

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Determining the Optimal Mesh for Making Acoustic Absorber from Arundo Donax Reed Stem

Akbar Ahmadi Asour<sup>1</sup>, Mohammadreza Monazzam<sup>1,\*</sup>, Ebrahim Taban<sup>2</sup>, Zahra Hashemi<sup>3</sup>, Somayeh Amininasab<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Occupational Health Engineering, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Behbahan Faculty of Medical Sciences, Khuzestan, Iran

<sup>4</sup> Department of Acoustic, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran Iran

Received: 12-06-2023

Accepted: 03-09-2023

### ABSTRACT

**Introduction:** The aim of this study was to investigate the effect of particle size (mesh) on the sound absorption coefficient of the absorbers made from Arundo Donax reed and to determine the optimal mesh for sound absorption.

**Material and Methods:** After crushing the reed stems in 10, 30, 20, 16, and 40 mesh sizes, they were washed with 5% NaOH. To make the samples 3 and 10 cm in diameter, 10% PVA was used as a binder, and the impedance of the two-channel tube was used according to ISO 10534-2 standard to determine the absorption coefficient. 22 samples of meshes 16 and 20 were made to achieve the optimal mesh based on the optimized RSM method, and the SAA index was used to compare the samples and determine the optimal mesh.

**Results:** The highest absorption peak was related to meshes 16 and 20 at the frequency of 2500 Hz, which is 0.94 and 0.98, respectively. The effect of increasing the thickness and density on the absorption coefficient is evident. The results have shown the effect of increasing the thickness and density on the absorption coefficient in mesh 20 in such a way that by increasing the density from 150 to 250 and the thickness from 10 to 30 mm, the absorption coefficient has increased from 35 to 63.5%. The optimal sample was mesh 20 with a thickness of 30 and a density of 250 kg/m<sup>3</sup>, which had the highest average absorption (SAA=0.57). The greater distance between the real and imaginary parts of the impedance shows the reactivity of the sample. In mesh 16 this distance is greater, as a result, mesh 16 has more reactivity and correspondingly less absorption.

**Conclusion:** The role of particle mesh as one of the important and influencing parameters on absorption coefficient has been investigated in this study.

**Keywords:** Noise, Mesh, Reed, Absorption, Arundo donax

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ahmadi Asour A., Monazzam M.R., Taban E., Hashemi Z., Amininasab S. Determining the Optimal Mesh for Making Acoustic Absorber from Arundo Donax Reed Stem. *J Health Saf Work.* 2023; 13(3): 496-513.

## 1. INTRODUCTION

One of the technical and engineering methods involves the use of sound-absorbing materials (natural or synthetic) to control sound in work environments. Over the past two decades, natural-based fibers such as date palm fibers, kenaf, and rice

husk granules have replaced artificial absorbents due to their cost-effectiveness and environmental friendliness.

Among different reed species, the Arundo donax variety possesses woody and robust stems with thick knots and hollow internodes in marshes, estuaries, and alongside river and lake banks. It

\* Corresponding Author Email: [esmaelm@tums.ac.ir](mailto:esmaelm@tums.ac.ir)

typically grows at altitudes ranging from 0 to 1200 meters above sea level. Chilekwa et al. (2006) first explored the acoustic properties of stem during the Hollywood Project activities. Trematerra et al. (2013) found that in samples prepared with 4 cm reed pieces, the peak absorption at 700 and 1,300 Hz was 0.7 and 0.75, respectively. In subsequent research, the impact of mesh on the sound absorption coefficient has been considered. Thus, the current research aims to create an absorber, determine the sound absorption coefficient in different bulk thicknesses and densities based on particle mesh, and ultimately select the best mesh as the optimal sample.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### *Preparation, Creation, and Determination of the Absorption Coefficient of Samples for Optimal Selection*

The stems of *Arundo donax* reed were ground into smaller fragments using a grinder. These were sieved using 10, 20, 16, 30, and 40 mesh sieves (2, 1.19, 0.841, 0.595 and 0.4 mm, respectively) and subsequently rinsed with 5% NaOH. After drying to the desired amount, based on the density of 150 kg/m<sup>3</sup> and thickness of 4 cm, they were combined with 10% polyvinyl alcohol (PVA) as a binder. The samples were formed into diameters of 100 and 30 mm. The absorption coefficient for each sample was determined using the two-channel impedance tube model B & K, following the transfer function method of ISO standard 10534-2, over a frequency

range of 50-6,300 Hz. After calibrating the microphones, measurements were performed under standard conditions (relative humidity at 45%, temperature at 25°C, and atmospheric pressure of 101,325 Pascal). The optimal samples were selected based on the maximum absorption peak and frequency range.

### *Making and Determining the Absorption Coefficient of Optimal Samples*

Two of the five investigated meshes with closely aligned absorption averages were selected for further analysis. The number of samples was determined using the response surface method (RSM) with thickness and density as variables to identify the optimal mesh from these two candidates. Accordingly, 22 samples under identical conditions were produced. The samples' sound absorption average (SAA) was calculated according to the ASTM-C 423 standard at 12 frequencies of one-third of the eco band, serving as a precise metric for more accurate selection and comparison.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### *Absorption Coefficients of Samples*

Among meshes 10, 16, 20, 30, and 40, the highest absorption peaks were observed in meshes 16 and 20 at a frequency of 2500 Hz, registering at 0.94 and 0.98, respectively (Fig. 1). Meshes 16 and 20 accounted for 47% and 56% of the average absorption coefficient (SAA), respectively (fig.1).

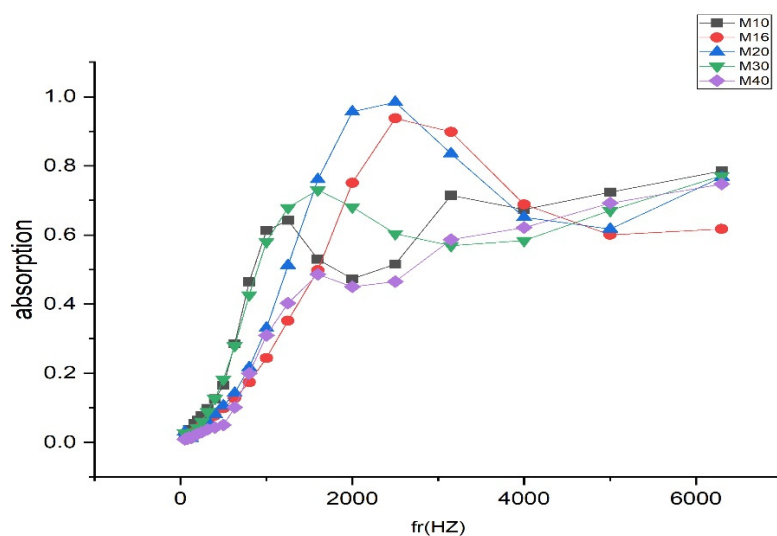


Fig. 1: Absorption coefficient of five meshes with the same thickness and density.

