



بررسی و بهینه‌سازی تأثیرات هندسه موانع صوتی جهت کنترل نویز فرودگاه

روح الله طالبی توتی^{1*}، اکبر اشراقی²، منصور ترابی³، محمدرضا غیبی⁴

- 1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 - 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوا فضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 - 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
 - 4- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- * تهران، صندوق پستی 16844، rtalebi@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 بهمن 1393
پذیرش: 20 فروردین 1394
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1394
کلید واژگان:

دیواره‌های صوتی
روش المان مرزی
افت جاگذاری
شبکه عصبی
الگوریتم ژنتیک

عوامل مختلفی مانند جنس، ارتفاع، ضخامت، ملاحظات نصب و شکل رأس دیواره‌ها بر بازدهی دیواره‌های صوتی در کاهش نویز فرودگاه تأثیر دارند. هدف از این مقاله، بهبود تأثیر شکل رأس دیواره‌ها بر میزان کاهش نویز اطراف فرودگاه و یافتن بهبود یافته‌ترین شکل رأس دیواره است. برای بررسی کارایی دیواره صوتی، از روش المان مرزی استفاده شده است. بدین صورت که با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی، دیواره‌های صوتی با اندازه‌ها و ابعاد مختلف در آن‌ها طراحی شده و پس از مش‌بندی آن‌ها، از روش المان محدود، برای تحلیل ارتعاشی مدل‌ها استفاده شده است. با استفاده از تحلیل ارتعاشی انجام شده، فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای سازه دیواره به دست می‌آید. سپس با مدل کردن منبع نویز و گیرنده‌های صوتی میزان افت جاگذاری آن‌ها محاسبه شده است. به دلیل این که تعداد حالات رأس دیواره Y شکل بسیار متنوع بوده و بررسی تمام حالات چه از لحاظ زمان و چه از لحاظ هزینه به صرفه نیست، از روش طراحی آزمایشات تاگوچی جهت تقلیل حالات موجود استفاده شده است. سپس رابطه حاکم بر نتایج آزمون‌های گرفته شده با درصد خوبی به کمک شبکه عصبی تشخیص داده شده و در نهایت از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی و به دست آوردن ایده‌آل‌ترین شکل رأس استفاده شده است.

Investigation and improvement in effectiveness of sound wall geometry to decrease airport noise

Rouhollah Talebitooti^{1*}, Akbar Eshraghi², Mansour Torabi³, Mohammad Reza Gheibi⁴

1,2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

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

*P.O.B. 16844 Tehran, Iran, rtalebi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 February 2015
Accepted 05 April 2015
Available Online 29 April 2015

Keywords:
Sound's walls
boundary element method
insertion loss
neural network
genetic algorithms

ABSTRACT

The different factors such as material, height, thickness, installation status, and geometry of the wall's head can influence the efficiency of the sound walls to decrease the noise pollution of the airports. This paper is presented to improve the effective geometry of the wall's head as well as finding the best wall's head to maximize the noise reduction in an airport. To investigate the performance of the sound wall, the boundary element method is used. Then, in order to model the sound walls with different dimensions and sizes, PATRAN software is utilized. In the next step, the models are meshed and finite element method is used to analyze the vibrations of the models. Consequently, the natural frequencies and the mode shapes of sound's walls are predicted and the insertion loss via modeling of sources of noise and sound receivers is calculated. The design method of Taguchi experiments is applied to decrease the total number of the different models of Y shape geometries. Accordingly, the governing equations with approximate fit over the test cases are determined by neural network. Finally, the genetic algorithm is used to obtain the ideal head's wall.

1- مقدمه

جریان هوا از روی بدنه و بال‌ها از جمله عوامل اصلی است. اگر فردی در نزدیکی فرودگاه یا در مسیر پرواز هواپیما زندگی کند، نویز حاصل از پرواز او را بسیار آزار خواهد داد.

حدود سه دهه است که توجه بیشتری به منابع سر و صدای هواپیماها و شیوه‌های کنترل آن شده است. از آنجایی که امروزه عموم مصرف‌کنندگان نسبت به سیستم‌های تولیدکننده نویز، بسیار حساس شده‌اند و با افزایش

متأسفانه گسترش شهرنشینی و تصرف زمین‌های اطراف فرودگاه‌ها، عدم توجه به رعایت فاصله حریم در ساخت منازل مسکونی مجاور فرودگاه‌ها و پیشرفت قابل توجه هواپیماهای جت، علی‌رغم محاسن متعدد آن‌ها، موجبات ناراحتی و آزدگی مردم این مناطق را فراهم آورده است. عوامل بسیاری سبب ایجاد نویز در پرواز هواپیما می‌شود که در این میان، موتورهای هواپیما و عبور

Please cite this article using:

R. Talebitooti, A. Eshraghi, M. Torabi, M. R. Gheibi, Investigation and improvement in effectiveness of sound wall geometry to decrease airport noise, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 269-277, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تعداد زیادی گیرنده صوتی که به کمک همان الگو، مدل‌سازی شده‌اند را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نکته‌ای که در این پژوهش باید مد نظر قرار گیرد این است که برای مدل‌سازی گیرنده صوتی و بررسی تأثیر دیواره بر آن، از چند گیرنده صوتی استفاده شده و تأثیر دیوار بر این گیرنده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

آلدام و اگان در سال 2011 [8] به بررسی تأثیرات ضخامت رأس دیواره‌های T شکل و همچنین تأثیر نسبت ضخامت مواد جاذب به‌کاررفته در رأس دیواره‌ها به ضخامت کلی رأس آن‌ها پرداختند. ایشان تلاش در به‌دست‌آوردن مدلی برای پیش‌بینی تأثیر میزان ماده جاذب به‌کارگرفته‌شده در رأس دیواره، بر کارایی دیواره‌ها داشتند. همچنین در این پژوهش به بررسی تأثیر ارتفاع دیواره‌های T شکل بر کارایی آن‌ها پرداخته شده است و در این حالت نیز سعی در به‌دست‌آوردن مدلی برای پیش‌بینی تأثیر ارتفاع بر کارایی دیواره‌ها داشته‌اند. اساس کار در این پژوهش استفاده از روش تحلیلی المان مرزی بوده است.

گروپسا و همکارانش [9] در سال 2012، در پژوهشی به بررسی تأثیر شکل رأس دیواره بر کارایی آن‌ها پرداخته‌اند. در این مطالعه چند شکل ساده بر مبنای روش المان مرزی مورد بررسی قرار گرفته است و در این پژوهش برای مدل‌سازی نویز فرودگاه از استاندارد اروپایی کلاس یک- سوم اکتاو باند [10] استفاده شده است.

2- تشریح مسئله

با نصب دیواره مانع در مسیر انتشار صوت، گیرنده از سه طریق صوت منتشرشده از منبع را دریافت خواهد کرد. دسته اول اصواتی که فرکانس‌های پایین دارند و از بالای رأس و لبه‌های دیواره صوتی به سمت گیرنده شکست پیدا می‌کنند. دسته دوم اصواتی هستند که دارای فرکانس‌های بالا هستند و از طریق شکاف یا روزنه‌های موجود در دیواره مسیر خود را به سمت گیرنده پیدا می‌کنند، اما دسته سوم، صوت‌هایی با فرکانس‌های پایین هستند که به واسطه انتقال از طریق دیواره به گیرنده می‌رسند. میزان صوت منتقل‌شده در این حالت بر اساس خصوصیات فیزیکی و جنس مواد دیواره تعیین می‌شود، به نحوی که برای کاهش انتقال صوت در فرکانس‌های پایین باید از موادی با کمینه چگالی سطحی 10kg/m^2 استفاده کرد.

به بیان ساده‌تر، در صورت برخورد یک موج صوتی به سطح مانع، مقداری از آن پس از برخورد به سطح، بازگشت شده و به سمت منبع منعکس می‌شود، بخشی از آن جذب دیوار شده و بخشی نیز از آن عبور کرده و به دریافت‌کننده‌ای که در پشت مانع قرار گرفته منتقل می‌شود. البته بسته به جنس و خواص فیزیکی سطح این مقادیر انعکاس، جذب و انتقال صوت در دیواره‌ها متفاوت خواهد بود. این رفتار در شکل 1 نمایش داده شده است.

