



Optimization of sound absorbing coatings included cylindrical cavity using genetic algorithm and a surrogate model based on artificial neural network

Sayed Hamid Sohrabi^{1*}, Amir Karimi², Saeed Parsamehr³

¹ PhD, Researcher, Malek Ashtar University of technology; s.h.sohrabi@mut-es.ac.ir

² PhD Student, Researcher, Isfahan University of Technology; a.karimi@me.iut.ac.ir

³ MSc, Researcher, Isfahan University of Technology; s.parsamehr@alumni.iut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 11 Jun 2023

Last modification: 10 Feb 2025

Accepted: 11 Feb 2025

Available online: 11 Feb 2025

Article type:

Research paper

Keywords:

Sound Absorbing lining

Genetic Algorithm

Surrogate Model

Artificial Neural Network

Optimization

ABSTRACT

This research introduces the optimal design for underwater sound-absorbing linings. To address the time and computational cost of the optimization process, a combined approach of the genetic algorithm and a surrogate model using artificial neural networks was implemented. The results conclusively demonstrate that the best cavity shape for the low-frequency domain is conical with an apex near the surface of the entering wave. In contrast, a conical shape in the opposite direction of the low-frequency case is optimal for the entire frequency range. Selecting the best frequency range is crucial for the design and optimization process. The optimal response significantly outperformed other randomly established linings, validating the chosen approach. Additionally, increasing the number of optimization variables will undoubtedly alter the optimal solution, albeit with a considerable increase in problem complexity.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



بهینه‌سازی پوشش‌های جاذب صوت دارای حفره داخلی استوانه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی

سید حمید سهرابی^{۱*}، امیر کریمی^۲، سعید پارسامهر^۳

^۱ دکتری مهندسی دریا، پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، s.h.sohrabi@mut-es.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان a.karimi@me.iut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، پژوهشگر، دانشگاه صنعتی اصفهان s.parsamehr@alumni.iut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش یک طراحی بهینه برای پوشش‌های جاذب صوت زیرآبی ارائه شده است. به دلیل زمان و هزینه محاسباتی بسیار زیاد فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با استفاده از حل گر المان محدود، هسته‌ی بهینه‌سازی بر اساس ترکیب الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی، در نظر گرفته شد. آموزش شبکه عصبی مبتنی بر حل گر المان محدود قرار داده شد و در گام بعدی صحت پاسخ‌های مدل جایگزین ارزیابی گردید. سپس فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از این مدل، انجام پذیرفت و نتایج حاصل نشان داد که در حوزه فرکانس پایین (زیر ۱۰ کیلوهرتز)، حفره‌ی بهینه، مخروطی و با رأسی نزدیک به سطح ورود موج به پوشش، بدست خواهد آمد. اما برای کل بازه‌ی فرکانسی، شکل حفره‌ی بهینه، مخروطی اما در جهت عکس حالت فرکانس پایین است. بنابراین انتخاب بازه مطلوب فرکانس در پروسه طراحی و بهینه‌سازی بسیار اهمیت دارد. همچنین پاسخ بهینه، به صورت مشخص دارای عملکرد بهتری نسبت به پوشش‌های به صورت تصادفی آزموده شده‌ی دیگر بود. علاوه بر این با افزایش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی، پاسخ بهینه قطعاً تغییر کرده و اما پیچیدگی مسئله نیز به شدت افزایش خواهد یافت.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

لایه جاذب صوت

الگوریتم ژنتیک

مدل جایگزین

شبکه عصبی مصنوعی

بهینه‌سازی

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱ - مقدمه

پوشش‌های جاذب صوت^۱، نوعی از مواد و ساختارهای ویژه‌ای است که برای کاهش و کنترل امواج صوتی در محیط‌های مختلف طراحی می‌شوند. این پوشش‌ها با جذب انرژی صوتی، مانع از بازتاب^۲ و پراکندگی^۳ صوت شده و در نتیجه، مقدار و انرژی امواج را کاهش می‌دهند. پوشش‌های جاذب صوت در صنایع مختلفی از جمله ساختمانی، خودرو، هوافضا، پزشکی و بسیاری از زمینه‌های دیگر کاربرد دارد. این پوشش‌ها می‌توانند در کاهش سر و صدا در محیط‌های کاری، افزایش آسایش و راحتی در خودروها، بهبود کیفیت صدا در استودیوها و بسیاری از کاربردهای دیگر مؤثر باشند. این جاذب‌ها از مواد مختلفی مانند پشم شیشه، پشم سنگ، لاستیک، فوم‌ها و مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند. یکی از کاربرد اینگونه پوشش‌ها در صنایع زیرآبی دریایی است. معمولاً این کاربردها به پنهان‌مانی تجهیزات زیردیا کمک کرده و عموماً از نوع پلیمری هستند. در این مقدمه، به بررسی ویژگی‌ها، انواع و کاربردهای پوشش‌های جاذب صوت زیرآبی^۴ پرداخته شده و به مزایا و معایب این پوشش‌ها و چگونگی انتخاب مناسب‌ترین پوشش برای هر کاربرد خاص، اشاره شده است.

در میدان‌های نبرد دریایی، پنهان‌مانی و استتار^۵ فاکتوری بسیار مهم برای شناورهای زیرآبی به شمار می‌رود. بنابراین جذب و پراکنده‌سازی امواج سونارهای فعال دشمن، برای ادامه حیات و عملیات این شناورها، یک ضرورت محسوب می‌گردد. جهت ایجاد پنهان‌مانی مناسب، استفاده از پوشش‌های ضداکوستیک^۶، امری رایج در این زمینه است. به همین دلیل بررسی عملکرد این پوشش‌ها از نظر کاهش اکوی برگشتی از شناور، در چند دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. پوشش‌های مورد استفاده در کاربردهای زیرسطحی علاوه بر خواص جذبی و پراکندگی امواج، بایستی دارای خواصی همچون مقاومت در برابر خوردگی دریایی، تحمل فشار هیدروستاتیک عمق و کمترین وزن خیس ممکن باشند^۱. به همین دلیل در شناورهای زیرآبی این پوشش‌ها معمولاً از جنس لاستیک تقریباً سفت با حفره‌های درونی ساخته می‌شوند^۲. بعضی از این پوشش‌ها به صورت کامپوزیتی لایه‌ای از چند لاستیک با امپدانس ویژه^۷ متفاوت، هستند^{۱-۵}. بعضی از آنها دارای حفره‌های پراکنده‌ساز^۸ با توزیع تناوبی^۹ در یک جهت^۶ و یا در دو

جهت^{۷-۱۴}، جهت ایجاد پدیده پراکندگی امواج^{۱۰} و رزونانس-های محلی حفره‌ها^{۱۱}، هستند. روش تحلیل پوشش‌های ضداکوستیک می‌تواند تحلیلی، عددی و یا روش‌های خاص باشد. معمولاً روش-های تحلیلی در پوشش‌های ساده و یا با پراکنده‌سازهای کروی مورد استفاده قرار می‌گیرد^{۲، ۱۵-۱۹}. یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیلی روش ماتریس انتقال (TMM)^{۱۲} است که در بررسی پوشش‌های کامپوزیت چند لایه استفاده فراوانی دارد^{۲۰، ۲۱}. روش‌های عددی در سال‌های اخیر توانسته است با پر کردن خلاء توانایی روش‌های تحلیلی و یا روش‌های خاص هم‌چون روش پراکندگی الکترونی^{۱۳}، سهم عمده‌ای از مدل‌سازی پوشش‌های صوتی ضداکوستیک را به خود اختصاص دهد^{۶، ۷، ۹، ۱۴، ۲۱}. در این تحقیق با استفاده از روش عددی، مدلی جهت بیان رفتار پوشش-های ضداکوستیک استخراج گردیده است. خلاء موجود در زمینه طراحی پوشش‌های زیرآبی (با در نظر گرفتن کلیه الزامات حوزه زیرآب) تنظیم و انتخاب اندازه و هندسه ساده‌ای برای حفره‌های پراکنده‌ساز امواج صوتی است که معمولاً در درون لایه ویسکوالاستیک پوشش تعبیه می‌شوند. به دلیل حجیم بودن حل‌های عددی عملاً رسیدن به یک نتیجه مطلوب به راحتی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل در این مقاله سعی شده است تا با بکارگیری روش‌های جدید محاسبات مبتنی بر مدل‌های جایگزین^{۱۴} با دقت بالا، بهترین شکل و اندازه حفره‌های پراکنده‌ساز استخراج شده و مدلی برای طراحی این پوشش‌ها بر حسب بازه فرکانسی خواسته شده معرفی گردد. هم‌چنین پوشش در نظر گرفته شده، یک پوشش لاستیکی بوده که دارای حفره‌های پراکنده‌ساز استوانه‌ای یا مخروطی است. ماده به صورت ویسکوالاستیک مدل‌سازی شده و اثرات اتلافی در بازه فرکانسی مورد بررسی، لحاظ شده است. جهت کاهش زمان محاسبات، یک سلول واحد^{۱۵} از پوشش به همراه شرایط مرزی تقارن صفحه‌ای در نظر گرفته شده است. با استفاده از این مدل میدان‌های تنش و جابجایی استخراج شده و بر اساس آن میدان فشار اکوستیکی در محیط مجاور پوشش (محیط آب دریا) محاسبه می‌گردد. بر اساس میدان‌های بدست آمده، ضریب انتقال^{۱۶}، ضریب جذب^{۱۷}، ضریب انعکاس^{۱۸} و کاهش اکوی^{۱۹} پوشش صوتی، قابل محاسبه است. می‌توان با تنظیم متغیرهای مسئله، رفتار پوشش را

