

بهینه‌سازی عملکرد آکوستیکی در ورق‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری

ریحانه اسماعیلی*

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تهران

reyhaneh.esmaeili@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

چکیده

به‌منظور مقابله با مشکلات آلودگی صوتی، طراحی سیستم‌ها و سازه‌هایی که بتوانند کنترل هدفمندی بر روی انتشار امواج صوتی داشته باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های رایج و پرکاربرد در کنترل آلودگی صوتی استفاده از ورق‌های ساندویچی به‌عنوان عایق آکوستیکی است. ویژگی بارز این نوع ورق‌ها قابلیت تغییرپذیری بالای هسته آنها است به نحوی که با تغییر جنس و چیدمان هسته، خواص صوتی و مکانیکی ورق تغییر می‌کند. در سال‌های اخیر از ساختارهای لانه زنبوری به‌عنوان هسته ورق‌های ساندویچی استفاده شده است. هسته‌های لانه زنبوری به‌علت ویژگی وزن کم و سختی بالا، گزینه مناسبی برای طراحی عایق‌های صوتی محسوب می‌شوند. ویژگی‌های متنوع و مشخصه‌های مختلف ساختار لانه زنبوری از جمله هندسه سلولی، جنس سازه به‌کار رفته و نوع چیدمان و نحوه جهت‌گیری سلول‌ها در کنار یکدیگر، این موضوع را نشان می‌دهد که ساختار بهینه‌ای طراحی شود تا رفتار آکوستیکی مناسب‌تری از این ساختار به‌دست آید. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهبود عملکرد آکوستیکی ساختار ورق ساندویچی با هسته لانه زنبوری استفاده شده است. این بهینه‌سازی برای دو نوع جهت‌گیری معمول سلول‌های لانه زنبوری و با در نظر گرفتن اینکه ورق تحت بارگذاری درون صفحه‌ای قرار دارد، انجام شده است. عمل بهینه‌سازی بر روی متغیرهای هندسی سلول لانه زنبوری برای تعدادی از مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف، صورت پذیرفته است و هدف، کاهش عبور صوت از این ورق در محدوده فرکانسی پایین بوده است. به این دلیل، بیشینه کردن ضریب افت انتقال صدا مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد موادی که جرم بالا و سختی نسبتاً کمتری دارند عایق صوتی مناسب‌تری محسوب می‌شوند.

واژگان کلیدی: آکوستیک، ورق ساندویچی، هسته لانه زنبوری، الگوریتم ژنتیک.

۱. مقدمه

شهری و صنعتی، مشکل آلودگی صوتی است که اثرات نامطلوب جسمی، روانی و اجتماعی را در زندگی افراد به‌وجود می‌آورد. از آنجایی که آلودگی صوتی به‌صورت اجتناب‌ناپذیری در محیط زندگی و محیط کار تولید و منتشر می‌گردد، یکی از

امروزه توسعه در محیط‌های شهری و صنعتی با تخریب محیط زیست همراه بوده است. آلودگی محیط‌زیست شامل آلودگی محیط، آلودگی هوا، آلودگی آب، آلودگی صوتی و غیره است. یکی از مشکلات آزاردهنده و نامشهود زندگی

معضلات عمده مدیریت زیست‌محیطی و شهری را تشکیل می‌دهد.

آلودگی صوتی، اثرات روانی و فیزیولوژیکی ناخوشایندی بر افراد می‌گذارد. تحقیقات بسیار وسیعی در خصوص تأثیر آلودگی صوتی بر آرامش جسمی و روانی صورت گرفته است. سطح صدای زمینه در یک شهر، ارتباط مستقیمی با تعداد افراد عصبی در آن شهر داشته و عامل بسیار مهمی در تولید و تشدید فشارها و تنش‌های عصبی در انسان است. بسته به شدت آلودگی صوتی و مدت‌زمانی که افراد تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند، اثرات نامطلوب این صداهای مزاحم بر افراد متفاوت خواهد بود.

