



بهینه‌سازی تراکنش توان صوتی پنل‌های چندجداره با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمدحسن شجاعی فرد^۱، روح الله طالبی توتی^{۲*}، منصور ترابی^۳، رضا احمدی^۴

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*تهران، کدپستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، rtalebi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش، پیش‌بینی تراکنش توان صوتی پنل‌های چند لایه عایق صوت متشکل از لایه‌های مختلف از جمله مواد متخلخل، مواد الاستیک و هوا با روش ماتریس انتقال (TMM) صورت پذیرفته است. پس از اشاره به تئوری‌های موجود در این حوزه، نحوه تحلیل آکوستیکی و استخراج پارامترهایی چون ضریب افت انتقال صوت با استفاده از روش ماتریس انتقال بسط و تشریح شده است. نتایج حاصل از روش مذکور با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و پس از اطمینان از صحت آن، به بهینه‌سازی چندهدفی رفتار آکوستیکی پنل چندلایه پرداخته شده است. فرآیند بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) با دو هدف بیشینه‌ساختن ضریب افت انتقال صوت پنل و در عین حال کمینه‌کردن وزن سازه صورت پذیرفته است. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه نشان می‌دهد که اگر هدف طراح دست‌یابی به متوسط ضریب افت انتقال صوت مشخصی در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰ هرتز برای پنل با ضخامت ثابت باشد، چنانچه پنل با تعداد لایه کمتری انتخاب نماید (سه لایه) از نظر وزنی به شرایط بهتری دست خواهد یافت. اما اگر متوسط ضریب افت انتقال صوت بیشتری در همان بازه فرکانسی مدنظر طراح باشد، انتخاب یک پنل با تعداد لایه بیشتر (شش لایه) از نظر وزنی شرایط مطلوب‌تری خواهد داشت.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۸ مرداد ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۳ مهر ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۰۵ بهمن ۱۳۹۲
کلید واژگان:
تراکنش صوتی
پنل‌های چندلایه متخلخل
روش ماتریس انتقال (TMM)
بهینه‌سازی چندهدفی با الگوریتم NSGA-II

Optimization of power transmission interaction of multilayered panel using genetic algorithm

Mohammad Hasan Shojaeefard¹, Rouhollah Talebitooti^{1*}, Mansour Torabi³, Reza Ahmadi⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4- Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 13114-16846 Tehran, rtalebi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 August 2013
Accepted 05 October 2013
Available Online 25 January 2014

Keywords:

Power Transmission Interaction
Poroelastic Multilayered Panel
TMM
Multi-Objective Optimization Using NSGA-II

ABSTRACT

In the present paper, power transmission interaction of multilayered sound isolation panels consists of porous, solid materials and air gaps using Transfer Matrix Method (TMM) has been considered. Considering the theories related to acoustical behavior of multilayered panel lined with poroelastic materials, detail explanation of Transmission Loss (TL) of a panel via TMM has been presented. Calculation of TL for a specified panel via TMM has been compared to existed experimental data in the literature and excellent agreement is observed. Next, based on this verified model, a multi-objective optimization of multilayered panel has been conducted using NSGA-II to maximize TL of panel while the panel weight is kept to a minimum. Results of two-objective optimization reveals, if the designer target is to achieve a specific average TL in the frequency band of 10 to 500 Hz, for a panel with constant width, selecting a panel with lower layers (three layers) can bring lower weight. But, if a higher average TL in the same frequency band is desired, a panel with more layers (six layers) has much better conditions in terms of weight.

۱- مقدمه

گرفته تا وسایل نقلیه مثل خودرو و هواپیما) نقش بسیار مهمی در کاهش نویز محیط ایفا می‌کنند. استفاده از این مواد به‌عنوان روش‌های کنترل غیرفعال نویز، به‌علت هزینه کمتر و سادگی در اجرا نسبت به روش‌های کنترل فعال نویز کاربرد وسیع‌تری پیدا کرده است. از سوی دیگر، کاربرد این مواد تحت قیود وزنی و اقتصادی قرار دارد و بهبود عملکرد این مواد به‌سادگی

مواد جاذب و مانع صوت که غالباً از مواد متخلخل^۱ ساخته می‌شوند، اغلب به‌صورت لایه‌ای جهت کاهش سطح نویز انعکاسی یا عبوری به‌کار می‌روند. استفاده از این مواد در زمینه‌های مختلف (از کاربردهای ساختمانی و صنعتی

1- Porous materials

Please cite this article using:

M.H. Shojaeefard, R. Talebitooti, M. Torabi, R. Ahmadi, Optimization of power transmission interaction of multilayered panel using genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 27-34, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روشی موسوم به MMA [۱۰] برای یافتن چیدمان بهینه لایه‌های هوا و مواد پراولاستیک با خواص ثابت، استفاده کردند. بهینه‌سازی هم در یک نقطه از فرکانس و هم در بازه کوچک و بزرگ فرکانسی صورت گرفت به طوری که تمامی فرکانس‌ها در بازه ۱ تا ۵ کیلوهرتز بوده‌اند. نتیجه بهینه‌سازی در فرکانس‌های تک نقطه‌ای حاکی از آن بود که با افزایش فرکانس تعداد لایه‌های به‌دست آمده افزایش و همچنین ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد که بخشی از آن به دلیل محدودیت ضخامت کلی پنل و بخش اصلی کار به دلیل کوتاه‌تر شدن طول موج‌ها در فرکانس‌های بالاتر است. فرانکو و همکارانش [۱۱] نیز در راستای بررسی اثر خواص هندسی پژوهشی انجام داده‌اند که در آن یک پنل ساندویچی را با خواص مختلف هسته و صفحه بیرونی مورد آزمایش قرار دادند. یکی از پیکربندی‌های خروجی، هسته‌ای ساخته شده از آلومینای خرابی مشبک بود که اجازه می‌داد سختی هسته در راستاهای مختلف به طور مستقل کنترل شود. همچنین کاوش خواص میکرو ساختار بهینه در حوزه جذب صوت توسط پروت و همکاران [۱۲] مورد بحث قرار گرفته است. با استفاده از حل عددی معادلات استوکس، پارامترهای مناسب برای میکرو ساختارها محاسبه شده و با استفاده از این نتایج خواص ماکروسکوپیکی را استخراج نمودند. آنان به اثرات جالب اندازه دهنه بر روی سطح جذب، اندازه سلول در فرکانس‌های اوج جذب و شکل سطح مقطع فیبرها در وزن ماده متخلخل پی بردند. در همین راستا لین نوردگرن و گورانسون [۱] اثر تغییر خواص میکروسکوپیکی یک فوم خاص بر روی خواص آکوستیکی به‌منظور رسیدن به خواص بهینه برای یک کاربری خاص را بررسی نمودند. همچنین، علاوه بر خواص آکوستیکی، کمینه شدن وزن سازه را در نظر گرفتند. آنان با روشی موسوم به قوانین مقیاسی^۶ بین خواص میکروسکوپیکی و خواص ماکروسکوپیکی فوم ارتباط برقرار نمودند.