هدف از این مقاله، یافتن پارامترهای بهینه برای زوایا و طول یال‌های دیواره‌های مانع صوت در فرودگاه‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک است. برای این منظور مدل دیواره طراحی شده بر اساس دیواره‌های طراحی‌شده در فرودگاه‌های مشهور دنیا، به‌صورت Y شکل در نظر گرفته شده است. ارتفاع کلی دیواره مقداری ثابت و برابر 12 متر لحاظ شده است. همچنین ضخامت دیواره و ضخامت رأس آن مقداری ثابت و برابر 35 سانتی‌متر و از جنس بتن در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب اندازه طول هر رأس نیز بین 2 تا 4 متر است. شکل 2 شماتیکی از طراحی بالا را نشان می‌دهد. همچنین زاویه هر رأس بین صفر تا 90 درجه قابل تغییر است.

آگاهی مشتریان نسبت به سیستم‌های تولیدکننده نویز و قوانین سخت‌گیرانه نویز، آسودگی آکوستیکی¹، به عنوان هدف اصلی مورد توجه در طراحی و ساخت سیستم‌های مکانیکی قرار گرفته است. گسترش شهرنشینی و نزدیکی شهرها به فرودگاه‌ها و افزایش تقاضا برای مسافرت‌ها و حمل و نقل‌های هوایی، سبب شده است که فرودگاه‌ها سهم بزرگی از سر و صدا را در زندگی شهری داشته باشند؛ بنابراین مطالعات گسترده‌ای جهت کنترل نویز فرودگاه‌ها صورت گرفته است [1].

ایجاد و ساخت دیواره‌های صوتی از جمله اقداماتی است که سازمان قوانین هوانوردی، فرودگاه‌های نزدیک به شهرها را به استفاده از آن توصیه کرده است. هم‌اکنون تعدادی از فرودگاه‌های مشهور دنیا، مانند فرودگاه فرانکفورت آلمان، فرودگاه شیپول آمستردام هلند و فرودگاه بروکسل بلژیک از آن استفاده می‌کند.

در این مقاله به بررسی شکل رأس دیواره و انتخاب بهینه‌ترین شکل رأس دیواره، به‌منظور داشتن بیشترین افت جاگذاری، پرداخته شده است.

پیشینه پژوهش در زمینه تأثیر هندسه دیواره صوتی جهت بیشترین کاهش نویز ایجاد شده، به بررسی‌های می و عثمان در سال 1980 [2] و هادرسال در سال 1991 [3] برمی‌گردد. ایشان در پژوهش‌هایی جداگانه به بررسی تأثیر شکل رأس دیواره بر کارایی آن‌ها پرداخته‌اند و هر دو به این نتیجه رسیده‌اند که در شرایط یکسان از قبیل ارتفاع، ضخامت، جنس و طول رأس دیواره‌ها، دیواره‌های T شکل دارای بیشترین کارایی است. نکته جالب در مورد دو پژوهش بالا این است که هر دو از یک روش تقریباً یکسان استفاده کرده‌اند و تنها فرضیات ساده‌کننده آن‌ها در حل تحلیلی کمی با هم متفاوت بوده است. با این وجود نتایج مشابهی حاصل شده است. لازم به یاد است که در این پژوهش تنها یک حالت کلی برای هر کدام از شکل‌ها در نظر گرفته‌شده و برای نمونه از بررسی تأثیر طول رأس بر کارایی این دیواره‌ها صرف‌نظر شده است.

فوجیوارا و فوروتا در سال 1991 [4] در پژوهشی با استفاده از روش المان مرزی، تأثیر جنس رأس دیواره‌ها بر کارایی آن‌ها را بررسی کرده و بیشتر به بررسی تأثیر به‌کارگیری مواد جاذب صوت در رأس دیواره‌ها پرداخته‌اند.

بالاک و همکارانش در سال 2006 [5] در پژوهشی به بررسی تأثیر شکل‌ها و ناهمواری‌های مختلف ایجادشده در رأس دیواره T شکل پرداخته و این دیواره‌ها را در دو حالت بدون مواد انعکاسی و با وجود مواد انعکاسی در رأس آن‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده‌اند. اساس مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها بر روش المان مرزی دو بعدی استوار است. آن‌ها فقط به تأثیر ناهمواری‌های مختلف ایجاد شده بر رأس دیواره‌ها پرداخته و از بررسی تأثیر موارد مختلفی مانند طول رأس، ضخامت و زاویه رأس صرف‌نظر کرده‌اند.

آکوبو و یاماموتو در سال 2007 [6] در مطالعه ایشان به بررسی تأثیر مکان قرارگیری منبع نویز و گیرنده‌های صوتی پرداخته‌اند و با جابه‌جا کردن محل گیرنده‌های صوتی و همچنین جابه‌جایی محل منبع نویز در مدل‌سازی، تلاش در به‌دست‌آوردن بهترین موقعیت منبع نویز و گیرنده که همان شرایط طراحی است، داشته‌اند. ایشان در این پژوهش از روش المان مرزی استفاده کرده‌اند.

ونکاس و گرابلیوسکاس [7] در سال 2011، به کمک مدل‌سازی‌ای به نام کادنا² به بررسی تأثیر زاویه رأس دیواره L شکل پرداخته‌اند و تأثیر نویز بر

1- Acoustic comfort
2- CadnaA

همچنین تمام فرکانس‌های محدوده یک- سوم اکتاو بالای فرکانس 1,000 هرتز را نیز می‌توان از معادله (2) استخراج کرد.

$$f_{n+1} = \frac{f_n}{2^{1/3}} \quad (2)$$

لازم به یاد است که نسبت پهنای باند هر طیف، بر فرکانس مرکزی آن طیف نسبت ثابتی دارد و برابر 23/2 درصد است.

$$BW = 100 \left[\frac{f_n^{\text{high}} - f_n^{\text{low}}}{f_n^{\text{ctr}}} \right] = 23.2\% \quad (3)$$

3- فرمولاسیون و محاسبه افت جای گذاری برای دیواره

اختلال در فشار، P ، تابعی از مکان، r ، و زمان، t ، بوده و در معادله موج صدق می‌کند [14].

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

در این رابطه، $c = 340 \text{ m/s}$.

حرکت موج، حرکتی غیر چرخشی است که سرعت، v ، گرادیان میدان اسکالر، Φ ، و چگالی سیال، ρ ، رابطه (4) را ارضا می‌کند. این پارامترها طبق معادله (5) به یکدیگر وابسته هستند.

$$P = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$P = c^2 \rho$$

$$v = \nabla \Phi \quad (5)$$

پتانسیل فشار و سرعت به وسیله رابطه (6) قابل محاسبه است.

$$P(r, t) = \text{Re}(p(r)e^{-i\omega t})$$

$$\Phi(r, t) = \text{Re}(\phi(r)e^{-i\omega t}) \quad (6)$$

در رابطه (6)، p ، به عنوان فشار آکوستیکی و ϕ ، به عنوان پتانسیل آکوستیکی، به تنهایی توابعی از موقعیت است و بر اساس رابطه (7) با یکدیگر ارتباط دارند.

$$p = i\omega\rho_0\phi \quad (7)$$

اگر p معادله هلمهولتز (رابطه (8)) را ارضا کند، رابطه (4) و روابط حاصل از معادله (5) نیز ارضا خواهند شد.

$$(\nabla^2 + k^2)p = 0 \quad (8)$$

در این رابطه، k عدد موج است و به کمک رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (9)$$

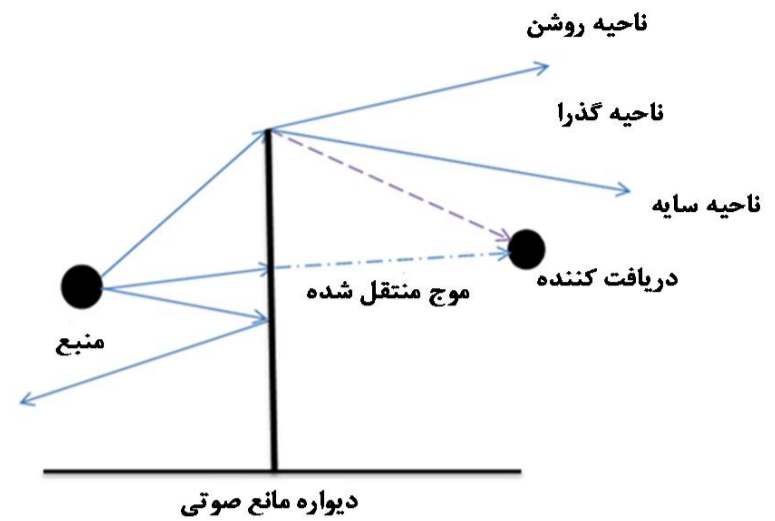
اگر سیال به وسیله یک دیواره صلب محدود شده باشد، شرایط مرزی مناسب به صورت رابطه (10) است.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

در معادله (10) عبارت $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ ، میزان تغییرات در جهت عمود بر دیواره را، به سمت خارج از سیال و داخل سطح دیواره است، مشخص می‌سازد.