۲. اهمیت و ضرورت پژوهش

یکی از راه‌های کنترل غیرفعال امواج صوتی، استفاده از عایق‌های صوتی است. استفاده از عایق‌های صوتی نسل جدید، راهکاری مناسب و منطقی جهت جلوگیری از آلودگی صوتی بوده و جایگزین بسیار مناسبی برای کلیه مواد و مصالح قدیمی و سنتی که دارای معایب و نواقصی هستند، به‌شمار می‌آید.

همچنین این ورق‌های جدید، نیاز به بهینه‌سازی و ارتقاء و بهبود عملکرد خود دارند تا با استفاده از مواد اولیه کم و با قیمت مناسب، ورقی با مشخصات آکوستیکی خوب به‌دست آید. ازجمله ورق‌های آکوستیکی مدرن مورد استفاده در صنعت، ورق‌های ساندویچی^۱ هستند. خواص صوتی ورق‌های ساندویچی به‌واسطه تغییر در جنس و نوع هسته آنها متفاوت است.

در سال‌های اخیر هسته‌های لانه زنبوری^۲ در طراحی ورق‌های ساندویچی استفاده شده است. ویژگی بارز این ساختارها استحکام مناسب در عین داشتن وزن کم است که برای استفاده در ساخت عایق‌هایی با کاربری مختلف، شرایط بسیار مناسبی دارند.

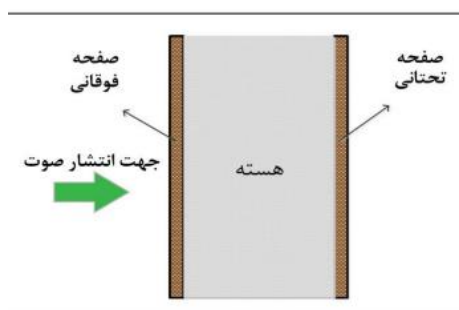
۳. ورق‌های ساندویچی

ازجمله سازه‌هایی که امروزه به‌صورت گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند ورق‌های ساندویچی هستند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید این ورق‌ها از سه قسمت تشکیل شده‌اند:

۱. صفحه محافظت‌کننده فوقانی؛

۲. هسته ورق؛

۳. صفحه محافظت‌کننده تحتانی.



شکل ۱. قسمت‌های مختلف ورق ساندویچی

یکی از مزیت‌های استفاده از ورق‌های ساندویچی، استفاده از مواد اولیه کمتر در تولید آنهاست که علاوه بر صرفه اقتصادی، باعث کاهش وزن سازه می‌شود.

مزیت دیگر استفاده این نوع ورق‌ها، قابلیت تغییرپذیری بالای ساختار در آنهاست. این تغییرات شامل تغییر در هسته ورق و تغییر در صفحات محافظت‌کننده ورق هستند. به نحوی که می‌توان با تغییر جنس سازه، مشخصات هندسی و نحوه چیدمان ساختاری ورق، مشخصات فیزیکی و مکانیکی کل ساختار ورق را بهبود بخشید. به‌عنوان مثال با تغییر هسته ورق ساندویچی به هسته‌ای با سختی بالا و درعین حال سبک، نسبت استحکام به وزن کل ساختار ورق ساندویچی بهبود پیدا کرده و گزینه مناسبی در صنایع مختلف مثل هوافضا و یا صنایع خودروسازی به‌شمار می‌رود.

یکی از کاربردهای مورد توجه ورق‌های ساندویچی، استفاده از آنها به‌عنوان عایق صوتی است و به‌واسطه نتایج حاصل شده از تحقیقاتی که صورت گرفته است. ورق‌های

ساندویچی در مقایسه با صفحات تک لایه رفتار آکوستیکی مناسب‌تری دارند [۱].