در این پژوهش، ابتدا تئوری مربوط به تحلیل آکوستیکی پنل‌های چندلایه به روش ماتریس انتقال تشریح شده است. پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در این زمینه و اطمینان از صحت مدل‌سازی، در قدم بعدی، با استفاده از این مدل معتبر، به بهینه‌سازی چندهدفی رفتار آکوستیکی پنل پرداخته شده است. رفتار آکوستیکی پنل چندجداره آکوستیکی از طریق یافتن مواد و ضخامت بهینه برای لایه‌ها، بهینه می‌شود و هم‌زمان با لحاظ کردن معیار رفتار آکوستیکی، کمینه شدن وزن پنل نیز، در حین فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. از آنجا که در کار حاضر، متغیرهای بهینه‌سازی شامل هر دو نوع متغیر پیوسته و گسسته می‌باشند، بنابراین الگوریتم ژنتیک، به‌عنوان یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌هایی که به‌خوبی می‌تواند متغیرهای پیوسته و گسسته را با هم اداره کند، به‌منظور حل مسأله حاضر انتخاب شده است. از طرفی با توجه به اینکه مسأله بهینه‌سازی حاضر، یک بهینه‌سازی چندهدفی می‌باشد، بنابراین نسخه چندهدفی الگوریتم ژنتیک یعنی الگوریتم ژنتیک با دسته‌بندی غیربرتر-NSGA-II [۱۳] مورد استفاده قرار گرفته است. خروجی الگوریتم NSGA-II مجموعه‌ای از نقاط پرتو می‌باشد که از دید بهینه‌بودن باهم تفاوتی ندارند به‌طوری که هر نقطه اگر از دید یک تابع هدف از سایر نقاط شرایط بدتری داشته باشد، حتماً از نظر تابع هدف دوم شرایط بهتری دارد. داشتن این نتایج از فرآیند بهینه‌سازی به طراح قدرت انتخاب می‌دهد که در شرایط مختلف، متناسب با نیاز بهترین پنل را برگزیند. همچنین، در قدم آخر، از بین نقاط جبهه پرتو، نقاطی براساس روش تاپسیس^۸ به‌عنوان یک تکنیک برتر

امکان‌پذیر نیست. بر این اساس مدل‌سازی و بهینه‌سازی رفتار این مواد، جهت حصول دو هدف متناقض افزایش افت انتقال صوت و کاهش وزن، مستلزم هزینه و زمان است [۱].

مدل‌سازی رفتار آکوستیکی مواد جاذب و مانع صوت با توجه به محدوده فرکانسی عملکرد آن‌ها به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. روش‌های اجزاء محدود^۱ و المان مرزی^۲ برای پیش‌بینی نوب و ارتعاشات در محدوده فرکانسی پایین و متوسط و روش تحلیل انرژی آماری^۳ در محدوده فرکانس بالا مؤثر می‌باشند. اما در این بین، روش‌های تحلیلی که پاسخ ارتعاشات آکوستیک سیستم را از طریق حل همزمان معادلات سازه و امواج آکوستیک به‌دست می‌آورند، هیچ‌گونه محدودیت فرکانسی ندارد. از طرفی دیگر اکثر جاذب‌های صوتی به‌صورت مجموعه‌ای چندلایه، متشکل از مواد متخلخل، مواد الاستیک و هوا می‌باشند. بنابراین توصیف رفتار یک محیط چندلایه امری مهم به‌شمار می‌آید. یکی از تکنیک‌های تحلیلی کارا برای توصیف انتشار امواج در ماده متخلخل و مجموعه‌های چندلایه، روش ماتریس انتقال^۴ است [۴]. انعطاف و سرعت بالای روش ماتریس انتقال در تحلیل و برآورد رفتار آکوستیکی پنل‌های چندلایه، این روش را به یک گزینه مناسب برای استفاده از آن در فرآیندهای بهینه‌سازی تبدیل می‌کند.

در حوزه بهینه کردن رفتار آکوستیکی مواد، تاکنون تلاش‌های قابل توجهی صورت گرفته است [۵، ۶]. در راستای رسیدن به رفتار آکوستیکی ایده‌آل محققان دو رویکرد در پیش گرفته‌اند. برخی از پژوهش‌ها با استفاده از منابع و مواد موجود سعی در یافتن ترکیب و چیدمان بهینه مواد داشته‌اند و به این ترتیب توانسته‌اند به کمک تکنیک‌های بهینه‌سازی بهبود چشم‌گیری در رفتار آکوستیکی مواد حاصل کنند. برخی دیگر نیز، در راستای یافتن خواص بهینه مواد مختلف قدم برداشته‌اند، به این امید که خواصی از مواد را کشف نمایند که سازه مورد نظر بتواند به منظور کاربردی خاص، بهترین عملکرد را داشته باشد. یقیناً در رویکرد اخیر ممکن است موادی از پژوهش استنتاج شود که هنوز تکنولوژی ساخت و یا ساخت مقرون به صرفه آن وجود نداشته باشد [۱]. رویکرد اول در دنیای مهندسی جذاب‌تر به‌نظر می‌رسد. آقای سیمونو همکاران [۷] محاسبات مربوط به فرکانس‌های تشدید تعدادی از پنل‌های چندلایه را انجام دادند و به این ترتیب بهترین چیدمان لایه‌ها را معرفی نمودند. آنان از مجموعه‌ای از مواد موجود در صنعت برای محاسبات خود بهره گرفتند و نتایج حاکی از آن بود که به‌دلیل بالا بودن سفتی مواد به‌کار رفته، پنل نهایی اساساً از قانون جرم^۵ در بازه فرکانسی ۵۰۰-۵۰۰۰ هرتز پیروی می‌نماید که میرایی بالای حاصل از لایه ویسکوالاستیک فقط در فرکانس‌های انطباق مفید خواهد بود. لذا آن‌ها راه‌حل استفاده از فوم‌هایی با سفتی پایین‌تر را پیشنهاد دادند. تانیو و همکاران [۸] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌یابی چیدمان لایه‌های سازه، برحسب تعداد لایه‌ها و ضخامت‌های متناظر پرداختند. فرآیند بهینه‌سازی با انتخاب مواد از یک لیست از پیش تعیین شده صورت گرفت که شامل تعداد محدودی مواد جامد، سیال و فوم بود. از مزایای این رویکرد آن است که برای ماده طراحی شده با کاربردی خاص، نیازی به ساخت مواد جدید نمی‌باشد. آقای لی و همکاران [۹] برای بیشینه کردن افت انتقال صوت از بهینه‌سازی توپولوژی با استفاده از روش ماتریس انتقال، منتهی از معادلات بابت، استفاده کردند. نویسنده‌ها از

1- Finite element method
2- Boundary element method
3- Statistical Energy Analysis (SEA)
4- Transfer Matrix Method (TMM)
5- Mass law

6- Scaling laws
7- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II
8- TOPSIS

میدان آکوستیکی در یک لایه سیال در هر نقطه M به طور کامل توسط بردار زیر توصیف می‌شود.

$$V^f(m) = [p(M), v_3^f(M)]^T \quad (2)$$

که در آن p و v_3 به ترتیب فشار و مؤلفه x_3 سرعت سیال می‌باشد. بالابند T به معنی ترانزاد می‌باشد. ماتریس انتقال در یک لایه سیال به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(k_3 h) j \frac{\omega \rho}{k_3} \sin(k_3 h) \\ j \frac{k_3}{\omega \rho} \sin(k_3 h) \cos(k_3 h) \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، k_3 عدد موج در راستای x_3 فرکانس موج عبوری و ρ چگالی ماده سیال و h ضخامت لایه سیال را نشان می‌دهد.