به طور معمول سرعت عمودی غیر صفر است و به صورت رابطه (11) تعریف می‌شود.

$$Z_s = \frac{p}{\frac{\partial \phi}{\partial n}} \quad (11)$$

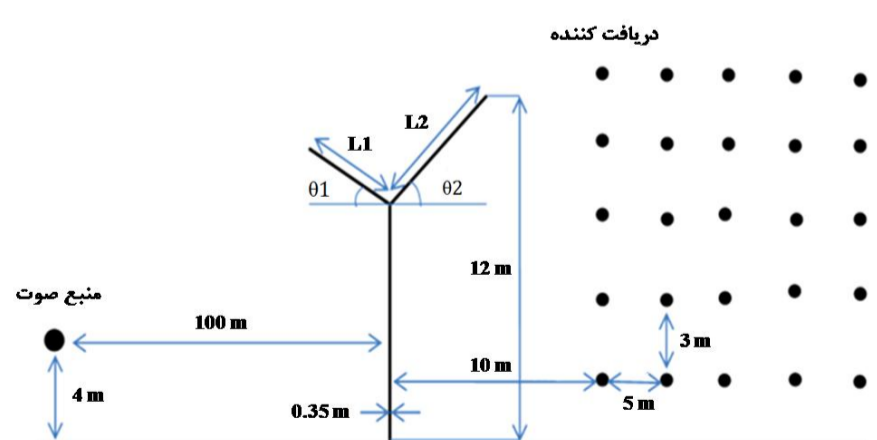


شکل 1 رفتار موج صوتی در برخورد با دیواره صوتی

در شکل 1، ناحیه روشن، منطقه‌ای است که موج صوتی بدون تفرق¹ به آن جا می‌رسد. ناحیه گذرا، منطقه بین دو ناحیه روشن و سایه است. ناحیه سایه نیز به ناحیه پشت مانعی گفته می‌شود که در مسیر یک موج صوتی قرار گرفته باشد. شدت صوت در این ناحیه با تفرق و تداخل امواج صوتی حول مانع تعیین می‌شود. طول این ناحیه به ارتفاع مانع وابسته است.

نویز مدل شده بر اساس استاندارد انجمن آکوستیک کشور ژاپن² [11] در فاصله 100 متری از دیواره و در ارتفاع 4 متری از سطح زمین مدل شده است. فاصله 4 متری با احتساب فاصله موتور هواپیما که تولیدکننده بیشترین نویز در سطح فرودگاه، مورد نظر قرار گرفته است [12]. گیرنده‌های صوتی نیز که تعداد آن‌ها 25 عدد است، در سمت مقابل دیواره و در فاصله افقی 5، 10، 15، 20 و 25 متری از دیواره و در ارتفاع‌های 3، 6، 9، 12 و 15 متری از سطح زمین قرار گرفته‌اند [13]. برای محاسبه افت جاگذاری دیواره، ابتدا بایستی توان صوتی دریافتی گیرنده‌ها محاسبه شوند، سپس متوسط توان صوتی دریافتی آن‌ها، در بازه‌هایی مشخص از فرکانس، بر اساس با استاندارد طیف یک- سوم اکتاو³ محاسبه شود [7]. لازم به یاد است که محدوده شنوایی انسان (20 هرتز تا 20000 هرتز) را می‌توان در 31 طیف تقسیم کرد که به این تقسیم، باند یک- سوم اکتاو می‌گویند. اگر فرکانس مرکزی نوزدهمین طیف یک- سوم باند ($f_{19}^{\text{ctr}} = 1000 \text{ Hz}$) به عنوان فرکانس مرکزی کل باند در نظر گرفته شود، آن‌گاه تمام فرکانس‌های مرکزی محدوده یک- سوم اکتاو زیر 1000 هرتز را می‌توان با معادله (1) تعریف کرد.

$$f_{n-1} = \frac{f_n}{2^{1/3}} \quad (1)$$



شکل 2 شماتیک موقعیت و هندسه منبع نویز، دریافت کننده نویز و دیواره صوتی

1- Diffraction
2- Acoustic Society of Japan
3- 1/3 Octave Band

طول یال‌های دیواره بین 2 تا 4 متر و زوایای آن‌ها بین صفر تا 90 درجه متغیر در نظر گرفته شده است. فاصله 100 متری منبع نویز از دیواره مانع صوت، برای حفظ حریم خط پرواز است [15]. همچنین ضخامت دیواره‌ها و رأس آن‌ها مقداری ثابت و برابر با 35 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. پس از مدل‌سازی و مش‌بندی مدل‌ها، برای محاسبه فرکانس طبیعی و شکل مودهای دیواره‌ها که همگی از جنس بتن هستند، از رابط نرم‌افزاری «نسترن⁴» استفاده شده است.

در ادامه مدل‌های ساخته‌شده به همراه فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهایشان وارد نرم‌افزار المان مرزی می‌شود. در نهایت با مدل‌سازی نویز فرودگاه و 25 گیرنده صوتی یاد شده، میزان افت جای‌گذاری دیواره‌های مانع صوت، یک به یک، اندازه‌گیری می‌شود.

5- طراحی آزمایشات به روش تاگوچی

روش تاگوچی در طراحی شرایط آزمایش، تعداد آزمایشات و زمان کلی اجرای آن‌ها را کاهش می‌دهد. نخستین مرحله در بهبود کیفیت، رسیدن به حالتی است که توزیع جمعیت حدالامکان نزدیک به مقدار مشخصه باشد. بدین‌منظور تاگوچی آزمایشات را با استفاده از جداولی معروف به «آرایه‌های اورتوگونال⁵» طراحی کرده است [16]. آرایه‌های اورتوگونال فرآیند طراحی آزمایشات را سهولت می‌بخشند. طراحی یک آزمایش، شامل انتخاب مناسب‌ترین آرایه اورتوگونال، تعیین فاکتورها با ستون‌های متناسب و در نهایت توضیح ترکیباتی از آزمایشات مجزا مرسوم به شرایط آزمایش است.

براین اساس که پارامترهای طول یال‌ها و زوایایشان با هم تداخلی ندارند و پژوهش به دنبال پوشش بهتر و دستیابی به نتایج بهتر است، فاکتورهای آزمایش در 10 سطح مورد بررسی قرار داده شده‌اند. برای این‌که بتوان کل آزمایشات مربوط به این 4 پارامتر (دو پارامتر زاویه یال‌ها و 2 پارامتر طول یال‌ها) را در 10 سطح بررسی کرد، حدود 10,000 آزمایش باید انجام شود. برای طراحی آزمایشات در 10 سطح به روش تاگوچی و با توجه به این‌که تعداد 4 پارامتر جهت بهبود مورد نظر است، تعداد 100 عدد آزمایش مورد نیاز است؛ بنابراین با توجه به تقسیم در 10 سطح برمبنای روش تاگوچی، اندازه طول هر رأس بین 2 تا 4 متر، با گام 20 سانتی‌متری در نظر گرفته شده است. پارامتر زاویه هر رأس نیز بین صفر تا 90 درجه با گام 10 درجه متغیر است. این تقسیم‌بندی اشراف بسیار خوبی بر حوزه تحت بررسی دارد که می‌توان در صفحه نیلسون آن را مشاهده کرد [16]. برای نمونه تعداد 10 آزمایش با مختصات زاویه یال جلو، صفردرجه، زاویه یال عقب، با فواصل 10 درجه‌ای و طول یال‌ها با فواصل 20 سانتی‌متری در 10 سطح در جدول 1 نمایش داده شده است. در این جدول، زوایا برحسب درجه و طول‌ها برحسب متر هستند.

6- مدل‌سازی د-یواره

در این بخش، نخست به صحنه‌گذاری نتایج نرم‌افزار سیس نویز به کمک حل عددی پرداخته شده است.

برای این منظور، از دیواره صوتی با هندسه ساده استفاده شده است و نتیجه در شکل 3 ارائه شده است. با توجه به شکل 3 مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج عددی و نرم‌افزاری وجود دارد.