⁹ Periodic distribution

¹⁰ wave scattering

¹¹ cavity local resonances

¹² transfer matrix method

¹³ electron scattering

¹⁴ surrogated models

¹⁵ unit cell

¹⁶ transmission coefficient

¹⁷ absorption coefficient

¹⁸ reflection coefficient

¹⁹ echo reduction

¹ Sound Absorption linings/coatings

² echo

³ Scattering

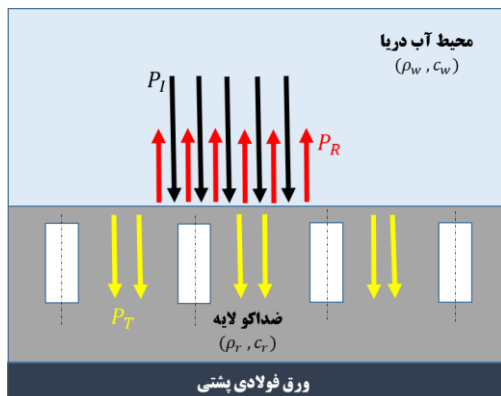
⁴ underwater

⁵ Concealing

⁶ anechoic

⁷ characteristic impedance

⁸ Scattering cavities



شکل ۱: تابش و انتقال صوت در سطح آب-لاستیک

۳- مدل سازی

پوشش صوتی در نظر گرفته شده در این پژوهش، یک پوشش حفره دار حاوی یک حفره مخروطی (در حالت خاص استوانه‌ای) است. هم‌چنین جهت کاستن از ابعاد شبکه محاسباتی و زمان حل، سلول واحدی از این پوشش با در نظر گرفتن شرایط تقارن، به عنوان مدل نهایی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی عملکرد آکوستیکی پوشش با استفاده از روش اجزاء محدود و با فرض فرود نرمال موج ورودی انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی هنیون و دیکارپیگنی (مرجع [۷]) صحت‌سنجی شده است. هم‌چنین با توجه به رویکرد و ماهیت فرآیند بهینه‌سازی در این مسأله، که یک فرآیند تکرار شونده است، لازم است تا شبیه‌سازی انجام شده به دفعات بسیار زیادی مورد تحلیل و بررسی واقع شود. این کار با توجه به نوع روش شبیه‌سازی (اجزاء محدود)؛ نیازمند هزینه‌ی محاسباتی و زمانی بسیار زیادی است. به همین جهت کاهش هزینه‌های محاسباتی و زمان مورد نیاز برای انجام فرآیند بهینه‌سازی، از یک هسته‌ی محاسباتی جایگزین بر پایه شبکه عصبی مصنوعی، برای ارزشیابی مدل‌سازی‌ها، استفاده شده است.

هسته‌ی محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش، یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده است که با خروجی‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود، آموزش داده شده است. ساختار این شبکه‌ی عصبی مصنوعی به گونه‌ای طراحی شده است که با وجود ساختار غیرخطی پاسخ‌ها و اندرکنش ناشناخته و پیچیده‌ی ورودی‌ها، بتواند پاسخ‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود را با درصد خطای اندکی بازتولید نماید. علاوه بر این، جهت توزیع مناسب، نمونه‌گیری بر روی جامعه متغیرهای ورودی، برای انجام شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود لازم، به روش ابر مکعب لاتین^۳ (LHS) انجام شده است. زیرا پوشش مناسب کل فضای متغیرهای ورودی، تاثیر قابل توجهی را بر عملکرد شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده و به تبع آن بر پاسخ‌های به دست آمده از حل گر بهینه‌ساز خواهد داشت. با توجه

در بازه‌های مختلف کنترل نمود. در این تحقیق به دلیل تحلیل ساده‌تر نتایج و نتیجه‌گیری بهتر، برخورد موج ورودی به صورت عمودی در نظر گرفته می‌شود.

۲- معادلات اساسی حاکم

معادله حرکت یک موج صفحه‌ای در حال حرکت در جهت x و وابسته به زمان را می‌توان با معادله (۱) نشان داد [۲۳].

$$p = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

که p_0 دامنه حرکت، k عدد موج، ω فرکانس زاویه‌ای موج فرودی است. سرعت موج (C) و چگالی ماده بستر انتقال صوت (ρ)، دو مشخصه تشکیل دهنده امپدانس صوتی (Z) هستند. امپدانس مشخصه یک ماده، به صورت حاصل ضرب چگالی ماده در سرعت صوت در آن ماده تعریف می‌شود. در مواد ویسکوالاستیک، با حرکت موج در ماده، انرژی موج به دلیل میرایی هدر می‌رود. گسترش موج، به خواص الاستیک و چگالی ماده وابسته است. اگر امپدانس صوتی محیط انتشار اول (آب)، Z_w و امپدانس محیط دوم (لاستیک)، Z_r به صورت زیر باشد [۱۰]:

$$Z_w = \rho_w c_w \quad (2)$$

$$Z_r = \rho_r c_r \quad (3)$$

که در معادلات (۲) و (۳)، ρ_w و c_w معرف سرعت صوت و چگالی محیط آب و ρ_r و c_r معرف سرعت صوت و چگالی محیط لاستیک هستند، آنگاه ضریب انعکاس بر اساس امپدانس دو محیط، تعریف شده و با معادله (۴) نشان داده می‌شود [۱۰].

$$R = \frac{p_R}{p_I} = \frac{Z_r - Z_w}{Z_r + Z_w} \quad (4)$$

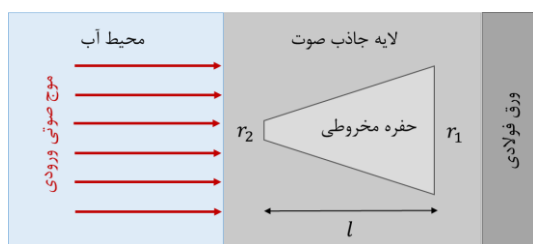
در معادله (۴)، p_R فشار میدان موج انعکاسی از سطح لاستیک و p_I فشار میدان موج ورودی اولیه به لاستیک است. با توجه به اینکه امپدانس لاستیک به دلیل ویسکوالاستیک بودن ماده، مختلط است، حتی با وجود فاز یکسان برای بخش حقیقی، همیشه یک عدم هم‌فازی در بخش مختلط امپدانس وجود دارد. به همین دلیل غیر ممکن است که انعکاس و انتقال انرژی به محیط مجاور اتفاق نیفتد. بازتابش و انتقال در مرز محیط، در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، روابط مربوط به کاهش اکو و اتلاف انتقال^۲ برای یک محیط به صورت روابط معادله (۵) تعریف خواهد شد [۲۴]:

$$ER = 20 \log \frac{p_I}{p_R} = 20 \log \left(\frac{1}{R} \right) \quad (5)$$

³ Latin Hypercube Sampling

² transmission loss

قابل محاسبه است. برای افزایش دقت و کارآمدی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش داده شده، لازم است برای هر پاسخ در هر نقطه، یک شبکه‌ی عصبی آموزش داده شود؛ لذا در این مدل‌سازی ۱۶۰ شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش داده شد تا به خوبی بتوانند پاسخ‌های حل اجزاء محدود را در هر نقطه از بازه فرکانسی مشخص شده، بازتولید کنند. در شکل ۲ شماتیک پوشش جاذب صوت زیرآبی مورد بحث به همراه کلیه پارامترهای هندسی مربوطه جهت درک بهتر مسئله ارائه شده است.



شکل ۲: شماتیک پوشش جاذب صوت (بی‌انعکاس) و پارامترهای در نظر گرفته شده در مسئله بهینه‌سازی

۴- اعتبارسنجی روش اجزاء محدود

به منظور بررسی صحت کارکرد روابط محاسبه شده، مخصوصاً رابطه مورد نیاز برای انجام فرآیند بهینه‌سازی یعنی رابطه کاهش اکو که خود مستقیماً از ضریب انعکاس محاسبه می‌شود، مسائلی با جواب معلوم، با این روش حل شده و از تطابق پاسخ‌ها، درستی نتایج تایید شده است.

۴-۱- صحت سنجی اول

برای صحت‌سنجی اول، صفحه‌ای ویسکوالاستیک با طول و عرض نامحدود و ضخامت ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱]. این صفحه در محیط سیال آب غوطه‌ور شده است و سیال از دو طرف تا بی‌نهایت ادامه دارد (شکل ۳). تحلیل در بازه فرکانسی ۲ تا ۴۰ کیلوهرتز انجام شده و خواص لایه ویسکوالاستیک در جدول ۱ آورده شده است:

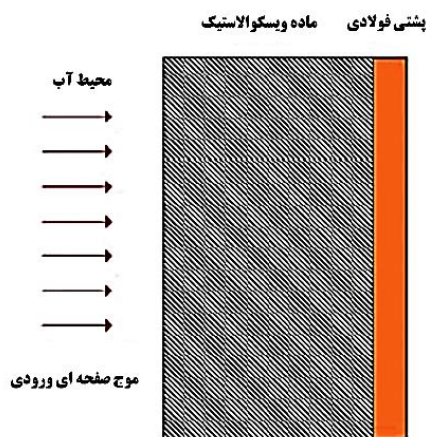
جدول ۱: خواص لایه ویسکوالاستیک مدل‌سازی شده در

صحت‌سنجی مورد اول [۱]

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
مدول ذخیره	E_r	1.4×10^8	Pa
چگالی	ρ	1100	$\frac{Kg}{m^3}$
نسبت پواسون	ν	0.49	-
ضریب اتلاف ماده	η	0.23	-