۴. ساختار لانه زنبوری

ساختار لانه زنبوری دارای آرایشی با سلول‌های باز است که از اتصال دیوارهای بسیار نازک به‌وجود می‌آیند. سطح مقطع سلول‌ها معمولاً به شکل شش ضلعی و یا اشکال هندسی دیگر است. ساختار لانه زنبوری، پیکربندی جالب توجهی از مواد است که امتیازات فراوانی را نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت جذب بالای انرژی برخورد حاصل از موج و ضربه مکانیکی، خواص بالستیکی مناسب، خاصیت دی‌الکتریک پایین و ضرایب انتقال حرارت پایین فراهم می‌کند.

پیش از اینکه بشر به فناوری سازه‌های لانه زنبوری دست یابد این ساختارها در طبیعت وجود داشته‌اند. اولین بار، ساختار لانه زنبوری به‌صورت کاغذی و برای بسته‌بندی در چین مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن، ساختار لانه زنبوری در تیرهای افقی راه‌آهن استفاده شد که به شکل لوله‌ای ساخته شده بودند.

امروزه ساختارهای لانه زنبوری به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالا و همچنین جذب انرژی مناسب، اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف اعم از ساختمان‌سازی، هوافضا، کشتی‌سازی، حمل و نقل و صنایع نظامی پیدا کرده‌اند. در سال‌های اخیر از ساختار لانه زنبوری در طراحی عایق‌ها و جاذب‌های صوتی استفاده شده است.

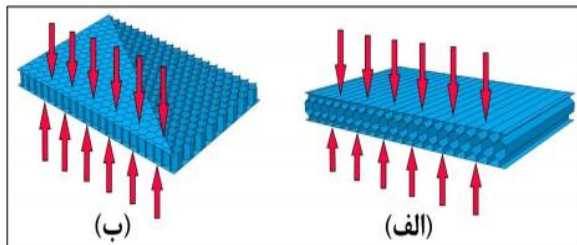
۵. نحوه بارگذاری سلول‌های لانه زنبوری

معمولاً بارگذاری در ساختارهای لانه زنبوری به دو صورت انجام می‌گیرد:

- بارگذاری درون صفحه‌ای؛

- بارگذاری برون صفحه‌ای؛

که در شکل ۲ نشان داده شده است. بارگذاری برون صفحه‌ای، سختی بالاتری در مقایسه با بارگذاری درون صفحه‌ای دارد و باتوجه به اینکه وزن سازه در هر دو حالت یکسان است، در ساخت تجهیزاتی که نسبت استحکام به وزن بالا نیاز است مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً در ساخت بدنه هواپیما یا بدنه خودرو.



شکل ۲. نحوه بارگذاری مختلف سلول‌های لانه زنبوری
(الف) درون صفحه‌ای؛ (ب) برون صفحه‌ای