در این رابطه، Z_s امپدانس مخصوص سطح نامیده می‌شود. در حالت کلی نیز Z_s به ارتعاش آکوستیکی میدان در تمامی محیط انتشار وابسته است. با جایگذاری رابطه (7) در رابطه (11)، رابطه (12) حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = ik\beta p$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik\beta \phi \quad (12)$$

که در این رابطه، β برآساس رابطه (13) قابل محاسبه است.

$$\beta = \frac{\rho_s c}{Z_s} \quad (13)$$

زمانی که محیط انتشار محدود شده باشد، معادله هلمهولتز با شرایط مرزی امپدانس جواب یکتایی خواهد داشت. در صورتی که سیال در محیط بی‌نهایت توسعه یابد، برای اطمینان از یکتایی جواب به شرط مرزی دیگری نیاز است. برای این منظور شرط دوبرعدی تابش سامرفیلد¹ مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک حل رابطه هلمهولتز (رابطه (8)) به صورت رابطه (14) است.

$$p(r) = G_f(r, r_0) = -\frac{e^{ik|r-r_0|}}{4\pi|r-r_0|} \quad (14)$$

که رابطه (8) را در هر نقطه‌ای به جز $r \neq r_0$ ارضا می‌کند. رابطه (14) فشار آکوستیکی تولیدشده در نقطه r به دلیل وجود منبع در نقطه r_0 را نمایش می‌دهد. روشن است که رابطه (14)، رابطه (15) را ارضا می‌کند.

$$(\nabla^2 + k^2)G_f(r, r_0) = \delta(r - r_0) \quad (15)$$

که در این معادله، δ تابع دلتای دیراک است.

مجذور مربعات فشار صوت از رابطه (16) اصل می‌شود.

$$(P^2)_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt \quad (16)$$

در این معادله، T متوسط دوره تناوب است. همچنین سطح فشار صوت حقیقی در واحد به صورت رابطه (17) محاسبه می‌شود.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{(P^2)_{ave}}{(P_{ref})^2} \right) \quad (17)$$

در رابطه (17)، P_{ref} فشار مرجع بوده و معمولاً مقدار آن $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ است. در نهایت افت جای‌گذاری برحسب dB ، برآساس رابطه (18) قابل محاسبه است.

$$IL = SPL_{\beta c} - SPL \quad (18)$$

در این رابطه، $SPL_{\beta c}$ سطح فشار صوت در زمین مسطح است [12].

4- مدل‌سازی دیواره

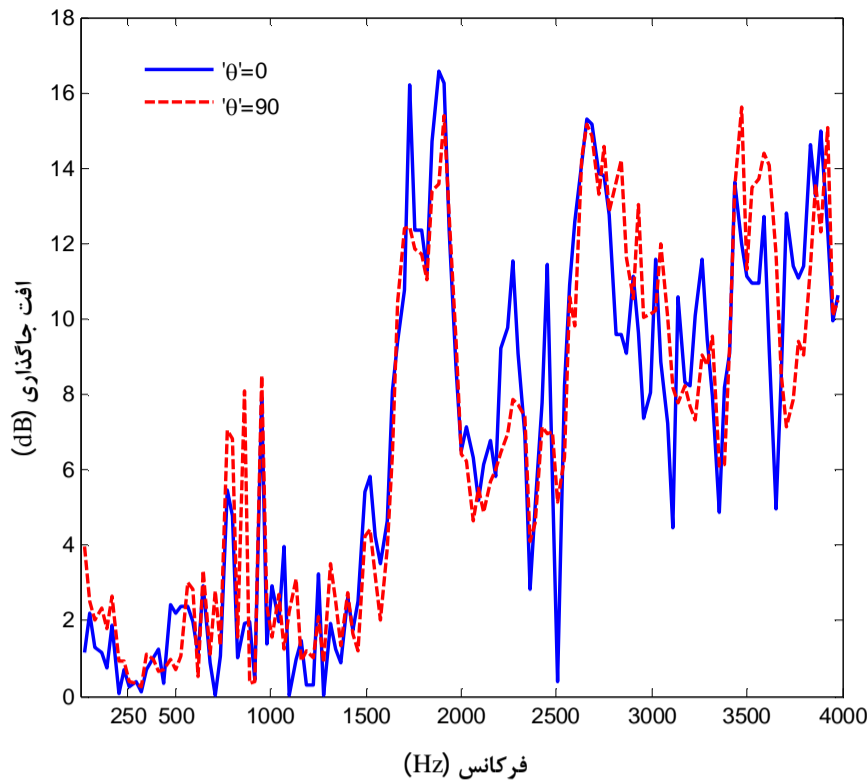
برای انجام مدل‌سازی، از نرم‌افزار المان محدود «پترن²» و المان مرزی «سیس نویز³» استفاده شده است. نخست به‌وسیله نرم‌افزار المان محدود، مدل‌های مورد بررسی، طراحی شده‌اند. پارامترهای مهندسی مختلفی مانند ضخامت رأس‌ها، طول هر رأس، زاویه هر رأس و ارتفاع دیواره بر کارایی آن‌ها تأثیر گذارند. دیواره صوتی ۷ شکل طراحی شده، با ارتفاع 12 متر در نظر گرفته می‌شود که این ارتفاع با توجه به بررسی دیواره‌های فرودگاه‌های معتبر، مانند فرودگاه اوکلند کالیفرنیا و فرودگاه فرانکفورت آلمان انتخاب شده است.

