



## Effect of Material Composition type and Audio Frequency factors on Absorption Coefficient and the Sound Level Variation

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mohammadi Gahrouyi R.<sup>1</sup> MSc,

Maleki A.\*<sup>1</sup> PhD,

Lashgari M.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Mohammadi Gahrouyi R, Maleki A, Lashgari M. Effect of Material Composition type and Audio Frequency factors on Absorption Coefficient and the Sound Level Variation. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(3):649-658.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering of Biosystems Department, Collage of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering of Biosystems Department, Collage of Agriculture, Arak University, Arak, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering of Biosystems Department, Collage of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Phone: +98 (38) 32324401

Fax: -

maleki@sku.ac.ir

#### Article History

Received: December 1, 2018

Accepted: June 15, 2019

ePublished: March 01, 2020

### ABSTRACT

The intensity of sound in most industries and processes is a disturbing factor. Sound absorbers are a means of reducing noise. There are various types of sound absorbers with different designs and materials, but sound absorbers that can have a high absorption coefficient will be effective. The design of the manger sponge with fractal structure will be a good solution to this problem. Various factors such as composition type, step, and frequency affect this adsorbent. In this research, each of these factors was investigated and analyzed. The effects of the absorption coefficient and changes in sound level influenced by composition type, step and frequency factors were investigated and analyzed. Investigation of the step factor revealed that the amount of absorption coefficient in step 2 had better results compared to the step 1. The absorption coefficient in steps 1 and 2 were 0.3 and 0.38, respectively. Among the effective factors on the amount of absorption coefficient of manger sponge, the composition type was more effective. The results showed that the adsorbent with harder texture has a lower absorption coefficient and the adsorbent with a lighter texture has a higher absorption coefficient. Among the composition type used for this adsorbent, the sponge has a maximum absorption coefficient of 0.4 and MDF has a minimum absorption coefficient of 0.3.

**Keywords** Manger Sponge; Adsorbent; Acoustics; Frequency; Porosity

### CITATION LINKS

[1] Investigation of two types of silent ... [2] Improved acoustic behavior of interior parts of ... [3] Designing of absorbent parts used ... [4] The effect of surface treatment ... [5] Providing a simple mathematical model ... [6] Noise and Vibration Engineering ... [7] Acoustic properties of non-textured ... [8] Studying the effect of sound absorber ... [9] Production method and analysis of the ... [10] Acoustical absorptive properties ... [11] The Fractal Geometry ... [12] Acoustical propagation in a prefractal ... [13] Localization of electromagnetic waves in three-dimensional fractal ... [14] Impedance tube for measurement of sound transmission loss and absorption ... [15] The feasibility of using impedance tube with two microphones and sound ... [16] Sound absorption by Menger sponge ... [17] Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in ... [18] The Micro flow ... [19] Theory and design of microperforated panel sound ... [20] Microperforated-panel wideband absorbers. Institute of Noise Control ... [21] Extension of frequency range of resonant sound absorbers using two-degree-of-freedom ... [22] New Sound absorption improvement strategy for QRD ... [23] Perforated flexible membrane insertion influence on the sound absorption performance of ... [24] Design of compact micro-perforated membrane absorber for polycarbonate pane in ... [25] Sound absorption structure in helical shapes made from fibrous ... [26] Upward refraction of sound propagating outdoors by graded index sonic crystals ... [27] Standardised acoustic characterisation of sonic crystal noise barrier: Sound ... [28] Multi resonant scatterers in sonic crystals: Locally multi resonant ... [29] Broadband resonant cavity inside a two dimensional sonic ... [30] Frequency characteristics of defect states in a two-dimensional phononic crystal ... [31] Wave propagation in a 2D sonic crystal with a Helmholtz resonant ... [32] Optimization of flat multi-layer sound absorber by using multi-objective genetic algorithm for ... [33] Bos indicus-cross feedlot cattle with excitable temperaments have tougher meat ... [34] Have we underestimated the impact of preslaughter stress on meat quality in ... [35] Effects of stress by unfamiliar sounds on carcass and meat traits in bulls from three ... [36] Standard E1050-98, Impedance and absorption of acoustical materials using a ... [37] Producing of Impedance Tube for Measurement of Acoustic Absorption ... [38] Hearing parameters in noise exposed industrial workers ...

## تأثیر عامل‌های جنس ماده و بسامد صوت بر ضریب جذب و تغییرات تراز صدا

راضیه محمدی MSc

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

علی ملکی PhD

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

مجید لشگری PhD

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

### چکیده

میزان شدت صدا در بیشتر صنایع و فرآیندها یک عامل مزاحم است. جاذب‌های صدا وسیله‌ای برای کاهش میزان سر و صدا هستند. انواع مختلفی از جاذب‌های صوتی با طراحی و جنس‌های گوناگون وجود دارد؛ اما جاذب‌های صدایی که بتوانند ضریب جذب بالایی داشته باشند، موثر واقع خواهد شد. طراحی اسفنج منگر با ساختار فرکتالی، راه حل مناسبی برای این مساله خواهد بود. با توجه به اینکه عوامل مختلفی مانند جنس، گام و بسامد بر این جاذب تأثیرگذار هستند، در این پژوهش هر یک از این عامل‌ها آزمایش شدند و اثرات ضریب جذب و تغییرات تراز صدا تحت تأثیر عامل‌های جنس، گام و بسامد بررسی و تحلیل شدند. در بررسی عامل گام، مشخص شد که میزان ضریب جذب گام دوم دارای نتایج مطلوب‌تری نسبت به گام یک است. این مقدار برای گام یک  $0.73$  و برای گام دو  $0.38$  به‌دست آمد. از میان عامل‌های موثر بر میزان ضریب جذب اسفنج منگر، عامل جنس، اثرات مشهودتری را نشان داد؛ به‌نحوی که جاذب با بافت سخت‌تر دارای ضریب جذب پایین‌تر و جاذب با بافت سبک‌تر، دارای ضریب جذب بالاتر است. از میان جنس‌های به‌کاررفته برای این جاذب، اسفنج دارای بالاترین ضریب جذب با مقدار  $0.4$  و ام‌دی‌اف حداقل ضریب جذب با مقدار  $0.3$  را دارد.

**کلیدواژه‌ها:** اسفنج منگر، جاذب، آکوستیک، بسامد، تخلخل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۵

نویسنده مسئول: maleki@sku.ac.ir

### مقدمه

ارتعاش یک شیء باعث بروز اختلال مکانیکی در هوا می‌شود. محیط، این آشفتگی را به‌صورت نوسانات یک موج فشاری انتشار می‌دهد. بسامد امواج منتشرشده تابعی از ویژگی‌های منبع صوتی است، به نحوی که با افزایش بسامد منبع صوتی، بسامد صوت منتشرشده نیز افزایش خواهد یافت. سرعت صوت در جامدات به دلیل تراکم زیاد مولکول‌ها، بیشتر از مایعات و در مایعات نیز بیشتر از گازها است. در واقع هرچه محیط غلیظ‌تر باشد، سرعت انتقال صوت در آن بیشتر است [1].

کنترل کامل سطح صدای تولیدی به دلیل فرآیندهای طراحی و زمان‌بر بودن معمولاً پرهزینه است. این در حالی است که در برخی از محیط‌ها، صدا در فرآیندهای تولید به‌وجود می‌آید. چون کنترل گیرنده صدا نیز کار دشوار و طاقت‌فرسایی است و در برخی از موارد امکان‌پذیر نیست، بنابراین در رابطه با کنترل صدا، قراردادن ماده‌ای

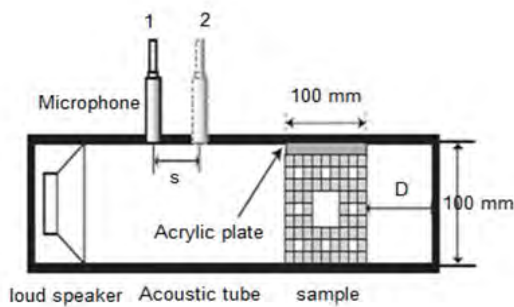
معین در مسیر انتقال آن (جاذب‌های آکوستیکی) می‌تواند مفید باشد [2]. با توجه به وسعت علم آکوستیک (پژواک‌شناسی)، شاخه‌های مختلفی از این علم ایجاد شده است. یکی از این شاخه‌ها مبحث جذب صوت است.