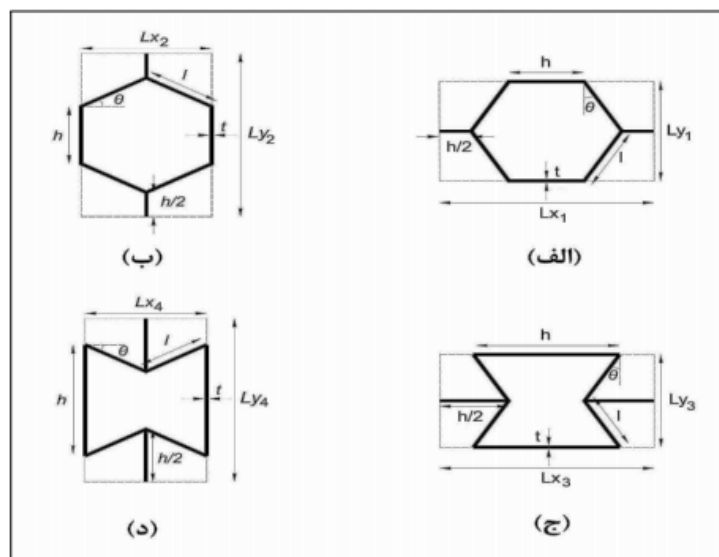
۶. طول و ارتفاع کلی یک سلول

طول کلی یک سلول را با L_x و ارتفاع کلی آن را با L_y نمایش می‌دهند. با توجه به نوع جهت‌گیری سلول‌ها و مقدار زاویه درون‌سلولی، مقدار طول کلی و ارتفاع کلی سلول متفاوت خواهد بود. شکل ۳ چهار ساختار مختلف لانه زنبوری را نشان می‌دهد که دارای L_x و L_y های متفاوتی هستند. ساختار الف در شکل ۳، معرف سلول لانه زنبوری در جهت‌گیری نوع اول و دارای زاویه درون‌سلولی مثبت است. در این سلول:

$$\begin{aligned} L_{x1} &= 2h + 2l\sin(\theta) \\ L_{y1} &= 2l\cos(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

ساختار ب، معرف سلول لانه زنبوری در جهت‌گیری نوع دوم و دارای زاویه درون‌سلولی مثبت است. در این سلول، L_{x2} و L_{y2} عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} L_{x2} &= 2l\cos(\theta) \\ L_{y2} &= 2h + 2l\sin(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۳. طول و ارتفاع کلی سلول‌های لانه زنبوری مختلف

- (الف) جهت‌گیری نوع اول و زاویه درون سلولی مثبت؛
 (ب) جهت‌گیری نوع دوم و زاویه درون سلولی مثبت؛
 (ج) جهت‌گیری نوع اول و زاویه درون سلولی منفی؛
 (د) جهت‌گیری نوع دوم و زاویه درون سلولی منفی؛

کرده و در محیط خارج از ورق منتشر می‌شود و یا توسط ورق جذب می‌گردد. مطالب بیان شده به صورت شماتیک در شکل ۴ نمایش داده شده است.

نسبت فشار موج صوتی بازتاب یافته به فشار صوتی موج ورودی، ضریب بازتاب فشار نامیده می‌شود:

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (5)$$

به نسبت فشار موج صوتی عبور کرده از ورق به فشار صوتی موج ورودی، نسبت عبور فشار گفته می‌شود:

$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (6)$$

کمیت مهم دیگر در بررسی میزان عبور موج صوتی، ضریب افت عبور صوت^۳ (STL) است که با نسبت عبور، نسبت عکس دارد. STL از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$STL = 20 \log \left(\frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

ساختار ج، معرف سلول لانه زنبوری در جهت‌گیری نوع اول و دارای زاویه درون سلولی منفی ($\theta < 0$) است. در این سلول داریم:

$$L_{x3} = |2h - |2l \sin(\theta)|| \quad (3)$$

$$L_{y3} = 2l \cos(\theta)$$

ساختار د، معرف سلول لانه زنبوری در جهت‌گیری نوع دوم و دارای زاویه درون سلولی منفی ($\theta < 0$) است. در این سلول، L_{x4} و L_{y4} عبارت‌اند از:

$$L_{x4} = 2l \cos(\theta) \quad (4)$$

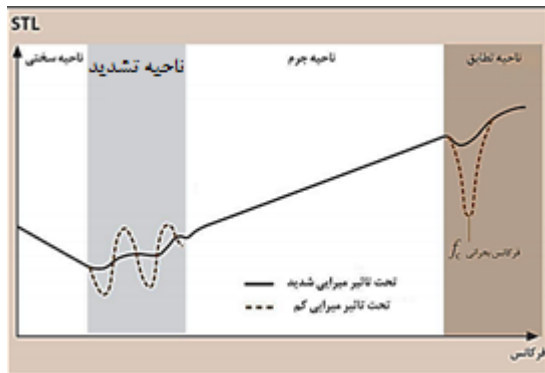
$$L_{y4} = |2h - |2l \sin(\theta)||$$

۷. بررسی مفاهیم آکوستیکی مورد نیاز برای تحلیل ساختار لانه زنبوری

۷-۱. نحوه عملکرد موج صوتی در مواجهه با یک ورق آکوستیکی

وقتی موج صوتی با یک ورق آکوستیکی برخورد می‌کند، قسمتی از موج از ورق عبور کرده و قسمتی دیگر از سطح ورق بازتابیده می‌شود. موج صوتی عبوری از سطح ورق به داخل آن، دو رفتار از خود نشان می‌دهد؛ یا از ورق عبور