1- Two dimensional Sommerfield radiation condition

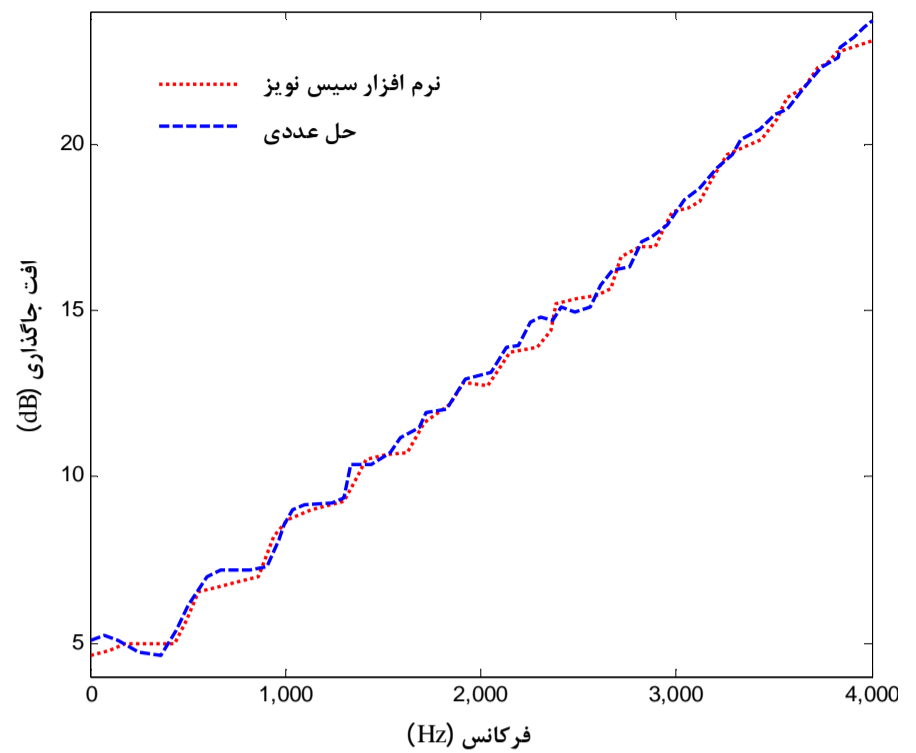
2- Msc.Patran

3- SYSNOISE

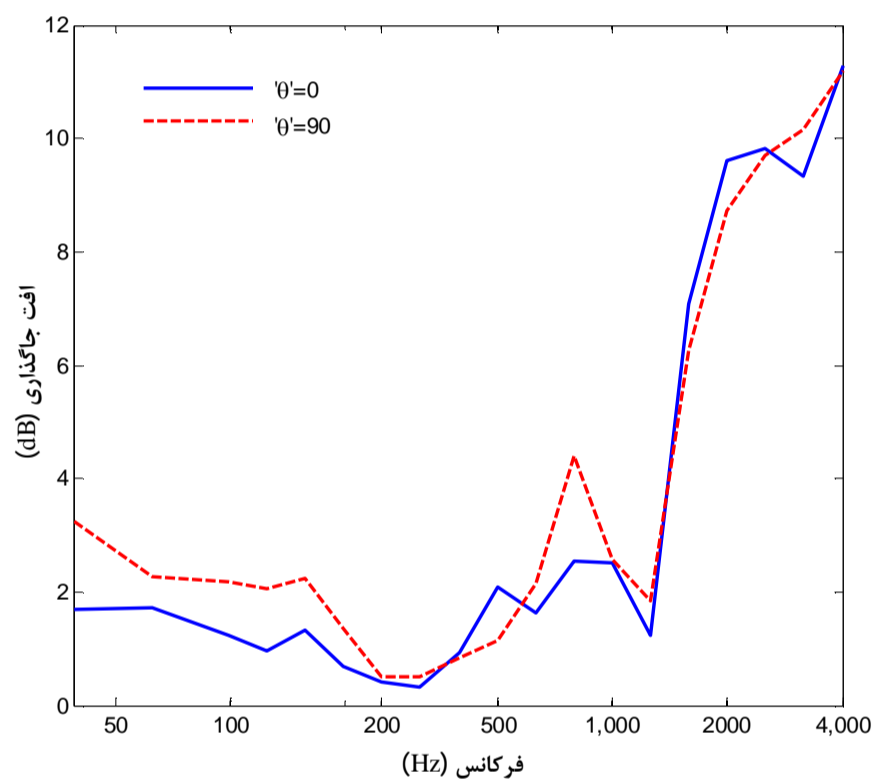
4- Msc.Nastran
5- Orthogonal Array



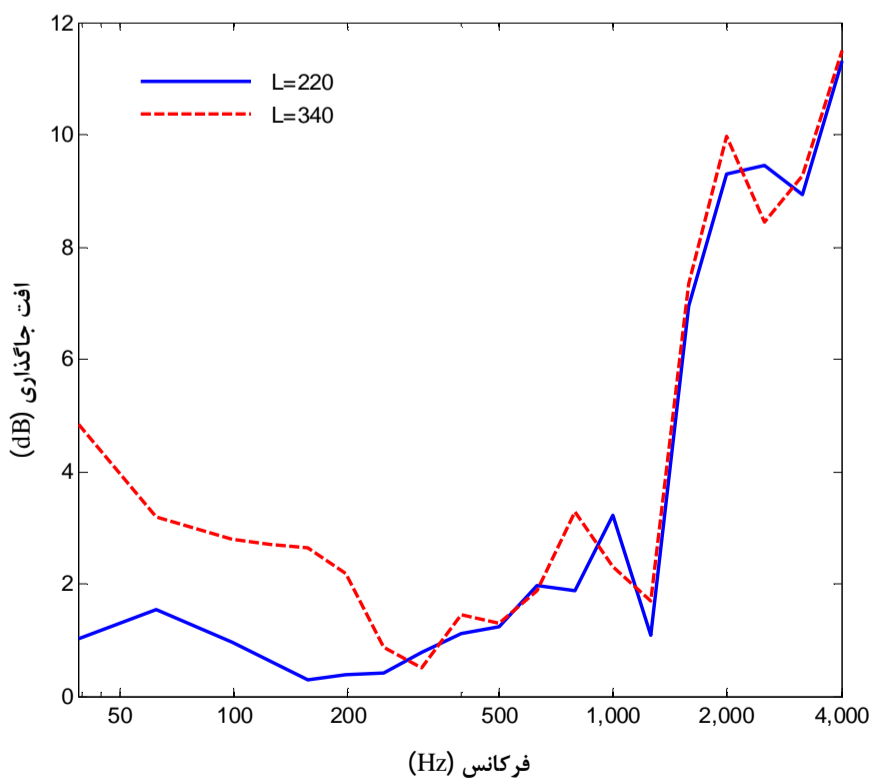
شکل 4 نمودار افت جای‌گذاری برای زوایای رأس مختلف



شکل 3 نمودار افت جای‌گذاری برای دیواره ساده



شکل 5 نمودار افت جای‌گذاری یک- سوم اکتاو برای زوایای رأس مختلف



شکل 6 نمودار افت جای‌گذاری یک- سوم اکتاو برای طول یال‌های مختلف

نتایج حاصل از نرم‌افزار برای دو حالت زاویه صفر و 90 درجه برای رأس جلو، در محدوده فرکانسی صفر تا 4,000 هرتز به صورت شکل 4 نشان داده شده است. لازم به یاد است که طول یال‌ها برابر 3 متر بوده و زاویه رأس عقب صفر درجه است.

برای مقایسه بهتر دو حالت بالا از شکل 5 که نمودار یک- سوم اکتاو زوایای صفر و 90 درجه، استفاده شده است. روند کارایی دیواره در دو حالت بررسی شده کمی با هم تفاوت دارند. با توجه به شکل 5، در فرکانس‌های پایین‌تر از 1,500 هرتز، دیواره با زاویه رأس 90 درجه، کارایی بهتری نسبت به دیواره با زاویه صفر درجه نشان می‌دهد، ولی در ادامه در فرکانس‌های 1,500 تا 2,500 هرتز، دیواره با رأس جلو صفر درجه کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد. در نهایت تا فرکانس 4,000 هرتز، دیواره با زاویه رأس جلو 90 درجه عملکرد بهتری دارد.

همچنین در شکل 6 به بررسی کارایی دیواره‌های Y شکل با طول یال متفاوت و زاویه یکسان 10 درجه پرداخته شده است. شکل 6 نشان می‌دهد که دیواره‌ای که دارای یال بلندتر است در محدوده‌های فرکانسی مختلف دارای افت جای‌گذاری بیشتری است. اگرچه در برخی از فرکانس‌های خاص عملکرد دیواره با طول یال کوچک‌تر بهتر است، ولی در یک طیف فرکانسی مورد بررسی، یالی با طول بلندتر در افزایش افت جای‌گذاری مؤثرتر واقع شده است.

جدول 1 طراحی تعدادی از آزمایشات به روش تاگوچی

| شماره آزمایش | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| زاویه یال جلو | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| زاویه یال عقب | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| طول یال جلو | 2 | 3/2 | 3 | 2/8 | 3/8 | 3/6 | 3/4 | 2/2 | 2/4 | 2/6 |
| طول یال عقب | 2 | 3/4 | 3/6 | 3/8 | 2/2 | 2/6 | 3 | 2/4 | 2/8 | 3/2 |

چندمتغیره که به‌عنوان یک روش استاندارد برای حل مسئله کمینه مربعات برای توابع غیرخطی درآمده است.

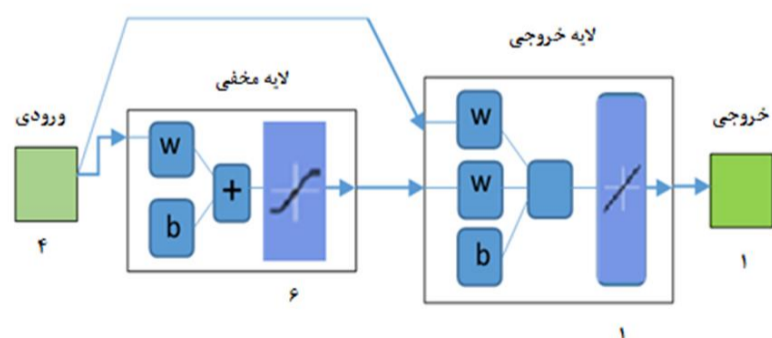
الگوریتم لونیبرگ - مارکوات یک نوع خاص از روش نیوتن است که برای کمینه‌سازی تابعی از مجموع مربعات سایر توابع غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الگوریتم لونیبرگ - مارکوات بین الگوریتم گاوس - نیوتن و روش نزول گرادیانی درونیابی می‌کند. این الگوریتم از الگوریتم گاوس - نیوتن مقاوم‌تر است، چون در بسیاری مواقع، حتی اگر بسیار دورتر از کمینه نهایی آغاز شده باشد، جوابی را پیدا می‌کند. البته برای تابع‌های خوش‌رفتار و پارامترهای آغازین معقول، الگوریتم لونیبرگ - مارکوات کمی کندتر از الگوریتم گاوس - نیوتن عمل می‌کند. الگوریتم یادشده پرفرودارترین الگوریتم برازش خم است و اندکی از کاربران ممکن است به روش‌های دیگر برازش خم نیاز پیدا کنند. از بین کل داده‌های موجود، که 100 داده است، 70 درصد به‌عنوان داده‌های آموزش و 15 درصد داده‌ها به‌عنوان اعتبارسنجی و 15 درصد مابقی برای آزمایش شبکه انتخاب شده‌اند. این انتخاب به‌طور کاملاً تصادفی از بین داده‌ها صورت گرفته است.

7-1- طراحی ساختار شبکه

زمانی که داده‌های موجود پیش‌پردازش گشته و به سه مجموعه آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش تقسیم شده‌اند، ساختار شبکه برای تعیین لایه‌های مخفی و همچنین نرون‌های موجود در هر لایه باید مشخص شود. تعداد نرون‌های لایه ورودی و خروجی به‌طور ساده قابل تعیین است چرا که مشخص‌کننده تعداد پارامترهای ورودی و خروجی هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش کلی برای تعیین تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی وجود ندارد و تنها با سعی و خطا می‌توان به عدد مورد نظر رسید. شبکه‌های مورد استفاده در این بررسی، دارای یک لایه مخفی با تابع تحریک از نوع تانژانت هایپربولیک و لایه خروجی با تابع تحریک خطی است.