Therefore, a comparison of the absorption peaks of meshes 16 and 20 indicates that mesh 20 is more efficient in the mid-frequency range.

*Absorption Coefficient and Impedance of Mesh Samples 16 and 20*

Given the superior SAA index in meshes 16 and 20 compared to other meshes, and following the optimized RSM, 22 samples in three densities of 150, 200, and 250 kg/m<sup>3</sup> and thicknesses of 20, 10, and 30 mm were produced, and examined with specific repeatability. Findings revealed that increasing thickness and density in mesh 20 caused the absorption coefficient to rise from 35% to 63.5% when density increased from 150 to 250 and thickness from 10 to 30 mm.

The optimal samples for mesh 16 had a thickness of 30 and a density of 200 (sample A), while mesh 20 had a thickness of 30 and a density of 250 (sample B). They registered the highest average absorption

(SAA) of 0.52 and 0.57, respectively. Consequently, these samples were chosen as optimal for further comparison, detailed analysis, and final sample selection (Fig. 2).

*Impedance of Samples*

For both samples, variations in the real part are discernible in the 2000-4000 Hz frequency range, and fluctuations in the imaginary part are evident between 2500-1600 and 3150-1600 Hz. The real peak for mesh 16 is approximately 38% higher than mesh 20 corresponding frequencies. Conversely, the peak of the imaginary part for mesh 16 is approximately 60% greater than that of mesh 20, implying that mesh 16 offers more resistance to sound waves (Fig. 3).

In this study, mesh 10 exhibits greater absorption than 40 and less than mesh 30. Meshes 16 and 20 demonstrate superior absorption with particle sizes larger than meshes 30 and 40 but smaller than

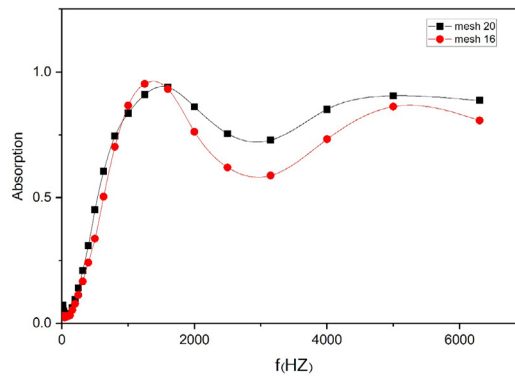


Fig. 2: Comparison of absorption of mesh 16 and 20

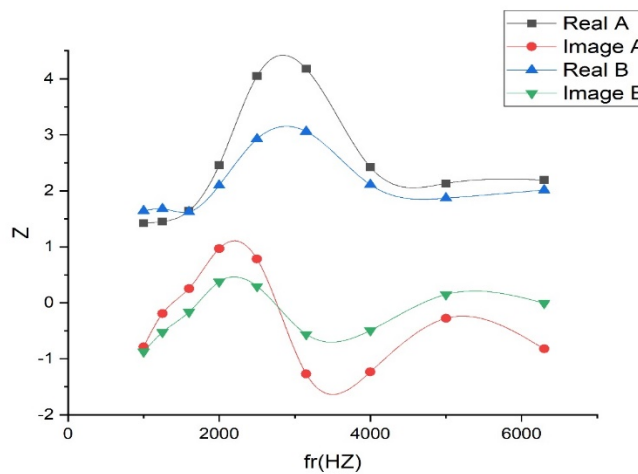


Fig. 3: The real and imaginary parts of impedance mesh 16 and 20

mesh 10. Hachit et al., while examining bagasse fibers, noted that the smallest fiber size exhibits the highest absorption performance, aligning with the findings of this study. Results indicate that higher meshes act passively, whereas lower meshes are reactive. In certain meshes, such as mesh 20, based on the size of the particles and the thickness of the sample, there is a shift towards lower frequency. This suggests that samples derived from reed particles exhibit selective frequency characteristics. Dugasa Abdi et al.'s 2021 study on chrome shave and coffee silver composite revealed that with a thickness of 30 mm, the absorption coefficient exceeded 0.5 from a frequency of 1000 Hz and reached 0.95 at 2000 Hz, echoing the findings of this study. For meshes 20 and 16, with the increase in thickness and density, the absorption coefficient rose as well. The enhanced absorption in mesh 20 might be ascribed to its finer particles and their more uniform arrangement, internally fostering consistent internal conditions. Due to reduced viscosity, Mantaz's study confirmed that thin fibers can move with greater ease and enhance absorption.

The real and imaginary values for mesh 16 are higher compared to mesh 20, suggesting

greater resistance to sound waves and increased reflection of waves in mesh 16 compared to mesh 20, leading to diminished absorption. A wider gap between the real and imaginary components of the impedance implies that the sample is reactive. This gap in sample A (mesh 16) surpasses that in B (mesh 20), meaning sample A is more reactive and, consequently, has lesser absorption than sample B.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, with the increase in thickness and density, the sound absorption coefficient of the samples has increased and the range of absorption has tended towards low frequencies. Mesh 20 with a thickness of 30 mm and a density of 250 kg/cubic is introduced as the optimal mesh.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under project No.4005734. We are thankful to the Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences (TUMS) for providing the necessary laboratory facilities.

## تعیین مش بهینه جهت ساخت جاذب آکوستیکی از ساقه نی *Arundo donax*

اکبر احمدی آسورا<sup>۱</sup>، محمدرضا منظم<sup>۱\*</sup>، ابراهیم تابان<sup>۲</sup>، زهرا هاشمی<sup>۳</sup>، سمیه امینی نسب<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۳</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشکده علوم پزشکی بهبهان، خوزستان، ایران  
<sup>۴</sup>گروه آکوستیک، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

### چکیده

**مقدمه:** اندازه ذرات عامل مهمی در کارایی جاذب‌های صدا می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی اثر اندازه ذرات (مش) بر ضریب جذب صوتی جاذب‌های ساخته شده از نی *Arundo Donax* و تعیین مش بهینه برای جذب صدا بوده است. **روش کار:** ساقه نی پس از خرد کردن در مش‌های ۱۰، ۱۶، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ با سود ۵ درصد شستشو داده شد. برای ساخت نمونه‌ها با قطرهای ۳ و ۱۰ سانتی‌متری از PVA ۱۰ درصد به‌عنوان. به عنوان چسب و برای تعیین ضریب جذب از لوله امیدانس دوکاناله طبق استاندارد ISO ۱۰۵۳۴-۲ استفاده شد. ۲۲ نمونه از مش ۱۶ و ۲۰ برای دستیابی به مش بهینه بر اساس روش RSM ساخته شد و شاخص SAA (میانگین جذب صوتی) برای مقایسه نمونه‌ها و تعیین مش بهینه محاسبه گردید.