مواد گوناگونی از جمله پشم شیشه، پشم معدنی، فوم یا مواد فیبری به‌عنوان جاذب صوت در صنعت و کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند [3]. گاهی به اشتباه موانع صوتی را به‌عنوان مواد جاذب صوت معرفی می‌کنند، حال آنکه این دو مفهوم کاملاً از هم متمایز هستند. برخلاف موانع صوتی و مواد صدا خفه‌کن عملکرد مواد جاذب صوتی به جرم وابسته نیست. به‌طور معمول، مواد جاذب صوت را همراه برخی موانع صوتی و به‌صورت متصل به هم مورد استفاده قرار می‌دهند تا به‌واسطه متخلخل بودن ساختار ماده جاذب صوت، این امکان برای برخی مواد جاذب صوت وجود داشته باشد تا بدون هیچ تغییری از میان ساختار عبور کنند [4].

برای آنکه یک ماده، جاذب صوتی موثری باشد، معمولاً بایستی انرژی صوتی وارده را به اشکال دیگری از انرژی (معمولاً حرارت) تبدیل کند. نمونه‌های اصلی مواد جاذب عبارت‌اند از: مواد جاذب متخلخل، جاذب‌های دیافراگمی و جاذب‌های تشدیدی یا واکنشی. مواد جاذب متخلخل، از بهترین جاذب‌های صوتی شناخته‌شده هستند. این مواد معمولاً پرزدار، فیبری، اسفنجی، پارچه‌ای و غیره هستند. اُفت‌های ناشی از اصطکاک که اغلب به حرارت تبدیل می‌شوند سبب کاهش انرژی صوتی می‌شوند [5].

در مواد اسفنجی ذکر این نکته اهمیت دارد که تنها اسفنج‌های سلول باز جاذب‌های صوتی موثری هستند. افزایش دانسیته مواد اسفنجی به این دلیل که دانسیته بر ابعاد سلولی و ضخامت غشا تأثیر می‌گذارد می‌تواند ویژگی‌های جاذب صوتی را در فرکانس‌های مشخصی تحت تأثیر قرار دهد [6]. اگر مواد جاذب صوت با موانع صوتی ترکیب شوند، کامپوزیتی حاصل می‌شود که می‌توان آن را در لوله‌های ضعیف یا به‌عنوان پرده‌های جاذب صوت، به کار گرفت. با توجه به گستره امواج ساطع‌شده از منبع صوتی، انتخاب ماده جاذب از نظر نوع و ابعاد بر اساس بسامدی که باید کنترل شود، صورت می‌گیرد [7]. پژوهشگران، اثر جاذب‌های صوتی در رفتار آکوستیکی پوسته‌های استوانه‌ای دو جداره را با چند نوع جاذب مختلف و چندین گاز مختلف در ناحیه بین پوسته داخلی و خارجی استوانه بررسی نموده‌اند و اثر هر یک را در کاهش انتقال صوت به داخل پوسته استوانه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار سه نوع جاذب پلی‌اتیلن چگالی کم، پلی‌اتیلن چگالی زیاد و پلی‌اورتان فوم میزان اُفت صدا را برای بسامدهای رینگ و برخورد نسبت به پوسته تک‌جداره حدود  $40$  دسی‌بل و نسبت به پوسته دو‌جداره  $5$  تا  $10$  دسی‌بل کاهش داد. همچنین گازهای هیدروژن و هلیوم، میزان انتقال صدا به داخل پوسته را به شدت کاهش دادند [8]. بررسی خواص آکوستیکی، مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات کروی آلومینا نشان داد که به دلیل کروی بودن و چگالی پایین می‌تواند تأثیر مناسبی بر ضریب

از لوله‌های چند بخشی و یک فیلتر صدا نیز استفاده شود.



شکل ۱) شماتیک روش اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی<sup>[۱۴]</sup>

ویژگی‌های قابل ملاحظه بر عملکرد جذب عبارتند از: تراکم، ضخامت، تخلخل و جریان هوا<sup>[۱۷]</sup>. به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد که با افزایش تراکم، ضخامت، تخلخل و جریان هوا، سطح عملکرد جذب افزایش می‌یابد. اگرچه روش‌های مختلفی برای کمی‌سازی رفتار جذب‌های صدا وجود دارد اما اغلب از روش لوله موج ایستاده برای تعیین این خواص استفاده می‌شود. زیرا به دلیل تک‌بعدی شدن موج (در پهنای باند خاص)، امواج صدا می‌توانند در یک جهت انتشار یابند که باعث ساده و کوچک‌شدن آزمون می‌شود<sup>[۱۸]</sup>.

رویکردها و مدل‌های مختلفی از جمله پانل‌های سوراخ‌شده<sup>[۱۹, ۲۰]</sup>، رزوناتورها و حفره‌ها<sup>[۲۱, ۲۲]</sup>، غشاهای<sup>[۲۳, ۲۴]</sup>، مواد طبیعی و مصنوعی فیبری یا متخلخل<sup>[۲۵]</sup> توسط محققین ارایه شده است. اکثر موارد پیشنهادی تنها در محدوده خاصی از بسامد، کارایی خوب و بهینه‌ای دارند. در سال‌های اخیر توجه زیادی به مواد جذب صوتی معدنی شده است. کریستال‌های صوتی و جذب‌های فونیکس و بعد از آن موانع صوتی از جمله این مواد پیشنهادی هستند<sup>[۲۶, ۲۷]</sup>. این ایده به‌صورت گسترده‌ای پذیرفته شد و جذب‌های صوتی قابل تنظیم از طرق مختلف توسعه داده شدند<sup>[۲۸, ۲۹]</sup>. یکی از رویکردهای ذکر شده، دست‌کاری در ساختارهای کریستالی صوتی است که در این ساختارها باید نقاط متمرکز (به‌صورت حلقوی، کروی و استوانه‌ای) را جایگزین نقاط پراکنده کرد<sup>[۳۰, ۳۱]</sup>.

کاهش ضخامت ابعاد این جذب‌های صوتی، دارای مزایایی از قبیل قیمت مناسب، نصب آسان و غیره است؛ لذا طراحی بهینه جذب‌های چندلایه تخت با کمترین ضخامت همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. پژوهشگرانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، طراحی جذب متخلخل سه‌لایه تخت را بهینه‌سازی نمودند. آنها ساختار چندلایه جذب را به دو روش تحلیلی و عددی بررسی نمودند. نتایج این تحقیق بیانگر تطابق مناسب روش‌های عددی با تحلیلی بود. همچنین نتایج نشان دادند که ساختار متخلخل سه‌لایه تخت با ضخامت کمتر از یک‌پنجم طول موج متناظر، با بسامد قطع ۸۰ هرتز دارای کیفیت قابل مقایسه‌ای نسبت به ساختارهای گوه‌ای داشت<sup>[۳۲]</sup>.

