

## بهینه‌سازی جاذب صوتی چندلایه تخت با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای استفاده در اتاق صامت

محسن بروغنی<sup>1</sup>، صدیقه بصیرجعفری<sup>2\*</sup>، صابر صفار<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صدا، دانشگاه صدا و سیما، تهران  
 2- استادیار، فیزیک، دانشگاه صدا و سیما، تهران  
 3- استادیار، مکانیک، دانشگاه صدا و سیما، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 1986916511، basirjafari@iribu.ac.ir

### چکیده

استفاده از جاذب صوتی تخت چندلایه در اتاق صامت نسبت به شیوه‌های متعارف نظیر جاذب‌های گوه‌ای و هرمی شکل، مزایایی از قبیل قیمت مناسب‌تر، نصب آسان‌تر و پیچیدگی ساخت کمتر دارد. بنابراین طراحی بهینه‌ی جاذب چندلایه تخت با کمترین ضخامت مورد توجه است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک چندهدفه به عنوان ابزاری مؤثر در بهینه‌سازی طراحی جاذب متخلخل سه‌لایه تخت استفاده شده است. برای داشتن محدوده گسترده‌تری از مواد متخلخل، ترکیب جاذب متخلخل فومی و فیبری استفاده شده است. به منظور بررسی عملکرد جذب صوتی ساختارهای چندلایه، دو روش تحلیلی و عددی (روش اجزای محدود و بطور خاص نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک) بکارگرفته شده است. در قدم اول، مدل ریاضی صحه‌گذاری شده و نتایج روش اجزای محدود، تحلیلی و تجربی برای دو نمونه ساختار مقایسه شده است که تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. همچنین برای صحه‌گذاری بر عملکرد الگوریتم ژنتیک برنامه‌نویسی شده، نتایج آن برای بهینه‌سازی جاذب متخلخل سه‌لایه تخت با نتایج مقاله‌ای مناسب مقایسه شده است که دقت و کارایی الگوریتم برنامه‌نویسی شده را نشان می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار متخلخل سه‌لایه تخت، با ضخامتی کمتر از یک پنجم طول موج متناظر با بسامد قطع 80 Hz، می‌تواند کیفیتی قابل مقایسه با ساختارهای متعارف گوه‌ای ایجاد نماید.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 03 آذر 1394  
 پذیرش: 11 دی 1394  
 ارائه در سایت: 25 بهمن 1394  
 کلید واژگان:  
 اتاق صامت  
 جاذب متخلخل  
 ساختار چندلایه تخت  
 الگوریتم ژنتیک چندهدفه

## Optimization of flat multi-layer sound absorber by using multi-objective genetic algorithm for application in anechoic chamber

Mohsen Broghany, Sedigheh Basirjafari\*, Saber Saffar

Department of Sound Engineering, IRIB University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 1986916511 Tehran, Iran, basirjafari@iribu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 24 November 2015  
 Accepted 01 January 2016  
 Available Online 14 February 2016

**Keywords:**  
 Anechoic chamber  
 Porous absorber  
 Flat multi-layer structure  
 Multi-objective genetic algorithm

### ABSTRACT

In an anechoic chamber, the flat multi-layer sound absorber is cheaper, easier to install and less complicated in manufacturing than conventional wedge and pyramid absorbers. Therefore, design of the optimum flat multi-layer absorber which has minimum thickness is desirable. In this paper, the genetic algorithm has been employed as an effective optimization tool to determine flat triple layer porous absorber. To obtain a broader range of porous materials, a combination of foam and fiber types is used. Theoretical and numerical method (finite element method specifically COMSOL Multi-physics version 4.4) have been used to investigate the operation of sound absorption corresponding to the multi-layer structure. In the first step, mathematical model is verified and finite element method, theoretical and experimental results are compared together for two different samples of structures which show appropriate matching. Furthermore to verify the operation of programmed genetic algorithm, the results obtained from the optimization of flat triple layer porous absorber are compared with suitable article which show accuracy and efficiency of this method. The optimization results indicate that a flat triple layer porous structure can achieve results comparable with quality wedge type structure with overall thickness slightly smaller than a fifth of a wavelength at 80 Hz cut-off frequency.

### 1- مقدمه

می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های این اتاق، بسامد قطع<sup>1</sup> است و منظور، بسامدی است که بالای آن بسامد، ضریب بازتاب فشار<sup>2</sup>، بیشتر از 10% نشود که این معادل با جذب بیش از 99% انرژی موج است [1]. شیوه متعارف برای طراحی اتاق صامت استفاده از جاذب‌های گوه‌ای و هرمی شکل است که

اتاق صامت به اتاقی گفته می‌شود که هیچ بازتاب صدایی در آن وجود ندارد. از این اتاق برای اندازه‌گیری پاسخ بسامدی دقیق تجهیزات صوتی، کالیبراسیون بلندگوها و میکروفون‌ها و سایر آزمایش‌های میدان آزاد استفاده

1- Cut-off frequency  
 2- Pressure reflection coefficient

Please cite this article using:

M. Broghany, S. Basirjafari, S. Saffar, Optimization of flat multi-layer sound absorber by using multi-objective genetic algorithm for application in anechoic chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 215-222, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تجاری و موجود در استرالیا اتاق صامتی با بسامد قطع 250 Hz طراحی نمودند [18]. همچنین برای طراحی دقیق‌تر به‌ویژه در بسامدهای پایین از مدل بایوت استفاده شده است [19]. از نواقص طراحی‌های انجام شده می‌توان به عدم صحت‌گذاری روابط تحلیلی مورد استفاده برای ساختار چندلایه و جاذب طراحی شده اشاره نمود.

هدف در این مقاله، طراحی جاذب سه‌لایه تخت برای رسیدن به بسامد قطع 80 Hz است و بدین منظور از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای ارائه‌ی ساختاری بهینه با ضخامت کلی کمتر از 100 cm (کمتر از یک چهارم طول موج بسامد قطع 80 Hz) استفاده شده است. برای داشتن محدوده گسترده‌تر مواد، از ترکیب فوم و فیبر استفاده شده است. برخلاف کارهای گذشته از مواد متخلخل موجود در صنعت به عنوان بانک مواد استفاده شده است. برای افزایش دقت و صحت مدل‌سازی مواد متخلخل، از مدل کوماتسو برای مواد فیبری و مدل کوانلی برای مواد فومی استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی عملکرد جذب آکوستیکی، از دو روش ماتریس تبدیل و شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک<sup>5</sup> استفاده شده است.