**یافته‌ها:** بیشترین ضریب جذب صدا مربوط به مش ۱۶ و ۲۰ در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۸. تأثیر افزایش ضخامت و دانسیته بر ضریب جذب به وضوح مشهود است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر افزایش ضخامت و چگالی بر ضریب جذب در مش ۲۰ است به گونه‌ای که با افزایش دانسیته از ۱۵۰ به ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر، ضریب جذب از ۰/۲۱ به ۰/۵۱، در مش ۱۶ و از ۰/۱۹ به ۰/۵۷، در مش ۲۰ افزایش یافته است. نمونه بهینه شده مش ۲۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و چگالی ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین میانگین جذب را داشته است (SAA=۰/۵۷). فاصله زیاد بخش‌های واقعی و مجازی امیدانس، راکتیو بودن نمونه را نشان می‌دهد. در مش ۱۶ این فاصله بیشتر است، در نتیجه مش ۱۶ راکتیویته بیشتر و به‌تبع آن جذب کمتری دارد.

**نتیجه‌گیری:** نقش مش ذرات به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر ضریب جذب مطرح می‌باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** صدا، جذب، ساقه نی، مش، *Arundo donax*

جذب اصوات وبه عنوان یک تکنیک مهندسی درکنترل

صدا محبوبیت خاصی پیدا نمایند (۱۲،۱۱).

در مناطقی که برنامه‌ریزی و تکنولوژی مناسبی برای مدیریت ضایعات کشاورزی و علف‌های زائد وجود ندارد، هرساله این ضایعات در حجم زیاد سوزانده می‌شوند. اخیراً بسیاری از محققان با توجه به پتانسیل مواد طبیعی، مطالعات گسترده‌ای درخصوص استفاده از این مواد مانند الیاف پالم خراما، کناف و گرانول پوسته برنج و غلاف ذرت بعنوان جاذب‌های صوتی در زمینه کنترل صدا انجام داده‌اند (۱۳-۱۶). Putra (۲۰۱۳) جذب صدا توسط الیاف ضایعات برنج رامطالعه و ضریب جذب ۰/۹ درفرکانس متوسط تا بالا را گزارش نمود (۱۷). در مطالعه‌ای مشابه، الیاف ضایعات نیشکر درفرکانس بالاتر از ۱/۵ کیلوهرتز ضریب جذب تا ۰/۷ را نشان دادند (۱۸).

نی از جمله گیاهان لیفی طبیعی و توخالی است که در بسیاری از نقاط در سراسر جهان در مرداب‌ها، خورها و سواحل رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، معمولاً در ارتفاعات بین ۰ تا ۱۲۰۰ متر بالاتر از سطح دریا می‌روید و رشد این گیاه با شرایط مختلف سازگار است (شکل ۱). از بین گونه‌های مختلف، نوع *Arundo donax* دارای ساقه‌های خشبی و محکم با گره‌های توپُر و میان گره‌های توخالی می‌باشد (۱۳) که بومی شرق آسیا محسوب می‌شود، اما سوابق تاریخی ریشه مدیترانه‌ای آن را نشان می‌دهند (۱۹). این گیاه (*Arundo donax*) بزرگترین گونه از بین شش گونه در تیره *Arundo* بوده و با ارتفاع حدود ۱۰ متر یکی از بلندترین گیاهان علفی است (۲۰) و در مناطق شمالی ایران سالانه به میزان قابل توجهی می‌روید ولی بدلیل عدم شناخت کافی از ویژگی‌های آن، بعنوان گیاه هرز سوزانده می‌شود.

اجزای تشکیل‌دهنده اغلب گیاهان مانند خرما، ذرت، پوسته برنج، کنف و جوت عموماً دارای بافت یکسان و مشابه می‌باشد ولی ساقه نی از لحاظ ساختاری از سه لایه متفاوت تشکیل شده است. لایه بیرونی چوبی و سخت و سیلیکونی، لایه میانی نسبتاً نرم و لایه درونی پنبه‌ای می‌باشد که از لحاظ آکوستیکی دارای امپدانس‌های

آلودگی صوتی یکی از ریسک فاکتورهای شغلی است که شاغلین در محیط‌های کاری در معرض مواجهه با آن قراردارند و طولانی‌شدن این مواجهه می‌تواند مشکلاتی همچون کاهش تمرکز، کاهش راندمان کاری، افزایش آسیب‌هایی مانند اختلال شنوایی، سردرد و بیماری‌های عصبی را به دنبال داشته باشد (۱). به‌منظور کاهش آلودگی صوتی و کنترل صدای محیط کار به روش فنی و مهندسی سه رویکرد کلی وجود دارد: (۱) اصلاح منابع (۲) موانع صوتی و (۳) جاذب‌های صوتی (۲، ۳). استفاده از جاذب‌های صوتی در مسیر انتقال صوت از روش‌های عملی و پرکاربرد محسوب می‌شود که می‌توان به دودسته جاذب‌های متخلخل یا رزونانسی طبقه بندی کرد (۴). جاذب‌های متخلخل دارای تعداد زیادی منافذ داخلی هستند. هنگامی که امواج صوتی برسطح آنها برخورد می‌کند، اصطکاک بین مواد و هوا در منافذ ایجاد می‌شود درنتیجه انرژی صوتی به دلیل اثرات ویسکوزیته و حرارتی به گرما تبدیل شده و مستهلک می‌شود (۵). این جاذب‌ها عملکرد صدای خوبی را در فرکانس‌های بالا نشان می‌دهند اما درفرکانس‌های پایین و متوسط عملکرد ضعیفی دارند. در مقابل جاذب‌های صوتی تشدیدکننده (رزونانسی) برای جذب امواج صوتی درفرکانس پایین که معادل تشدیدگر هلمهولتز هستند، کارآمد بوده و انرژی صوتی را با اثر رزونانس کاهش می‌دهند (۶، ۷).