آلودگی صوتی در بخش صنایع غذایی و کشاورزی می‌تواند اثرات مخربی روی کیفیت مواد غذایی و به‌دنبال آن سلامتی افراد جامعه

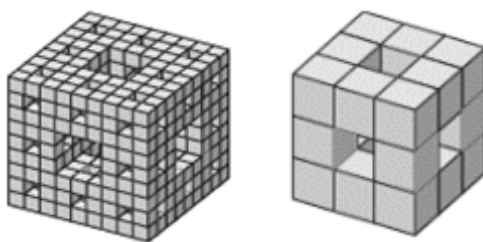
جذب صوتی پلی‌یورتان فوم بگذار<sup>[۹]</sup>. ارزیابی عملکرد مواد جذب صوت و تعیین عواملی همچون ضریب جذب، ضریب انعکاس و غیره اساساً بر پایه قراردادن جسم مورد نظر در معرض منبع صوت و اندازه‌گیری تاثیر حضور جسم بر میزان صوت و جذب آن است<sup>[۱۰]</sup>. هندسه فرکتال یک مدل دقیق از ساختارهای پیچیده در طبیعت را فراهم می‌کند<sup>[۱۱]</sup>. در بررسی خواص صوتی دستگاه‌های به‌شدت نامنظم، مطالعات نظری و آماری روی انتشار صوت در پدیده‌های فرکتالی انجام شده است. نتایج نشان داده که این پدیده‌ها می‌توانند به‌عنوان جذب صوت در نظر گرفته شوند<sup>[۱۲]</sup>. مطالعات اخیر در مورد ارتعاش صدا در حفره‌های فرکتالی نشان داده که این مواد می‌توانند به‌عنوان جذب امواج صوتی و امواج الکترومغناطیسی در نظر گرفته شوند. ساختارهای فرش سرپینسکی و ساختار سه‌بعدی فرکتالی اسفنج منگر نمونه‌هایی از این نوع جذب‌ها هستند که قابلیت جذب امواج صوتی و الکترومغناطیسی را دارند<sup>[۱۳]</sup>.

برای اندازه‌گیری جذب صوت سه روش میدان پژواک، روش لوله امیدانس و روش شرایط یکنواخت وجود دارد. در روش میدان پژواک، نحوه عملکرد اجسام در ارتباط با امواجی که به‌صورت نامنظم به سطح جسم برخورد می‌کنند، ارزیابی می‌شود؛ این حالت زمانی رخ می‌دهد که جسم در دایره یا میدان انتشار قرار دارد. روش لوله امیدانس روشی سریع و تکرارپذیر است که از امواج صوتی مسطح (واقع در یک صفحه) استفاده می‌شود. در این روش از یک تا چند میکروفون استفاده می‌شود. در روش استفاده از لوله امیدانس مجهز به میکروفون‌های ثابت، می‌توان از سه و حتی چهار میکروفون نیز استفاده نمود<sup>[۱۴]</sup>. در روش شرایط یکنواخت، به‌منظور اندازه‌گیری ضریب انتقال مواد از میکروفون سوم و حتی جفت میکروفون دوم در پشت نمونه مورد آزمایش استفاده می‌شود<sup>[۱۷]</sup>.

در پژوهشی میزان ضریب جذب صدا برای چند جذب با جنس‌های پشم معدنی، پشم شیشه، چوب‌پنبه و لاستیک در دو ضخامت به روش تابع انتقال در لوله امیدانس به روش دو میکروفونی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های پشم معدنی و پشم شیشه بیشترین ضریب جذب و لاستیک و چوب‌پنبه کمترین ضریب را داشتند. در مقایسه پشم شیشه با مقادیر مرجع نشان داد که با افزایش بسامد، میزان جذب افزایش یافت. اما در نمونه پشم معدنی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر نسبت به ضخامت کمتر، در همه بسامدها به‌جز محدوده ۱۲۵۰ تا ۳۲۰۰ هرتز، جذب بیشتری داشت اما پشم معدنی مرجع با ضخامت بیشتر در بسامدهای ۲۰۰ و ۵۰۰ هرتز، ضریب جذب کمتری را نشان داد<sup>[۱۵]</sup>.

کاواچی و همکاران<sup>[۱۶]</sup>، ضریب جذب صوت اسفنج منگر اکریلیکی که نوعی فرکتال سه‌بعدی است را به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از روش دو میکروفونی (شکل ۱) در محدوده بسامدی ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ هرتز به‌منظور بررسی خواص آکوستیکی آن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اسفنج منگر با توجه به ساختار فرکتالی خود دامنه‌ای وسیع از بسامدها را جذب می‌کند. همچنین آنها متوجه شدند برای کامل روشن‌شدن نقش فرکتال در امواج آکوستیک، باید

نهایت ۲۷ لایه شد.



شکل ۲) ساختار الگوی فرکتالی گام به گام اسفنچ منگر در گام اول (چپ) و دوم (راست)

### روش آزمون

با توجه به فرضیه تاثیر جنس ماده بر میزان ضریب جذب، اسفنچ منگر با ساختار فرکتالی با جنس‌های مختلفی ساخته شد. مواد مورد بررسی شامل چوب‌پنبه، ام‌دی‌اف، فوم و اسفنچ بود. پس از انتخاب جنس ماده تشکیل‌دهنده اسفنچ منگر و ساخت نمونه‌های آزمایشی در گام‌های مختلف، آزمون‌های آکوستیکی در لوله امیدانس انجام گرفت. صدا به وسیله مولد سیگنال تولید شد که با استفاده از بلندگو به داخل لوله امیدانس هدایت شد و خروجی آنها پس از اعمال روی اسفنچ‌های ساخته شده، توسط آزمون دو میکروفونی اندازه‌گیری و ثبت شد. قبل از ثبت داده‌ها، به منظور کالیبره نمودن سامانه و حذف خطای اندازه‌گیری، ابتدا با استفاده از کالیبراتور میکروفون‌ها چند سیگنال با بسامد ۱۰۰۰ هرتز در فشار صوت ۹۴ و ۱۱۴ دسی‌بل تولید و سامانه مورد نظر ارزیابی شد. به منظور ساخت لوله امیدانس از لوله PVC با قطر خارجی ۱۲۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۱۹/۱ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. جنس و شرایط انتخاب با استفاده از استاندارد بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات انتخاب شد [36]. شکل ۳ نمایی از تجهیزات و نحوه اتصال آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۳) نمایی از تجهیزات و نحوه اتصال آنها، (۱) لوله امیدانس، (۲) بلندگو، (۳) دستگاه مولد، (۴) و (۵) میکروفون‌ها، (۶) رایانه، (۷) نمونه اسفنچ، (۸) کارت صدا

تجهیزات الکتریکی به کاررفته در این پژوهش شامل میکروفون، تقویت‌کننده، پایش داده، کالیبراتور و اسپیکر هستند. مشخصات اصلی مانند سازنده، مدل، دامنه کاری و دقت اندازه‌گیری هر کدام از این تجهیزات در جدول ۱ گزارش شده است. گستره بسامد کاری عبارت است از:

داشته باشد. بنابراین برای رفع این مشکل باید میزان این آلودگی صوتی در کارخانه‌ها و تمام صنایع وابسته به صنعت غذا و کشاورزی، کاهش داده شود. در سال‌های اخیر، در رابطه با کیفیت گوشت و مواد غذایی، مقاومت در برابر تغییرات هموستاز (ثابت نگه‌داشتن مواد در محیط داخلی بدن) توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است [33]. این تغییرات در زمان‌ها و مکان‌های مختلفی می‌تواند اتفاق افتد؛ مانند امکانات کشتارگاهی که در آن صداهای ناآشنا به‌عنوان یک عامل استرس‌زا بر کیفیت گوشت تاثیر می‌گذارد [34]. همچنین استرس ناشی از سروصدا در طول نگهداری در کشتارگاه، تاثیر قابل توجهی در کیفیت و پارامترهای گوشت لاشه گاو گوشتی حتی در بین نژادهای مختلف دارد [35]. جاذب‌های صوتی در انواع مختلفی از جنس‌ها مانند کناف، چوب‌پنبه، فیبر و غیره ساخته می‌شود. به دلیل اهمیت این موضوع و با توجه به مطالعات اخیر محققین، بررسی جاذب‌های صدایی که بتوانند ضریب جذب بالایی داشته باشند، موثر واقع خواهد شد. طراحی اسفنچ منگر با ساختار فرکتالی که اثر تخریبی زیست‌محیطی نداشته باشد، راه‌حل مناسبی برای این مساله خواهد بود. لذا مطالعه تجربی خواص آکوستیکی اسفنچ منگر برای جذب محدوده‌ای از فرکانس‌های امواج صوتی می‌تواند در طراحی جاذب‌های صوتی موثر واقع شود. با توجه به پژوهش انجام شده [16] فرآیند ساخت و تولید جاذب‌های اکریلیکی هزینه‌بر است و در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست. از طرفی با توجه به راحتی دسترسی به موادی مانند ام‌دی‌اف، فوم و چوب‌پنبه ضرورت ارزیابی این مواد در بازه بسامدی بالاتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا هدف از این پژوهش تعیین مقدار ضریب جذب صدا و کاهش تراز ساختار اسفنچ منگر با الگوی فرکتالی در جنس‌های مختلف در محدوده بسامدی ۱۶ تا ۴۰۰۰ هرتز بوده است.