قالب‌بندی مقاله‌ی پیش رو بدین‌گونه است که در بخش 2، ماتریس تبدیل ماده‌ی متخلخل، حجم هوایی و ساختار چندلایه محاسبه شده است. در بخش 3 در مورد الگوریتم ژنتیک و پارامترهای موردنیاز در الگوریتم ژنتیک توضیحاتی داده شده است. در بخش 4، صحت مدل ریاضی ارائه شده، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و عملکرد الگوریتم ژنتیک برنامه نویسی شده ارزیابی شده است. همچنین در این قسمت، نتایج بهینه‌سازی و تأثیر فاصله هوایی بین لایه‌های جاذب متخلخل و بین دیوار و جاذب متخلخل، آورده شده است. در نهایت، در بخش 5 نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق آورده شده است.

## 2- مدل ریاضی

### 2-1- محاسبه ماتریس تبدیل ماده متخلخل

در این مقاله، به‌منظور داشتن محدوده‌ی گسترده‌تری از مواد از ترکیب ماده‌ی متخلخل فومی و فیبری استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول 1 آورده شده است. برای محاسبه ماتریس تبدیل ماده‌ی متخلخل، ابتدا لازم است امپدانس مشخصه ( $Z_c$ ) و ثابت انتشار ( $K$ ) ماده متخلخل محاسبه شود. با توجه به این که کوماتسو توانست مدل دلنی و بیزلی و مدل میکی را بهبود ببخشد و نتایج دقیقتری نسبت به این دو مدل به‌ویژه برای بسامدهای کمتر از 100 Hz بدست آورد [14]، از این مدل برای مواد متخلخل فیبری استفاده شده است. همچنین با توجه به این‌که کوانلی با افزایش تعداد آزمایش‌هایش و استفاده از مواد متخلخل فومی متنوع با بازه‌ی مقاومت در برابر جریان گسترده‌تر ( $24300 \text{ (Pas/m}^2\text{)} - 2900 \text{ (Pas/m}^2\text{)}$ ) مدل دقیقتری برای مواد فومی ارائه نمود [15]، از این مدل نیز برای مواد متخلخل فومی استفاده شده است.

مدل کوماتسو:

$$Z_c = \rho c [1 + 0.00026 \left( 2 - \log \left( \frac{f}{\sigma} \right) \right)^{6.2} - j 0.0047 \left( 2 - \log \left( \frac{f}{\sigma} \right) \right)^{4.1}] \quad (1)$$

با روش اجزای محدود و المان مرزی<sup>1</sup> تحلیل می‌شوند [3,2]. این نوع جاذب‌ها دارای پیچیدگی‌هایی از قبیل پیچیدگی ساخت، سختی نصب و اشغال زیاد فضا هستند. بنابراین محققان به فکر شیوه‌ای دیگر برای طراحی اتاق صامت افتادند.

جاذب متخلخل جزو پرکاربردترین نوع جاذب‌های صوتی است که به طور کلی در انواع فومی، فیبری و اسفنجی در صنعت کاربرد دارند. بهینه‌سازی جذب صوتی این نوع جاذب‌ها به ازای ضخامت معین، مسأله‌ی مهمی در صنعت آکوستیک است. شوتیان‌لی و همکارانش به بهینه‌سازی یک‌لایه جاذب متخلخل فیبری با ضخامت مشخص پرداختند. آن‌ها مشخصات میکروسکوپی جاذب فیبری را به‌گونه‌ای تعیین کردند که بیشترین میانگین ضریب جذب صوتی برای گستره‌های بسامدی مختلف بدست آید [4]. زین‌العابدین و همکارانش به منظور بهینه‌سازی جذب صوتی ماده‌ی متخلخل، جاذبی تک‌لایه با استفاده از ترکیب پشم شیشه و اسفنج طراحی نمودند [5]. فولادی و همکارانش پوشش فیبری روی نارگیل را به‌عنوان جاذب متخلخل مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که به‌ازای ضخامت 20 mm از این نوع جاذب می‌توان به میانگین ضریب جذب صوتی 0.8 برای گستره‌ی بسامدی  $f > 1360 \text{ Hz}$  دست یافت. همچنین آن‌ها برای افزایش میزان جذب صوتی، ساختار چندلایه از این نوع جاذب را پیشنهاد دادند [7,6]. داورن اولین بار، ایده طراحی اتاق صامت را، به‌وسیله‌ی جاذب‌های متخلخل تخت چندلایه داد. او ساختارهای مختلف را به‌وسیله‌ی لوله‌ی امپدانس مورد آزمایش قرار داد، اندازه‌گیری‌های او نشان داد که برای اتاق صامت به‌جای جاذب‌های متعارف گوه‌ای شکل از جاذب متخلخل چندلایه تخت با ضخامت کلی کمتر از یک‌چهارم طول موج متناظر با بسامد قطع اتاق، می‌توان استفاده نمود [8]. کارهای بعدی که توسط دان و داورن انجام شد، نشان‌دادند که امپدانس کلی یک ساختار تخت چندلایه با تکرار معادله‌ی ساختار تک‌لایه به‌دست می‌آید [9]. برای محاسبه‌ی امپدانس کلی ساختار چندلایه متخلخل به دو پارامتر ثابت انتقال<sup>2</sup> و امپدانس مشخصه<sup>3</sup> ماده‌ی متخلخل نیاز است. دلنی و بیزلی برای محاسبه‌ی این دو پارامتر، از طریق آزمایش، مدلی برای مواد متخلخل فیبری ارائه دادند که هم‌خوانی قابل‌قبولی بین نتایج آزمایش و مدل ارائه شده برای بسامدهای بالای 100 Hz بدست‌آمد [10]. جونز و همکارانش به ساده‌سازی مدل دلنی بیزلی پرداختند تا بدون نیاز به دانستن مقدار مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل بتوان منحنی جذب صوتی آن را بدست آورد [11]. در بررسی‌های بعد، مدل‌های میکی و ورونینا برای اصلاح مدل دلنی و بیزلی ارائه شدند [13,12]. کوماتسو برای مدل‌سازی مواد متخلخل فیبری بر خلاف دو روش دلنی و بیزلی و میکی، به‌جای عبور خط راست از بین نقاط اندازه‌گیری شده از منحنی لگاریتمی استفاده کرد و نتایج بهتری به‌خصوص برای بسامدهای پایین 100 Hz بدست آورد [14]. کوانلی نیز برای افزایش دقت مدل‌سازی، مواد متخلخل فومی را با محدوده‌ی مقاومت در برابر جریان گسترده‌تر مورد آزمایش قرارداد [15]. بعد از آن احتیاج بود یک ساختار چندلایه بهینه طراحی شود و استفاده از الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به این هدف پیشنهاد شد. زو و همکارانش با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>4</sup> و استفاده از معادلات کامینگ برای مدل‌سازی جاذب متخلخل، ساختاری سه‌لایه از مواد فومی برای بسامد قطع 100 Hz طراحی کردند [17,16]. و در تحقیقی دیگر با روشی مشابه و استفاده از مواد فیبری