جاذب‌های متخلخل که به طورگسترده درصنایع و بخش‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، غالباً از الیاف مصنوعی ساخته می‌شوند (۸). مانند پشم شیشه، پشم سنگ و پلاستیک‌های فومی، فوم پلی اورتان سلول باز و منسوجات غیر بافته شده مانند پلی استر و پلی پروپیلن که علی‌رغم مزیت‌های قابل توجه مانند پایداری بالا، هدایت حرارتی پایین، مقاوم در برابر حریق و خاصیت آب دوستی کم (۹) بدلیل آلودگی و گرم کردن کره زمین، عدم زیست تخریب‌پذیر بودن و هزینه‌های زیاد (۱۰) سبب شده است که مواد الیافی با پایه طبیعی با مزایایی ازجمله چگالی کم و هزینه پایین بطورگسترده با هدف



شکل ۱: رویش و ساختار ظاهری نی *Arundo donax*

جاذب عملکرد قابل قبولی داشته باشد که در مطالعه Mon-*taña* و همکاران (۲۰۱۰) به آن اشاره شده است (۲۵). عملکرد جذب نه تنها با خواص فیزیکی و شیمیایی مواد، بلکه به پارامترهای آکوستیکی و غیر آکوستیکی مانند اندازه و قطر ذرات، مقاومت جریان هوا، تورتوزیته و غیره بستگی دارد. افزایش قطر فیبر سبب کاهش جذب صدا می‌شود. درجاذب‌های با اندازه ذرات کوچک‌تر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر، مقاومت جریان هوا و تورتوزیته بیشتر و در نتیجه میزان جذب نیز بیشتر خواهد بود (۲۶،۱). مقاومت جریان هوا به اصطکاک یا مقاومت ماده در برابر جریان هوا اطلاق می‌شود و در واحد ضخامت با مربع قطر الیاف نسبت عکس دارد. با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، مقاومت جریان هوا افزایش می‌یابد (۲۷).

اکثر مطالعات انجام شده بر روی جاذب‌های صوتی ساخته شده از ساقه نی بر جذب صوتی آن‌ها متمرکز بوده و تاثیر مش بر ضریب جذب صوتی کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۲۹،۲۸). به طور کلی تعداد پژوهش‌هایی که مشخصاً در جهت بررسی خواص آکوستیکی این نوع جاذب‌ها و عوامل مؤثر بر آن انجام شده است، در مقایسه با کاربرد گسترده آنها بسیار محدود است؛ لذا مطالعه حاضر با هدف ساخت و تعیین ضریب جذب صوتی جاذب حاصل از ذرات نی *Arundo Dnoax* در ضخامت‌ها و دانسیته‌های مختلف و بررسی تاثیر اندازه (مش) ذرات بر رفتار جذب صوتی جاذب و انتخاب مش بهینه بوده است.

متفاوتی می‌باشند. علیرغم دارا بودن ویژگی‌های ذکر شده، مطالعات اندکی در خصوص خواص آکوستیکی این ماده انجام شده است که به پژوهش‌های بیشتری نیاز می‌باشد (۲۱).

Chilekwa و همکاران (۲۰۰۶) برای اولین بار در فعالیت‌های پروژه هالیوود جهت بررسی خواص آکوستیکی نی، تأثیر پیکربندی در عملکرد برخی از نمونه‌های نی را با استفاده از لوله امیدانس مورد مطالعه قرار دادند. به نظر می‌رسد مؤثرترین پیکربندی قرار گرفتن نی بصورت طولی با یکدیگر و موازی با صدای تابشی باشد (۲۲). در مطالعه Francesco Asdrubali و همکاران (۲۰۱۵) جهت بررسی تاثیر ضخامت و ساختار فضایی (موازی یا عمود بر امواج صوتی) بر عملکرد صوتی جاذب، ۳۳ نمونه از نی با سه نوع پیکربندی "عمودی"، "افقی" و "ضربدری" و در ضخامت‌های متفاوت با استفاده از لوله امیدانس مورد سنجش قرار گرفتند. با افزایش ضخامت، ضریب جذب افزایش یافت و با افزایش تعداد لایه‌ها، پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین گسترش یافت به نحوی که در جاذب تک لایه، ماکزیمم جذب در فرکانس‌های حدود ۱۲۰۰ هرتز و در جاذب با ضخامت ۱۵ سانتی متر پیک جذب در فرکانس حدود ۲۰۰ هرتز (در ساختار افقی و متقاطع) بوده است (۲۳). نتایج مطالعه Trematerra و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد در نمونه‌های تهیه شده از قطعات ۴ سانتی متر نی، بیشترین میزان جذب در فرکانس ۷۰۰ و ۱۳۰۰ هرتز بوده است که به ترتیب ۰/۷ و ۰/۷۵ گزارش گردید (۲۴). ذرات نی در ترکیب با گل رس می‌تواند به عنوان عایق و



شکل ۲: فرآیند آماده سازی نمونه ها

### روش کار

(۱) آماده سازی (خرد کردن و مش بندی ذرات)

نی های *Arundo donax* مورد استفاده در این مطالعه از بستر رودخانه ها و مرداب ها در استان مازندران شهرستان بابل جمع آوری شدند که حدود ۶ ماه قبل بریده شده و در فضای آزاد کاملاً خشک شده بودند. با توجه به هدف مطالعه جهت انتخاب بهینه ترین اندازه ذرات از لحاظ ضریب جذب، ابتدا توسط دستگاه آسیاب به قطعات کوچک تر خرد و از الک های با مش ۱۰، ۲۰، ۱۶، ۳۰ و ۴۰ که از نظر اندازه به ترتیب ۲، ۱/۱۹، ۰/۸۴۱، ۰/۵۹۵ و ۰/۴ میلی متر می باشند، عبور داده شدند. در مرحله بعد با سود (NaOH) ۵٪ (۵ گرم سود جامد شرکت اسپوتا با چگالی ۲/۱۳ گرم بر سانتی متر مکعب و خلوص ۹۸/۵ درصد در ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه) بر اساس مطالعات گذشته شسته شدند (۳۰). سود با تاثیر بر سطح ذرات و ایجاد حفره های میکروسکوپی و ناهموازی، سطح ویژه بالاتری را فراهم می کند لذا شانس میرایی موج صوتی برخوردی و در نتیجه میزان جذب صدا افزایش می یابد (۲۴). جهت همبندی ذرات از پلی وینیل الکل (PVA) ۱۰٪ (۱۰ گرم از پودر PVA (Sigma-Aldrich 99.000) (g/mol) در ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه بر روی همزن مغناطیسی با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و با چرخش ۵۰۰ دور در دقیقه) به عنوان بایندر استفاده گردید. با تعیین اندازه،

جرم کل ذرات مورد نیاز برای ساخت هر نمونه بر اساس چگالی بالک و ضخامت نمونه محاسبه شد.