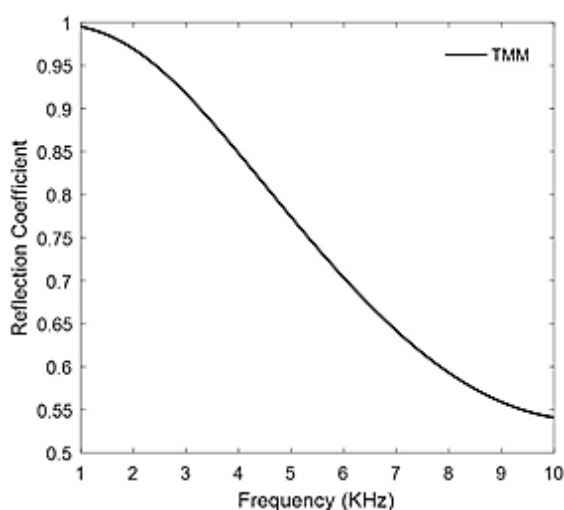
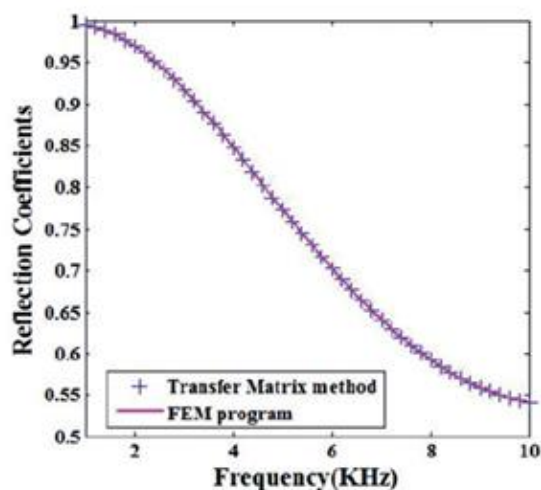
به داده‌های ارائه شده در بخش پنجم مقاله دیده می‌شود که شبکه‌ی عصبی مصنوعی توانسته است با خطایی کمتر از ۱ درصد، پاسخ‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود را برای تمام دامنه‌ی مورد نیاز از ورودی‌ها، بازتولید کند. تعداد متغیرهای طراحی در این پژوهش زیاد نیست اما اندرکنش ورودی‌ها با یکدیگر و اندکنش ورودی‌ها با پاسخ‌های آکوستیکی مورد انتظار، بسیار پیچیده و ناشناخته است. به همین سبب باید حل‌گر بهینه‌ساز توانایی یافتن پاسخ‌های بهینه‌ی واقعی و غیر محلی را در ضمن عملکرد صحیح، داشته باشد. هم‌چنین با توجه به تعداد تابع‌های هدف بسیار زیاد برای این مسأله، حل‌گر بهینه‌ساز باید توانایی مدیریت و تصمیم‌گیری مناسبی بر پایه‌ی ارزش‌های به دست‌آمده را نیز داشته باشد. به همین سبب و با توجه به ماهیت این مسأله، و نیز توانایی مطلوب الگوریتم ژنتیک، از این حل‌گر در فرآیند بهینه‌سازی تحقیق حاضر استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک قابلیت اثبات شده‌ای در یافتن پاسخ‌های بهینه برای مسأله‌هایی با رفتارهای غیرخطی و دارای توابع هدف چندگانه دارد. برای مرحله‌ی اول از مدل‌سازی، سه متغیر طراحی، دو شعاع مقاطع دو انتهای استوانه و طول استوانه انتخاب شدند، که این سه متغیر مستقل از یکدیگر هستند. هم‌چنین محدوده‌ی طراحی برای دو متغیر شعاع مقاطع به صورت یکسان و از مقدار ۵ میلی‌متر تا مقدار ۲۰ میلی‌متر، و برای متغیر طول حفره استوانه‌ای از ۱۰ تا ۳۴ میلی‌متر، در نظر گرفته شده است. برای این مدل‌سازی، با استفاده از روش ابر مکعب لاتین، تعداد ۱۰۰۰ نمونه، هر کدام شامل یک جفت شعاع و یک طول (سه متغیر طراحی)، از بازه‌های تعریف شده، انتخاب گردید. شبیه‌سازی اجزاء محدود برای ۱۰۰۰ نمونه انجام و پس از پس‌پردازش مبسوط، خروجی‌های آکوستیکی مورد انتظار به همراه متغیرهای ورودی متناظر با خود، در یک ساختار ماتریسی مشخص ذخیره‌سازی شد تا یک پایگاه داده^۱ جهت ایجاد مدل جایگزین بر پایه شبکه عصبی مصنوعی، را تشکیل دهند. سپس شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از این پایگاه داده، فرآیند آموزش را طی کرده و آماده‌ی استفاده به عنوان مدل جایگزین در فرآیند بهینه‌سازی شدند. با توجه به این مهم که شبکه‌ی عصبی مصنوعی نیز در همان بازه متغیرهای ورودی شبیه‌سازی اجزاء محدود، آموزش دیده است، پاسخ شبکه‌ی عصبی نیز تنها در این محدوده قابل پذیرش و دارای اعتبار است و لذا در رابطه با پاسخ‌های شبکه‌ی عصبی برای ورودی‌های خارج از این محدوده نمی‌توان اظهار نظر کرد. این مدل‌سازی در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز و در ۴۰ نقطه فرکانسی انجام شده است. هم‌چنین از هر تحلیل در هر فرکانس، تعداد ۴ پاسخ (ضریب انعکاس، ضریب انتقال، کاهش اکو و جذب)

¹ Data Base

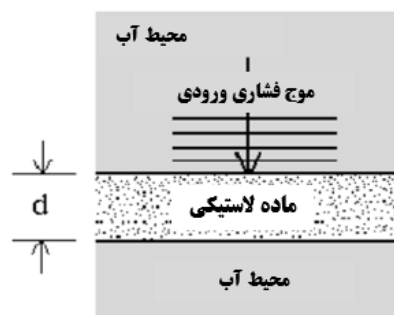


شکل ۵: لایه ویسکوالاستیک با پشتی فولادی [۲]

همان گونه که در شکل ۶ ملاحظه می شود، تطابق کاملی میان نتایج ضریب انعکاس صوتی حاصل از روش ماتریس انتقال بکار گرفته شده در تحقیق حاضر و نتایج موجود در مرجع [۲] وجود دارد.

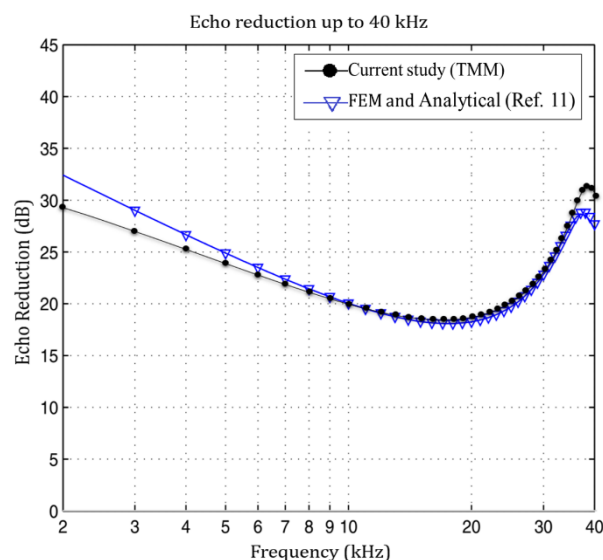


شکل ۶: مقایسه نمودار کاهش اکو (ER). (بالا) نتایج موجود در مرجع [۲] و (پایین) نتایج روش ماتریس انتقال تحقیق حاضر



شکل ۳: لایه ویسکوالاستیک مغروق در آب [۱]

همان گونه که در شکل ۴ ملاحظه می شود، تطابق کاملی میان نتایج کاهش اکو (ER) حاصل از روش ماتریس انتقال بکار گرفته شده در این تحقیق و نتایج موجود در مرجع [۱] وجود دارد.

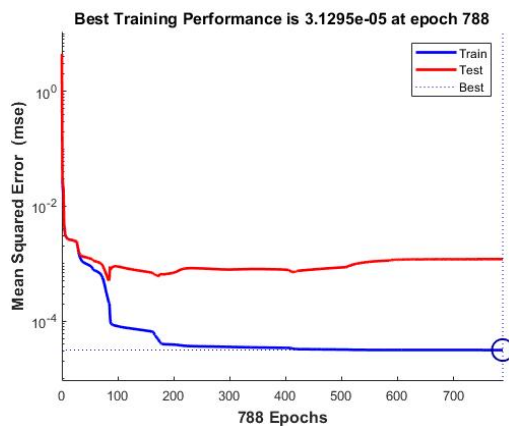


شکل ۴: مقایسه نمودار کاهش اکو (ER) برای نتایج موجود در مرجع [۱] و نتایج روش ماتریس انتقال تحقیق حاضر

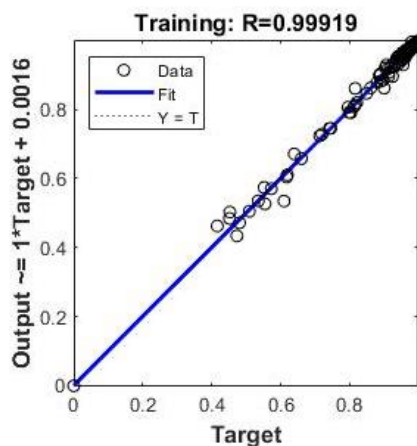
۴-۲- صحت سنجی دوم

برای مورد دوم از حالت های در نظر گرفته شده برای صحت سنجی، مطابق با مرجع [۲]، صفحه ای ویسکوالاستیک با طول و عرض نامحدود و ضخامت ۴۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. این صفحه از جلو با محیط سیال آب نیمه بی نهایت و در طرف پشت به یک لایه فولادی با ضخامت ۵ میلی متر در تماس است. ضمناً پشت لایه فولادی نیز یک فضای نیمه بی نهایت از سیال هوا قرار گرفته است (شکل ۵). هم چنین جهت مدل سازی، خواص ماده ویسکوالاستیک در این حالت نیز مشابه صحت سنجی اول و مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. در این حالت، تحلیل در بازه فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز انجام شده است.

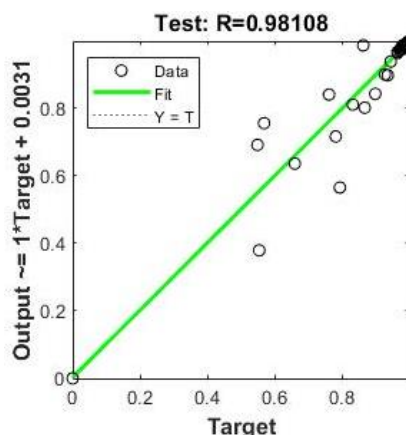
نمودار انحراف معیار^۵ تمام داده‌های ورودی شبکه عصبی را برای فرکانس ۱ کیلوهرتز نمایش می‌دهند.