شکل 9 ساختار شماتیک شبکه عصبی را با تعداد لایه‌های آن‌ها و با تعداد نرون‌های آن مشخص کرده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود لایه مخفی از 6 نرون تشکیل شده و تابع انتقال آن از نوع سیگموئید² است. این تابع انتقال مقادیر ورودی را در محدوده مثبت و منفی بی‌نهایت دریافت کرده و یک مقدار خروجی بین 0 و 1 تولید می‌کند. لایه خروجی نیز از یک نرون تشکیل شده و تابع انتقال آن از نوع خطی است، یعنی همان مقدار ورودی را به‌عنوان خروجی برمی‌گرداند. در این تحقیق، 4 ورودی که شامل دو زاویه و دو طول یال برای دیواره صوتی است به‌عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شده‌اند و نتیجه مدل‌سازی به‌عنوان خروجی در لایه خروجی اعمال شده است. شبکه عصبی با یادگیری و ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی رفتار سیستم را تعیین و مشخص می‌سازد.



شکل 9 ساختار شبکه عصبی با یک لایه مخفی و 6 نرون

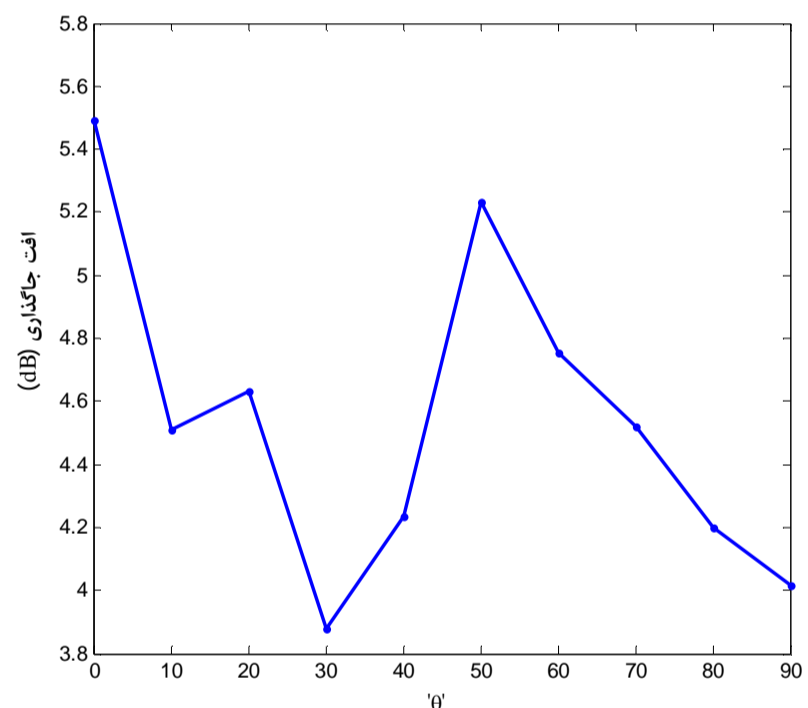
برای تحلیل نتایج حاصل از حالت‌های مختلف زاویه رأس جلوی دیواره، می‌توان بدین‌صورت عمل کرد که از مقدار افت جای‌گذاری (IL)، برای تک تک حالت‌ها در محدوده فرکانسی میانگین‌گیری کرد. در این صورت نتایج به‌صورت شکل 7 بیان می‌شوند.

همان‌گونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود، کارایی دیواره به‌ازای افزایش زاویه رأس جلویی تا یک مقدار خاص (30 درجه) کاهش می‌یابد که این نتیجه می‌تواند به دلیل کاهش تفرق نویز حاصل از رئوس دیواره در این زوایا باشد. پس از این محدوده، با افزایش زاویه رأس تا 50 درجه کارایی دیواره افزایش پیدا می‌کند، که با افزایش زاویه رأس تا 90 درجه دوباره عملکرد دیواره تضعیف می‌شود. زاویه یال عقب در این حالت صفر و طول یال‌ها 3 متر است.

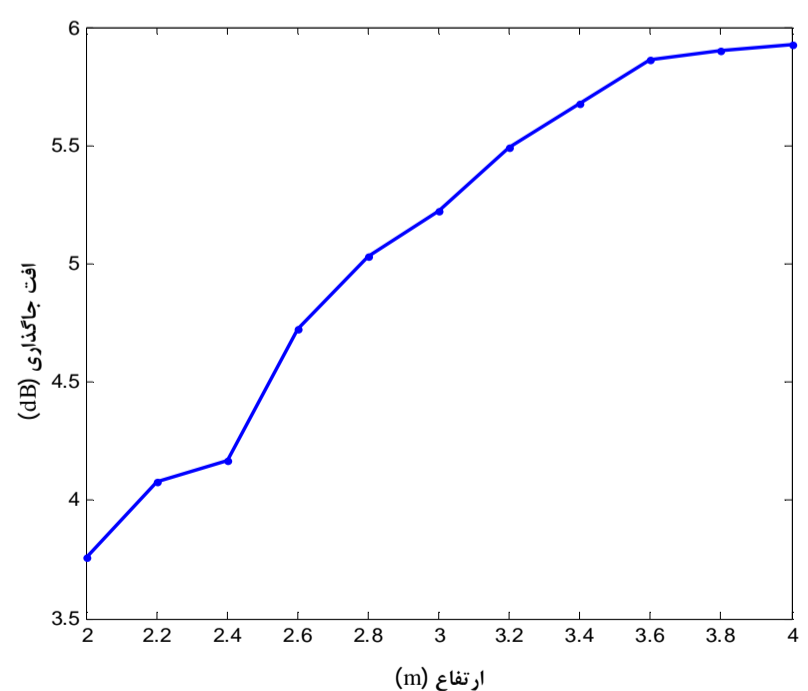
اثر افزایش طول یال جلویی بدون تغییر بقیه پارامترها نیز در شکل 8 مدنظر قرار گرفته شده است. در این بررسی زاویه یال جلو 30 درجه، طول یال عقب 3 متر و زاویه رأس عقب نیز صفر درجه لحاظ شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش طول یال جلو کارایی دیواره نیز بهبود پیدا کرده است.

7- شبکه عصبی مصنوعی بر پایه الگوریتم لونیبرگ - مارکوات¹

الگوریتم لونیبرگ - مارکوات روشی است برای کمینه یک تابع غیرخطی



شکل 7 نمودار مقدار افت جای‌گذاری برای دیواره صوتی با زاویه رأس‌های مختلف



شکل 8 نمودار افزایش افت جای‌گذاری با افزایش طول یال جلو دیواره

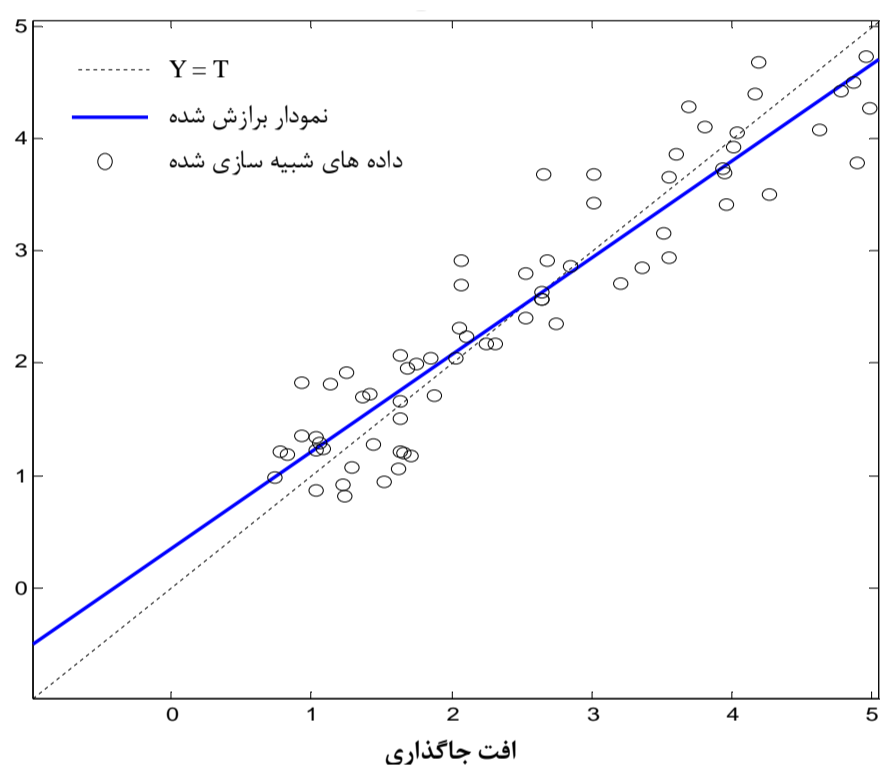
2-7- آموزش شبکه

برای آموزش شبکه یعنی به دست آوردن ضرایب مجهول مربوط به وزن‌ها و بایاس‌های شبکه از الگوریتم لونیگ-مارکوات استفاده می‌شود. این روش در رأستای آموزش شبکه‌های عصبی بسیار مناسب است، زیرا شاخص کارایی در شبکه‌های عصبی خطای میانگین مربعات است. نمودار رگرسیون ارائه شده در شکل 10 بیانگر برازش بسیار خوب شبکه‌های عصبی مصنوعی بر داده‌های ورودی است.