(۲) ساخت و تعیین ضریب جذب نمونه ها برای انتخاب اولیه نمونه های بهینه

با توجه به هدف، ابتدا وزن مورد نیاز نمونه ها بر اساس پارامترهای جدول ۱ و فرمول ۱ تعیین و نسبت به ساخت اقدام شد. ذرات خرد شده پس از مخلوط شدن با بایندر PVA (۱۰ درصد)، در قالب های مربوطه (شکل ۲) در قطرهای ۱۰۰ و ۳۰ میلی متر بصورت یکنواخت پر شدند. انتخاب قطرهای مذکور بدلیل هماهنگی با قطر داخلی لوله های بزرگ و کوچک امپدانس تیوب بوده است. برای خشک شدن سطوح داخلی، نمونه ها پس از خروج بصورت افقی قرار می گرفتند تا در مدت ۳ روز کاملاً خشک گردند. در انتهای هر روز با اندازه گیری وزن نمونه ها و کسر آن از مجموع وزن مواد اولیه و بایندر، میزان رطوبت موجود مشخص می گردید تا به حداقل مقدار برسد.

$$\rho = M/V \quad (1)$$

$\rho$  = چگالی بالک (کیلو گرم بر متر مکعب)

M: جرم ماده (کیلو گرم)

V: حجم نمونه (متر مکعب)

1. Poly Vinyl Alcohol

جدول ۱: پارامترهای فیزیکی نمونه‌ها

شماره نمونه	ضخامت (میلی‌متر)	چگالی بالک (kg/m <sup>3</sup> )	مش ذرات (میلی‌متر)*
۱	۴۰	۱۵۰	۱۰(۲)
۲	۴۰	۱۵۰	۱۶(۱/۱۹)
۳	۴۰	۱۵۰	۲۰(./۸۴)
۴	۴۰	۱۵۰	۳۰(./۵۹)
۵	۴۰	۱۵۰	۴۰(./۴)

\*اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر

بصورت زیر قابل محاسبه است (۲۶):

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{2jk(l+s)} - H_{12}}$$

که در آن  $k = 2\pi f/c$  عدد موج است.  $l$  فاصله بین میکروفون ۲ تا جلوی نمونه آزمایشی و  $s$  فاصله بین دو میکروفون است.

تابش نرمال ( $\alpha_n$ ) و نسبت امپدانس ویژه ( $Z/c$ ) با روابط زیر محاسبه گردید (۲۷):

$$\frac{Z}{c} = \frac{1+R}{1-R}$$

$$\alpha_n = 1 - |R|^2$$

که  $\rho$  و  $c$  به ترتیب چگالی و سرعت صوت در هوا هستند. لازم به ذکر است که  $\alpha_n$  نرمال نشان‌دهنده یک ماده متخلخل است که قادر به جذب انرژی صوتی در باندهای فرکانسی مختلف است.

۳) ساخت و تعیین ضریب جذب نمونه‌های بهینه پس از تعیین ضریب جذب نمونه‌های مرحله قبل، برای اطمینان در انتخاب دقیق‌تر مش، از بین ۵ مش مورد بررسی دو مش که دارای میانگین جذبی نزدیک به هم بودند برای ادامه بررسی انتخاب شدند. برای انتخاب مش بهینه از بین دو مش انتخابی بعنوان جاذب نهایی، تعداد نمونه‌ها به روش سطح - پاسخ (RSM) با استفاده از نرم‌افزار Design Expert با دو متغیر ضخامت و دانسیته

برای تعیین ضریب جذب هر یک از نمونه‌ها از لوله امپدانس دوکاناله مدل B & K (شکل ۳) براساس روش تابع انتقال استاندارد ۲-۱۰۵۳۴ ISO در فرکانس ۶۳۰-۵۰ هرتز استفاده شده است (۲۴). منبع صدا در یک انتهای لوله و نمونه در یک نگهدارنده قرار گرفت. قطر بزرگ لوله (۱۰۰ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری ناحیه فرکانس پایین (۱۶۰-۵۰ هرتز) و لوله کوچکتر (۳۰ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری ناحیه فرکانس بالا (۶۳۰-۵۰ هرتز) استفاده شد. قبل از آزمایش نمونه‌ها، کالیبراسیون میکروفون‌ها با استفاده از کالیبراتور مربوطه در فرکانس ۱ کیلوهرتز و ۱۱۴ دسی بل انجام و اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط استاندارد (رطوبت نسبی ۴۵٪، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر ۱۰۱۳۲۵ پاسکال) صورت گرفت. برای جلوگیری از خطاهای غیرضروری حین اندازه‌گیری از جمله احتمال قرارگیری نامناسب نمونه‌ها در لوله، آزمایش‌ها حداقل سه بار برای هر نمونه تکرار شد. برای هر آزمایش، نمونه از آن خارج و دوباره در نگهدارنده قرار داده می‌شده است. مقادیر ضریب جذب گزارش شده برای هر نمونه، میانگین سه بار تکرار می‌باشد (۳۱). پس از تعیین ضریب جذب، نمونه‌های بهینه بر اساس حداکثر پیک جذبی و ناحیه فرکانسی مشخص گردیدند.

این رویکرد از تابع انتقال صوتی تصحیح شده (H12) برای تعیین ضریب انعکاس نمونه (R) استفاده می‌کند. بر اساس نظر چانگ و بلاسر<sup>۱</sup> (۲۶) ضریب انعکاس (R)

1. Chung and Blaser



شکل ۳: نمای لوله امپدانس دو میکروفون

جدول ۲: تعداد نمونه های مش ۱۶ و ۲۰ بر اساس روش RSM (نمونه های بهینه شده)

۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	دانشیته (kg/m <sup>3</sup> )		ضخامت (میلی متر)
			مش	مش	
۱	---	۱	۱۶	۲۰	۱۰
۱	---	۱	۲۰	۱۶	
---	*۴	*۲	۱۶	۲۰	۲۰
---	*۴	*۲	۲۰	۱۶	
۱	*۲	---	۱۶	۲۰	۳۰
۱	*۲	---	۲۰	۱۶	

