>ub</sub> کرانهای پایین و بالای متغیرهای طراحی را نشان میدهند. بهدلیل اهمیت وزن و بار كمانش سازه، اين الزامات بهصورت قيدهاى غيرخطي در نظر گرفته می شوند. روش های مختلفی برای بهینه سازی مسائل مختلف وجود دارد. در این تحقیق، برای بهینه سازی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این روش، برای حل مسائل مقید و غیرمقید به کار



(بخش اِیپیدیاِل اَنسیس)

ايجاد الگوى پارامتريک صفحه مرکب

 $\checkmark$ 

به دست آوردن پاسخ مکانیکی

(بار کمانش)

چینش لایهها بر عبارات خمشی و بسآمد طبیعی و بار کمانش مود اول مواد مرکب مختلف.	<b>جدول ۲</b> اثر چ
---	---------------------

موان	راوید دید چینی	D11	Dit	DIP	DYY	DYS	Dçç	بسامت (هريز)	بار ممانس (۱۱)
	<sub>اِس</sub> [۰۹۰۰۹۰]	٨,١۶	۰,۲۵	•	۴,۱۷	•	•,47	<b>۲۴</b> , <b>۲</b> ۷	2474
درافيت	<sub>اِس</sub> [ ۵۹ – ۴۵ ۴۵ – ۴۵]	٣,۶٢	۲٫۷۹	۰,۹۹	۳,۶۲	۰,۹۹	۲٫۹۵	۱۰۳/۶۹	۵۰۶۸
NE	ا <sub>ِس</sub> [۰۹۰۰۹۰]	۴٬۵۵	۰,۱۷	•	۲٫۳۴	•	۰,۱۷	۵٩,٢١	۲۰۸۷
تولار	ا <sub>یس</sub> [ ۵۵ – ۴۵ – ۴۵]	١٬٩٧	1,84	۵۵, •	۱,۹۷	۵۵, •	1,84	<b>۲</b> ,۵۵	2221
الياف	ا <sub>ِس</sub> [۰۹۰۰۹۰]	۲٫۵۲	•,77	•	۱٬۵۶	•	۰,۱۷	۳۸,۹۴	١٣۵۵
شيشه	ا <sub>یس</sub> [ ۵۵ – ۴۵ – ۴۵]	٠٣٠	۰٫۹۷	•,74	۱٫۳۰	•,74	۰٫۹۱	49,81	1789
الياف	ا <sub>ِس</sub> [۰۹۰۰۹۰]	۱۱٬۹۵	٠٫١١	•	۵٫۶۷	•	۰ ۲ ۱	۸۵,۳	۵۰۳۱
كربن	<sub>اِس</sub> [ ۴۵ – ۴۵ ۴۵ – ۴۵]	۴,۶۷۵	۴,۲۵	۱,۵۲	۴,۶۷	١,Δ٢	۴٫۳۵	126,97	۶۳۸۹

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

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

$$\min f(X) = -1 \cdot \log_{1 \cdot} \left| \tau_{avg}(X) \right| \tag{(7.)}$$

$$\tau_{avg}(X) = \sum_{i=1}^{N_f} \overline{\beta_i} \frac{\prod_i}{\prod_i}$$
(11)

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، اندازه گیری سطح فشار صوتی حساسیت کمتری به بسآمدهای کمتر از ۱۰۰۰ هرتز و بالاتر از ۴۰۰۰ هرتز دارد [۱۹، ۱۹]. ثوابت وزنی  $\overline{\beta_i}$  در جدول ۳ نشان داده شدهاند.