3-7- اعتبارسنجی شبکه

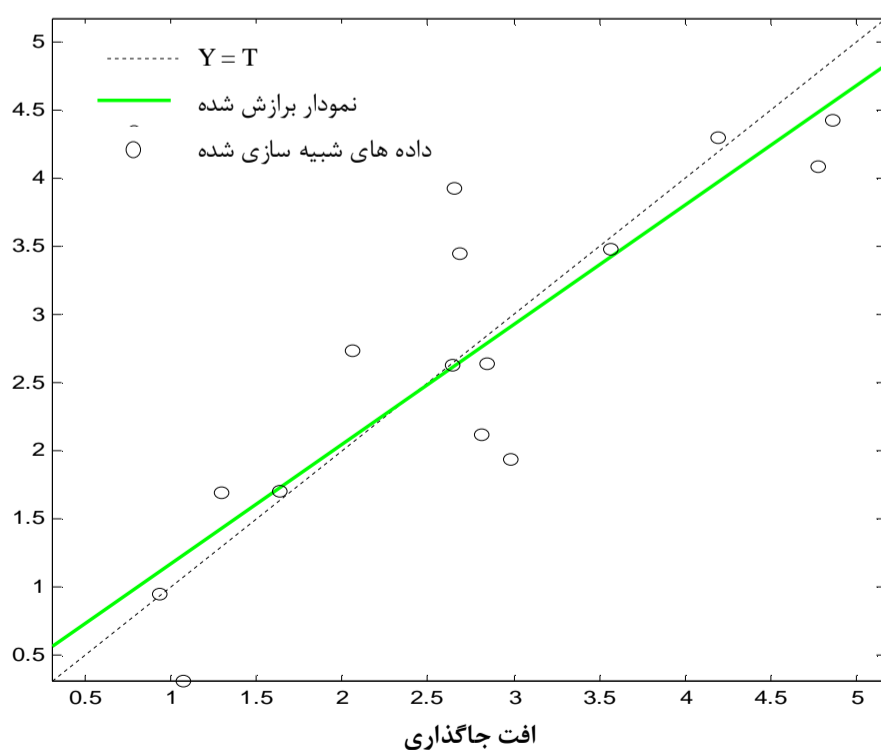
این مجموعه از داده‌ها در هنگام آموزش به شبکه ارائه نمی‌شود و پس از پایان آموزش به شبکه ارائه شده و نتایج تولیدشده توسط شبکه با مقادیر مطلوب واقعی مقایسه شده و تطابق این دو مجموعه به عنوان معیاری برای تعمیم شبکه به کار می‌رود. نمودار رگرسیون ارائه شده در شکل 11 با دقت مطلوبی شبکه عصبی تحت آموزش را تأیید و تصدیق می‌کند.

آموزش: R=0.93744



شکل 10 نمودار رگرسیون حاصل از آموزش شبکه‌های عصبی

صحه گذاری: R=0.86793



شکل 11 نمودار رگرسیون حاصل از اعتبارسنجی شبکه عصبی

4-7- آموزش شبکه

برای جلوگیری از بیش‌برازش¹ تابع هدف در شبکه‌های عصبی بایستی اصلاح شوند، یعنی علاوه بر متوسط مجذور خطای حاصل از داده‌ها، مجذور ضرایب خود شبکه را نیز با ضریب معینی به تابع هدف می‌افزاییم تا از این راه شبکه مجبور شود با روند نرم‌تری² بر داده‌ها برازش یابد؛ بنابراین تابع هدف در شبکه‌های عصبی از رابطه (19) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{تابع ارزش}^3 &= \mu \times mse + (1 - \mu) \times mse \\ &= \mu \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{n} + (1 - \mu) \frac{\sum c_i^2}{n} \end{aligned} \quad (19)$$

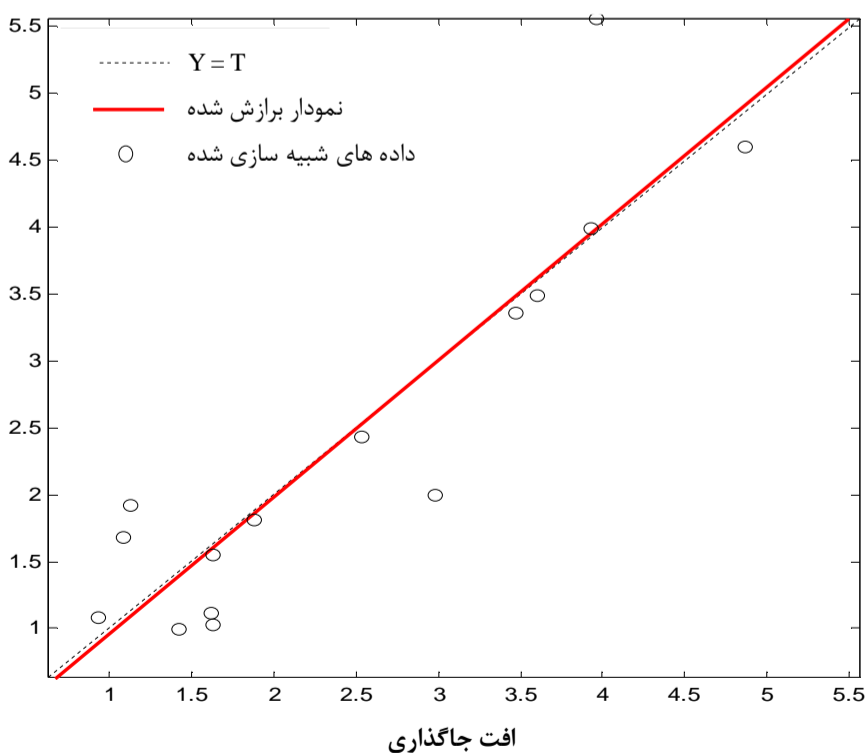
که در آن C_i همان ضریب شبکه، n ، تعداد داده‌های ورودی به شبکه و \bar{n} تعداد ضرایب شبکه است. μ ضریبی برای تنظیم میزان تأثیر ضرایب شبکه در تابع هدف مسئله که تنظیم صحیح آن دارای اهمیت است. از این‌رو از این تکنیک برای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه بر داده‌ها استفاده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل 12 مشاهده می‌شود جواب‌های حاصل از شبکه عصبی با دقت مناسبی به جواب‌های واقعی نزدیک است.

در این پژوهش برای اجرای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک باید نخست پارامترها را مشخص کرد. جمعیت بیشتر سبب می‌شود تا میزان اختلافات موجود در جمعیت ابتدایی افزایش و محاسبات بهتر شود. نخست فرض بر این است که محاسبات بدون محدودیت در زمان انجام شود. راه حل مناسب با فرض جمعیت 100 و تکرار 500، تعیین می‌شود. به صورت طبیعی جامعه کوچک‌تر، تکرار کمتر و زمان محاسبه کمتری را خواهد داشت. محاسبات بدون محدودیت در زمان انجام شده و با فرض جمعیت 100 و تعداد تراکم بیشینه 500 صورت گرفت. همان‌گونه که در شکل 13 نشان داده شده است، تابع برازندگی برای فرکانس 0 تا 4,000 هرتز در تکرار 250، به عدد 8.36 همگرا شده است.

پارامترهای مجهول که از الگوریتم ژنتیک برای بازه فرکانسی صفر تا 4,000 هرتز به دست آمده براساس جدول 2 است.