### مواد و روش‌ها

برای طراحی و ساخت الگوی اسفنچ منگر و تعیین محدوده بهینه ضریب جذب از دو گام متفاوت ساختار متوالی فرکتالی استفاده شده است. در هر گام به ترتیب تعداد حفره‌ها افزایش یافته که در نتیجه بر عملکرد جذب موثر آن تاثیرگذار است. در گام اول فقط یک حفره در وسط هر ضلع در نظر گرفته شد. در گام دوم دارای یک حفره در وسط و سه حفره در راستای هر ضلع است (شکل ۲). برای ساخت این اسفنچ از الگوی مکعبی ۹×۹ سانتی‌متر استفاده شده است. به دلیل ساختار متخلخل اسفنچ منگر و همچنین عدم وجود ورقه‌هایی از جنس‌های مختلف با این ضخامت، طراحی و ساخت آن به‌صورت پیوسته و یک‌جا، کاری دشوار بود؛ بنابراین برای ساخت گام اول ابتدا ۹ لایه یک سانتی‌متری طراحی شد و سپس به‌وسیله لیزر، حفره‌ها ساخته شدند. این ۹ لایه توسط چسب و به‌صورت دستی با نهایت دقت به هم متصل شدند. برای گام دوم از همین روش استفاده شد، با این تفاوت که به دلیل بیشتر شدن تعداد حفره‌ها هر لایه یک سانتی‌متری نیز خود به ۳ لایه تقسیم و در

جدول ۳) تجزیه و تحلیل واریانس میانگین اثرات جنس، گام، موج، بسامد و دامنه بر ضریب جذب و تغییرات تراز صدا

جنس	درجه آزادی	جمع میانگین مربعات	
		منابع متغیر	ضریب جذب
چسب	۳	۰/۵۹۵**	۲۶۵۷/۴۸۶**
گام	۱	۰/۲۴۸**	۲۵۲/۷۲۳ <sup>ns</sup>
بسامد	۸	۲۲/۲۴۶**	۷۸۷۱۵/۲۱۷**
جنس x گام	۳	۰/۵۰۴**	۱۹۹۴/۰۲۰**
جنس x بسامد	۲۳	۱۳/۹۱۲**	۶۹۷۰/۹۴۳**
گام x بسامد	۸	۱/۸۱۵**	۸۴۵/۳۱۰ <sup>ns</sup>
جنس x گام x بسامد	۱۶	۵/۰۶۰**	۳۸۰۷/۰۹۱**
خطا	۱۷۷۵	۲۵/۹۲۸	۱۰۴۵۸۴/۲۳۰

\*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪؛ <sup>ns</sup>: عدم معنی‌داری

جنس به‌کاررفته در ساختار اسفنج منگر یکی از عوامل تعیین‌کننده مهم در میزان جذب صدا است. استفاده از چندین جنس مختلف این امکان را فراهم می‌کند تا مقایسه بهتر و در نتیجه انتخاب بهتری حاصل شود. نمودار ۱، اثر جنس‌های به‌کاررفته در ساختار اسفنج منگر را بر ضریب جذب استاندارد صدا نشان می‌دهد. در دو جنس ام‌دی‌اف و فوم مقدار ضریب جذب تقریباً نزدیک به هم به‌دست آمدند. در مورد دو جنس دیگر یعنی چوب‌پنبه و اسفنج نیز همین طور است. محدوده تغییرات ضریب جذب برای چهار جنس به‌کاررفته بین ۳/۰ تا ۴/۰ است. نتایج حاکی از آن است که جنس‌های سخت‌تر دارای ضریب جذب پایین‌تر و جنس‌هایی با بافت سبک‌تر دارای ضریب جذب بالاتری هستند. بنابراین مشاهده می‌شود که ام‌دی‌اف با توجه به بافت سخت‌تر نسبت به سایر جنس‌ها ضریب جذب پایین‌تر و فوم با بافت سبک ضریب جذب بالاتری دارد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش چگالی ماده، ضریب جذب مواد کاهش یافته که با یافته‌های دیگر پژوهشگران تطابق داشت [15].

کمترین تغییرات تراز صدا در ام‌دی‌اف و بیشترین تغییرات در چوب‌پنبه به‌ترتیب برابر ۴/۵۹- و ۱۰/۱۴۹- دسی‌بل به‌دست آمدند. با توجه به مشاهدات به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که هرچه ساختار اسفنج دارای بافت سخت‌تری باشد، میزان تغییرات تراز صدا به‌طور محسوسی کمتر خواهد بود. محدوده تغییرات تراز صدا بر فوم، چوب‌پنبه و اسفنج بین ۷/۲- تا ۱۰- دسی‌بل و تقریباً نزدیک به هم و با اختلاف از چوب‌پنبه است.

یکی از عامل‌های مهم بر مقدار ضریب جذب، میزان درصد خلل و فرج در جاذب اسفنج منگر است. با استفاده از دو گام پیشنهادی در الگوی اسفنج منگر از گام یک به دو میزان خلل و فرج و به‌دنبال آن مقدار ضریب جذب صدای استاندارد افزایش پیدا کرده است؛ به عبارتی گام دو، عملکرد جذب بالاتری نسبت به گام یک دارد (نمودار ۲). بیشینه ضریب جذب برای گام یک ۳۱۷/۰ و برای گام دو ۳۸۴/۰ است. با توجه به اینکه تعداد حفره‌ها در گام دو بالاتر از گام یک است می‌توان نتیجه گرفت که هرچه میزان تخلخل بیشتر باشد، ضریب جذب بالاتر خواهد بود؛ بنابراین رابطه مستقیمی بین میزان

$$f_l < f < f_u \quad (1)$$

که در آن  $f_l$  بسامد پایین لوله،  $f$  بسامد و  $f_u$  بسامد بالایی لوله، به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود تا از انتشار موج غیرتخت جلوگیری شود.  $C_0$  (سرعت صدا) بر حسب متر بر ثانیه از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$C_0 = 343.2 \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (2)$$

در این رابطه  $T$  دما بر حسب کلوین است. فاصله میکروفن‌ها:  $S$  (متر)، از رابطه ۳ تعیین می‌شود:

$$f_u \cdot S < 0.45 C_0 \quad (3)$$

حد بسامد پایینی بستگی به فاصله میان میکروفن‌ها و درستی سیستم تحلیل دارد، اما به عنوان یک رهنمود کلی، فاصله‌بندی میکروفن بایستی از ۵٪ طول موج متناظر با بسامد پایینی مورد نظر فراتر رود به شرط آنکه الزامات معادله ۳ رعایت شود. با توجه به اینکه بایستی ضریب جذب در بسامدهای ۱۶ تا ۴۰۰۰ هرتز محاسبه شود، با استفاده از روابط مطرح‌شده محل نصب دقیق میکروفن‌ها روی دیواره لوله محاسبه شد [35] (جدول ۲).