شکل ۸: نمودار کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در فرکانس ۱ کیلوهرتز در طی آموزش



شکل ۹: نمودار انحراف معیار آموزش شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۱ کیلوهرتز

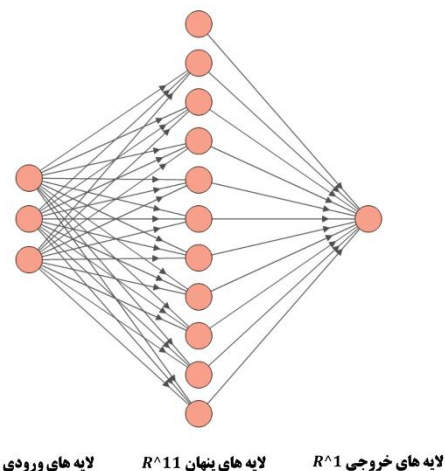


شکل ۱۰: نمودار انحراف معیار آزمایش شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۱ کیلوهرتز

با توجه به نتایج رضایت‌بخش فوق، می‌توان نتیجه گرفت که روش ماتریس انتقال بکار گرفته شده جهت استخراج پاسخ‌های آکوستیکی پوشش‌های جاذب صوت بدون حفره، برای موج ورودی صفحه با زاویه فرود عمودی، معتبر بوده و در نتیجه به منظور استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، قابل استفاده خواهد بود.

۵- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ در این مدل‌سازی دارای ۱۰ لایه‌ی مخفی هستند و از دو لایه‌ی ورودی و خروجی استفاده می‌کنند. شکل ۷ ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی مورد استفاده در این مدل‌سازی را نمایش داده است.



شکل ۷: ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی مورد استفاده در مدل‌سازی

لازم به ذکر است که فرآیند آموزش شبکه عصبی و اخذ نتایج از آن در یک مسئله بهینه‌سازی، قبلاً برای حالتی که حفره درون پوشش تنها دارای دو متغیر باشد، توسط نویسندگان همین مقاله انجام و چاپ شده است [۲۵]. در این بخش فرآیند آموزش^۲ و آزمایش^۳ شبکه عصبی برای حالت سه متغیره آورده شده است. برای تمام شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش داده شده، مقدار کارایی^۴ با اندکی بهبود نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش دیده برای مدل‌سازی‌های انجام شده با دو متغیر [۲۵]، مقداری کمتر از ۰/۰۰۱ هستند. به دلیل طولانی شدن متن مقاله، از آوردن تمام نمودارها برای مسئله سه متغیره خودداری و تنها به آوردن دو نمونه اکتفا شده است، یکی در فرکانس ۱ کیلوهرتز و دیگری در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز. شکل ۸ نمودار کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش‌دیده، شکل ۹ نمودار انحراف معیار آموزش شبکه عصبی، شکل ۱۰ نمودار انحراف معیار آزمایش شبکه عصبی و شکل ۱۱

¹ artificial neural network

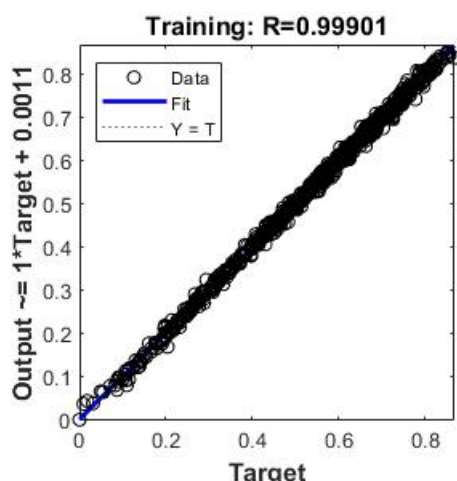
² train

³ test

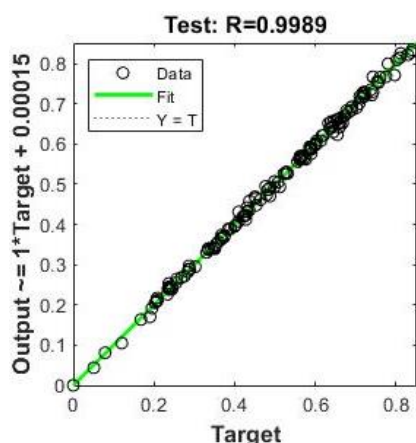
⁴ Performance

⁵ standard deviation

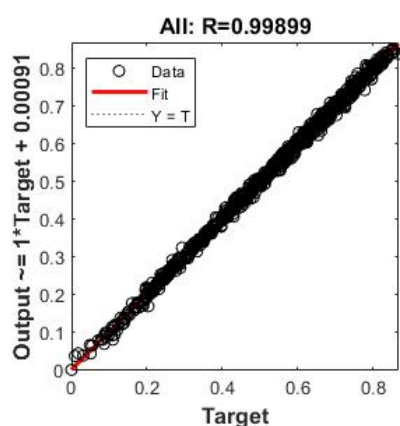
مصنوعی آموزش دیده برای فرکانس ۲۰ کیلو هرتز نیز مانند شبکه‌ی مربوط به فرکانس ۱ کیلو هرتز، نه تنها قابل قبول، بلکه بسیار راضی کننده هستند.



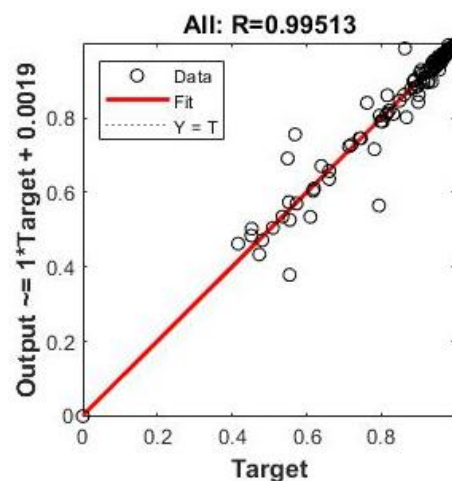
شکل ۱۳: نمودار انحراف معیار آموزش شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز



شکل ۱۴: نمودار انحراف معیار آزمایش شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز

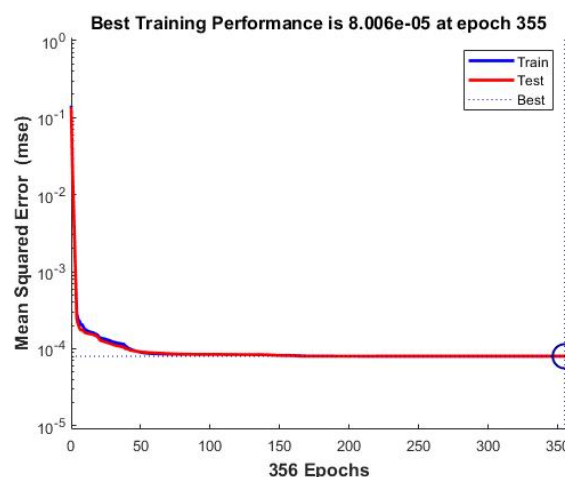


شکل ۱۵: نمودار انحراف معیار داده‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز



شکل ۱۱: نمودار انحراف معیار تمام داده‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی در فرکانس ۱ کیلو هرتز

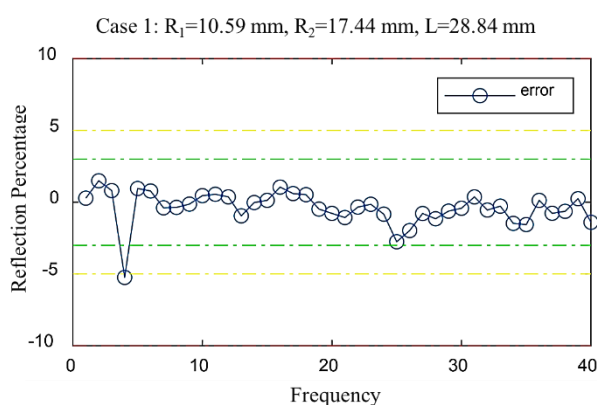
با توجه به نمودارهای فوق ضریب هم‌بستگی به‌دست آمده برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در فرکانس ۱ کیلو هرتز برای آموزش، مقدار ۹۹/۹ درصد، برای آزمایش مقدار ۹۸/۱ درصد و برای تمامی داده‌های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی مقدار ۹۹/۵ درصد بوده است. این مقادیر هم‌بستگی برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی، بسیار راضی کننده خواهند بود. شکل ۱۲ تا شکل ۱۵ به ترتیب نمودارهای کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در طی آموزش، آزمایش و تمام داده‌ها، در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز را نمایش می‌دهند.



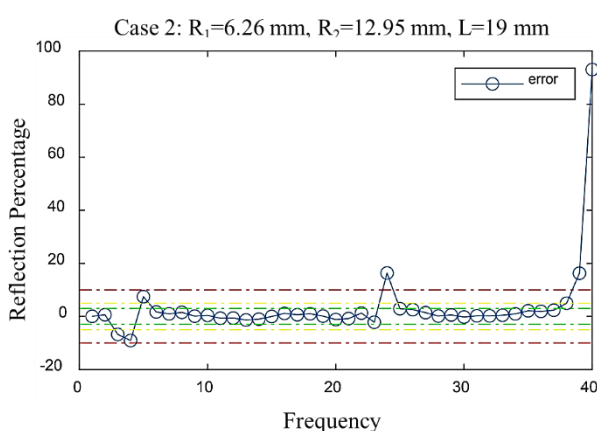
شکل ۱۲: نمودار کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز در طی آموزش

با توجه به نمودارهای فوق ضریب هم‌بستگی^۱ به‌دست آمده برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در فرکانس ۲۰ کیلو هرتز برای آموزش، مقدار ۹۹/۹ درصد، برای آزمایش مقدار ۹۹/۸ درصد و برای تمامی داده‌های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی مقدار ۹۹/۸ درصد بوده است. مقادیر هم‌بستگی برای شبکه‌ی عصبی

^۱ correlation coefficient



شکل ۱۷: میزان خطا برای مقایسه پاسخ ضریب انعکاس یک پوشش حاصل از شبکه عصبی آموزش دیده و حاصل از مدل اجزاء محدود