1- Boundary element  
2- Propagation constant  
3- Characteristic impedance  
4- Genetic Algorithm (GA)

5- COMSOL Multi-physics version 4.4

با توجه به اینکه سرعت ذره‌ای بر روی سطح دیوار سخت برابر صفر است می‌توان رابطه (8) را نوشت:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} P_i = T_{11}P_e \\ V_i = T_{21}P_e \end{cases} \quad (8)$$

با توجه به رابطه (8) امپدانس آکوستیکی ویژه<sup>3</sup> ورودی طبق رابطه (9) محاسبه می‌شود:

$$Z_{in} = \frac{P_i}{V_i} = \frac{T_{11}}{T_{21}} \quad (9)$$

و با استفاده از آن، ضریب جذب<sup>4</sup> برخورد عمود و ضریب بازتاب فشار را به- ترتیب طبق روابط (10) و (11) می‌توان بدست آورد.

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re}\left(\frac{Z_{in}}{\rho c}\right)}{\left[1 + \operatorname{Re}\left(\frac{Z_{in}}{\rho c}\right)\right]^2 + \left[\operatorname{Im}\left(\frac{Z_{in}}{\rho c}\right)\right]^2} \quad (10)$$

$$R = \sqrt{1 - \alpha} \quad (11)$$

که در آن، Re به معنی قسمت حقیقی و Im به معنی قسمت موهومی است.

### 3- روش اجزای محدود

در این تحقیق برای بررسی عملکرد جذب آکوستیکی جاذب متخلخل چندلایه، علاوه بر روش تحلیلی ماتریس تبدیل، از روش عددی اجزای محدود نیز به کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک استفاده شده است. در این نرم افزار از واسط کاربری فشار آکوستیکی در حوزه بسامد استفاده شده است که موج صوتی را در حوزه بسامد مدل می‌کند و با حل معادله هلمهولتز در حوزه‌ی بسامد، رفتار آکوستیکی ساختار را مشخص می‌نماید. نحوه مش‌زنی ساختار در شکل 2 مشاهده می‌شود. مدل ارائه شده شامل 3732 المان مش است. حداکثر و حداقل اندازه هر المان به ترتیب، برابر با 5 mm و 23 μm در نظر گرفته شده است.

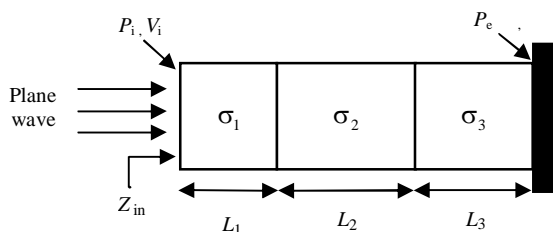


Fig. 1 schematic of three layer porous absorber mounted on rigid wall.

شکل 1 طرح کلی سه‌لایه جاذب متخلخل که بر روی دیواری سخت نصب شده است.

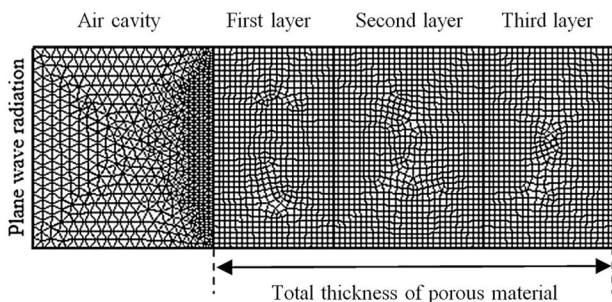


Fig. 2 Final mesh of the structure

شکل 2 مش نهایی ساختار

$$K = \frac{2\pi f}{c} \left[ 0.0069 \left( 2 - \log\left(\frac{f}{\sigma}\right) \right)^{4.1} + j \left( 1 + 0.0004 \left( 2 - \log\left(\frac{f}{\sigma}\right) \right)^{6.2} \right) \right] \quad (2)$$

مدل کوانتی:

$$Z_c = \rho c \left[ 1 + 0.212 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.455} - j 0.105 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.607} \right] \quad (3)$$

$$K = \frac{2\pi f}{c} \left[ 0.163 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.592} + j \left( 1 + 0.188 \left( \frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.54} \right) \right] \quad (4)$$

که در روابط بالا f بسامد و σ نشان‌دهنده‌ی مقاومت در برابر جریان هوای ماده‌ی متخلخل است. پس از محاسبه‌ی امپدانس مشخصه و ثابت انتشار، ماتریس تبدیل ماده‌ی متخلخل [P] به‌دست می‌آید:

$$[P] = \begin{bmatrix} \cos(KL) & jZ_c \sin(KL) \\ j \sin(KL) & \cos(KL) \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن، L ضخامت ماده متخلخل است.