به‌منظور بررسی آماری و تحلیل نتایج از نرم‌افزارهای اسکوپ (Scope) برای ثبت سیگنال، MATLAB 7.1(R2010a) SPSS و استخراج پارامترهای سیگنال و اسپیس‌اس (SPSS) برای تحلیل معنی‌دار بودن نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب جذب صوت استفاده شد.

جدول ۱) مشخصات الکتریکی تجهیزات

تجهیزات	سازنده	مدل	دامنه	دقت
میکروفن	BSWA	MP201	16-146 dB	50 mV/Pa
تقویت‌کننده	BSWA	MAP231	19 Hz-150 kHz	-
پایس داده	BSWA	MC3022	35-118 dB	-
کالیبراتور	BSWA	CA111	94 and 114 dB at 1000 Hz	-
اسپیکر	Gun speaker	-	20-20000 Hz	-

جدول ۲) موقعیت نصب میکروفن‌ها بر دیواره لوله امپدانس

موقعیت میکروفن‌ها	فاصله بین میکروفن‌ها (میلی‌متر)	بسامد حد پایین: $f_l$ (هرتز)	بسامد حد بالا: $f_u$ (هرتز)
۲-۱	۳۵	۵۰۰	۴۰۰۰
۳-۱	۲۷۷	۱۶	۵۰۵

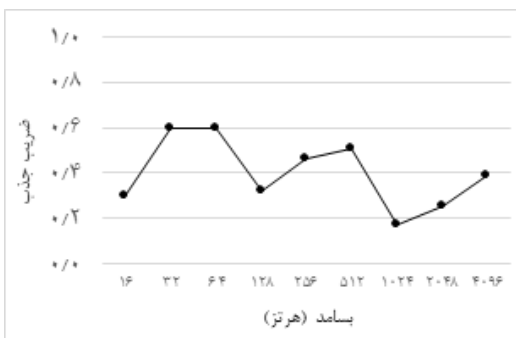
## نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس میانگین اثرات جنس، گام و بسامد بر ضریب جذب و تغییرات تراز صدا، نشان می‌دهد که کلیه اثرات سطوح عامل‌های اصلی و اثرات برهمکنش در سطح احتمال یک درصد تحت آزمون توکی برای ضریب جذب معنی‌دار شده‌اند (جدول ۳). برای تغییرات تراز صدا، اثرهای جنس و بسامد و اثرات برهمکنش جنس-بسامد و جنس-گام-بسامد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده‌اند. اثر سطح گام و برهمکنش گام-بسامد در تغییرات تراز صدا، معنی‌دار نیستند.

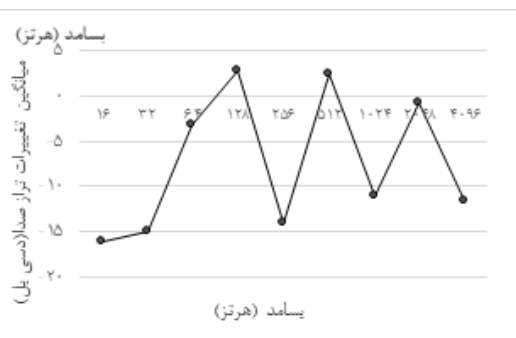


تغییرات ضریب جذب استاندارد صدای اسفنج منگر در بسامدهای مختلف نشان می‌دهد که در بسامدهای ۳۲ تا ۶۴ هرتز ضریب جذب به بیشینه خود با مقدار ۰/۶ رسیده است (نمودار ۳). در بسامد ۱۰۲۴ هرتز کمترین ضریب جذب با مقدار ۰/۱۷۳ دیده می‌شود. در بسامدهای ۶۴ تا ۱۲۸ هرتز و ۵۱۲ تا ۱۰۲۴ هرتز شیب نمودار منفی شده است؛ ولی در سایر بسامدها این شیب مثبت است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت ضریب جذب استاندارد صدا در بسامدهای مختلف، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال در بسامد ۱۶ هرتز ضریب جذب ۰/۳ دیده شد که با افزایش میزان بسامد تا ۶۴ هرتز این ضریب جذب نیز افزایش پیدا کرده و مقدار آن به بالاترین مقدار (۰/۶) رسیده است. از بسامد ۱۶ تا ۱۲۸ هرتز روند کاهشی ضریب جذب مشاهده می‌شود و مقدار آن به ۰/۳۱۷ رسیده است. در مرحله بعد و با زیاد شدن بسامد تا ۲۵۶ هرتز ضریب جذب افزایش یافته است. نتایج تحقیقات انجام شده نیز نشان داده که ضریب جذب صوتی در بسامدهای پایین افزایش کمی داشته در حالی که این ضریب در بسامدهای میانی و بالاتر افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند [۸].

رابطه میان بسامدهای مختلف و میانگین تغییرات تراز صدای اسفنج منگر نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در بسامدهای ۱۶، ۳۲ و ۲۵۶ هرتز روی داده است که بیشینه آن در بسامد ۱۶ هرتز است. کمترین تغییرات در بسامدهای ۱۲۸، ۵۱۲ هرتز و کمترین مقدار آن در ۵۱۲ هرتز است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت روند تغییرات منظم نیست و در بسامدهای مختلف اعداد متفاوتی به دست آمدند و نمی‌توان بیشترین یا کمترین تغییرات تراز صدا را به بسامدهای پایین یا بسامدهای بالا نسبت داد.



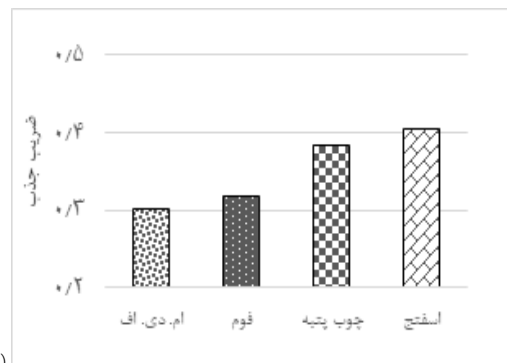
(الف)



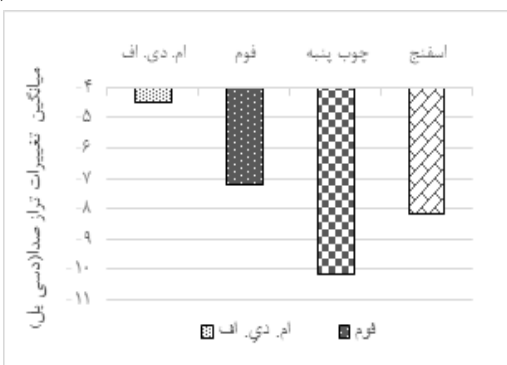
(ب)

**نمودار ۳** اثر بسامد بر مقدار ضریب جذب استاندارد صدا (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)

تخلخل و ضریب جذب وجود دارد. میانگین تغییرات تراز صدا در اسفنج منگر نشان می‌دهد که این محدوده تغییرات از گام یک به گام دو تقریباً ناچیز است.