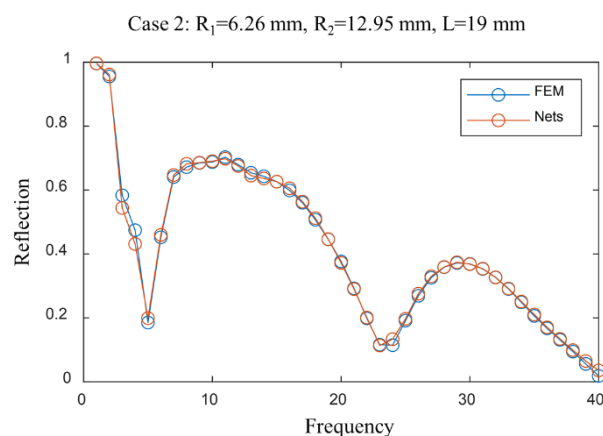
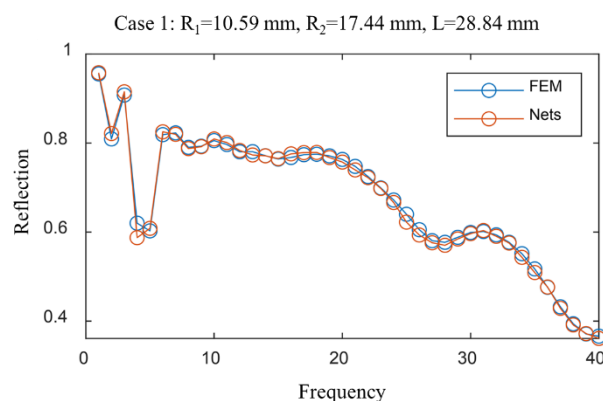


شکل ۱۸: میزان خطا برای مقایسه پاسخ ضریب انعکاس یک پوشش حاصل از شبکه عصبی آموزش دیده و حاصل از مدل اجزاء محدود

در شکل ۱۹ فلوجارتی از روش پیشنهادی و استفاده شده در تحقیق حاضر ارائه شده است. بخش A مربوط به شبکه‌ی عصبی استفاده شده در این پژوهش است که یک شبکه‌ی پس انتشار بیسین^۱ است. این تکنیک یک فرایند آموزش شبکه است که مقدارهای مربوط به وزن‌ها و انحراف‌های معیار را مطابق با بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکوارد^۲ تغییر می‌دهد. این روش ترکیبی از خطاها و وزن‌های مربع شده را به حداقل می‌رساند و سپس ترکیب صحیح را تعیین می‌کند تا شبکه‌ی تولید شده به خوبی تعمیم‌پذیر باشد. شبکه‌ی عصبی بکار رفته در این تحقیق، شامل یک لایه‌ی ورودی، ۱۰ لایه‌ی میانی و یک لایه‌ی خروجی است. تابع تحریک برای لایه‌های پنهان تابع انتقال سیگموئید متقارن^۳ است و برای لایه‌ی خروجی تابع انتقال خطی^۴ استفاده شده است.

مقادیر به دست آمده برای ضرایب هم‌بستگی شبکه‌ی عصبی مصنوعی آموزش دیده در فرکانس‌های ۱ و ۲۰ کیلوهرتز، تضمین می‌نماید که پاسخ‌های حل گر المان محدود برای سه وروری در تمامی نقاط محدوده‌ی طراحی، به خوبی بازتولید خواهند شد. علاوه بر این اطمینان از صحت پاسخ‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی، پاسخ دو عضو تصادفی با پاسخ حاصل از روش اجزاء محدود برای همان دو عضو، مقایسه شده است. عضو اول یک پوشش دارای حفره مخروطی به شعاع‌های ۱۰/۵۹ و ۱۷/۴۴ و طول ۲۸/۸۴ میلی‌متر؛ و عضو دوم پوشش دارای حفره مخروطی به شعاع‌های ۶/۲۶ و ۱۲/۹۵ و طول ۱۹ میلی‌متر است. نتیجه در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.

در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نیز مقدار خطاهای بین پیش‌بینی شبکه عصبی و پاسخ روش اجزاء محدود برای دو عضو تصادفی مورد بررسی آورده شده است.



شکل ۱۶: مقایسه پاسخ ضریب انعکاس دو پوشش. خط قرمز پاسخ حاصل از شبکه عصبی و خط آبی پاسخ حاصل از مدل اجزاء محدود

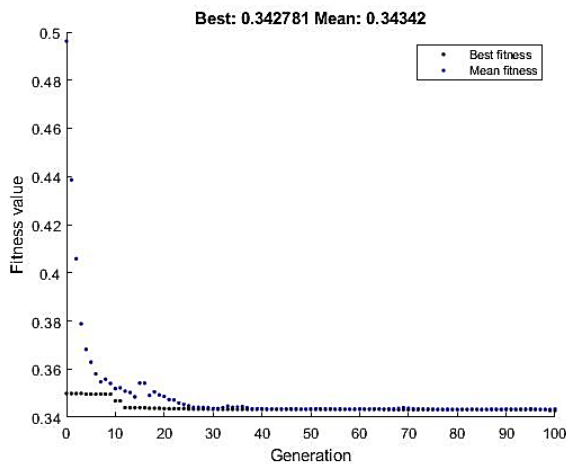
¹ Bayesian regularization backpropagation

² Levenberg-Marquardt

³ Symmetric sigmoid transfer function

⁴ Linear transfer function

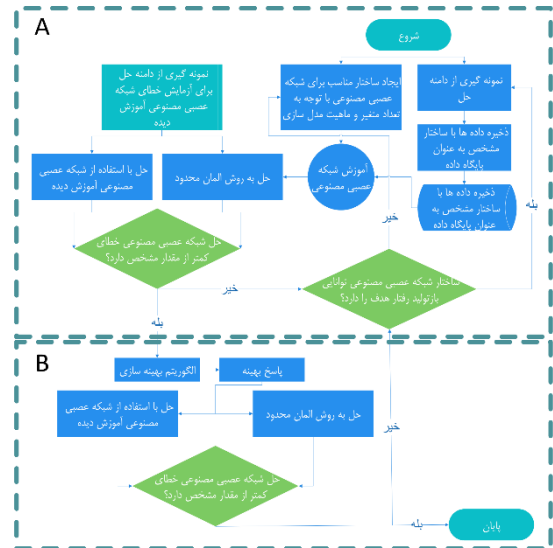
در گزارش آمده است، ۱۶۰ هدف (۴ خروجی هر کدام در ۴۰ فرکانس) برای بهینه‌سازی وجود دارد. در این پژوهش تنها پاسخ ضریب بازتاب (R) به عنوان متغیر مستقل انتخاب و تابع هدف بهینه‌سازی، بر اساس این متغیر تنظیم شده و این پارامتر کمینه خواهد شد. لذا در نهایت از این ۱۶۰ پاسخ، ۴۰ پاسخ مستقل (ضرایب انعکاس در ۴۰ فرکانس متفاوت) به عنوان ۴۰ تابع هدف اصلی انتخاب و در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. برای مدل‌سازی انجام شده، در ابتدا، بهینه‌سازی بر روی تمام بازه‌ی فرکانسی محدوده‌ی طراحی، یعنی از ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، انجام گردید. شکل ۲۰ نمودار فرآیند بهینه‌سازی را برای مدل‌سازی فوق، نمایش می‌دهد.



شکل ۲۰: نمودار فرآیند بهینه‌سازی برای بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز

پاسخ بهینه‌ی بدست آمده برای این مسئله بهینه‌سازی، مقدار $r_1 = 9.4 \text{ mm}$ و $r_2 = 5 \text{ mm}$ برای شعاع‌های قاعده‌های استوانه (مخروط)، به ترتیب در جناح دور از چشمه‌ی موج و نزدیک به چشمه‌ی موج است. مقدار طول حفره (l) برای پاسخ بهینه، مقدار ۲۲/۴ میلی‌متر است. مقدار میانگین ضریب بازتاب (R) برای مدل بهینه‌شده، در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، مقدار ۰/۳۴۳ است. شکل ۲۱ و شکل ۲۲ به ترتیب نمودارهای ضریب بازتاب و پاسخ کاهش اکو را برای پاسخ بهینه و دو پاسخ اتفاقی دیگر، نمایش می‌دهند.

با توجه به این مهم که پاسخ‌های ضریب بازتاب و کاهش اکو از یکدیگر مستقل نیستند، هر دو شکل ۲۱ و شکل ۲۲ نتایج مشابهی را در بر دارند. با توجه به شکل ۲۱ پاسخ بهینه، مقدار ضریب بازتاب میانگین کمتری را نسبت به دو پاسخ دیگر، به خود اختصاص داده است. در صورت انجام بهینه‌سازی در بازه‌های فرکانسی مختلف، ممکن است پاسخ‌های بهینه‌ی متفاوتی بدست آید. ولی اگر هدف یافتن پاسخ بهینه برای کمینه‌ی بازتاب و یا بیشینه‌ی کاهش اکو در کل بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز،



شکل ۱۹: فلوچارت روش پیشنهادی در بهینه‌سازی پوشش آکوستیکی

۶- بهینه‌سازی

با توجه به متغیرها در این مدل‌سازی که شعاع قاعده‌های یک استوانه (r_1 و r_2) و طول حفره (l) هستند، بردار طراحی بهینه‌سازی نیز شامل سه متغیر خواهد بود (شکل ۲). به دلیل ماهیت فیزیکی و هندسی پژوهش، تمامی طول‌ها باید مقداری مثبت را بپذیرند. همچنین به دلیل وجود قیود محدوده‌ی طراحی که براساس این قیود شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش دیدند، لازم است تا قیود محدوده‌ی طراحی نیز در بهینه‌سازی مورد توجه قرار گیرند. تابع هدف (F)، مقدار میانگین ضریب بازتاب (R) و یا مقدار میانگین پاسخ کاهش اکو (ER) در بازه فرکانسی مورد بررسی خواهد بود. ضریب انعکاس و پاسخ کاهش اکو، طبق رابطه (۵) به یکدیگر مربوط می‌شوند. قیود فیزیکی مسئله بهینه‌سازی شامل بزرگتر از صفر بودن کلیه مقادیر متغیرهای مسئله بهینه‌سازی و قیود طراحی مسئله، شامل کمینه و بیشینه‌ی مقادیر متغیرهای سه‌گانه، جهت تولید داده‌های لازم برای شبکه عصبی، است. بنابراین فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی را می‌توان با رابطه (۶) بیان نمود.