۲-۱-۱-۲- لایه پنل

لایه پنل برای مدل کردن مواد جامد الاستیک به کار می‌رود که به عنوان جاذب کنترل نویز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل مورد بحث، برای مدل‌سازی لایه‌های جامد بیرونی از این لایه استفاده شده است. برای بیان انتشار صوت در هر نقطه از این ماده از چهار متغیر فیزیکی استفاده می‌گردد. این چهار متغیر به صورت یک بردار ستونی برای نقطه M از آن لایه آورده شده است:

$$V^s(M) = [V_1^s(M) v_3^s(M) \sigma_{33}^s(M) \sigma_{13}^s(M)]^T \quad (4)$$

که v_3^s, v_1^s مؤلفه‌های سرعت و $\sigma_{33}^s, \sigma_{13}^s$ مؤلفه‌های تنش در جهت x_1, x_3 مربوط به نقطه M از لایه مورد نظر می‌باشند.

به این ترتیب ماتریس انتقال مربوط به لایه پنل را می‌توان با رابطه زیر توصیف کرد:

$$[T^s] = [\Gamma(-h)][\Gamma(0)]^{-1} \quad (5)$$

که در آن $\Gamma(h)$ یک ماتریس 4×4 می‌باشد که در رابطه (۶) آورده شده است:

$$\begin{aligned} \Gamma_{1,1} &= \omega k_1 \cos k_{13} h & \Gamma_{1,2} &= -j \omega k_1 \sin k_{13} h \\ \Gamma_{2,1} &= -j \omega k_{13} \sin k_{13} h & \Gamma_{2,2} &= \omega k_{13} \cos k_{13} h \\ \Gamma_{3,1} &= -D_1 k_1 \cos k_{13} h & \Gamma_{3,2} &= -j D_1 \sin k_{13} h \\ \Gamma_{4,1} &= j D_2 k_{13} \sin k_{13} h & \Gamma_{4,2} &= -D_2 k_{13} \cos k_{13} h \\ \Gamma_{1,3} &= j \omega k_{33} \sin k_{33} h & \Gamma_{1,4} &= \omega k_{33} \cos k_{33} h \\ \Gamma_{2,3} &= \omega k_1 \cos k_{13} h & \Gamma_{2,4} &= -j \omega k_1 \sin k_{33} h \\ \Gamma_{3,3} &= -j D_2 \sin k_{33} h & \Gamma_{3,4} &= -D_2 k_{33} \cos k_{33} h \\ \Gamma_{4,3} &= D_1 \cos k_{33} h & \Gamma_{4,4} &= -j D_2 \sin k_{33} h \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} D_1 &= \lambda(k_1^2 + k_{13}^2) + 2\mu k_{13}^2 \\ D_2 &= 2\mu k_1 \end{aligned} \quad (7)$$

در روابط فوق ρ, λ, μ و به ترتیب چگالی ماده و ضرایب اول و دوم لامه^۱ می‌باشند. همچنین k_1 عدد موج در راستای x_1 و پارامترهای k_{13} و k_{33} از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} k_{13} &= \sqrt{(\delta_1^2 - k_1^2)} & \delta_1^2 &= \frac{\omega^2 \rho}{\lambda + 2\mu} \\ k_{33} &= \sqrt{(\delta_3^2 - k_1^2)} & \delta_3^2 &= \frac{\omega^2 \rho}{\mu} \end{aligned} \quad (8)$$

۲-۱-۳- لایه فوم

لایه فوم برای مدل‌سازی لایه متخلخل به کار می‌رود. در مدل مورد بحث در این پژوهش، برای مدل‌سازی ماده متخلخل میانی از این لایه استفاده شده

رده‌بندی ترجیحات براساس مشابهاً به راه حل ایده‌آل، انتخاب شده است. این نوع رویکرد در بهینه‌سازی چندهدفی یکی از جنبه‌های اصلی این پژوهش بوده که در کارهای قبلی دیده نمی‌شود. در کارهای گذشته انجام شده، از رویکردهای قدیمی بهینه‌سازی چندهدفی استفاده شده که نتایج به دست آمده در قیاس با روش به کار رفته، دید ضعیف‌تری برای انتخاب مواد به دست می‌دهد. نهایتاً در این پژوهش، پنل انتخاب شده از بین پنل‌های جبهه پرتو، با پنل پایه مقایسه شده است که مشاهده گردید، در شرایط وزن ثابت، پنل از نظر رفتار آکوستیکی وضعیت بهتری دارد.

۲- روش ماتریس انتقال برای شبیه‌سازی رفتار پنل‌های چندلایه

اکثر عایق‌های صوتی به صورت مجموعه‌ای چندلایه، متشکل از مواد متخلخل، مواد الاستیک و هوا می‌باشند. بنابراین توصیف رفتار یک محیط چندلایه امری مهم به شمار می‌آید. یکی از روش‌های کارا برای توصیف انتشار موج در ماده متخلخل و مجموعه‌های چندلایه، روش ماتریس انتقال است. یکی از بزرگ‌ترین مزایای این روش نسبت به روش‌هایی همچون المان محدود، زمان مورد نیاز بسیار کم برای محاسبه خواص آکوستیکی می‌باشد.

در روش ماتریس انتقال، برای هر لایه، متناسب با جنس لایه و ضخامت آن، یک ماتریس انتقال امواج آکوستیکی تعریف می‌گردد. مجموعه دیگری از ماتریس‌ها به نام ماتریس‌های کوپلینگ برای توصیف شرایط مرزی بین لایه‌های مختلف تعریف می‌شوند. سپس با استفاده از مجموعه ماتریس‌های انتقال و کوپلینگ، ماتریس کلی تشکیل می‌شود به طوری که این ماتریس نهایی می‌تواند خواص آکوستیکی در همه نقاط لایه‌های داخلی را توصیف نماید. با استفاده از این ماتریس می‌توان مشخصه‌های کلی پنل چندلایه را محاسبه نمود. در این روش به راحتی می‌توان جنس و ضخامت هر لایه را تغییر داد و سریعاً ماتریس کلی را متناسب با مقادیر جدید بازسازی نمود. همچنین محاسبه مشخصه‌های آکوستیکی، از جمله ضریب افت انتقال صوت پنل، با سرعت بالا انجام می‌گیرد. ویژگی‌های این روش شرایط بسیار خوبی برای فرایند بهینه‌سازی رفتار آکوستیکی پنل‌های چندلایه فراهم می‌سازد.