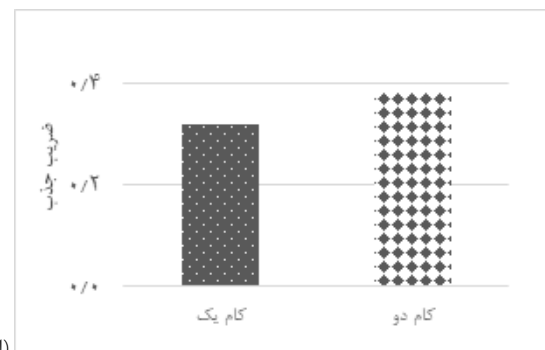


(الف)

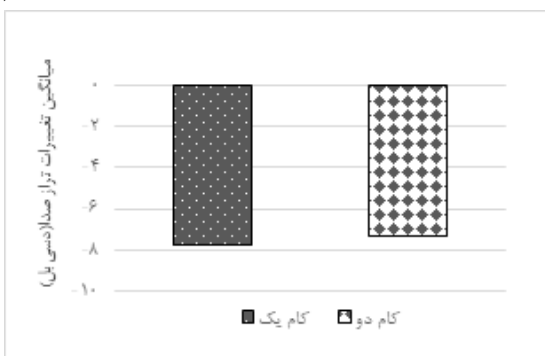


(ب)

**نمودار ۱** اثر جنس بر مقدار ضریب جذب استاندارد صدا (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)



(الف)



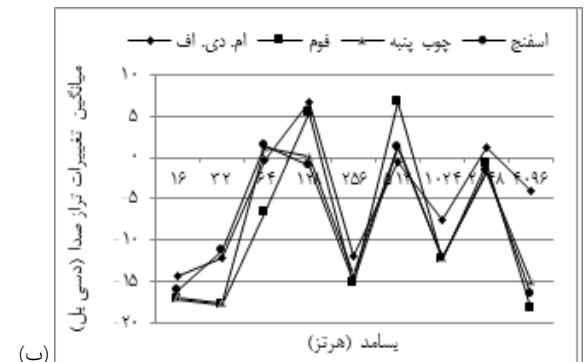
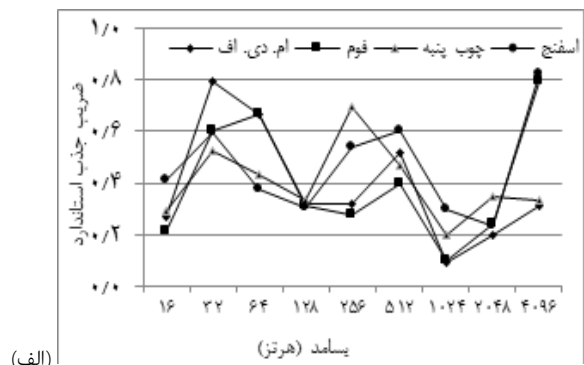
(ب)

**نمودار ۲** اثر گام بر مقدار ضریب جذب استاندارد صدا (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)

پیدا کرده است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که ساختارهایی با بافت سخت‌تر (مانند ام‌دی‌اف و چوب‌پنبه) دارای تغییرات تراز صدای بیشتر و ساختارهایی با بافت سبک (مانند فوم و اسفنج) دارای تغییرات تراز صدای کمتری هستند.

### برهمکنش عامل‌های جنس و بسامد

رابطه بین بسامدهای مختلف و ضریب جذب استاندارد صدا در چهار جنس متفاوت از اسفنج منگر در نمودار ۵ نشان داده می‌شود. روند تغییرات برای جنس‌های مختلف متفاوت است. برای ام‌دی‌اف بیشترین جذب در بسامدهای پایین و بیشینه آن در بسامد ۳۲ و با مقدار ۰/۸ اتفاق افتاده است. در دو جنس فوم و اسفنج، بیشترین جذب در بسامد بالا یعنی ۴۰۹۶ و با مقدار ۰/۸۲ صورت گرفته است. بالاترین جذب برای چوب‌پنبه در بسامد ۲۵۶ و با مقدار ۰/۷ است. بنابراین نمی‌توان گفت که بیشترین جذب یا کمترین جذب در کدام محدوده خاص از بسامدها اتفاق می‌افتد. برای دو جنس ام‌دی‌اف و فوم کمترین میزان جذب در بسامد ۱۰۲۴ با مقدار ۰/۱ ثبت شده است. برای اسفنج کمترین جذب در بسامد بالای ۲۰۴۸ با مقدار ۰/۲۳ اتفاق افتاده است و برای چوب‌پنبه کمترین جذب در بسامد ۱۰۲۴ با مقدار ۰/۱۹ را داشته است. لذا می‌توان گفت که با توجه به نفوذ بیشتر امواج با فرکانس‌های بیشتر در ماده، کمترین جذب برای هر چهار جنس در بسامدهای بالا مشاهده شده است که نتایج با یافته‌های پژوهشگران دیگر نیز تطابق داشته است [15].

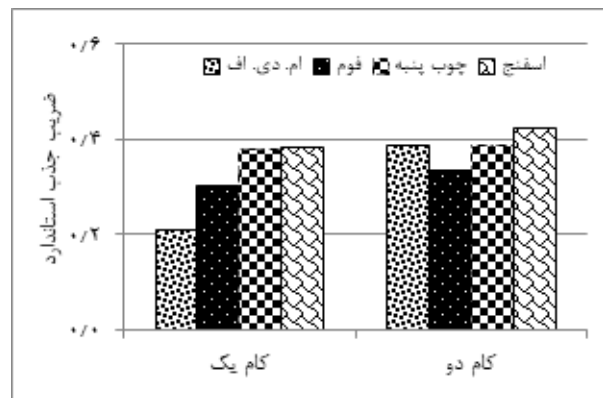


نمودار ۵) اثر برهمکنش عامل‌های جنس و بسامد بر ضریب جذب استاندارد (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)

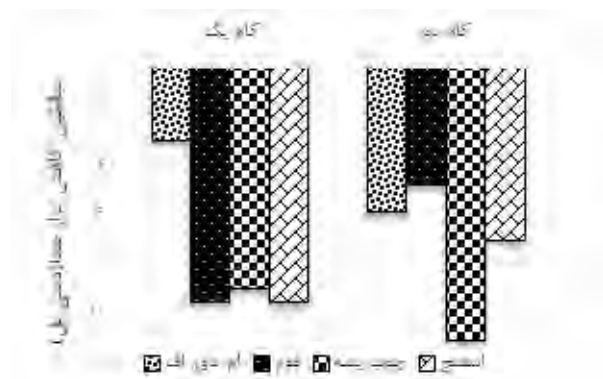
روند تغییرات تراز صدا در دو جنس ام‌دی‌اف و فوم تقریباً یکسان است. همچنین چوب‌پنبه و اسفنج نیز روند تغییرات مشابهی دارند.

### برهمکنش عامل‌های جنس و گام

ارتباط میان گام و ضریب جذب استاندارد صدا برای جنس‌های مختلف اسفنج منگر نشان می‌دهد که برای هر چهار جنس به‌کاررفته در ساخت این اسفنج ضریب جذب از گام یک به سمت گام دو افزایش پیدا کرده است (نمودار ۴). این افزایش در جنس ام‌دی‌اف محسوس‌تر و تقریباً از ۰/۲ به سمت ۰/۴ صعود داشته است. برای فوم از ۰/۳ به ۰/۳۳، برای چوب‌پنبه از ۰/۳۷ به ۰/۳۹ و برای اسفنج از ۰/۳۸ به ۰/۴۲ روند افزایشی وجود دارد (نمودار ۴). مشاهده می‌شود گام دوم از جنس ام‌دی‌اف جذب بالاتر و محسوس‌تری در مقایسه با گام یک دارد. با توجه به مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت با زیاد شدن تعداد حفره‌ها یا به عبارتی تغییر ساختار اسفنج منگر از گام یک به گام دو برای همه جنس‌های به‌کاررفته در این آزمون، ضریب جذب افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که افزایش عملکرد جذب برای جنس ام‌دی‌اف از گام یک به دو مشهودتر از سایر جنس‌ها است.