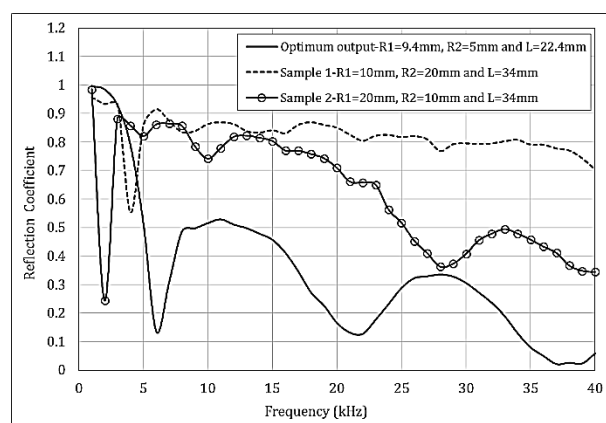
$$\left\{ \begin{array}{l} F = \text{mean } ER(f) \quad ; \quad f: [f_{\min}, f_{\max}] \\ \forall r > 0 \\ r_{\min} = 5 \text{ mm} \\ r_{\max} = 20 \text{ mm} \\ l_{\min} = 1 \text{ mm} \\ l_{\max} = 35 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (6)$$

در مسائل آکوستیکی مربوط به جاذب‌های صوتی چهار پاسخ معمول وجود دارد، ضریب انعکاس، ضریب انتقال، افت انتقال و افت انعکاس یا همان کاهش انعکاس. این چهار خروجی با روابطی به یکدیگر مربوط می‌شوند. مثلاً افت انتقال به ضریب انتقال و کاهش انعکاس به ضریب انعکاس مربوط می‌گردد. بنابراین مطابق با آنچه

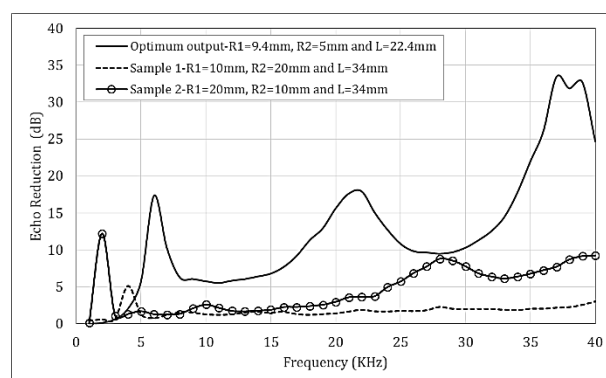
ضرایب بازتاب کمتری نسبت به پوشش بهینه هستند. این موضوع نشان می‌دهد که یک پوشش جاذب صوت را نمی‌توان برای کل بازه فرکانسی بهینه نمود. البته به عنوان قاعده‌ای کلی می‌توان گفت که در فرکانس‌های پایین (معمولاً زیر ۱۰ کیلوهرتز) بهینه‌سازی جداگانه‌ای بایستی انجام گردد. این موضوع در مرجع [۲۶] بررسی شده است. با توجه به اینکه پاسخ ضریب انعکاس و کاهش اکو خیلی از هم مستقل نیستند، مطابق با این گزاره، مشاهده می‌گردد که پوشش جاذب صوت بهینه شده نیز، در بازه بالای ۵ کیلوهرتز دارای پاسخ کاهش اکو بهتری نسبت به دو پوشش دیگر است. مقدار میانگین کاهش اکو برای مدل بهینه‌ی یافته شده در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، مقدار ۱۲/۳ دسی‌بل است. این مقدار برای دو پوشش دیگر برابر با ۱/۷ و ۴/۶ دسی‌بل می‌باشد. به وضوح کیفیت بهتر پوشش بهینه شده مشخص است. نکته‌ای که در رابطه با طراحی پوشش‌های جاذب صوت دریایی وجود دارد، تنظیم پارامترها به نحوی است که در بازه وسیعی از فرکانس‌های امواج ارسالی از سونارهای فعال، عملکرد قابل قبولی داشته و در ضمن، در یک یا چند فرکانس محدود نیز عملکرد خوبی از خود نشان دهند. انتخاب این فرکانس‌ها، معمولاً بر اساس فرکانس مرکزی کارکردی سونارهای فعال تعیین می‌گردد. اما تنظیم پارامترها به صورتی که انتظارات طراح را برآورده نماید، با وجود چندین متغیر طراحی، کاری ساده نیست. به بیان دیگر طراحی این چنین پوششی با تغییر پارامترها و به روش‌های سنتی، عملاً انجام پذیر نیست و بایستی از ابزارهای بهینه‌سازی استفاده شود.

به عنوان یک مورد دیگر، مسئله بهینه‌سازی پوشش جاذب صوت با دو متغیر (فقط شعاع‌های ابتدا و انتهای استوانه)، جهت بررسی اثر پارامتر طول حفره (L)، برای بازه فرکانسی مشابه، حل شده است. پاسخ بهینه‌ی یافته شده در حالت دو متغیره، بیان‌گر پوششی با حفره مخروطی و با شعاع دور از چشمه موج $r_1 = 5 \text{ mm}$ و شعاع نزدیک به چشمه موج $r_2 = 6.4 \text{ mm}$ است. شکل ۲۳، نمودار کاهش اکو را برای پاسخ بهینه در حالت دو متغیره و دو پاسخ اتفاقی دیگر نمایش می‌دهد. مقدار میانگین کاهش اکو برای این پوشش بهینه شده، در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، مقدار ۱۱/۵ دسی‌بل است. همان‌طور که از شکل ۲۳ پیداست، پوشش بهینه به وضوح دارای دو قله یکی در فرکانس ۲۰ و دیگری در فرکانس ۳۷ کیلوهرتز با مقادیر به ترتیب ۳۴/۲ و ۳۶ دسی‌بل است. مشاهدات نشان داد که در اکثر فرکانس‌های بازه بالای ۱۵ کیلوهرتز، به جز دو فرکانس یاد شده، پوشش‌ها عملکرد یکسانی از خود نشان می‌دهند. در بازه فرکانسی زیر ۱۵ کیلوهرتز، پاسخ‌ها نشان می‌دهد که پوشش بهینه‌شده، پاسخ بهتری نسبت به پوشش‌های به صورت تصادفی انتخاب شده، ندارد. در مسئله بهینه‌سازی دو متغیره مجدداً مشاهده شد که فرآیند بهینه‌سازی برای فرکانس-

بدون تمرکز بر بازه‌ی فرکانسی مشخصی باشد، پاسخ ارائه شده در شکل ۲۱، بهینه خواهد بود.



شکل ۲۱: نمودار ضرایب بازتاب برای پاسخ بهینه و دو پاسخ اتفاقی دیگر در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز



شکل ۲۲: نمودار کاهش اکو برای پاسخ بهینه و دو پاسخ اتفاقی دیگر در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز

ولی با این حال می‌توان فرآیند بهینه‌سازی را برای محدوده‌ی فرکانسی خاصی که دارای اهمیت است و یا دارای اهمیت بیشتری نسبت به دیگر بازه‌های فرکانسی است، تکرار کرد و پاسخ بهینه را در آن محدوده‌ی فرکانسی، مجدداً ارزیابی نمود.

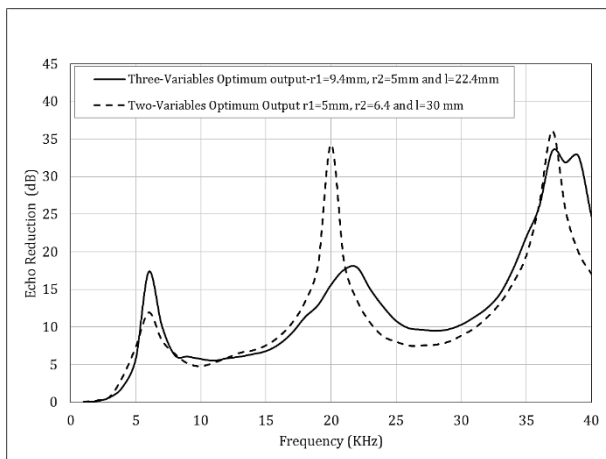
همان‌طور که از نمودار ضریب بازتاب مشخص است، نمودار مربوط به پاسخ بهینه، در بازه فرکانسی بالای ۵ کیلوهرتز، به روشنی ضریب انعکاس کمتری را ارائه می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که پوشش جاذب صوت بهینه شده، در کل بازه ۶ تا ۲۸ کیلوهرتز، دارای پاسخ بهتری نسبت به دو پوشش جاذب صوت انتخاب شده به صورت تصادفی است. هم‌چنین پاسخ بهینه دارای سه قعر، به ترتیب در فرکانس‌های ۶، ۲۲ و ۳۷ کیلوهرتز است. مقادیر ضرایب بازتاب در این سه فرکانس به ترتیب عبارتند از ۰/۱۳۶، ۰/۱۲۷ و ۰/۰۲۶. بنابراین پوشش بهینه در یک بازه فرکانسی باریک حول این سه فرکانس دارای بهترین عملکرد آکوستیکی است.

نکته دیگری که از نمودارها می‌توان برداشت نمود این است که در بازه فرکانس‌های زیر ۵ کیلوهرتز، پاسخ پوشش‌های دیگر دارای

شکل ۲۵: نمودار کاهش اکو برای پاسخ بهینه و سه پاسخ اتفاقی دیگر در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز

با توجه به پاسخ بدست آمده برای پوشش بهینه شده برای بازه فرکانسی زیر ۱۰ کیلوهرتز، مشاهده می‌شود که شکل حفره‌ی پوشش بهینه استوانه‌ای بدست آمده و متفاوت از حفره مخروطی مربوط به پوشش بهینه بازه ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی پوشش‌های جاذب صوت دریایی، بایستی بر اساس اینکه عملکرد آکوستیکی (کاهش بازتاب) پوشش در چه بازه‌ای باید بهینه شود، تمرکز تابع هدف بهینه‌سازی بر آن بازه فرکانسی گذاشته شود.