### 2-2- محاسبه‌ی ماتریس تبدیل حجم هوایی

ماتریس تبدیل حجم هوایی [S] به ضخامت D طبق رابطه (6) محاسبه می‌شود. در این رابطه، ρc امپدانس مشخصه هوا و k ثابت انتشار موج در هوا است.

$$[S] = \begin{bmatrix} \cos(kD) & j\rho c \sin(kD) \\ j \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2-3- محاسبه ماتریس تبدیل ماده متخلخل در ساختار چندلایه

شکل 1 ساختاری سه لایه از ماده‌ی متخلخل که بر روی دیواری سخت نصب شده، را نشان می‌دهد. در یک ساختار چندلایه، ماتریس تبدیل کل ساختار [T] از ضرب ماتریس تبدیل تک‌تک لایه‌ها در یکدیگر به‌دست می‌آید. اگر P<sub>i</sub> و V<sub>i</sub> به ترتیب، فشار صدا و سرعت ذره‌ای<sup>2</sup> بر روی سطح اولین لایه، P<sub>e</sub> و V<sub>e</sub> فشار و سرعت ذره‌ای بر روی سطح دیوار سخت باشند، رابطه‌ی (7) را بین کمیت‌های مذکور می‌توان به‌دست آورد:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ V_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

جدول 1 مشخصات مواد متخلخل مورد استفاده [20,19]

Table 1 Properties of used porous materials [19,20]

شماره	نوع	مقاومت در	شماره	نوع	مقاومت در
متخلخل	جاذب	برابر جریان هوا	متخلخل	جاذب	برابر جریان هوا
	متخلخل	(Pas/m <sup>2</sup> )		متخلخل	(Pas/m <sup>2</sup> )
1	فوم	60	13	فیبر	1410
2	فوم	79	14	فوم	1724
3	فوم	176	15	فوم	2184
4	فوم	287	16	فوم	3085
5	فوم	356	17	فیبر	3190
6	فیبر	453	18	فوم	5745
7	فیبر	483	19	فوم	6229
8	فیبر	535	20	فیبر	7153
9	فیبر	549	21	فیبر	11180
10	فیبر	659	22	فیبر	12378
11	فوم	671	23	فیبر	13915
12	فوم	816	24	فیبر	47637

1- Flow resistivity  
2- Particle velocity

3- Specific acoustic impedance  
4- Absorption coefficient

#### 4- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو و بهینه‌سازی مبتنی بر اصول ژنتیک و انتخاب طبیعی است. این روش با ایجاد جمعیتی از افراد که هر یک در قالب کروموزوم ارائه می‌شوند، پیاده‌سازی می‌گردد و پس از محاسبه‌ی میزان شایستگی هر فرد در جامعه، افراد موجود در جمعیت در اختیار فرآیند تکامل قرار می‌گیرند. الگوریتم ژنتیک دارای کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف است. یک نمونه از این کاربردها مسائل بهینه‌سازی چندهدفه<sup>3</sup> است که در آن، پارامترهای متفاوتی که قرار است بهینه شوند در قالب رشته‌ی کروموزوم سازماندهی می‌شوند. در این تحقیق برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار متلب<sup>4</sup> استفاده شده است.

از آنجاکه برای اتاق صامت در هر بسامدی بالای بسامد قطع، ضریب بازتاب فشار نباید از 10% بیشتر شود، بنابراین طراحی چنین ساختاری با کمترین ضخامت ممکن به یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌شود. در این تحقیق، هدف این است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساختاری ارائه شود که کمترین ضخامت را در بسامد قطع مورد نظر داشته باشد. نمودار شکل 3 نمای کلی از مراحل یک الگوریتم ژنتیک ساده را نشان می‌دهد.

#### 4-1- مؤلفه‌های استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

پارامترهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله عبارتند از: بیشترین تعداد نسل<sup>5</sup> برابر با 100 نسل، اندازه‌ی جمعیت<sup>6</sup> در هر نسل برابر با 340، شکاف نسل<sup>7</sup> برابر با 0.5 به این معنی که در هر نسل، 50% از جمعیت جایگزین می‌شوند و نرخ جهش<sup>8</sup> برابر 5% به این معنی که در هر نسل، 5% از جمعیت جهش می‌یابند. تابع شایستگی در این مسأله، میزان ضریب جذب است و برای محاسبه‌ی آن از روش ماتریس تبدیل که در بخش قبل توضیح داده شد، استفاده شده است. متغیرهای طراحی نیز جنس و ضخامت هر لایه است.

#### 5- نتایج و بحث

##### 5-1- ارزیابی روش‌های تحلیلی و عددی

برای صحت‌گذاری<sup>9</sup> مدل ریاضی ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل 4، نتایج دو روش تحلیلی و عددی با نتایج تجربی برای یک ساختار تک‌لایه [21] و در شکل 5، نتایج روش تحلیلی و عددی برای ساختاری سه-لایه متشکل از جاذب‌های متخلخل موجود در جدول 1، مقایسه شده است که تطابق مناسبی را نشان می‌دهند.

##### 5-2- ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک

به منظور صحت‌گذاری عملکرد الگوریتم ژنتیک برنامه‌نویسی شده، مقاله‌ای مناسب [17] که در آن به بهینه‌سازی جاذب متخلخل سه‌لایه با استفاده از جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک موجود در نرم‌افزار متلب پرداخته، انتخاب شده است. برای قابل مقایسه بودن نتایج بهینه‌سازی، معادلات حاکم و گستره مقاومت در برابر جریان مواد متخلخل، مطابق با این مقاله در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه‌سازی در جدول 2 آورده شده است. در این مقاله منظور از