\*تکرارپذیری

تعداد ۲۲ نمونه با شرایط یکسان تعیین گردید (جدول ۲). براساس روش سطح - پاسخ برای هر یک از مش ها ۱۱ نمونه تعیین شد. برای ضخامت ۱۰ میلی متر با دانشیته ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضخامت ۲۰ میلی متر با دانشیته ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت ۳۰ میلی متر دانشیته ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب نمونه ای مشخص نگردید. برای دانشیته ۱۵۰ با ضخامت ۲۰ دو بار تکرار و دانشیته ۲۰۰ در ضخامت های ۲۰ و ۳۰ به ترتیب ۴ و ۲ بار تکرار در هر دو مش مشخص گردید. با تهیه مقدار لازم از مواد مش ۱۶ و ۲۰ نسبت به ساخت نمونه ها در قطرهای ۱۰ و ۳۰ میلی متر با دانشیته و ضخامت های مختلف اقدام و با استفاده از امپدانس تیوب ضریب جذب اندازه گیری شد. علاوه بر رسم نمودارها، میانگین جذب صوتی نمونه ها (SAA)، طبق استاندارد ASTM-C ۴۲۳ در ۱۲ فرکانس یک سوم اکتاواند (۲۰۰-۲۵۰-۳۱۵-۴۰۰-۵۰۰-۶۳۰-۸۰۰-)

۱. Sound absorption average

$$SAA = 1/12 \sum_{k=2}^{250} a f_i \quad (3)$$

$a$ : ضریب جذب

$f_i$ : فرکانس (هرتز)

SAA: میانگین ضریب جذب

### یافته ها

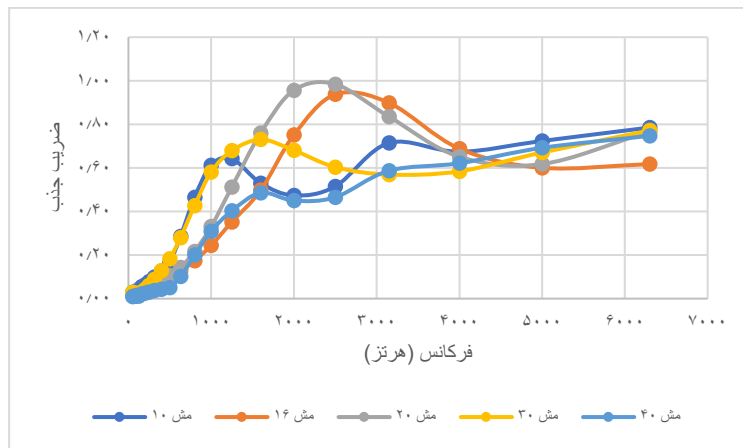
ضرایب جذب نمونه های اولیه

شکل ۴ ضریب جذب هر یک از نمونه های اولیه با مش های متفاوت (۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۶، ۱۰ میلی متر) را در ضخامت یکسان ۴ سانتی متر و چگالی ۱۵۰ کیلوگرم

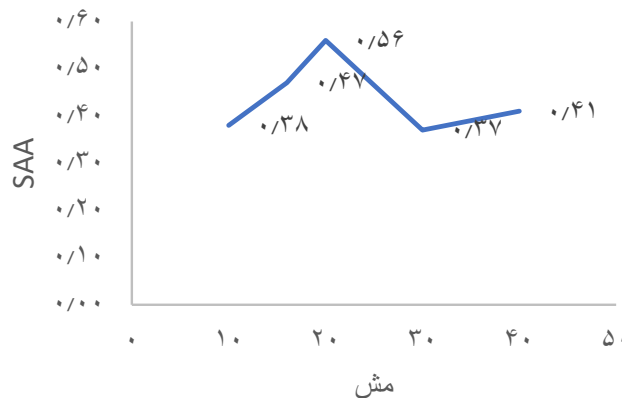
می‌دهد. مش ۲۰ و ۳۰ به ترتیب با میانگین ضریب جذبی ۰/۵۶ و ۰/۳۷ بیشترین و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند.

SAA مش‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نشان می‌دهد که فاصله مش ۲۰ با مش‌های ۱۰ و ۳۰ تقریباً یکسان می‌باشد. ولی فاصله بین مش ۴۰ و ۳۰ از قاعده مش‌های قبل پیروی نمی‌کند. بطور کلی با افزایش مش (کوچک‌تر شدن ذرات) ضریب جذب افزایش می‌یابد. این روند تا مش ۲۰ ادامه دارد به نحوی که از مش ۱۰ به مش ۱۶ افزایش ۲۵ درصدی و از مش ۱۶ به ۲۰ افزایش ۲۰ درصدی مشاهده می‌شود ولی در مش ۳۰ مقدار جذب کاهش می‌یابد. در مش ۴۰ افزایش حدود ۸ درصدی نسبت به مش ۳۰ دیده

بر متمرکعب در بازه فرکانسی ۶۳۰۰ - ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. بالاترین جذب صدا مربوط به مش‌های ۱۶ و ۲۰ در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز بوده است که به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۸ تعیین شد. در شکل ۴، مش ۲۰ با دانسیته و ضخامت برابر با مش ۱۶ ولی با اندازه ذرات کوچکتر، در محدوده فرکانسی پایین‌تر از مش ۱۶، جذب بیشتری داشته است. لذا مقایسه پیک جذبی مش ۱۶ و ۲۰ نشان می‌دهد که مش ۲۰ می‌تواند عملکرد بهتری در محدوده فرکانس میانی داشته باشد. از بین مش‌های ۱۰ و ۳۰ و ۴۰ در محدوده فرکانسی کمتر از ۲۰۰۰ هرتز، مش ۳۰ جذب بالایی را نشان داده است (۰/۷۳ در ۱۶۰۰ هرتز). شکل ۵ مقادیر SAA مش‌های مورد بررسی را نشان



شکل ۴: ضریب جذب مش‌های پنجگانه (دانسیته: ۱۵۰ کیلو گرم بر مترمکعب، ضخامت: ۴۰ میلی‌متر)



شکل ۵: مقادیر SAA نمونه‌های اولیه (دانسیته: ۱۵۰ کیلو گرم بر مترمکعب، ضخامت: ۴۰ میلی‌متر)

می‌شود.

داشته‌اند.