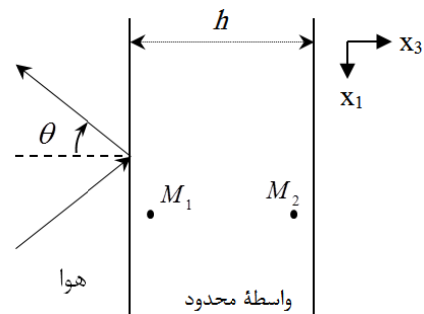
۲-۱-۱-۲- بیان ماتریسی واسطه‌های پایه

۲-۱-۱-۲-۱- لایه سیال (هوا)

شکل ۱ یک موج صوتی صفحه‌ای را نمایش می‌دهد که با زاویه θ به یک لایه با ضخامت h در صفحه (x_1, x_3) برخورد می‌کند. انتشار صوت در یک لایه محدود توسط ماتریس انتقال $[T]$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V(M_1) = [T]V(M_2) \quad (1)$$

مؤلفه‌های بردار $V(M)$ متغیرهایی هستند که برای بیان و توصیف میدان آکوستیکی لایه در نقطه M تعیین می‌شوند. باید اشاره کرد که درایه‌های ماتریس انتقال $[T]$ نیز تنها به ضخامت لایه و خواص فیزیکی آن لایه بستگی دارد.



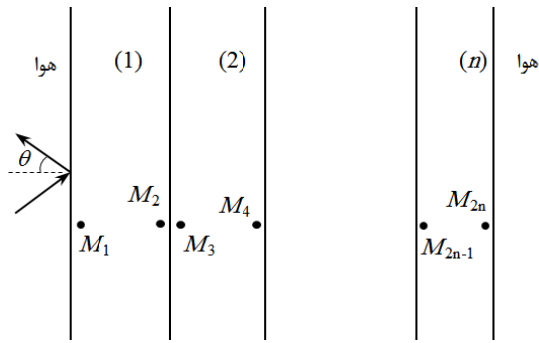
شکل ۱ انتشار یک موج صفحه‌ای در یک لایه میانی (واسطه) [۴]

می‌شود. روابط (۱۴) و (۱۵) بیان ریاضی متغیرهای طراحی و توابع هدف را نمایش می‌دهند.

$$Transmission\ Loss = f(H_{1 \times n}, M_{1 \times n}) \quad (15)$$

$$Weight = f(H_{1 \times n}, \rho_{1 \times n}); \quad (16)$$

که $H_{1 \times n}$ بیانگر بردار حاوی ضخامت n لایه و $M_{1 \times n}$ برداری که حاوی مشخصه عددی جنس‌های موجود در لیست مواد انتخابی بوده و $\rho_{1 \times n}$ بردار حاوی چگالی هر لایه می‌باشد. در این مدل‌سازی لایه‌های بیرونی از جنس مواد جامد و لایه‌های میانی از جنس هوا و مواد متخلخل انتخاب می‌شوند. برای مواد جامد و مواد متخلخل فهرستی از مواد موجود و قابل دسترس تهیه شده است. جنس و ویژگی هر دسته از مواد جامد و متخلخل و هوا به ترتیب در جداول ۱ الی ۳ آورده شده‌اند [۸،۴].



شکل ۲ سازه چندجداره متشکل از n لایه مختلف [۴]

جدول ۱ فهرست جنس‌های انتخابی برای مواد جامد

شماره ماده	نام ماده	ضریب پواسون (ν)	الاستیسیته (E, Pa)	چگالی ماده ($\rho, kg/m^3$)
۱	فولاد	۰/۳۱	۲/۱۰۰۱۱	۷۸۰۰
۲	آلومینیوم	۰/۳۳	۷/۱۰۰۱۰	۲۷۰۰
۳	چدن	۰/۲۵	۱/۳۰۰۱۱	۷۲۰۰
۴	تیتانیوم	۰/۳۴	۱/۱۰۰۱۱	۴۵۰۰
۵	جرم سنگین ^۱	۰/۳۵	۷/۷۰۰۰۷	۲۱۰۰
۶	رزین بارشده ^۲	۰/۳۵	۷/۷۰۰۰۷	۲۱۰۰
۷	رزین	۰/۴۵	۱/۰۰۰۰۸	۱۰۰۰
۸	برنج	۰/۳۷	۱/۰۴۰۱۱	۸۵۰۰

جدول ۲ فهرست جنس‌های انتخابی برای مواد متخلخل

نام ماده	V	η	E	ρ_1	α_∞	σ	φ
فوم ۱	۰/۴۰	۰/۲۶۵	۸/۰۰۰۵	۳۰	۷/۸۰	۲/۵۰۴	۰/۹۰
فوم ۲	۰/۳۳	۰/۱۵	۳/۴۰۵	۲۱۱	۱/۵۰	۵/۵۰۵	۰/۸۱
فوم ۳	۰/۳۳	۰/۰۹	۲/۳۰۵	۱۱	۱/۳۸	۴/۸۰۵	۰/۹۶
فوم ۴	۰/۳۰	۰/۰۷	۵/۱۰۵	۱۰	۱/۰۲	۱/۷۰۴	۰/۹۷
فوم ۵	۰/۳۰	۰/۱۰	۹/۰۰۰۴	۴۰	۱/۰۰	۱/۲۰۴	۰/۹۵
فوم ۶	۰/۳۰	۰/۱۰	۱/۳۰۵	۳۳	۱/۱۰	۵/۰۰۳	۰/۹۸
فوم ۷	۰/۳۰	۰/۰۵۵	۱/۴۰۶	۳۱	۲/۵۲	۸/۷۰۴	۰/۹۷
فوم ۸	۰/۳۰	۰/۱۰	۴/۷۰۷	۱۶	۱/۹۸	۶/۵۰۴	۰/۹۹
فوم ۹	۰/۲۰	۰/۱۸	۲/۹۰۵	۳۰	۱/۹۰	۲/۲۰۴	۰/۹۸
فوم ۱۰	۰	۰/۱۰	۴/۴۰۳	۱۳۰	۲/۱۰	۱/۳۰۵	۰/۹۴
فوم ۱۱	۰/۳۵	۰/۱۴	۸/۰۰۰۴	۸/۸	۱/۰۲	۱/۱۰۴	۰/۹۹
فوم ۱۲	۰	۰/۵۰	۲/۰۰۰۴	۶۰	۱/۰۰	۵/۰۰۳	۰/۹۹

است. میدان آکوستیکی در هر نقطه از یک ماده متخلخل را می‌توان با شش متغیر فیزیکی به طور کامل توصیف کرد. این شش متغیر به صورت یک بردار ستونی برای نقطه M از آن لایه آورده شده‌اند:

$$V^p(M) = [v_1^s(M), v_3^s(M), v_3^f(M), \sigma_{33}^s(M), \sigma_{13}^s(M), \sigma_{33}^f(M)] \quad (9)$$

که v_1^s, v_3^s مؤلفه‌های سرعت فریم در جهت x_1, x_3 مؤلفه سرعت سیال در جهت x_3, x_3 تانسور تنش فریم و تانسور تنش در فاز سیال مربوط به نقطه M از لایه مورد نظر می‌باشند. ماتریس انتقال مربوط به لایه فوم را می‌توان با استفاده از رابطه زیر تعریف کرد:

$$[T^p] = [\Gamma(-h)][\Gamma(0)]^{-1} \quad (10)$$

که در آن $\Gamma(h)$ یک ماتریس 6×6 می‌باشد و جزئیات بیشتر را می‌توان در مرجع [۴] یافت.