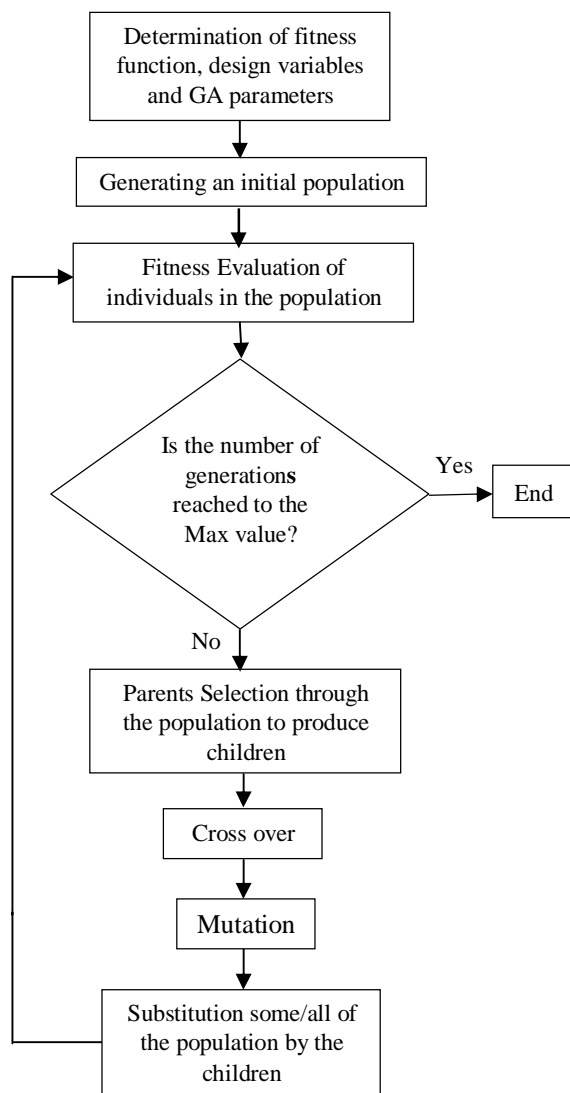


Fig. 3 Schematic diagram of genetic algorithm

شکل 3 طرح نموداری الگوریتم ژنتیک

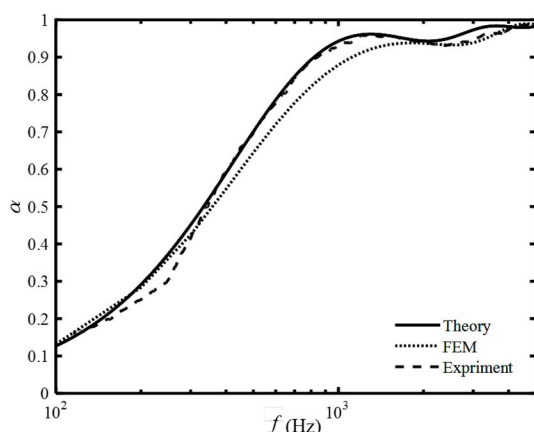


Fig. 4 Comparison of sound absorption coefficient that has been measured in impedance tube [21] and calculated with two methods for single layer of mineral wool ( $\sigma = 22500 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L = 6 \text{ cm}$ ).

شکل 4 مقایسه ضریب جذب صوتی اندازه‌گیری شده در لوله‌ی امپدانس [21] و محاسبه شده، برای یک لایه پشم معدنی ( $\sigma = 22500 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L = 6 \text{ cm}$ )

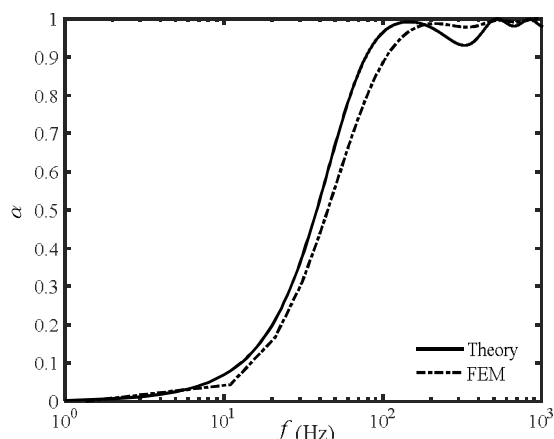
- 1- Optimization
- 2- Evolution
- 3- Multi-Objective optimization
- 4- Matlab
- 5- Maximum number of generation
- 6- Population size
- 7- Generation gap
- 8- Mutation rate
- 9- Verification

ساختارهایی با ضخامت کلی کمتر از 100 cm (کمتر از یک‌چهارم طول موج بسامد قطع 80 Hz) مطلوب است. عملکرد جاذب آکوستیکی ساختارهای چندلایه، متأثر از تعداد لایه‌ها، جنس و ضخامت هرلایه است. در این مقاله از ساختار سه‌لایه به دلیل تأثیر بیشتر نسبت به ساختار دولایه [16] استفاده شده است. همچنین به دلیل خطای موجود در مدل‌سازی ریاضی و اندازه‌گیری مقاومت در برابر جریان مواد مورد استفاده، ضریب بازتاب فشار کمتر از 12% مورد پذیرش است [18]. از آنجاکه برای طراحی اتاق صامت، بسامدهای زیر 1000 Hz مهم هستند گستره‌ی بسامدی استفاده شده در الگوریتم ژنتیک به بسامدهای مرکزی باند یک‌سوم اکتاوی بین 80 Hz - 1000 Hz محدود شده است.

الگوریتم ژنتیک با استفاده از مواد موجود در جدول 1، 19 ساختار را با استفاده از ترکیب مواد معرفی کرده است که بسامد قطع 80 Hz را با ضخامت کلی کمتر از 100 cm نتیجه می‌دهد. ساختارهای مذکور بر اساس افزایش ضخامت کلی ساختار در جدول 3 مرتب شده‌اند. با توجه به این‌که هدف، کم‌کردن ضخامت کلی ساختار است، ساختار اول با ضخامت کلی 77.1 cm به عنوان مناسب‌ترین ساختار انتخاب شده است که نسبت به ساختارهای متعارف گوه‌ای با ضخامت یک‌پنجم طول موج بسامد قطع [23]، ضخامت کمتری دارد. برای این ساختار، میزان ضریب جذب صوتی با دو روش تحلیلی (مدل‌سازی ریاضی) و عددی (نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک) محاسبه شده است و در شکل 6 آورده شده است. همچنین میزان ضریب بازتاب صوتی این ساختار، برای بسامد مرکزی باند‌های یک سوم اکتاوی بین 80 Hz-1000 Hz در جدول 4 آورده شده است.

#### 4-5- بررسی اثر فاصله هوایی

در این بخش به بررسی تأثیر فاصله هوایی بین لایه‌های جاذب متخلخل، بر روی میزان ضریب بازتاب فشار پرداخته شده است. فاصله هوایی در بین لایه‌ها به دو دلیل رخ می‌دهد: عدم نصب دقیق (غیر اختیاری)، به صورت اختیاری توسط طراح. شکل 7 نشان می‌دهد که چگونه فاصله هوایی (گستره 9 cm - 0 cm) بر روی ضریب بازتاب فشار ساختار 1 (ساختار دارای کمترین ضخامت)، تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل 6 در ساختار سه‌لایه، اگر فاصله‌ی هوایی بین لایه سوم و دیوار باشد حداکثر افزایش فشار بازتابیده به‌ازای فواصل هوایی به ضخامت 3 cm، 6 cm و 9 cm به ترتیب، برابر با 0.1%، 1.4% و 3.2% است. اگر فاصله هوایی بین لایه دوم و سوم باشد، حداکثر افزایش فشار بازتابیده به‌ازای فواصل هوایی به ضخامت 3 cm، 6 cm و 9 cm به ترتیب برابر با 2.3%، 4.6% و 6.8% است. اگر فاصله‌ی هوایی بین لایه اول و دوم باشد، حداکثر افزایش فشار بازتابیده به‌ازای فواصل هوایی به ضخامت 3 cm، 6 cm و 9 cm به ترتیب برابر با 4.7%، 8.5% و 11.3% است. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که فاصله‌ی هوایی، سبب افزایش ضریب بازتاب فشار صوتی در