	(( ی		
پارامتر	ضريب	ثابت وزنى	بسآمد
$\beta_i$	$\cdot^{dB(A)/\cdot\cdot}$	(دسىبل)	(هرتز)
•,1108	١	•	1
•/١٣٢٧	1,148	• ,6	170.
۰,۱۴۵۵	١,٢۵٩	١	18
•,1074	٨١٣,١	١,٢	7
۰,۱۵۵۹	1,869	۲٫۲	۵۰۰
•,1074	٨١٣,	١/٢	310.
۰,۱۴۵۵	١,٢۵٩	١	4

**جدول ۳** ثوابت وزنی A.

# ۳. نتايج

جدول ۴، خواص مکانیکی و شرایط محیطی مورد استفاده در شبیه سازی عددی ورق مرکب را نشان می دهد. مطابق با شکل های ۳ و ۴، مواد کربن اپوکسی و الیاف کربن به دلیل داشتن افت تراگسیل صدای بالاتر، به عنوان انتخاب اول در میان مواد جدول ۱ برای ادامه محاسبات بر گزیده شدهاند. در این مقاله، بهینه سازی افت تراگسیل صدا در دو

بخش لایههای همجنس و لایـههایی با جـنس متفاوت بررسی شده است.

- ى	ט ר ריי		
كربن اپوكسى	الياف كربن	محيط	مواد
100.	1077	۲٫٩	ρ (kg/m <sup>°</sup> )
177	۲٫۶	-	E <sub>11</sub> (GPa)
١.	Δ, ۱ Υ	-	E <sub>17</sub> (GPa)
۵	۲,۵۸	-	G <sub>17</sub> (GPa)
۳,۰	۰,۲۵	-	نسبت پواسون v
-	-	34.	سرعت صدا (m/s)
	۶.	زاويه (درجه)	
$oldsymbol{\cdot}_{ar{ar{ar{ar{ar{ar{ar{ar}}}}}}}$			ابعاد صفحه (متر)
۱ یا متغیر			ضخامت صفحه (میلیمتر)

جدول ۴ خواص مکانیکی مواد انتخابی و شرایط محیطی.

## 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، می توان به صورت بردار زیر در نظر گرفت. بهینه سازی چیدمان لایهها همراه با بار کمانش و بسآمد طبیعی مود اول در جدول ۵ قرار دارد. منحنی افت تراگسیل صدا با جهات بهینه شده لایهها در شکل ۶ نشان داده شده است.

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

الياف كربن	گرافیت اپوکسی	مواد		
<sub>اِس</sub> [۶۰ -۵۶ ۶۲ ۱۸]	<sub>ایی</sub> [۵۵ –۵۲ ۶۲ ۸]	زاویه لایهچینی <sup>*</sup> بهینه (درجه)		
۶۳۰۷	۵۱٫۱	بار کمانش (N)		
۱۲۲٬۸۶	۱۰۰٫۸۷	بسآمد (هرتز)		
۱,۵۲	١,۵٩	چگالی سطحی (kg/m <sup>۲</sup> )		
* Stacking				

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

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

ای ورق مر تب.	محامتهای بهینهسده بر	<b>جدول /</b> جهات و ه
الياف كربن	گرافیت اپوکسی	مواد
اِس[۶۱ –۸۳ ۶۳ –۳۳]	<sub>اِس</sub> [۶۰ ۵۹ -۶۷ ۵۳]	زاویه لایهچینی بهینه (درجه)
[•,\Y••,\\\	[•,187 •,188	ضخامت بهينه لايهها
إس[١٩٦]٠	إس[۱۷۱] • ۱۱۱۱] •	(میلیمتر)
۶۳۲۲٫۸	۵۱۱۷/۹	بار کمانش (N)
145,78	114,87	بسآمد (هرتز)
١,٧٩۶	١,٧٩۶	چگالی سطحی (kg/m <sup>۲</sup> )

التربية خار ترجاء

مواد مختلف.	مرکب با	در ورق	بهينەشدە	۷ پارامترهای	جدول
-------------	---------	--------	----------	--------------	------

[98 91	<sub>اِس</sub> [۳۹ ۵۹–۵	زاویه لایهچینی بهینه (درجه)
·,184 ·,	ایس[۱۱۹، ۲۷۵	ضخامت بهينه لايهها
[	٠٫١٣٣	(میلیمتر)
	147,1	بسآمد (هرتز)
,	۱٫٨٠٢	چگالی سطحی ( <sup>۲</sup> kg/m)
107.	لايه اول	
107.	لايه دوم	
107.	لايه سوم	چکالی بهینه مواد دیهما
107.	لايه چهارم	