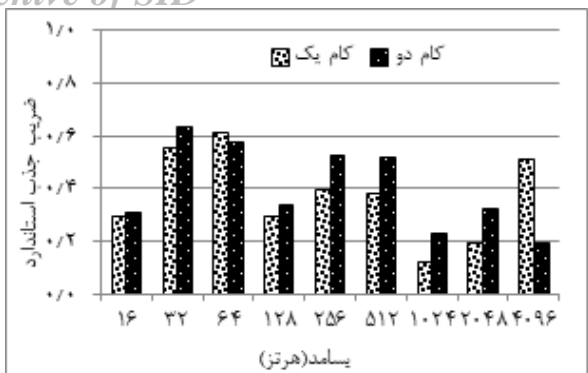
(الف)



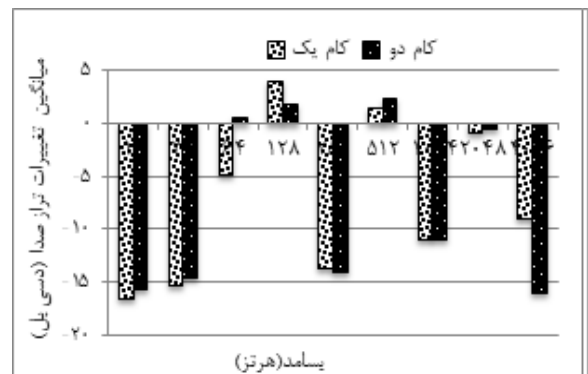
(ب)

نمودار ۴) اثر برهمکنش عامل‌های جنس و گام بر ضریب جذب صدا (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)

بررسی تراز صدا نشان می‌دهد که در دو جنس ام‌دی‌اف و چوب‌پنبه از گام یک به گام دو تغییرات تراز صدا افزایش پیدا کرده است. تراز صدا در جنس ام‌دی‌اف از ۲/۹۳- به ۵/۸۶- و در جنس چوب‌پنبه از ۹/۰۱- به ۱۱/۱۲- تغییر کرده است. در فوم و اسفنج این روند کاهشی است و در فوم از ۹/۵۶- به ۴/۷۸- و در اسفنج از ۹/۵- به ۷/۴- تغییر



(الف)



(ب)

نمودار ۱۶ اثر برهمکنش عامل‌های گام و بسماد بر ضریب جذب استاندارد (الف) و میانگین تغییرات تراز صدا (ب)

### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت موضوع کاهش سروصدا، ساخت جاذب‌های صدایی که بتوانند ضریب جذب بالایی داشته باشند، لازم به نظر می‌رسد. جاذب‌های متخلخل نسبت به سایر جاذب‌ها به دلیل داشتن خلل‌وفرج و حفره‌های زیاد دارای جذب بالاتری هستند؛ بنابراین ساختن یک جاذب متخلخل با بالاترین ضریب جذب هدف عمده این تحقیق است.

بررسی عامل‌های جنس، گام و بسماد نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد جنس به‌کاررفته در اسفنج منگر نسبت به دو عامل دیگر، بر میزان تغییرات ضریب جذب، تأثیرات مثبت و مشهودتری داشته است. با تغییر دادن جنس اسفنج، میزان ضریب جذب و تغییرات میانگین تراز صدا به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر پیدا کرد. با زیاد شدن تعداد حفره‌ها روی اسفنج منگر می‌توان ضریب جذب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. از میان چهار جنس به‌کاررفته، جنس اسفنج به‌خاطر بافت سبک خود دارای بالاترین میزان ضریب جذب با مقدار ۰/۴ و جنس ام‌دی‌اف به دلیل ساختار سخت‌تر دارای کمترین میزان ضریب جذب با مقدار ۰/۳ است. با تغییر گام از یک به دو و با زیاد شدن تعداد حفره‌ها میزان جذب از ۰/۳ به ۰/۳۸ افزایش پیدا کرده است. میزان ضریب جذب همچنین در بسمادهای بین ۳۲ تا ۶۴ هرتز دارای حداکثر مقدار ۰/۶ و در بسماد ۱۰۲۴ هرتز دارای کمترین مقدار خود یعنی ۰/۱۷ است. با توجه به نتایج پژوهش‌های انجام‌شده و تحقیق حاضر، در محدوده بسمادی تأثیرگذار [15, 38]

در ام‌دی‌اف بیشترین تغییرات تراز صدا در بسماد ۱۶ هرتز و با مقدار ۱۴/۳۶-دسی‌بل و کمترین مقدار آن در بسماد ۱۲۸ هرتز و با مقدار ۶/۷۴-دسی‌بل اتفاق افتاده است. در فوم بیشترین تغییرات تراز صدا در بسماد ۴۰۹۶ هرتز با مقدار ۱۸/۲- و کمترین تغییرات در بسماد ۵۱۲ هرتز با مقدار ۶۷/۶۷-دسی‌بل است. چوب‌پنبه دارای بیشترین تغییرات تراز صدا در بسماد ۱۶ هرتز به میزان ۱۴/۳۶- و کمترین تغییرات در بسماد ۵۱۲ هرتز با مقدار ۱/۲۹ است و اسفنج در بسماد ۱۶ هرتز کمترین تغییرات و در بسماد ۵۱۲ هرتز بیشترین تغییرات را به‌ترتیب با مقادیر ۱۵/۹۹- و ۱/۲۹ دارد. نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که در محدوده بسمادی ۲۵۰ تا ۵۰۰ هرتز برای اسفنج ضریب جذب افزایش و در بسماد ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز ضریب جذب کاهش پیدا می‌کند [37]. با توجه به نمودار ۵ می‌توان نتیجه گرفت در هر چهار جنس ذکرشده در بسمادهای پایین، حداکثر میزان تغییرات تراز صدا و در فاصله میان بسمادهای ۱۲۸ تا ۵۱۲ هرتز حداقل تغییرات تراز صدا مشاهده می‌شود. نتایج پژوهشگران نشان داده که افزایش بسماد از ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز ضریب کاهش شنوایی را افزایش داده، به نحوی که بیشترین میزان ضریب کاهش در بسماد ۴۰۰۰ هرتز رخ داده بود [38].

### برهمکنش عامل‌های گام و بسماد

رابطه بین بسمادهای مختلف و ضریب جذب استاندارد صدا در دو گام در نمودار ۶، نشان داده شده است. با توجه به اینکه با افزایش تعداد حفره‌ها میزان جذب بالاتر می‌رود در همه بسمادها به‌جز دو بسماد ۶۴ و ۴۰۹۶ هرتز میزان جذب در گام دوم بیشتر بوده است. در بسماد ۶۴ هرتز از گام یک به گام دو ضریب جذب از ۰/۶۱ به ۰/۵۷ کاهش یافته است. در بسماد ۴۰۹۶ هرتز ناگهان کاهش محسوسی در ضریب جذب از گام یک به دو دیده می‌شود. این کاهش از ۰/۵ به ۰/۲ است. با بالاتر رفتن مقدار بسماد قدرت نفوذ موج و عبور آن از جاذب بیشتر می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در بسمادهای بالاتر از ۲۰۴۸ از گام یک به گام دو میزان جذب اسفنج منگر کاهش می‌یابد. در گام یک، در میان بسمادهای مختلف، میزان جذب صدا در بسماد ۶۴ هرتز بالاتر است و در بسماد ۱۰۲۴ هرتز، جذب به حداقل رسیده است و در گام دو بیشینه جذب در بسماد ۳۲ هرتز و کمینه جذب در بسماد ۴۰۹۶ هرتز اتفاق افتاده است. این طور می‌توان نتیجه گرفت که جذب‌های بالا در بسمادهای پایین و جذب‌های پایین در بسمادهای بالا است.

بررسی تغییرات تراز صدا نشان می‌دهد که روند تغییرات در هر دو گام تقریباً یکسان است. در بسمادهای پایین برای هر دو گام بالاترین تغییرات و البته در بسمادهای مختلف، اعداد مختلفی از میانگین تغییرات تراز صدا مشاهده می‌شود. در گام یک، در بسمادهای ۱۶، ۳۲، ۲۵۶، ۱۰۲۴، ۴۰۹۶ هرتز بالاترین تغییرات تراز صدا به‌ترتیب با مقادیرهای ۱۵/۷۱، ۱۴/۷۲، ۱۴/۱۹۴، ۱۱/۰۴- و ۸-دسی‌بل و پایین‌ترین تغییرات تراز صدا را در بسمادهای ۶۴، ۱۲۸، ۵۱۲ و ۲۰۴۸ هرتز با مقادیرهای ۴/۸۶، ۳/۸۹، ۲/۴، ۰/۵۲- دسی‌بل است. در گام دو نیز در همین نتایج قابل مشاهده است.