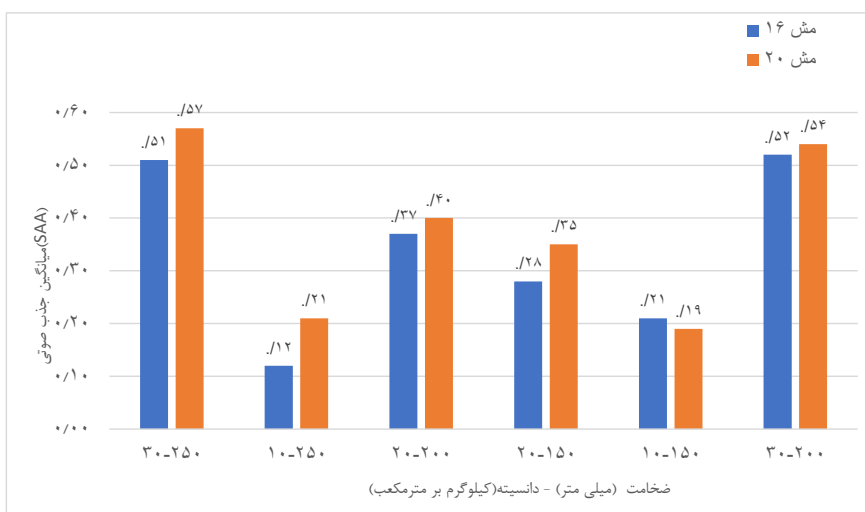
مقایسه نمودار جذب مش ۱۶ و ۲۰ (شکل ۷) نشان می‌دهد میزان جذب در محدوده ۱۰۰۰-۲۰۰۰ به بیشترین مقدار رسیده است. در مش ۲۰ در ۱۲۵۰ هرتز ۰/۹۵ و در مش ۱۶ در ۱۶۰۰ هرتز ۰/۹۳ می‌باشد و مجدداً در فرکانس ۵۰۰۰ هرتز به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۶ بوده است. مش ۱۶ تنها در فرکانس‌های ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ هرتز نسبت به مش ۲۰ بیشتر بوده است ولی در بقیه فرکانس‌های مش ۲۰ جذب بیشتری را نشان داد. به عبارت دیگر در فرکانس‌های کمتر از ۸۰۰ هرتز و بالاتر از ۱۲۵۰ هرتز عملکرد مش ۲۰ بهتر از مش ۱۶ بوده است لذا نمونه‌های مذکور به عنوان نمونه‌های بهینه و نهایی برای مقایسه و بررسی‌های دقیق‌تر انتخاب شدند.

#### امپدانس نمونه‌ها

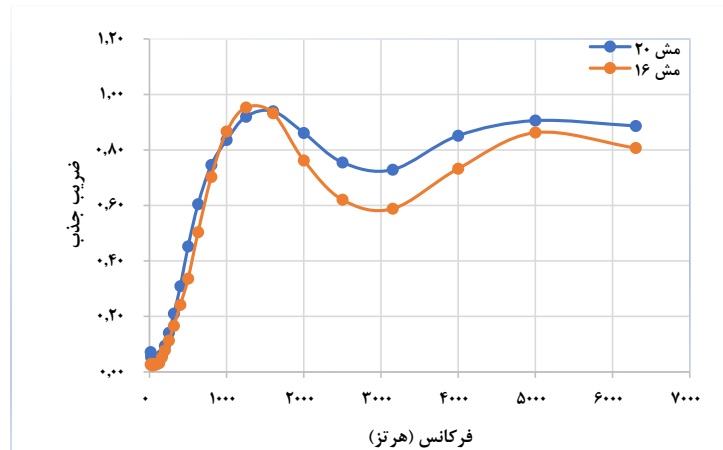
در بررسی عملکرد جذب صوتی جاذب‌ها می‌توان از تحلیل امپدانس سطحی جاذب استفاده کرد. شکل ۸-الف تغییرات امپدانس موج صوتی را در طیف فرکانسی ۶۳-۶۳۰۰ هرتز نشان می‌دهد. با توجه به این که در کمتر از ۱۰۰۰ هرتز مقادیر امپدانس به یکدیگر نزدیک و نوسانات قابل ملاحظه نمی‌باشد لذا فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز در بخش‌های حقیقی و مجازی نمونه‌ها

ضریب جذب و امپدانس نمونه‌های مختلف مش ۱۶ و ۲۰ با توجه به بالاتر بودن شاخص SAA در مش ۱۶ و ۲۰ نسبت به مش‌های دیگر، بر اساس جدول ۲ در سه دانسیته ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳ ضخامت ۲۰، ۳۰ و ۱۰ میلی‌متر با تکرار پذیری مشخص شده ۲۲ نمونه مورد بررسی قرار گرفتند.

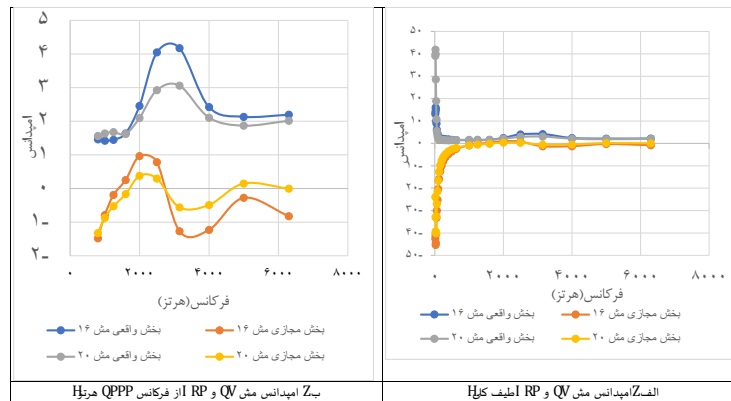
در شکل ۶ تاثیر افزایش ضخامت و دانسیته بر ضریب جذب در مش ۲۰ قابل مشاهده است به نحوی که در دانسیته ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با افزایش ضخامت از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر، در دانسیته ۲۰۰-۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر و در دانسیته ۱۵۰-۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب با افزایش ضخامت از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر ضریب جذب به ترتیب ۶۳/۵، ۲۶ و ۳۵ درصد افزایش داشته است. در مش ۱۶ در دانسیته‌های ۲۵۰ و ۲۰۰ با افزایش ضخامت نیز ضریب جذب افزایش یافته است ولی در دانسیته ۱۵۰ روند معکوس بوده است. بر این اساس نمونه بهینه در مش ۱۶، دارای ضخامت ۳۰ و دانسیته ۲۰۰ (نمونه A) و در مش ۲۰ با ضخامت ۳۰ و دانسیته ۲۵۰ (نمونه B) می‌باشد که به ترتیب بیشترین میانگین جذب (SAA) ۰/۵۲ و ۰/۵۷ را



شکل ۶: مقادیر SAA نمونه‌های مش ۱۶ و ۲۰ بر اساس روش RSM (optimized samples) بر حسب دانسیته و ضخامت



شکل ۷: مقایسه جذب مش‌های ۱۶ و ۲۰



شکل ۸: مقادیر بخش حقیقی و مجازی امپدانس مش ۱۶ و ۲۰

مقاومت بیش‌تر مش ۶ در مقابل موج صوتی می‌باشد.