**Fig. 5** Comparison of sound absorption coefficient that has been achieved with FEM and calculated theoretically for triple layer porous absorber ( $\sigma_1 = 287 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L_1 = 24 \text{ cm}$ ,  $\sigma_2 = 483 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L_2 = 24 \text{ cm}$ ,  $\sigma_3 = 11180 \text{ Pas/m}^2$ ,  $L_3 = 20 \text{ cm}$ ).

شکل 5 مقایسه‌ی ضریب جذب صوتی بدست آمده با روش اجزای محدود و محاسبه شده به روش تحلیلی برای جاذب متخلخل سه لایه ( $\sigma_1 = 287 \text{ Pas/m}^2$ ،  $L_1 = 24 \text{ cm}$ ،  $\sigma_2 = 483 \text{ Pas/m}^2$ ،  $L_2 = 24 \text{ cm}$ ،  $\sigma_3 = 11180 \text{ Pas/m}^2$ ،  $L_3 = 20 \text{ cm}$ ).

لایه اول، لایه در تماس با هوا، لایه دوم، لایه میانی و لایه سوم، لایه چسبیده به دیوار است. نتایج جدول 2 علاوه بر تأیید صحت عملکرد الگوریتم ژنتیک برنامه‌نویسی شده، نشان می‌دهد که الگوریتم برنامه‌نویسی شده نسبت به جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک که در مرجع [17] استفاده شده است، عملکرد مطلوب‌تری دارد و توانسته است ساختاری با ضخامت کلی کمتر برای بسامد قطع 100 Hz ارائه دهد.

#### 3-5- نتایج بهینه‌سازی

برای داشتن بیشترین میزان ضریب جذب صوتی توسط یک‌لایه جاذب متخلخل باید بین جاذب متخلخل و دیوار به‌اندازه‌ی یک‌چهارم طول موج بسامد قطع فاصله باشد. در حقیقت این نقطه مکانی است که سرعت ذره‌ای ناشی از موج در آن بیشینه است [22]. بنابراین برای داشتن بیشترین میزان ضریب جذب صوتی، لازم است که ماده‌ی متخلخل ضخامتی برابر با یک‌چهارم طول موج بسامد قطع داشته باشد. داورن نشان داد که با چندلایه نمودن جاذب متخلخل می‌توان با ضخامتی کمتر از یک‌چهارم طول موج بسامد قطع، به جذب کامل برای بسامدهای بالای بسامد قطع دست‌یافت [8]. در این مقاله هدف طراحی جاذب متخلخل چندلایه برای بسامد قطع 80 Hz است. با توجه به این‌که طول موج متناظر با این بسامد قطع 425 cm است،

جدول 2 مقایسه‌ی نتایج بهینه‌ی بدست آمده با الگوریتم ژنتیک با نتایج مرجع [17]

**Table 2** Comparison between the obtained optimization results of present genetic algorithm and the results of Ref [17]

روش	بسامد قطع (Hz)	مقاومت ویژه در برابر جریان لایه اول (Pas/m <sup>2</sup> )	مقاومت ویژه در برابر جریان لایه دوم (Pas/m <sup>2</sup> )	مقاومت ویژه در برابر جریان لایه سوم (Pas/m <sup>2</sup> )	ضخامت لایه اول (cm)	ضخامت لایه دوم (cm)	ضخامت لایه سوم (cm)	ضخامت کلی ساختار (cm)
الگوریتم ژنتیک [17]	100	417	1707	6188	25.5	15.3	12.1	52.9
الگوریتم ژنتیک (کار حاضر)	100	477	1590	6144	24.4	14.3	13.3	52

جدول 3 نتایج بهینه‌سازی

Table 3 Optimization results

ساختار	جنس لایه اول	جنس لایه دوم	جنس لایه سوم	ضخامت لایه اول cm	ضخامت لایه دوم cm	ضخامت لایه سوم cm	ضخامت کلی cm
1	جاذب 3	جاذب 12	جاذب 20	22.6	29.8	24.7	77.1
2	جاذب 3	جاذب 13	جاذب 17	27.5	28.7	27.6	83.8
3	جاذب 3	جاذب 11	جاذب 17	36.4	15	35	86.4
4	جاذب 3	جاذب 13	جاذب 19	32.1	39.3	16.1	87.5
5	جاذب 3	جاذب 12	جاذب 18	37.4	24.7	26.5	88.6
6	جاذب 3	جاذب 12	جاذب 16	35.3	21.5	32	88.8
7	جاذب 8	جاذب 13	جاذب 20	38.9	34.9	16.8	90.6
8	جاذب 3	جاذب 11	جاذب 16	30.7	23.3	36.8	90.8
9	جاذب 7	جاذب 13	جاذب 20	39	36.9	15.3	91.2
10	جاذب 3	جاذب 13	جاذب 16	31.4	34.9	25.3	91.6
11	جاذب 6	جاذب 13	جاذب 17	38.6	31.9	21.8	92.3
12	جاذب 2	جاذب 12	جاذب 17	39.3	19.1	35	93.4
13	جاذب 2	جاذب 11	جاذب 17	38.9	20.1	35	94
14	جاذب 8	جاذب 13	جاذب 20	39.4	37.1	18.5	95
15	جاذب 7	جاذب 10	جاذب 17	33.2	32.1	30.5	95.8
16	جاذب 1	جاذب 11	جاذب 17	39	22.1	35	96.1
17	جاذب 6	جاذب 10	جاذب 17	33.9	34.2	29.5	97.6
18	جاذب 7	جاذب 9	جاذب 17	32.9	35	30.4	98.3
19	جاذب 6	جاذب 6	جاذب 17	32.4	35	32.3	99.7