[Dissertation]. Telangana: Jawaharlal Nehru Technology Universit; 2007.

15- Forouharmajd F, Mohammadi Z. The feasibility of using impedance tube with two microphones and sound absorption coefficient measurement of Iranian-made materials using transfer function method. *Journal of Health System Research*. 2016;12(1):119-124. [Persian]

16- Kawabe T, Miyazaki T, Oka D, Koyanagi S, Hinokidani A. Sound absorption by Menger sponge fractal. *Acoustical Society of America*. 2009;125(5):2830-2833.

17- Skinner Ch, Peters J, Vandenbroeck J. *Acoustic Absorbers: A third way for the management of sound in automobiles*. Maastricht: UTECH Europe; 2006.

18- de Bree HE. *The Micro flown e-book*. Unknown Publisher; 2009.

19- Maa DY. Theory and design of microperforated panel sound absorbing constructions. *Scientia Sinica*. 1975;18(1):55-71.

20- Maa DY. Microperforated-panel wideband absorbers. *Institute of Noise Control Engineering*. 1987;29(3):77-84.

21- Sanada A, Tanaka N. Extension of frequency range of resonant sound absorbers using two-degree-of-freedom Helmholtz based resonator with a flexible panel. *Applied Acoustics*. 2013;74(4):509-516.

22- Yahya I, Harjana H. New Sound absorption improvement strategy for QRD element. 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013. Unknown Publisher; 2013.

23- Harjana H, Yahya I. Perforated flexible membrane insertion influence on the sound absorption performance of cavity backed micro perforated panel. *International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA-14)*. Paris: Atlantis Press; 2014.

24- Min S, Nagamura K, Nakagawa N, Okamura M. Design of compact micro-perforated membrane absorber for polycarbonate pane in automobile. *Applied Acoustic*. 2013;74(4):622-627.

25- Kim BS, Cho SJ, Min DK, Park J. Sound absorption structure in helical shapes made from fibrous paper. *Composite Structure*. 2015;134:90-94.

26- van der Aa, Forssén J. Upward refraction of sound propagating outdoors by graded index sonic crystals noise barrier. *Applied Acoustics*. 2013;74(1):89-101.

27- Morrandi F, Miniaci M, Marzani A, Barbaresi L, Garai M. Standardised acoustic characterisation of sonic crystal noise barrier: Sound insulation and reflection properties. *Applied Acoustics*. 2016;114:294-306.

28- Romero-García V, Krynkina A, Garcia-Raffi LM, Umnova O, Sanchez-Perez JV. Multi resonant scatterers in sonic crystals: Locally multi resonant metamaterial. *Journal of Sound and Vibration*. 2013;332(1):184-198.

29- Alberti A, Gome PM, Spiouas I, Eguia MC. Broadband resonant cavity inside a two dimensional sonic crystal. *Applied Acoustics*. 2016;104:1-5.

30- Wang XP, Jiang P, Chen TN, Yu KP. Frequency characteristics of defect states in a two-dimensional phononic crystal with slit structure. *International Journal of Modern Physics B*. 2016;30(06):1650025.

31- Wu LY, Chen LW. Wave propagation in a 2D sonic crystal with a Helmholtz resonant defect. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010;43(5):055401.

32- Broghany M, Basirjafari S, Saffar S. Optimization of flat multi-layer sound absorber by using multi-objective genetic algorithm for application in anechoic chamber. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(2):215-222. [Persian]

استفاده از جاذب‌هایی با جنس اسفنج و فوم می‌تواند به ضریب جذب صدای بالاتری دست یابد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان از کلیه حمایت‌های مالی، اداری و آزمایشگاهی دانشگاه شهرکرد تشکر و قدردانی می‌کنند.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهام نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**منابع مالی:** هزینه‌های پژوهش از بخش هزینه‌های پایان‌نامه دانشجویی تأمین شده است.

## منابع

1- Sheikhi M, Kheyri A. Investigation of two types of silent layout versus fan ventilation channel using software simulation. *SOUT WA ERTEASH*. 2011;2(4):43-50. [Persian]

2- Nick A, Becker U, Thoma W. Improved acoustic behavior of interior parts of renewable resources in the automotive industry. *Journal of Polymers and the Environment*. 2002;10(3):115-118.

3- Shokoohi Tabrizi M. Designing of absorbent parts used in acoustic rooms [Dissertation]. Tehran: University of Tehran; 2000. [Persian]

4- Price AJ, Mulholland KA. The effect of surface treatment on sound absorbing materials. *Applied Acoustics*. 2004;1(1):67-72.

5- Monazam M. Providing a simple mathematical model and validating it-determine the best performance domain of audio barriers. *Iran Occupational Health*. 2009;6(2):77-82. [Persian]

6- Golmohamadi R. *Noise and Vibration Engineering: Measurement, assessment, effect and control*. 3<sup>rd</sup> Edition. Hamedan: Student Publications; 2007. [Persian]

7- Hasanzadeh S. Acoustic properties of non-textured layers made of fiber. Isfahan: Isfahan University of Technology; 2012. [Persian].

8- Farshidianfar A, Oliazadeh P. Studying the effect of sound absorber materials in acoustical behavior of double-wall cylindrical shell. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(4):331-338. [Persian]

9- Yazdanpanah H, Farshidianfar A, Ahmadpour A, Faezian A, Mokhtari F. Production method and analysis of the acoustic and mechanical properties of soft polyurethane foam reinforced by nano-alumina particles. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(7):261-266. [Persian]

10- Kannan AJ. Acoustical absorptive properties of nonwovens [Dissertation]. Raleigh: NC State University; 2005.

11- Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: Times Books (Henry Holt and Company); 1982.

12- GibiaT B, Barjau A, Castor K, Chazaud EB. Acoustical propagation in a prefractal waveguide. *Physical Review E*. 2003;67:066609.

13- Takeda MW, Kirihara S, Miyamoto Y, Sakoda K, Honda K. Localization of electromagnetic waves in three-dimensional fractal cavities. *Physical Review Letters*. 2004;92:093902.

14- Vengala XC. Impedance tube for measurement of sound transmission loss and absorption coefficients of Polymer cross-linked aerogel core composites

- 36- ASTM. Standard E1050-98, Impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. Pennsylvania: ASTM; 2014.
- 37- Golmohammadi R, Oliyaei M, Samavat H, Motamedzadeh M. Producing of Impedance Tube for Measurement of Acoustic Absorption Coefficient of Some Sound Absorber Materials. *Avicenna Journal of Clinical Medicine*. 2008;15(1):55-61. [Persian]
- 38- Safavi Naini SA, Fathololuomi MR, Fatahi Bafghi A. Hearing parameters in noise exposed industrial workers in Azmayesh factory. *Research in Medicine*. 2005;29(3):239-243. [Persian]
- 33- Voisinet BD, Grandin T, O'Connor SF, Tatum JD, Deesing MJ. Bos indicus-cross feedlot cattle with excitable temperaments have tougher meat and a higher incidence of borderline dark cutters. *Meat Science*. 1997;46(4):367-377.
- 34- Ferguson DM, Warner RD. Have we underestimated the impact of preslaughter stress on meat quality in ruminants?. *Meat Science*. 2008;80(1):12-19.
- 35- Peña F, Avilés C, Domenecha V, González A, Martínez A, Molina A. Effects of stress by unfamiliar sounds on carcass and meat traits in bulls from three continental beef cattle breeds at different ageing times. *Meat Science*. 2014;98(4):718-725.