مطابق شکل ۷، نتایج به خوبی نشان میدهند که افت تراگسیل صدا در هر دو ناحیه جرم و سفتی مهار با افزایش ضخامت ورق افزایش می یابد. این افزایش به تر تیب برای گرافیت ایوکسی و الیافکربن 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 می گیرد. پارامترهای طراحی برای این حالت عبارتند از:

 $x_{i} = \left[\theta_{i}, \theta_{r}, \theta_{r}, \theta_{r}, h_{i}, h_{r}, h_{r}, h_{r}, n_{r}, n_{r}, n_{r}, n_{r}\right]$ (۲۵) که، n نشان دهنده نوع ماده انتخابی مطابق با جدول ۲ است. قیود بهینهسازی نیز همانند قبل، شامل کمانش مود



شکل ۶ منحنی افت تراگسیل صدا با جهات بهینه شده لایه ها، (الف) گرافیت اپوکسی، (ب) کربن آر اٍف.

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 می کند. در ناحیه جرم مهار نیز بهدلیل یکسان بودن وزن ورقها، منحنی های 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 به صورت رابطه ۲۳ لحاظ شود.

$$c_{\gamma} = \sum_{i=1}^{\Lambda} h_i \rho_i - m_i \leq \cdot$$
 (۲۳)  
که در آن،  $m_i = 1_{\Lambda} kg / m^{\gamma}$  جرم بر واحد سطح میباشد.

۲۴ در این حالت متغیرهای طراحی به صورت رابطه  
انتخاب میشوند:  

$$x_{i} = \left[\theta_{\gamma}, \theta_{\gamma}, \theta_{\gamma}, \theta_{\gamma}, h_{\gamma}, h_{\gamma}, h_{\gamma}\right]_{s} - 9 \cdot \leq \theta_{i} \leq 9 \cdot$$

$$(\gamma^{num} \leq h_{i} \leq \cdot \gamma^{num}$$

مختلف، اختلاف چندانی با الیاف کربن بهینه شده ندارد. لذا، پیشنهاد استفاده از مواد مرکب چند مادهای تنها به خاطر افزایش افت تراگسیل صدا مقرون به صرفه نمی باشد.

## ۴. نتیجهگیری

در این تحقیق، بهینهسازی افت تراگسیل صدای ورق مركب مستطيلي با طول محدود مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، با توسعه الگوی تحلیلی راسس، امکان محاسبه افت تراگسیل صدا با سپرصوتی نامتناهی فراهم شد. بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفت و بسآمدهای گسسته بر مبنای افت تراگسیل با ثابت وزن دهی A انتخاب شدند. به منظور جلوگیری از اثر نرم شدن ناشی از بهینهسازی، قید پایداری سازه با استفاده از ایییدیال نرمافزار آنسیس انجام یذیرفت. چندین ماده مرکب مرسوم نیز برای این تحقیق در نظر گرفته شدند. نتایج نشان میدهند که موادی همانند گرافیت ایوکسے و الیافکربن بهدلیل سفتی بیشتر از افت تراگسیل صدای مناسب تری برخور دارند. هم چنین، فرآیند بهینه سازی اثر چندانی روی افت تراگسیل صدا در ناحیه جرم مهار نداشت؛ چراکه این مواد دارای چگالی نزدیک به یکدیگر می باشند. اگرچه استفاده از ضخامت لمینت بهعنوان متغیر طراحی، اثر قابل توجهی در افت تراگسیل صدا دارد، اما می تواند امتیاز وزن کم مواد مرکب را تحت تأثیر قرار دهد. هم چنین، نتایج نشان میدهند که بهینهسازی ورق مرکب متشكل از چندين ماده صرفاً جهت افزايش افت تراگسـيل صدا مقرون به صرفه نمیباشد.

### ۵. فهرست منابع

- 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



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؛ بهطوری که 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<sup>™</sup> 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<sup>\*</sup>

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)

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: bagheri@alborz.kntu.ac.ir