۱. ناحیه سختی؛^۵
۲. ناحیه تشدید؛^۶
۳. ناحیه جرم؛^۷
۴. ناحیه تطابق؛^۸



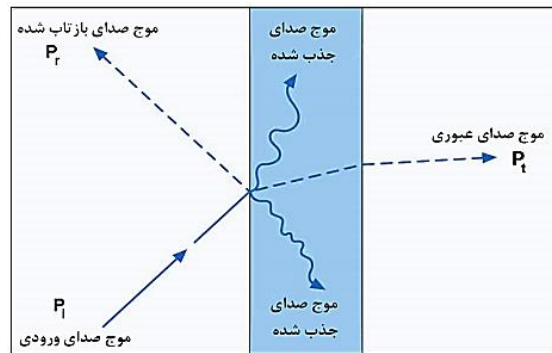
شکل ۵. نمودار STL برحسب فرکانس

معمولا در فرکانس‌های خیلی پایین، سختی ورق،^۹ عامل مؤثر بر تغییرات STL خواهد بود و مشخصه‌های جرم و میرایی، اثر چندانی بر ضریب افت عبور صوت نخواهند گذاشت. در این ناحیه با افزایش فرکانس تا حد مشخصی STL کاهش پیدا خواهد کرد. این ناحیه با بروز اولین تشدید به پایان می‌رسد.

در فرکانس‌های پایین، به‌واسطه قرارگیری ورق در ناحیه تشدید خود، STL به‌وسیله فرکانس طبیعی ورق کنترل می‌شود. در فرکانس‌های تشدید ساختار به بالاترین حد نوسان خود می‌رسد. فرکانس تشدید در یک ورق عموماً از مشخصات جنس، شکل و اندازه ورق تأثیر می‌پذیرد. نمودار STL در تشدید، به علت نوسان بیشینه ساختار ورق و انتقال قابل ملاحظه انرژی صوتی از ورق، دارای فرورفتگی‌های قابل توجهی است.

در فرکانس‌های میانی، عموماً مشخصه جرم ورق، عامل تأثیرگذار بر تغییرات STL است. در این ناحیه، STL از رابطه قانون جرم تبعیت می‌کند:

$$STL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\rho_s \omega \cos \phi}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$



شکل ۴. رفتار موج صوتی در مواجهه با یک ورق آکوستیکی

۲-۷. امپدانس آکوستیکی

امپدانس آکوستیکی^۴ از جمله ویژگی‌های آکوستیکی مهم یک ماده است که نشان‌دهنده مقاومت ماده در برابر عبور موج صوتی بر خوردی به آن است و عامل مؤثری در ضریب انتقال صوت عبوری از آن ماده محسوب می‌شود. رابطه آن به‌صورت نسبت فشار آکوستیکی P به سرعت ذره U تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{P}{U} \quad (8)$$

برای انتشار موج تخت، امپدانس آکوستیکی، حاصل ضرب چگالی ماده ρ در c سرعت انتشار صوت در محیط خواهد بود.