۲-۲- ماتریس‌های کوپلینگ و ماتریس کلی

ماتریس انتقال، ارتباط بین مشخصات مربوط به دو نقطه از یک لایه را مشخص می‌کند. حال چنانچه زیرسیستم مورد بحث متشکل از چند لایه مختلف باشد، بایستی ارتباط میان نقاط، در دو لایه مجاور یکدیگر را نیز تعیین کرد. لایه‌های مجاور هم می‌تواند لایه‌های از یک جنس با ضخامت‌های مختلف و یا لایه‌های غیر همجنس باشند. شرایط مرزی بین لایه‌های مختلف، رفتار موج را در عبور از مرز بین لایه‌ها مشخص می‌کند. در کار حاضر، به عنوان نمونه، شرایط مرزی بین لایه‌های فوم و لایه سیال بررسی و ماتریس کوپلینگ مربوطه استخراج می‌شود.

شکل ۲ یک سازه متشکل از n لایه مختلف را نمایش می‌دهد به طوری که در هر دو سمت آن یک سیال قرار دارد. شرایط پیوستگی بین لایه هوا و لایه فوم، شرط‌های زیر را ایجاد می‌نماید:

$$\begin{aligned} (1-\varphi)v_3^s(M_2) + \varphi v_3^f(M_2) &= v_3^f(M_3) \\ \sigma_{33}^s(M_2) &= -(1-\varphi)p(M_3) \\ \sigma_{13}^s(M_2) &= 0 \\ \sigma_{33}^f(M_2) &= -\varphi p(M_3) \end{aligned} \quad (11)$$

در صورتی که رابطه بین نقاط M_3 و M_2 را به صورت زیر بیان کنیم:

$$[I_{pf}]VP(M_2) + [J_{pf}]VF(M_3) = 0 \quad (12)$$

ماتریس‌های کوپلینگ بین دو لایه فوم و هوا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_{pf} = \begin{bmatrix} 0 & 1-\varphi & \varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

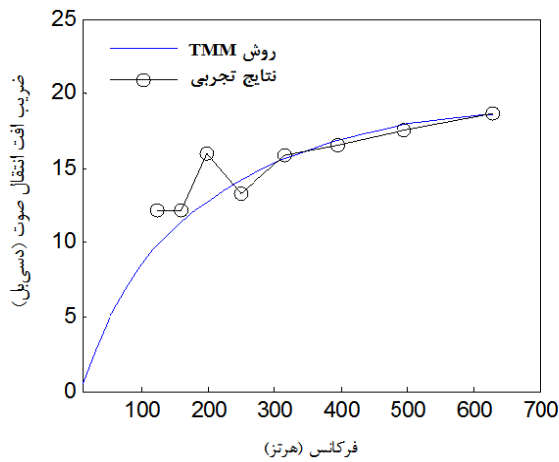
$$J_{pf} = \begin{bmatrix} 1-\varphi & 0 \\ 0 & 0 \\ \varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

شرایط مرزی مربوط به سایر لایه‌ها را می‌توان در مرجع [۴] یافت. اکنون با داشتن ماتریس‌های انتقال هر لایه و ماتریس کوپلینگ برای توصیف شرایط مرزی بین لایه‌ها، می‌توان با سرهم کردن ماتریس‌های مربوطه به ماتریسی دست یافت که رفتار آکوستیکی کل سیستم چندلایه را توصیف می‌نماید.

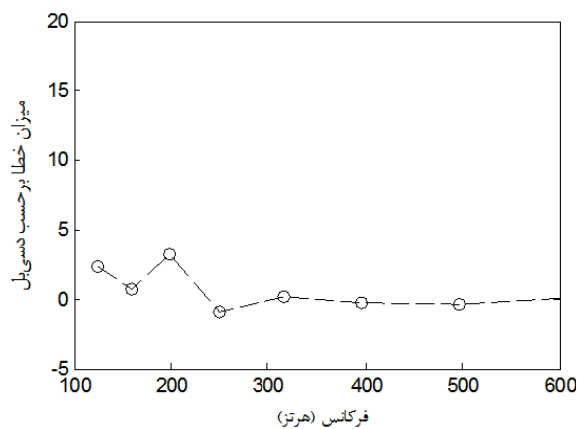
۳- بهینه‌سازی چندهدفی پل چندلایه آکوستیکی

هر مسأله بهینه‌سازی شامل متغیرهایی در مدل ارائه شده است، که با تنظیم آن‌ها می‌توان به پاسخی مطلوب از مدل دست یافت. در مطالعه حاضر هدف اصلی بهینه‌کردن رفتار آکوستیکی پل و همچنین کمینه‌سازی وزن سازه می‌باشد. بنابراین جنس‌لایه‌ها و ضخامت‌ها، متغیرهای تأثیرگذار در رفتار آکوستیکی پل و وزن سازه متأثر از چگالی و ضخامت لایه‌ها می‌باشد. به منظور کمی‌سازی رفتار آکوستیکی از معیار ضریب افت انتقال صوت استفاده

1- Heavy mass
2- Loaded rubber



شکل ۳ مقایسه ضریب افت انتقال صوت پنل سه‌جداره به روش TMM با نتایج آزمایشگاهی [۱۴]



شکل ۴ خطای ضریب افت انتقال صوت پنل سه‌جداره بین نتایج روش TMM و نتایج آزمایشگاهی [۱۴]

نمودار مربوط به خطای حاصل از نتایج به دست آمده از حل تحلیلی پنل سه‌لایه و نتایج آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده است. این مقایسه همخوانی مناسب نتایج حاصل از حل تحلیلی به روش ماتریس انتقال و داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. عدم تطبیق کامل نتایج به دلیل فرضیاتی همچون بی‌نهایت بودن ابعاد پنل، مدل‌سازی شرایط مرزی بین لایه‌ها با شرایط مرزی کلاسیک و ... که در حل تحلیلی در نظر گرفته شده است، می‌باشد. از طرفی بروز خطا در نتایج تجربی ناشی از شرایط آزمایش و دقیق نبودن خواص آکوستیکی اندازه‌گیری شده دلایلی دیگر بر همین موضوع است.

۳-۲- نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌سازی

در قدم اول یک پنل سه لایه با لایه‌های بیرونی از جنس جامد و لایه داخلی از جنس ماده متخلخل یا هوا با مجموع ضخامت ۳۰ میلی‌متر و مطابق قیدهای تعریف شده در مدل بهینه‌یابی (۱۷) در نظر گرفته شده است. در الگوریتم NSGA-II، تعداد جمعیت و نسل‌ها به ترتیب ۲۰ و ۱۵۰۰ و همچنین درصد ترکیب فرآیند ۷۰ لحاظ شده است. نمودار شکل ۵ روند همگرایی متوسط ضریب افت انتقال صوت پنل را نمایش می‌دهد. نمودار جبهه پرتو حاصل از بهینه‌سازی چندهدفی در شکل ۶ آورده شده است. در جدول ۵ مشخصات هر کدام از نقاط طراحی جبهه پرتو ارائه شده‌اند. به منظور انتخاب یک نقطه طراحی از بین نقاط جبهه پرتو، از روش تاپسیس استفاده شده