جدول 4 ضریب بازتاب فشار صوتی (%) برای ساختار 1 در جدول 3

Table 4 Sound pressure reflection factor (%) for structure 1 in Table 3

1000 Hz	800 Hz	630 Hz	500 Hz	400 Hz	315 Hz	250 Hz	200 Hz	160 Hz	125 Hz	100 Hz	80 Hz	بسامد مرکزی باندهای یک سوم اکتاوی
0.5	9	6.7	11.8	4.3	5.9	8.7	9.7	10.5	8.6	5.3	11.6	درصد ضریب بازتاب فشار (%)

صامت پیشنهاد شده است. برخلاف کارهای گذشته از مواد متخلخل موجود در صنعت به عنوان بانک مواد استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند این نوع ساختار از لحاظ ضخامت و کیفیت جذب صوت، با ساختارهای متعارف گوه‌ای قابل مقایسه است، به طوری که با ضخامتی کمتر نسبت به ساختار گوه‌ای می‌توان اتاق صامتی با کیفیت یکسان در جذب صوت ایجاد نمود.

برای طراحی ساختاری بهینه از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهند که با استفاده از 24 نوع ماده‌ی متخلخل مورد بررسی در این مقاله، 19 ساختار متنوع می‌تواند بسامد قطع 80 Hz، با ضخامت کلی کمتر از 100 cm (کمتر از یک چهارم طول موج بسامد قطع 80 Hz) را نتیجه دهد. در میان ساختارهای مذکور، ساختار با ضخامت 77.1 cm (کمترین ضخامت) به‌عنوان مناسب‌ترین ساختار انتخاب شده است که برای طراحی اتاق صامت نسبت به ساختار گوه-ای [17] ضخامت کمتری دارد. با توجه به این تحقیق می‌توان نتایج را بصورت زیر بیان نمود:

- الگوریتم ژنتیک ابزاری مؤثر برای طراحی بهینه جاذب متخلخل چندلایه تخت است.
- با بهینه‌سازی ساختار سه‌لایه تخت جاذب متخلخل، به ساختاری با ضخامتی کمتر از ساختارهای متعارف گوه‌ای و کیفیتی یکسان در جذب صوت می‌توان رسید.

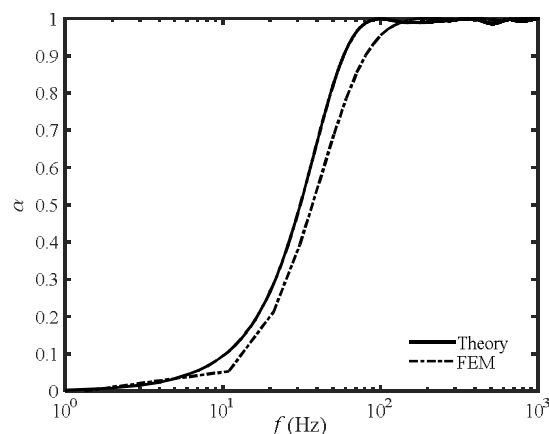


Fig. 6 Sound absorption coefficient for structure 1 in Table 3

شکل 6 ضریب جذب صوتی برای ساختار 1 در جدول 3

برخی بسامدها و در نتیجه، عبور از حد مجاز 12% برای اتاق صامت می‌شود. همچنین در برخی بسامدها سبب کاهش ضریب بازتاب فشار صوتی می‌شود. نکته قابل توجه این است که حساسیت میزان ضریب بازتاب فشار به وجود فاصله هوایی، در بین لایه اول و دوم بیشتر است.

### 6- نتیجه گیری

در این تحقیق، استفاده از جاذب متخلخل سه‌لایه تخت، برای طراحی اتاق

- مطابق انتظار، در تمام ساختارهای بهینه ارائه شده از لایه اول به سمت لایه سوم، مقدار مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل افزایش می‌یابد که میزان این افزایش توسط الگوریتم ژنتیک کنترل می‌شود.
- در ساختارهای بهینه ارائه شده، مقدار مقاومت در برابر جریان ماده متخلخل در لایه اول کم است، که احتمالاً به دلیل ایجاد تطبیق امپدانسی مناسب با هوا است.
- در ساختارهای بهینه ارائه شده، مقدار مقاومت در برابر جریان ماده‌ی متخلخل در لایه سوم زیاد است، که احتمالاً به دلیل جذب بیشتر انرژی موج در این لایه است.
- در طراحی اتاق صامت با استفاده از جاذب چندلایه متخلخل، از ایجاد فاصله هوایی در بین لایه‌ها اجتناب شود.
- حساسیت میزان ضریب بازتاب فشار به وجود فاصله هوایی، در بین لایه‌های جلو زیاد است و به سمت لایه‌های آخر، این حساسیت کمتر می‌شود.

### 7- مراجع

[1] L. L. Beranek, H. P. Sleeper Jr, The design and construction of anechoic sound chambers, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 18, No. 1, pp. 140-150, 1946.

[2] V. Easwaran, M. Munjal, Finite element analysis of wedges used in anechoic chambers, *Journal of sound and vibration*, Vol. 160, No. 2, pp. 333-350, 1993.

[3] C.-N. Wang, M.-K. Tang, Boundary element evaluation on the performance of sound absorbing wedges for anechoic chambers, *Engineering analysis with boundary elements*, Vol. 18, No. 2, pp. 103-110, 1996.

[4] S. Liu, W. Chen, Y. Zhang, Design optimization of porous fibrous material for maximizing absorption of sounds under set frequency bands, *Applied Acoustics*, Vol. 76, No. 2, pp. 319-328, 2014.

[5] M. Zainulabidin, M. A. Rani, N. Nezeze, A. M. Tobi, Optimum sound absorption by materials fraction combination, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 118-121, 2014.

[6] M. H. Fouladi, M. Ayub, M. J. M. Nor, Analysis of coir fiber acoustical characteristics, *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 1, pp. 35-42, 2011.

[7] M. H. Fouladi, M. J. M. Nor, M. Ayub, Z. A. Leman, Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel, *Applied Acoustics*, Vol. 71, No. 3, pp. 241-249, 2010.

[8] W. Davern, Flat-walled graded density anechoic lining, in *Proceeding of 10th International Congress on Acoustics*, Australia, Sydney, 1980.

[9] I. Dunn, W. Davern, Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers, *Applied acoustics*, Vol. 19, No. 5, pp. 321-334, 1986.