۳-۷. ضریب افت عبور صوت

یکی از مهم‌ترین کمیت‌های سنجش یک عایق صوتی، ضریب افت عبور صوت STL است. ضریب STL به فرکانس صوت ورودی و جنس ماده سازنده ورق و همچنین به نوع شکل و چیدمان آن وابسته است. عموماً رابطه ضریب STL با فرکانس به چهار قسمت مجزا تقسیم می‌شود که در هر قسمت، یک عامل بر تغییرات STL غلبه دارد. شکل ۵ نمودار ضریب افت عبور صوت برحسب فرکانس را نمایش می‌دهد. چهار ناحیه مجزای نمودار ضریب افت عبور صوت برحسب فرکانس عبارت‌اند از:

در این رابطه ρ_s نسبت جرم ورق به مساحت سطح ورق (چگالی سطحی ورق)، θ معرف زاویه موج صوتی ورودی نسبت به خط عمود بر سطح ورق، ρ_0 چگالی محیط انتشار صوت (در اینجا محیط انتشار هوا است) و c_0 سرعت انتشار صوت در محیط (در اینجا محیط انتشار هوا است) و ω فرکانس زاویه‌ای موج صوتی ورودی است. در صورتی که تابش موج صوتی ورودی به صورت مستقیم بر ورق باشد زاویه θ برابر با صفر خواهد بود. با در نظر گرفتن بالا بودن فرکانس، می‌توان از تقریب $1 \gg \rho_s \omega / 2\rho_0 c_0$ استفاده کرد.

۷-۴. روش امپدانس پیشرو

روش امپدانس پیشرو، یک روش تحلیل آکوستیکی است که در آن نیازی به حل معادلات موج و اعمال شرایط مرزی در معادلات نیست. ماهیت این تحلیل بر پایه محاسبه قدم به قدم امپدانس آکوستیکی محیط‌هایی که موج صوتی در آنها منتشر می‌شود، استوار است.

۸. الگوریتم ژنتیک

امروزه با پیشرفت سریع دانش و اهمیت منابع انرژی، بهینه‌سازی از اهمیت بالایی در علوم مختلف مهندسی برخوردار شده است. بهینه‌سازی یکی از مفاهیمی است که به خوبی از پل ارتباطی بین تئوری و عمل عبور کرده و دارای کاربرد گسترده‌ای است. یکی از ابزارهای مناسب برای بهینه‌سازی مسائل، استفاده از الگوریتم ژنتیک است که شاخه‌ای از محاسبات تکاملی محسوب می‌شود و مبانی این روش از طبیعت الهام گرفته شده است.

۹. نحوه استفاده از الگوریتم ژنتیک در این

پژوهش

هدف این پژوهش بهینه‌سازی ساختار هسته لانه زنبوری در ورق ساندویچی توسط الگوریتم ژنتیک است. در واقع هدف، کاهش نسبت عبور فشار (T) از ورق و در نتیجه افزایش افت ضریب عبور صوت (STL) است.

مشخصه‌های بهینه‌سازی در این پژوهش (ورودی‌های تابع ارزیابی) عبارت‌اند از: تعداد سلول‌ها در راستای طول ورق (N_x)، تعداد سلول‌ها در راستای ضخامت هسته ورق (N_y)، و زاویه درون سلولی (θ).

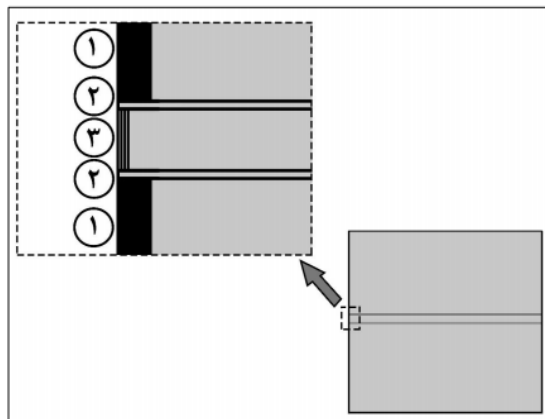
در واقع تغییرات و اثر عملگرهای ترکیب و جهش بر روی این سه مشخصه خواهد بود و سایر متغیرهای مربوط به تابع ارزیابی از طریق این سه مشخصه قابل محاسبه هستند.