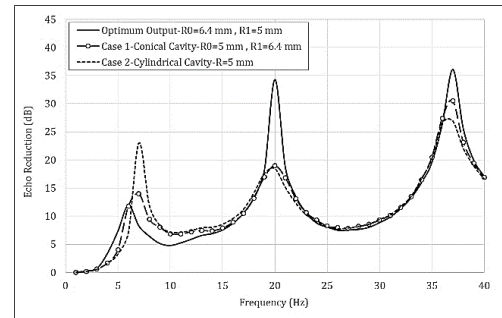
هم‌چنین با بررسی نتایج حاصل شده برای مسائل بهینه‌سازی پوشش جاذب با در نظر گرفتن دو متغیر و سه متغیر طراحی (شکل ۲۶)، مشخص می‌شود که در اکثر فرکانس‌های بازه ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، در نظر گرفتن متغیر سوم طراحی یعنی طول حفره استوانه‌ای (مخروطی)، به طور نسبی باعث بهبود عملکرد آکوستیکی پوشش بهینه بدست آمده می‌شود، البته به جز در بخش میانی و در بازه فرکانسی ۱۳ تا ۲۱ کیلوهرتز.



شکل ۲۶: پاسخ‌های کاهش اکو برای حالت دو متغیره و سه متغیره

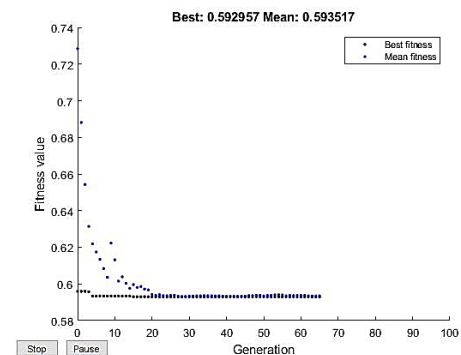
در مقایسه‌ی بهینه‌سازی دو و سه متغیره، متغیر طراحی افزوده شده، طول حفره است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش یک متغیر به متغیرهای بهینه‌سازی، پاسخ پوشش‌های بهینه بدست آمده نیز متفاوت خواهد شد. در حالت سه متغیره طول حفره کوتاه‌تر شده اما شعاع قاعده دور از موج ورودی آن، بزرگ‌تر گردیده است. در حالت دو متغیره، طول حفره بیشتر اما شعاع قاعده دور از موج آن کوچک‌تر است (شکل ۲۷). بنابراین در وهله اول، اضافه شدن طول به پارامترهای بهینه‌سازی باعث عوض شدن جهت و ابعاد حفره مخروطی داخل پوشش شده است.

های پایین، جواب مناسبی بدست نخواهد داد، هر چند با توجه به تابع هدف بهینه‌سازی، میانگین پاسخ‌های پوشش بهینه، بهتر باشد.



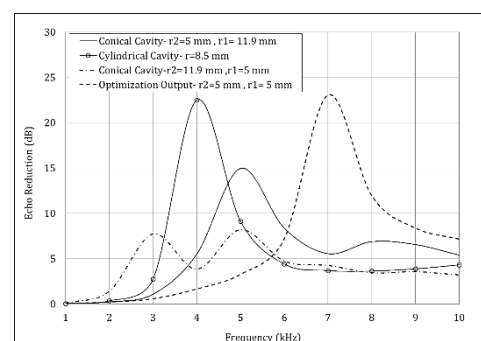
شکل ۲۳: نمودار کاهش اکو برای پاسخ بهینه دو متغیره و دو پاسخ اتفاقی دیگر در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز

لذا با توجه به اهمیت زیاد بازه‌ی فرکانس پایین (معمولاً زیر ۱۰ کیلوهرتز)، به عنوان یک مسئله دیگر، فرآیند بهینه‌سازی برای مدل دو متغیره در این بازه، انجام شد.



شکل ۲۴: نمودار فرآیند بهینه‌سازی (بازه فرکانسی زیر ۱۰ کیلوهرتز)

شکل ۲۴ نمودار فرآیند بهینه‌سازی را در بازه‌ی فرکانسی زیر ۱۰ کیلوهرتز و برای مسئله بهینه‌سازی پوشش جاذب صوت با دو متغیر طراحی، نمایش می‌دهد. پاسخ بهینه‌ی بدست آمده برای مدل دو متغیره، در بازه زیر ۱۰ کیلوهرتز، بیانگر پوششی با حفره استوانه‌ای و با شعاع $r_1 = r_2 = 5 \text{ mm}$ است. مقدار میانگین کاهش اکو برای مدل بهینه‌ی یافته شده در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز، مقدار $6/34$ دسی‌بل است. شکل ۲۵ نمودار کاهش اکو را برای پاسخ بهینه و سه پاسخ اتفاقی دیگر در این بازه‌ی فرکانسی نمایش می‌دهند.

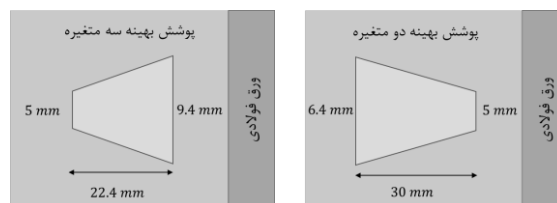


با توجه به شکل ۲۸، با افزایش طول حفره، در محدوده فرکانس پایین (۱-۱۰ کیلوهرتز)، کمینه‌ی پاسخ پوشش‌های مختلف، از مقدار ۰/۲۳ شروع به کاهش تا مقدار ۰/۱۳ (مربوط به پوشش بهینه‌ی سه متغیره) نموده و سپس به مقدار ۰/۳۱ افزایش یافته است. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش طول حفره تا یک مقدار معین (همان مقدار بدست آمده در فرآیند بهینه‌سازی) باعث بهبود پاسخ آکوستیکی انعکاس شده و از آن به بعد پاسخ ضریب انعکاس مجدداً افزایشی خواهد شد. همچنین مشاهده می‌گردد که در تمام محدوده‌ی فرکانسی، با اینکه مقادیر کمینه‌ی کلیه پاسخ‌ها، با یکدیگر متفاوت است، اما فرکانس رخداد مقادیر کمینه برای طول حفره‌های مختلف، با اختلاف کمی نسبت به یکدیگر، در فرکانس‌های نزدیک به هم، اتفاق افتاده‌اند. علاوه بر این، پاسخی بهتر است که در کل بازه فرکانسی دارای مساحت زیر نمودار کمتری باشد. بر این اساس مشاهده می‌گردد که پاسخ بهینه بدست آمده، نسبت به دیگر پاسخ‌ها دارای مساحت کمتری می‌باشد. هم-چنین قابل ذکر است که کمینه اول پاسخ بهینه نسبت به اغلب پاسخ‌ها، در فرکانس کمتری رخ داده است که از نظر طراحی مثبت ارزیابی می‌گردد.

تاکید بر این نکته قابل توجه خواهد بود که با ثابت در نظر گرفتن شعاع‌های قاعده‌های حفره با شکل مخروط ناقص و افزایش طول حفره، شیب دیواره‌های حفره یا همان مخروط ناقص در طول‌های مختلف متفاوت خواهد بود. لذا پدیده‌ی مورد تحلیل در شکل ۲۸، تنها تاثیر شکل حفره و یا تنها تاثیر طول حفره نخواهد بود و این تاثیر حاصل اندرکنش این دو تاثیر خواهد بود. با مقایسه‌ی پاسخ بهینه با پاسخ‌های رسم شده از حفره‌های دیگر، مشاهده می‌شود که پاسخ بهینه توانسته است در تمام نقاط بروز کمینه و بیشینه، به طور میانگین پاسخ مورد قبول را بازتولید کند و پاسخ‌های کمینه‌ی این نمودار در بین پاسخ‌های مطلوب قرار گرفته است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی پوشش‌های ضداکوی دارای حفره‌های مخروطی و استوانه‌ای با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و مدل جایگزین مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، انجام گردید. استفاده از روش اجزاء محدود به عنوان مدل پایه برای انجام فرآیند بهینه‌سازی، دارای هزینه محاسباتی بسیار بالا و مستلزم زمان حل زیادی است. به همین دلیل بایستی با کاهش هزینه‌های محاسباتی و زمانی، بر این مشکل فائق آمد. به همین منظور استفاده از مدل‌های جایگزین با سرعت بیشتر، یکی از روش‌های مدرن در فرآیندهای بهینه‌سازی محسوب می‌گردد. در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی جهت ساخت مدل جایگزین اجزاء محدود استفاده گردید.

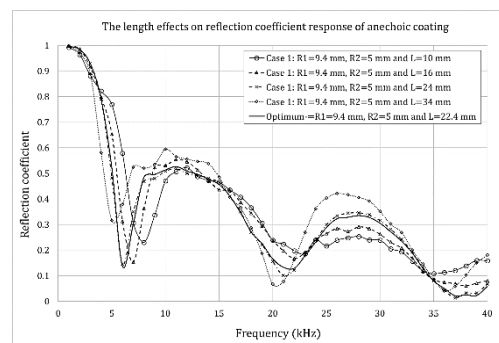


شکل ۲۷: شکل هندسی حفره پوشش‌های بهینه به‌دست آمده در دو

حالت دو و سه متغیره

علاوه بر این بر اساس نتایج بدست آمده (شکل ۲۶)، پاسخ پوشش بهینه در حالت سه متغیره، در بازه فرکانس پایین (در بازه‌ی ۱ تا ۱۰ کیلوهرتز)، دارای ماکزیمم محلی بزرگ‌تری نسبت به پاسخ بهینه‌ی دو متغیره است. با این حال با وجود برتری پاسخ آکوستیکی پوشش بهینه‌ی سه متغیره نسبت به دو متغیره، میانگین این دو پاسخ در بازه‌ی فرکانسی ۱ تا ۴۰ کیلوهرتز، نزدیک به یکدیگر است. به عبارت دیگر با دو هندسه‌ی مختلف از طراحی، پاسخ‌های نزدیک به هم، نتیجه گرفته شده است. با توجه به اینکه محاسبات نشان می‌دهد که حفره در حالت سه متغیره دارای حجم بالاتری (حدود ۲۲٪) است، می‌توان اظهار داشت که انجام بهینه‌سازی با سه متغیر طراحی می‌تواند منجر به پوشش‌های با وزن کمتر، اما با کیفیت پاسخ‌های حالت دو متغیره شود. این موضوع در شناورهای زیرسطحی که تعادل وزن و بویانسی از اهمیت حیاتی برخوردار است، و نیز اینکه معمولاً این پوشش‌ها دارای حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد بویانسی منفی هستند، بسیار مهم می‌باشد.