[10] M. Delany, E. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied acoustics*, Vol. 3, No. 2, pp. 105-116, 1970.

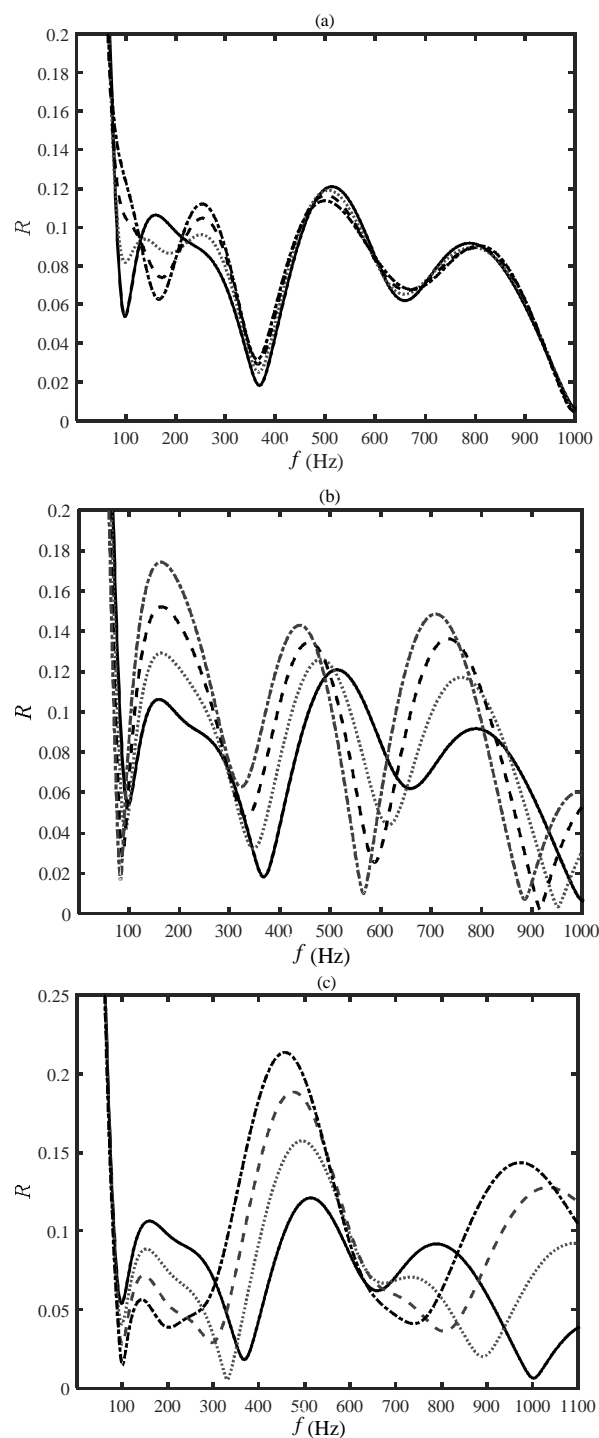
[11] P. W. Jones, N. J. Kessissoglou, Simplification of the Delany-Bazley approach for modelling the acoustic properties of a poroelastic foam, *Applied Acoustics*, Vol. 88, No. 2, pp. 146-152, 2015.

[12] Y. Miki, Acoustical properties of porous materials. generalizations of empirical models, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 11, No. 1, pp. 25-28, 1990.

[13] N. Voronina, Acoustic properties of fibrous materials, *Applied Acoustics*, Vol. 42, No. 2, pp. 165-174, 1994.

[14] T. Komatsu, Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials, *Acoustical science and technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 121, 2008.

[15] W. Qunli, Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam, *Applied acoustics*, Vol. 25, No. 3, pp. 141-148, 1988.



**Fig. 7** The effect of air gap on sound pressure reflection coefficient for optimum structure 1 in Table 3, (a) if the air gap has been located between the wall and third layer, (b) if the air gap has been located between the third and second layers, (c) if the air gap has been located between the second and first layers. ( — without air gap, ..... 3 cm air gap, - - - 6 cm air gap, - . - 9 cm air gap)

شکل 7 تأثیر فاصله‌ی هوایی بر روی ضریب بازتاب فشار برای ساختار بهینه‌ی 1 در جدول 3، (الف) اگر فاصله‌ی هوایی بین لایه سوم و دیوار باشد، (ب) اگر فاصله‌ی هوایی بین لایه دوم و لایه سوم باشد، (ج) اگر فاصله‌ی هوایی بین لایه اول و دوم باشد. ( — بدون فاصله‌ی هوایی، ..... 3 cm فاصله‌ی هوایی، - - - 6 cm فاصله‌ی هوایی، - . - 9 cm فاصله‌ی هوایی)

- application in anechoic chambers, in *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, USA, New York, 2012.
- [20] A. Cummings, S. Beadle, Acoustic properties of reticulated plastic foams, *Journal of sound and vibration*, Vol. 175, No. 1, pp. 115-133, 1994.
- [21] M. Mirowska, K. Czyzeski, Estimation of sound absorption coefficient of porous absorber, in *The 14th International Conference on Sound & Vibration*, Australia, Cairns, 2007.
- [22] F. A. Everest, K. C. Pohlmann, T. Books, *The master handbook of acoustics*, pp. 184-186, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [23] W. Davern, J. Hutchinson, Polyurethane foam wedge for anechoic chamber, *Applied Acoustics*, Vol. 4, No. 4, pp. 287-302, 1971.
- [16] J. Xu, J. M. Buchholz, F. R. Fricke, Application of multi-layered polyurethane foams for flat-walled anechoic linings, *Applied Acoustics*, Vol. 67, No. 5, pp. 476-485, 2006.
- [17] J. Xu, J. Nannariello, F. R. Fricke, Optimising flat-walled multi-layered anechoic linings using evolutionary algorithms, *Applied Acoustics*, Vol. 65, No. 11, pp. 1009-1026, 2004.
- [18] J. Xu, J. M. Buchholz, F. R. Fricke, Flat-walled multilayered anechoic linings: optimization and application, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 118, No. 5, pp. 3104-3109, 2005.
- [19] V. Dabbagh, R. Keshavarz, A. Ohadi, Accurate designing of flat-walled multi-layered lining system using genetic algorithm for