۱۰. صحنه‌گذاری بر نتایج به دست آمده

شکل ورق هندسی در این تحلیل یک ورق ساندویچی دارای دو صفحه محافظت‌کننده و یک هسته است که برای تعریف مشخصات ماده سازنده صفحات محافظت‌کننده از مقادیر چگالی (ρ) و سرعت انتشار صوت ماده (c) و برای تعریف مشخصات جنس هسته از مقادیر چگالی معادل (ρ_{eq}) و سرعت انتشار صوت معادل (c_{eq}) استفاده شد. از آنجاکه روش تحلیل امپدانس پیشرو بر مبنای فرض نامحدود بودن ورق استوار است، شرایط مرزی ورق به نحوی تعریف می‌شود که این شرط برقرار گردد.

مطابق شکل ۶ سه نوع مرز مختلف به صورت ادامه دهنده برای محیط انتشار صوت، هسته ورق و صفحه‌های محافظت‌کننده در نظر گرفته می‌شود.

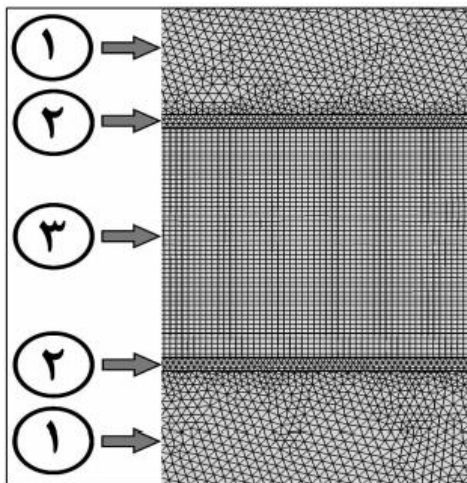
یک مرز ادامه دهنده از جنس محیط انتشار صوت (هوا)،
یک مرز ادامه دهنده از جنس ماده سازنده صفحات



شکل ۶. شرایط مرزی ورق و محیط انتشار صوت

- مرز ۱: مرز ادامه دهنده محیط انتشار صوت (هوا)
- مرز ۲: مرز ادامه دهنده صفحات محافظت کننده ورق
- مرز ۳: مرز ادامه دهنده هسته ورق

محافظت کننده ورق ساندویچی و یک مرز ادامه دهنده از
جنس هسته ورق ساندویچی در نظر گرفته می شود.



شکل ۷. نحوه مش بندی قسمت های مختلف ورق

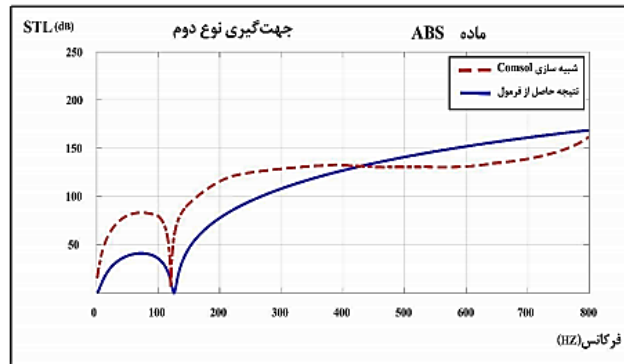
- مش نوع ۱: مش مثلثی متوسط برای محیط انتشار صوت (هوا)
- مش نوع ۲: مش مثلثی ریز برای صفحات محافظت کننده ورق
- مش نوع ۳: مش مربعی ریز برای هسته ورق

از این مواد دارای جهت گیری متفاوتی با یکدیگر است. شکل های ۸ و ۹ بیانگر مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی نرم افزاری (کامسول^{۱۰}) و نتایج به دست آمده توسط راه حل تئوری و فرمول برای دو ماده مختلف هستند.