در جدول ۲ پارامترهای ρ_i (kg/m³), α_{∞} (-), σ (Nm⁻⁴s), η (-), E (Pa), ρ_1 (kg/m³) و v (-) به ترتیب بیان‌گر تخلخل، مقاومت جریانی، چگالی بالک فاز جامد، مدول یانگ استاتیکی، ضریب افت و ضریب پیوستن فاز جامد می‌باشند. همان‌طور از نحوه تعریف توابع هدف می‌توان دید، متغیرهای طراحی ترکیبی از متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشند. بردار متغیرهای H ، که حاوی ضخامت‌ها می‌باشد، از جنس متغیر پیوسته و بردار M ، که حاوی مشخصه‌های عددی هر کدام از مواد براساس جداول ۱ الی ۳ می‌باشد، از جنس متغیر گسسته می‌باشد. از آنجا که مقدار بردار ρ نیز از جداول انتخاب می‌شود، بنابراین این بردار نیز در زمره متغیرهای گسسته جای می‌گیرد. بدین ترتیب مسأله بهینه‌یابی و قیدهای حاکم بر آن به کمک رابطه (۱۷) تعریف می‌گردد.

$$\begin{cases} \text{Max} & TL_{avg} = f(H, M) \\ \text{Min} & Weight = f(H, \rho) \\ & 0 < H_i < 30e - 3; i = 2, \dots, n - 1 \\ & 0 < H_1, H_n < 2e - 3 \\ & \sum_{i=1}^n H_i = 30e - 3 \\ & M_i \in \{1, 2, \dots, 21\} \\ & \rho_i \in \{1, 2, \dots, 21\} \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه فوق، از آنجا که ۸ ماده جامد، ۱۲ ماده متخلخل و ۱ لایه هوا برای مسأله لحاظ شده‌است، بنابراین بردارهای گسسته مواد و چگالی (ρ_i و M_i) به صورت مقادیری از ۱ تا ۲۱ تعریف می‌شوند. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی چندهدفی برای پنل‌های سه تا شش لایه با استفاده از الگوریتم NSGA-II انجام شده است. هدف اصلی از این فرآیند بهینه‌سازی آن است که به این پرسش پاسخ داده شود که بهترین ترکیب از جنس لایه‌ها، تعداد لایه‌ها و ضخامت هر لایه برای رسیدن به پنلی که بهترین رفتار آکوستیکی و در عین حال کمترین وزن را داشته باشد، چیست؟ به‌علاوه باید تعیین گردد که کدامین فرکانس صوتی برای تعیین رفتار آکوستیکی مواد مدنظر می‌باشد. از آنجا که در عمل فرکانس‌های صوتی تنها یک مقدار خاص ندارند، بلکه بازه‌ای از فرکانس‌ها را شامل می‌شوند، بنابراین، در این کار، متوسط افت انتقال صوت در یک بازه فرکانسی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است، تا خروجی حاصل از فرآیند بهینه‌سازی برای دنیای واقعی عملی‌تر باشد. بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰ هرتز بازه فرکانسی بوده است که در فرآیند بهینه‌سازی منظور گردید [۱]. در ادامه نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌سازی آورده شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی مدل

شکل ۳ مقایسه نتایج حاصل از حل تحلیلی به روش ماتریس انتقال (TMM) یک پنل سه جداره با لایه میانی متخلخل با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در این زمینه توسط بولتن [۱۴] را نمایش می‌دهد. مشخصات فیزیکی پنل سه جداره مذکور در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳ ویژگی‌های هوا به‌عنوان لایه حد فاصل

امپدانس	چگالی
۴۱۵/۱	۱/۲۱۳

جدول ۴ مشخصات فیزیکی پنل سه جداره [۱۴]

شماره لایه	ضخامت لایه (mm)	جنس لایه
لایه ۱	۱/۲۷	آلومینیوم
لایه ۲	۲۷	فوم ۱
لایه ۳	۰/۷۶۲	آلومینیوم

جدول ۵ نقاط جبهه پرتو در فضای طراحی، حاصل از بهینه‌سازی پنل سه‌لایه در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰ هرتز

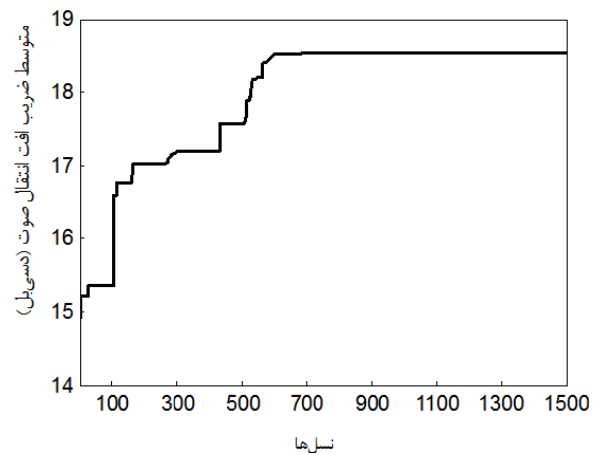
شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده
نقطه	جامد	متخلخل	جامد	لایه سه	لایه دو	لایه یک
۱	۳	۵	۱	۲	۲۷/۰۰۱	۱/۹۹۹
۲	۳	۵	۱	۱/۲۹۸	۲۷/۰۰۱	۱/۹۹۹
۳	۳	۵	۱	۱/۷۰۷	۲۷/۴۸۳	۱/۳۶۸
۴	۲	۵	۲	۱/۰۲۳	۲۷/۰۰۱	۱/۹۹۹
۵	۳	۳	۲	۰/۹۱۴	۲۷/۸۰۶	۱/۲۹۲
۶	۲	۱	۲	۱/۶۵	۲۷/۷۸۱	۰/۶۹۳
۷	۳	۳	۲	۰/۲۶۷	۲۸/۴۵۱	۰/۹۳۳
۸	۳	۴	۲	۰/۱۸۰	۲۸/۶۸۴	۰/۵۳۳
۹	۲	هوا	۱	۰/۱۰۷	۲۸/۹۹	۰/۰۰۷

جدول ۶ ضخامت لایه‌های پنل‌های چهار تا شش لایه مربوط به نقاط انتخاب شده از جبهه‌های پرتو

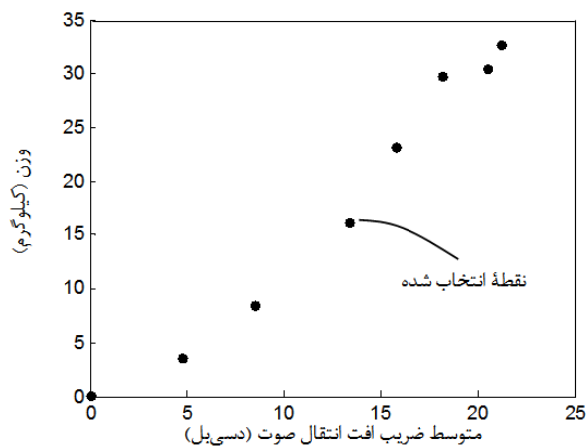
نوع پنل	ضخامت شش لایه	ضخامت پنج لایه	ضخامت چهارم لایه سه	ضخامت لایه دو	ضخامت لایه یک	(تعداد لایه‌ها)
۴	-	-	۱/۴۶۱	۱۴/۳۸	۱۲/۹۳	۰/۵۷۴
۵	-	۰/۹۹۹	۱۴/۲۸	۳/۸۰۱	۹/۹۵۳	۱/۰۵۹
۶	۰/۶۹۹	۴/۷۶۶	۱۰/۴۰	۶/۴۹۳	۶/۸۵۹	۱/۱۱۵

است. به این ترتیب نقطه شماره ۶ به‌عنوان نقطه طراحی برگزیده شد. برای پنل‌های چهار، پنج و شش لایه نیز فرآیند بهینه‌سازی اعمال شد. نمودار شکل‌های ۷ الی ۹ به‌ترتیب جبهه پرتو و نقطه طراحی انتخاب شده متناظر با لایه‌های مذکور را نمایش می‌دهند.