به عنوان یک نتیجه دیگر، می‌توان گفت که تغییرات طول حفره داخل پوشش، در بیشینه‌ها و کمینه‌های پاسخ‌های آکوستیکی، تاثیرگذار بوده است. با این حال متغیرهای طراحی در این پدیده دارای اندرکنش هستند و نمی‌توان بدون در نظر گرفتن تغییرات دیگر متغیرها، به تفسیر تغییر یک متغیر پرداخت. برای بررسی اثر طول حفره، یک شکل حفره‌ی مخروط ناقص با شعاع‌های قاعده با مقادیر ۹/۴ و ۵ میلی‌متر (ابعاد حفره‌ی بهینه حالت سه متغیره)، با طول‌های ۱۰، ۱۶، ۲۶ و ۳۴ میلی‌متر، تحلیل آکوستیکی شده و پاسخ بازتاب این مدل‌ها استخراج شده است.



شکل ۲۸: پاسخ‌های بازتاب برای پوششی با شکل حفره‌ی مخروط ناقص و با شعاع‌های قاعده با مقادیر ۹/۴ و ۵ میلی‌متر و طول‌های ۱۰، ۱۶، ۲۶ و ۳۴ میلی‌متر و پاسخ بازتاب برای پاسخ بهینه‌ی یافت شده

- [2] Cederholm, A., 2003, *Homogeneous models of anechoic rubber coatings*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, ISBN. 91-7283-580-X.
- [3] Yang, X. Wang, Y. and Yu, H., 2007, *Sound Performance of Multilayered Composites*, Journal of [Materials and Manufacturing Processes](#), **22(6)**, p.721-725.
- [4] Cheng, Y., Xu, J. Y. and Liu, X. J., 2009, *Broadband Acoustic Cloak with Multilayered Homogeneous Isotropic Materials*, PIER Online, **5(2)**, p.177-180.
- [5] Baker, R. M. L. and Baker, B. S., (2012), *Multiple-layer radiation absorber*, Physics Procedia, **38**, p.298-303.
- [6] Hennion, A. C., Bossut, R., Decarpigny, J. N. and Audoly, C., 1990, *Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a periodic elastic structure using the finite element method: Application to compliant tube gratings*, Journal of Acoustical Society of America, **87(5)**, p.1861-1870.
- [7] Hladky-Hennion, A. C. and Decarpigny, J. N., 1991, *Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: Application to Alberich anechoic coatings*, Journal of Acoustical Society of America, **90(6)**, p.3356-3367.
- [8] Ma, T. C., Scott, R. A. and Yang, W. H., 1980, *Harmonic wave propagation in an infinite elastic medium with a periodic array of cylindrical pores*, Journal of Sound and Vibration, **71**, p.473-482.
- [9] Easwaran, V. and Munjal, M. L., 1993m *Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach*, Journal of Sound and Vibration, **93(3)**, p.1308-1318.
- [10] Cai, C., Hung, K. C. and Khan M. S., 2006, *Simulation-based analysis of acoustic absorbent lining subject to normal plane wave incidence*, Journal of Sound and Vibration, **124(4)**, p.1974-1984.
- [11] Panigrahi, S. N., Jog, C. S. and Munjal, M.L., 2008, *Multi-focus design of underwater noise control linings based on finite element analysis*, Journal of Applied Acoustics, **69**, p.1141-1153.
- [12] Meng, H., Wen, J., Zhao, H. and Wen X., 2012, *Analysis of absorption performances of anechoic layers with steel plate backing*, Journal of Acoustical Society of America, **132(1)**, p.69-75.
- [13] Meng, T., 2014, *Simplified model for predicting acoustic performance of an underwater sound absorption coating*, Journal of Vibration and Control, **20(3)**, p.339-354.
- [14] Ye, C., Liu, X., Xin, F., and Lu, T. J., 2018, *Underwater acoustic absorption of composite anechoic layers with inner holes*, Journal of Sound and Vibration, Vol.426, p.54-74.

با توجه به نمودارهای کارایی و مقادیر هم‌بستگی برای شبکه‌های عصبی مصنوعی آموزش دیده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل شبکه عصبی توسعه داده شده به جای مدل اجزاء محدود، انتخاب مناسبی برای پیش‌بینی پاسخ‌های آکوستیکی پوشش‌های ضداکو است. مدل شبکه عصبی توسعه داده شده، خطای بسیار اندک در پیش‌بینی پاسخ‌های آکوستیکی پوشش‌ها داشته و همخوانی بسیار خوبی با نتایج مدل اجزاء محدود از خود نشان می‌دهد. استفاده از مدل جایگزین بر پایه شبکه عصبی مصنوعی، هزینه و زمان محاسبات فرآیند بهینه‌سازی پوشش‌های جاذب صوت حفره‌دار را نسبت به حالتی که از مدل اجزاء محدود استفاده گردد، تا ۱۰ هزار برابر کاهش خواهد داد. هم‌چنین در پژوهش حاضر، سعی شد تا علاوه بر دستیابی به یک پاسخ بهینه برای پوشش‌های جاذب صوت با سه متغیر طراحی، تاثیرات متغیرها بر پاسخ طراحی نیز مورد توجه قرار گیرد.

هم‌چنین نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که به دلیل وابستگی پاسخ‌های دینامیکی-آکوستیکی پوشش‌های جاذب صوت زیرسطحی به فرکانس، پاسخ‌های بهینه برای بازه‌های مختلف، نتایج متفاوتی را رقم خواهد زد و امکان دستیابی به پاسخ‌های نزدیک به هم با هندسه‌های مختلف طراحی امکان‌پذیر است. نتایج نشان داد که در حوزه فرکانس پایین (زیر ۱۰ کیلوهرتز)، حفره بهینه، مخروطی و با رأسی نزدیک به سطح ورود موج به پوشش، بدست خواهد آمد. اما برای بازه فرکانس کل (۱-۴۰ کیلوهرتز)، شکل حفره‌ی بهینه بدست آمده، مخروطی اما در جهت برعکس حفره بدست آمده برای بازه فرکانسی زیر ۱۰ کیلوهرتز است. بر این اساس در پروسه طراحی این پوشش‌ها بایستی به دقت، بازه مطلوب تعیین شده و بر اساس آن بهینه‌سازی انجام گردد. هم‌چنین افزودن یک متغیر به بردار طراحی، امکان دستیابی به پاسخ بهینه‌ی جدیدی را نسبت به طراحی با دو متغیر فراهم نمود و پاسخ آکوستیکی مدل بهینه حالت سه متغیره، برتری‌هایی نسبت به حالت دو متغیره داشت.

۵ - تشکر و قدردانی

در اینجا یاد و خاطره استاد عزیز مرحوم دکتر محمدجواد کتابداری را گرامی داشته و از راهنمایی‌های ایشان در نوشتن این مقاله تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

۶ - مراجع

- [1] Hinders, M.K., Rhodes, B.A. and Fang, T.M., 1995, *Particle loaded composites for acoustic anechoic coatings*, Journal of sound and vibration, **185(2)**, p.219-46.

- [15] Ivansson, S., 2004, *Sound absorption by viscoelastic coatings with periodically distributed cavities*, Swedish Defense Research Agency, Technical Report, ISSN. 1650-1942, p.1-30.
- [16] Meyer, E., Brendel, K. and Tamm, K., 1958, *Pulsation Oscillations of Cavities in Rubber*, Journal of Acoustical Society of America, 30(12), p.1116-1124.
- [17] Gaunaurd, G. C. and Oberall, H., 1978, *Theory of resonant scattering from spherical cavities in elastic and viscoelastic media*, Journal of Acoustical Society of America, 63(6), p.1699-1712.
- [18] Gaunaurd, G. C., Scharnhorst, K. P. and Oberall, H., 1978, *Giant monopole resonances in the scattering of waves from gas-filled spherical cavities and bubbles*, Journal of Acoustical Society of America, 65(3), p.573-594.
- [19] Brill, D., Gaunaurd, G. C. and Oberall, H., 1980, *Resonance theory of elastic shear-wave scattering from spherical fluid obstacles in solids*, Journal of Acoustical Society of America, 67(2), p.414-424.
- [20] Hao, Z., Bi-long, L. and Zheng-tao, S., 2015, *Sound absorption features of double layered structures coated with acoustic absorption layers*, Journal of Vibration and Shock, 34(23), p.31-36.
- [21] Meng, T. and Hong-Xing, H., 2011, *Improved low-frequency performance of a composite sound absorption coating*, Journal of Vibration and Control, 18, p.48-57.
- [22] Jarzynski, J., 1990, *Mechanisms of Sound Attenuation in Materials*, Sound and Vibration Damping with Polymer, Chapter 10, ACS Symposium Series 424, Dallas, Texas.
- [23] Möser, Michael., 2009, *Engineering acoustics*, Nova York (Estados Unidos), Springer Publishing.
- [24] Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R., Coppens, Alan B., Sanders, James V., 2000, *Fundamental of Acoustics*, John Wiley & Sons, ISBN: 0471847895.
- [25] S.H. Sohrabi, A. Karimi, M. Ketabdari, 2021, "Optimization of Anti-Echo Coatings with Conical and Cylindrical Cavities Using Genetic Algorithm and Surrogate Model Based on Artificial Neural Network," 29th Annual International Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineers and the 8th Conference on Thermal Power Plants Industry, Tehran, Iran (in Persian).
- [26] S.H. Sohrabi, 2019, "Investigation of the Effect of Cavity Shape on the Acoustic Response of Low-Reflection Underwater Coatings," Ph.D. Dissertation, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (in Persian).