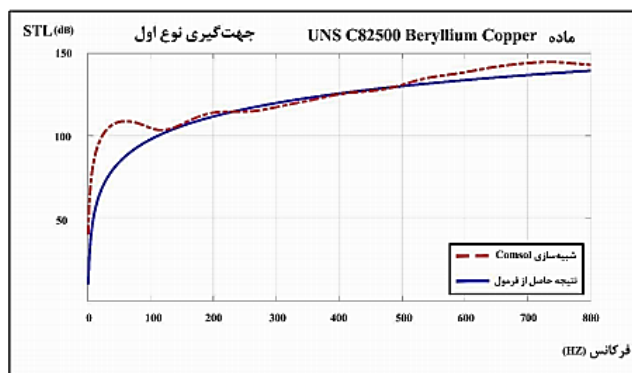
شکل ۸ نتایج مربوط به ماده ای از جنس پلاستیک با نام اختصاری ABS^{۱۱} است که جهت گیری سلول های لانه زنبوری آن از نوع دوم است. با وجود ابعاد نامحدود ورق، به دلیل چگالی کم و مدول یانگ بالای مواد پلاستیکی برخی از تشدیدهای این مواد در نتایج کار مشاهده می شود. شکل ۹ هم مربوط به ماده ای از جنس مس و با نام UNS Beryllium Copper C82500 است که تحت جهت گیری سلولی نوع اول است.

نوع مش بندی برای هسته ورق نوع مربعی و برای قسمت های دیگر مثل صفحات محافظت کننده و محیط انتشار صوت از نوع مثلثی است و اندازه این مش ها بسته به اهمیت نتایج منطقه مورد بررسی ریزتر خواهد بود. شکل ۷ نشان دهنده نحوه مش بندی در محیط نزدیک به ورق است. طبق شبیه سازی که در این تحقیق صورت گرفت نسبت فشار عبوری از ورق بر فشار ورودی اندازه گیری شد و از این نسبت (نسبت عبور فشار) مقدار ضریب افت عبور صوت به دست آمد.

دو نوع ماده با خواص مکانیکی و آکوستیکی مختلف که یکی از جنس فلز مس و دیگری از جنس پلاستیک است به منظور صحنه گذاری بر فرمول ها و روابط استفاده شده در این تحقیق انتخاب شدند. ساختار لانه زنبوری ساخته شده



شکل ۸. صحنه گذاری بر نتیجه حاصل از فرمول توسط شبهه سازی کامسول برای ماده ABS از گروه مواد از جنس پلاستیک و تحت جهت گیری نوع دوم



شکل ۹. صحنه گذاری بر نتیجه حاصل از فرمول توسط شبهه سازی کامسول برای ماده UNS C82500 Beryllium Copper از گروه مواد از جنس مس و تحت جهت گیری نوع اول

۱۱. نتیجه گیری

کاری که در این پژوهش انجام شد عبارت بود از بهبود عملکرد آکوستیکی ساختار ورق ساندویچی با هسته لانه زنبوری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بود. این بهینه سازی برای دو نوع جهت گیری اول و دوم سلول های لانه زنبوری که تحت بارگذاری درون صفحه ای قرار دارد، انجام گرفت.

۱۲. مأخذ

- [1] Wang, Tongan, Shan Li, Shankar Rajaram, and Steven R. Nutt, "Predicting the sound transmission loss of sandwich panels by statistical energy analysis approach", *Journal of Vibration and Acoustics*, 2010, Vol.132, no.1.
- [2] Lang, Mark A., and Clive L. Dym, "Optimal acoustic design of sandwich panels", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, Vol.57, no.6, pp.1481-1487.
- [3] Toyoda, Masahiro, Kimihiro Sakagami, Daiji Takahashi, and Masayuki Morimoto, "Effect of a honeycomb on the sound absorption characteristics of panel-type absorbers", *Applied acoustics*, 2011, Vol.72, no.12, pp.943-948.

1. Sandwich Panel
2. Honeycomb core
3. Sound transmission loss (STL)
4. Acoustic impedance
5. Stiffness region
6. Resonance region
7. Mass region
8. Coincidence
9. Panel
10. Comsol
11. Acrylonitrile butadiene styrene