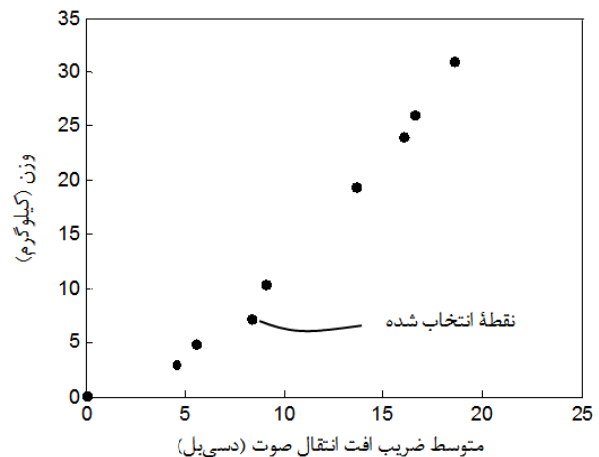
در جدول ۶ ضخامت لایه‌های پنل‌های چهار تا شش لایه مربوط به نقاط انتخاب شده از جبهه‌های پرتو آورده شده است. در جدول ۷ نیز جنس لایه‌ها مشخص شده‌اند.



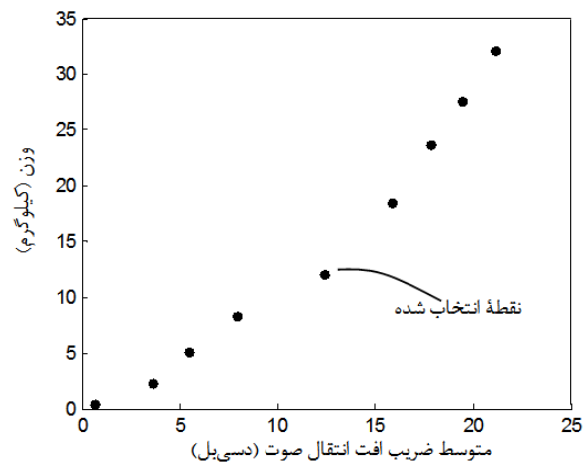
شکل ۵ روند همگرایی متوسط ضریب افت انتقال صوت پنل در حین فرآیند بهینه‌سازی چندهدفی



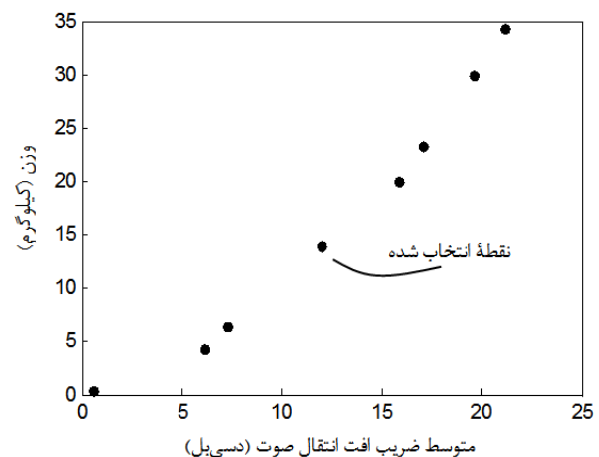
شکل ۸ نمایش جبهه پرتو نقطه انتخاب شده براساس روش تاپسیس برای پنل پنج‌لایه



شکل ۶ نمایش جبهه پرتو نقطه انتخاب شده براساس روش تاپسیس برای پنل سه‌لایه



شکل ۹ نمایش جبهه پرتو نقطه انتخاب شده براساس روش تاپسیس برای پنل شش‌لایه



شکل ۷ نمایش جبهه پرتو نقطه انتخاب شده براساس روش تاپسیس برای پنل چهارلایه

جدول ۷ ضخامت لایه‌های پنل‌های چهار تا شش لایه مربوط به نقاط انتخاب شده از

جبهه‌های پرتو						
نوع پنل (تعداد لایه‌ها)	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده	شماره ماده
۴	-	-	۱	متخلخل	متخلخل	جامد
۵	-	۱	۱۱	متخلخل	متخلخل	جامد
۶	۳	۱۱	۳	متخلخل	متخلخل	جامد

جدول ۸ مشخصات مربوط به نقاط انتخاب شده در فرآیند بهینه‌سازی دو هدفی

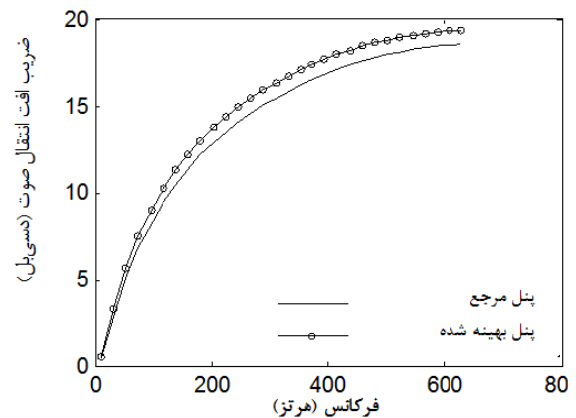
شماره نقطه / نوع پنل (تعداد لایه‌ها)	وزن پنل (کیلوگرم)	ضریب افت انتقال صوت (دسی‌بل)
۳ / (۴) لایه	۱۹/۴۴	۱۳/۶۴
۳ / (۶) لایه	۷/۱۶	۸/۳۲
۴ / (۵) لایه	۱۳/۸۹	۱۱/۹۶
۴ / (۶) لایه	۶/۳۴	۷/۲۳
۵ / (۶) لایه	۱۶/۱۹	۱۳/۳۵
۵ / (۷) لایه	۸/۴۶	۸/۴۸
۶ / (۵) لایه	۱۲/۱۴	۱۲/۳۸
۶ / (۶) لایه	۸/۳۴	۷/۹۰

پس شرایط پنل شش لایه از پنل پنج لایه بهتر است. پنل چهار لایه نیز نسبت به پنل شش لایه از نظر هر دو معیار شرایط بدتری دارد. نقطه شماره ۴ پنل سه لایه، دارای متوسط افت انتقال صوت ۱۳ دسی‌بل، ولی دارای وزن ۱۹ کیلوگرم است؛ پس نسبت به ویژگی‌های پنل شش لایه، دارای شرایط بدتری است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اگر متوسط افت انتقال صوتی در حدود ۱۲ دسی‌بل مد نظر طراح باشد، پنل شش لایه از نظر بهترین شرایط را دارد. از جدول ۸ می‌توان دید که اگر ضریب افت انتقال صوتی در حدود ۸ دسی‌بل مد نظر طراح باشد، انتخاب پنل سه لایه، هم از نظر وزن شرایط بهتری دارند و هم از نظر ساخت، پنل‌هایی با تعداد لایه کمتر مقرون به صرفه‌تر می‌باشند.