آزمون: R=0.90064



شکل 12 نمودار رگرسیون حاصل از شبکه عصبی

- 1- Over fitting
- 2- Smooth
- 3- Cost Function

زمان زیادی نیز دارد. برای طراحی دیواره صوتی 4 فاکتور مورد نیاز است. از سوی دیگر برای هر فاکتور حالت‌های بی‌شماری قابل تعریف است که اگر هر فاکتور در 10 سطح بررسی شود، تعداد آزمایشات مورد نیاز 10,000 مورد خواهد بود.

در این پژوهش استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تعیین تعداد آزمایشات، به طوری که حوزه تحت بررسی را پوشش دهد، تعداد آزمایشات مورد نیاز را به شدت کاهش داده است. به گونه‌ای که با طراحی آزمایشات تاگوچی بر مبنای آرایه‌های ارتوگونال، تعداد آزمایشات مورد نیاز به 100 مورد تقلیل می‌یابد.

با بررسی دیواره‌های صوتی با ابعاد و اندازه‌های مختلف به وسیله نرم‌افزار المان مرزی، نتایج زیر حاصل شد.

1- با افزایش طول یال جلو و ثابت نگه داشتن باقی فاکتورها، کارایی دیواره افزایش می‌یابد.

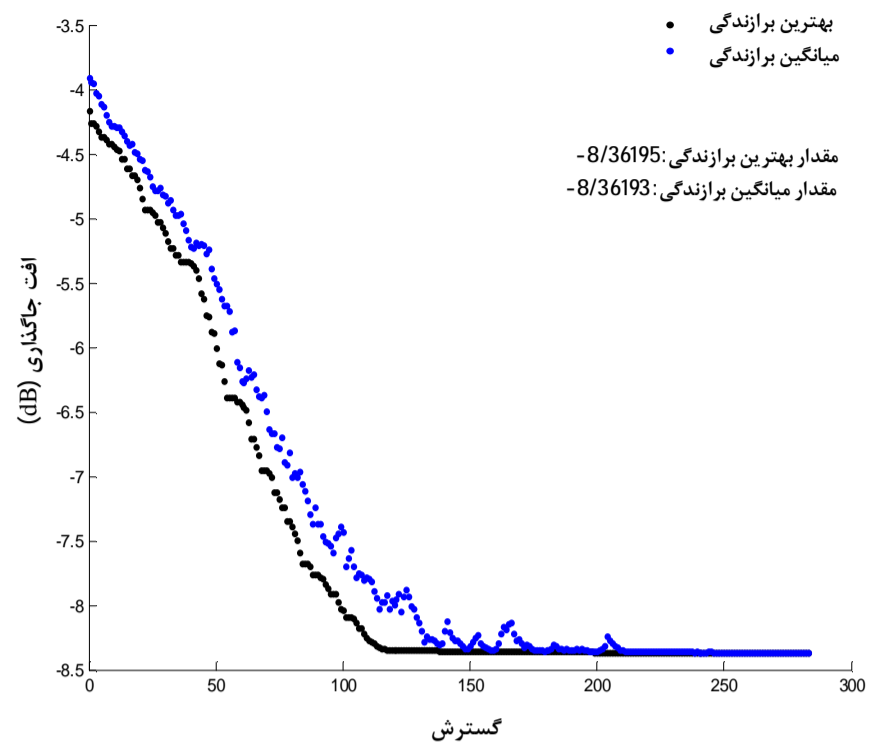
2- با ثابت نگه داشتن طول یال جلو و تغییر زاویه آن، به‌زای افزایش زاویه تا 30 درجه، عملکرد دیواره تضعیف شد که این نتیجه می‌تواند به دلیل کاهش تفرق نویز حاصل از رئوس دیواره در این زوایا باشد.

3- با بررسی افت جای‌گذاری دو دیواره با زوایای رأس جلوی صفر و 90 درجه، نشان داده شد عملکرد دیواره‌ها برای فرکانس‌های مختلف متفاوت است.

جهت تعیین بهترین حالت ممکن از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نسبت به آزمایشات انجام گرفته، حدود 22 درصد بهبود پیدا کرده است و منجر به افزایش بیشتر افت جای‌گذاری دیواره نسبت به حالت پیشین شده است.

9- منابع

- [1] D. Schreckenber, Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *International journal of environmental research and public health*, vol. 7, No. 9, pp. 3382-3405, 2010.
- [2] C. Andrew, D.N. May, M.M. Osman, Highway noise barriers: new shapes. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 71, No. 1, pp. 59-64, 1980.
- [3] D.C. Hothersall, S.N. Chandler-Wilde and M.N. Hajmirzae, Efficiency of single noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 146, No. 2, pp. 303-322, 1991.
- [4] F. Kyoji, F. Naotuki, Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge. *Noise control engineering journal*, vol. 37, 1991.
- [5] M. Baulac, D. Jérôme, J. Philippe, Optimization with genetic algorithm of the acoustic performance of T-Shaped noise barriers with a reactive top surface. *Journal of Applied Acoustic*, vol. 69, No. 4, pp. 332-342, 2006.
- [6] O. Tomonao, Y. Kohei, Procedure for determining the acoustic efficiency of edge-modified noise barriers. *Journal of Applied Acoustic*, vol. 68, No. 7, pp. 797-819 2007.
- [7] Ž. Venckus, R. Grubliauskas, and A. Venslovas, The Research on the Effectiveness of the Inclined Top Type of a Noise Barrier. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 20, pp. 162-155, 2012.
- [8] D. Oldham, A. C. Egan, A parametric investigation of the performance of T-Profiled highway noise barriers and the identification of a potential predictive approach. *Journal of Applied Acoustic*, vol. 72, No. 11, pp. 803-813, 2011.
- [9] S. Grubesa, H. Domitrovic and K. Jambrosic, Performance of traffic noise barriers with varying cross-section. *journal of PROMET-Traffic & Transportation*, vol. 23, pp. 168-161, 2011.
- [10] M. Garai, P. Guidorzi, European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers, Experimental verification and comparison with laboratory data, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, pp. 1067-1054, 2000.
- [11] SAR, G.o.t.H.K., *Guidelines on Design of Noise Barriers Environmental Protection Department and Highways Department January*. Second Issue, 2003.



شکل 13 نمودار بهینه‌سازی در محدوده فرکانسی 0 تا 4,000 هرتز

جدول 2 طول و زاویه بهینه یال‌ها در فرکانس صفر تا 4,000 هرتز

| اندازه فرکانس | طول یال جلو (متر) | زاویه یال جلو (درجه) | طول یال عقب (متر) | زاویه یال عقب (درجه) |
|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| صفر تا 4,000 هرتز | 4/00 | 51/00 | 3/99 | 7/05 |

پس از استخراج پارامترهای دیواره صوتی از الگوریتم ژنتیک، باید مقادیر به‌دست‌آمده را در نرم‌افزار المان مرزی وارد کرده و صحت داده‌های بالا را بررسی کرد. با استفاده از داده‌های بالا در نرم‌افزار، میزان افت جای‌گذاری برابر 7.81 دسی‌بل می‌شود. میانگین درصد خطا در روش الگوریتم ژنتیک نسبت به نتایج نرم‌افزار، 4 درصد است که نتیجه مطلوبی است. در حالی که با استفاده از طراحی آزمایشات به روش تاگوچی در بازه فرکانسی صفر تا 4,000 هرتز، بیشینه افت جای‌گذاری برابر 6.42 می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش طراحی آزمایشات تاگوچی و الگوریتم ژنتیک برداشت می‌شود که میزان افت جای‌گذاری در روش الگوریتم ژنتیک، 22 درصد افزایش یافته است که نتیجه مطلوبی است. نمودار میله‌ای شکل 14 داده‌های حاصل از هر سه روش را مقایسه می‌کند.

8- نتیجه‌گیری

بررسی و آزمایش تمام حالات و اشکال علاوه بر هزینه مالی زیاد، نیاز به صرف



شکل 14 مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف

- [15] R. A. M. Rubhera, T. S. Mufuruki, Noise pollution associated with the operation of the Dar es Salaam International Airport, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 4, No. 2, pp.81-89, 1999.
- [16] K. R. Ranjit, *A primer on the Taguchi method*, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [12] D.G. Hull, *Fundamentals of airplane flight mechanics*. Springer, 2007.
- [13] H. A. Wayne, *A Derivation Of An Empirical Equation For Estimating The Acoustical Shadow Zone Legend Of Roadway Noise Barriers*, B.Sc thesis, University of Central Florida, 1999.
- [14] P. Mc Laughlin, *Outdoor sound propagation and the boundary element method*, M.Sc. dissertation, University of Reading, 2005.