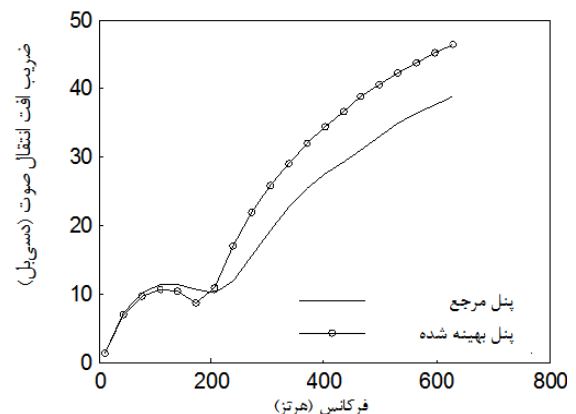
۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به تحلیل و بهینه‌سازی پنل‌های چندلایه متشکل از لایه‌های متخلخل، هوا و لایه‌های جامد پرداخته شد. برای پیش‌بینی رفتار آکوستیکی پنل‌های چندلایه، از روشی موسوم به روش ماتریس انتقال استفاده گردید. روش ماتریس انتقال، به دلیل دقت و سرعت بالا در تحلیل آکوستیکی پنل‌های چندلایه و همچنین انعطاف بالایی که برای تحلیل هر چیدمانی از پنل‌های چندلایه دارد، آن را برای استفاده در فرآیند بهینه‌سازی به یک گزینه ایده‌آل تبدیل می‌کند. فرآیند بهینه‌سازی هم‌زمان، دو هدف بالابردن ضریب افت انتقال صوت و کمینه کردن وزن سازه را دنبال می‌کند که بدین منظور از روش قدرتمند الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است. الگوریتم‌های مربوط به پیاده‌سازی روش ماتریس انتقال و الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب به زبان برنامه‌نویسی متلب نوشته شد. در فرآیند بهینه‌سازی دوهدفی پنل سه‌سانتی چندلایه متخلخل، مشخص گردید که در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰ هرتز چه تعداد لایه برای پنل استفاده شود، هر لایه از چه جنسی انتخاب شود و ضخامت هر لایه چه مقداری داشته باشد که پنل نهایی هم نظر رفتار آکوستیکی و هم از نظر وزن سازه در شرایط مطلوبی قرار گیرد. از فرآیند بهینه‌سازی نتایج زیر قابل استخراج می‌باشند:

- در صورتی که طراح بخواهد پنبلی با متوسط ضریب افت انتقال صوتی در حدود ۸ دسی‌بل در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰ هرتز را انتخاب نماید، با انتخاب تعداد لایه‌های کمتر برای پنل می‌تواند از نظر وزنی به شرایط مطلوب‌تری دست یابد.
- اگر طراح متوسط ضریب افت انتقال صوت بالاتری (حدود ۱۲ دسی‌بل) مد نظر داشته باشد، در این صورت پنل‌هایی با تعداد لایه بیشتر از نظر وزن شرایط بهتری خواهند داشت.



شکل ۱۰ مقایسه ضریب افت انتقال صوت پنل سه‌جداره مرجع ۱۱۴ با پنل بهینه‌شده



شکل ۱۱ مقایسه ضریب افت انتقال صوت پنل شش‌جداره مرجع با پنل بهینه‌شده

با توجه به نقاط به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی دوهدفی، مطابق جدول ۵ تا ۷، به‌عنوان نمونه ضریب افت انتقال صوت پنل سه لایه بهینه شده با پنل پایه مرجع در شکل ۱۰ مقایسه شده است. همچنین در مورد پنل شش لایه یک پنل پایه با ضخامت کل ۳۰ میلی‌متر، متشکل از دو لایه برنجی به ضخامت‌های ۰/۷ و ۰/۳ میلی‌متر و چهار لایه فوم از جنس "فوم ۱۰" (مطابق جدول ۲) با ضخامت یکسان انتخاب گردید. سپس مقایسه مدل بهینه شش لایه با پنل پایه در شکل ۱۱ آورده شده است. در هر دو مورد مشاهده می‌شود که در وزن یکسان، پنل بهینه شده نسبت به پنل پایه شرایط بهتری از نظر ضریب افت انتقال صوت دارد.

از طرف دیگر، به‌منظور مقایسه کارایی پنل‌های مختلف (با تعداد لایه متفاوت)، از هر پنل، دو نقطه از جبهه پرتو مربوطه انتخاب شده است. در جدول ۸ مشخصات نقاط انتخاب شده ارائه شده‌اند.

از مقایسه پنل‌های پنج لایه و شش لایه، می‌توان دریافت که در پنل شش لایه با کاهش ۴ کیلوگرم (نقطه شماره ۵)، می‌توان تقریباً به همان متوسط انتقال صوت در پنل پنج لایه (۱۳ دسی‌بل) دست یافت.

۵- مراجع

- [8] O. Tanneau, J. Casimir, P. Lamary, Optimization of multilayered panels with poroelastic components for an acoustical transmission objective, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 120, pp. 12-27, 2006.
- [9] J. S. Lee, E. Kim, Y. Kim, Optimal poroelastic layer sequencing for sound transmission loss maximization by topology optimization method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 122, pp. 2097-2106, 2007.
- [10] K. Svanberg, The method of moving asymptotes-a new method for structural optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 359-373, 1987.
- [11] F. Franco, K. A. Cunefare, M. Ruzzene, Structural-acoustic optimization of sandwich panels, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 129, No. 3, pp. 330-340, 2007.
- [12] C. Perrot, F. Chevillotte, R. Panneton, Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124, pp. 940-948, 2008.
- [13] D. Kalyanmoy, *Multi Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [14] J. Bolton, N. M. Shiau, Y. Kang, Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, No. 3, pp. 317-347, 1996.
- [1] E. Lind-Nordgren, P. Göransson, Optimising open porous foam for acoustical and vibrational performance, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 7, pp. 753-767, 2010.
- [2] F. Sgard, N. Atalla, J. Nicolas, A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, pp. 2865-2872, 2000.
- [3] R. H. Lyon, R. G. DeJong, M. Heckl, Theory and application of statistical energy analysis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 6, pp. 3021-3021, 1995.
- [4] J. F. Allard, N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media*, John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [5] M. Shojaeifard, R. Talebitooti, A. Yadollahi, Optimization of sound transmission through laminated composite cylindrical shells by using a genetic algorithm, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 47, No. 4, pp. 481-494, 2011.
- [6] X. Wang, T. J. Lu, Optimized acoustic properties of cellular solids, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 106, pp. 756-765, 1999.
- [7] F. Simon, S. Pautin, D. Biron, Optimisation of sandwich trim panels for reducing helicopter internal noise, in *30 th European Rotorcraft Forum*, 2004.