### بحث

مکانیسم اتلاف انرژی صوتی در یک ماده متخلخل مستلزم آن است که امواج به راحتی از طریق خلل و فرج و منافذ آن به سطح ماده نفوذ کرده و اجازه اتلاف آن را بدهند (۳۴). سطح ذرات نی بعد از اصلاح بعلت تاثیر سود برلیگنین ذرات، ناهموارتر و خشن‌تر شده و پیچیدگی‌های بیشتری در آن ایجاد شده است که می‌تواند در افزایش تورتوزیته نقش مهمی ایفا نموده و در مقابل عبور امواج صوتی مقاومت بیشتری را نشان دهد و سبب افزایش جذب شود (۲۹). تورتوزیته عبارت است از نسبت طول

حذف و تغییرات دو بخش درطیف کوتاه‌تری (۳۰۰-۶۰۰-۱۰۰۰ هرتز) نشان داده شده است (شکل ۸-ب).

در هر دو نمونه تغییرات بخش حقیقی در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز و تغییرات بخش مجازی در مش ۱۶ و ۲۰ به ترتیب در محدوده‌های فرکانسی ۲۵۰۰-۱۶۰۰ و ۳۱۵۰-۱۶۰۰ هرتز دیده می‌شود. محدوده فرکانسی ۴۰۰۰-۲۰۰۰ هرتز نشان‌دهنده مقاومت ماده در مقابل عبور موج صوتی می‌باشد که بیانی از جذب ماده می‌باشد. پیک بخش حقیقی مش ۱۶ در فرکانس‌های مربوطه حدود ۳۸٪ بیش‌تر از مش ۲۰ می‌باشد. در مقابل پیک بخش مجازی مش ۱۶ نیز حدود ۶۰٪ بیش‌تر از مش ۲۰ می‌باشد که هر دو مورد می‌تواند به معنی

در ضخامت یکسان ماده نمونه مورد نیاز است (۳۶). ولی در بعضی از اندازه‌ها با نتایج مطالعات انجام شده مغایرت دارد که دلیل نا همخوانی نتایج را شاید بتوان علاوه بر اندازه ذره به عوامل دیگری مانند فشردگی ذرات، دانسیته و توزیته نمونه نسبت داد که نیاز به مطالعات بیشتری در این زمینه می‌باشد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که در مش‌های بالا (ذرات با اندازه کوچکتر) نمونه‌ها بیشتر از نوع پسیو هستند و در مش‌های کم‌تر (اندازه ذرات بزرگ‌تر) راکتیو عمل می‌کنند. لذا مش‌های ۳۰ و ۴۰ نسبت به مش‌های دیگر از قابلیت پسیو بیشتری برخوردار هستند به همین دلیل در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز میزان جذب رو به افزایش است. در بعضی مش‌ها مانند مش ۲۰ با توجه به اندازه ذرات و ضخامت نمونه طیف جذبی به سمت فرکانس پایین حرکت می‌کند لذا می‌توان گفت که نمونه‌های حاصل از ذرات نی از نوع فرکانس انتخابی (selective frequency) می‌باشند. به این دلیل که علیرغم ثابت بودن ضخامت نمونه‌ها، پیک جذب در مش‌های مختلف، متفاوت بوده است (مش ۱۰ در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز، مش ۱۶ و ۲۰ در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز، مش ۳۰ در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز و مش ۴۰ در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز)، بنابراین انتخابی عمل کردن مواد جاذب متخلخل علاوه بر ضخامت (۲۵، ۲۴) می‌تواند متاثر از اندازه ذرات باشد که در مطالعات بررسی شده به این موضوع اشاره‌ای نشده است.

در مطالعه Da Silva (۲۰۱۹) بر روی الیاف طبیعی تهیه شده از سیسال، پوسته نارگیل و نیشکر با ضخامت ثابت ۴۰ میلی‌متر در فرکانس کمتر از ۱/۶ کیلوهرتز، ضریب جذب صدا برای سیسال و پوسته نارگیل در فرکانس ۸۰۰ هرتز و برای الیاف ضایعات نیشکر در ۶۰۰ هرتز بیش از ۰/۵ بوده است (۳۷). در مطالعه حاضر ضریب جذب مش ۲۰ در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز به ۰/۹۱ و در مش ۱۶ به ۰/۹۵ رسیده است که با مطالعه حقیقت و همکاران (۲۰۲۳) که در ضخامت ۳۰ میلی‌متر با اندازه ذرات ۱/۳-۰/۷۹ میلی‌متر، ضریب جذب در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز

پیچ و خم‌های موجود در نمونه به طول مستقیم. پارامتری است ساختاری و بدون بُعد که اثر ساختار داخلی حفره را بر سرعت ماکروسکوپی جریان هوا موجود در مواد متخلخل نشان می‌دهد و تنها تابع هندسه ماده متخلخل و نوع جریان هوای داخل آن می‌باشد (۳۵).

در مطالعه حاضر با بررسی مش‌های مختلف مشخص گردید که با ثابت بودن ضخامت و دانسیته نمونه‌ها در مرحله اول آزمایش میزان جذب مش‌های ۱۰، ۳۰ و ۴۰ در فرکانس کمتر از ۲۰۰۰ هرتز با توجه به نوع مش از روند مشخصی پیروی نمی‌کند و ارتباط منطقی بین تغییرات میزان جذب و اندازه ذرات (بجز از مش ۱۰ تا ۲۰) نمی‌توان یافت. از مش ۱۰ تا مش ۲۰ با ریزتر شدن ذرات، مقدار SAA افزایش می‌یابد که روند صعودی را طی می‌کند ولی در مش ۳۰ علیرغم کاهش اندازه ذرات مقدار SAA به کمترین مقدار (۰/۳۷) و در مش ۴۰ مجدداً افزایش می‌یابد و مقدار ۰/۴۱ را نشان می‌دهد که نسبت به مش ۱۶ و ۲۰ کمتر بوده است. حقیقت و همکاران با بررسی الیاف باگاس با هدف ارزیابی تاثیر اندازه الیاف بر میزان جذب بیان نمودند که کمترین اندازه فیبر بالاترین عملکرد جذب را دارند (۱) که با نتایج این مطالعه مطابقت نسبی دارد. دلیل این اختلاف را شاید بتوان به روش فرآوری نمونه‌ها نسبت داد که در مطالعه حقیقت و همکاران از آسیاب کردن باگاس نیشکر ولی در این مطالعه از نی‌های سالم پس از خرد کردن در آسیاب استفاده شده است. کمتر بودن میزان جذب در نمونه مش ۴۰ نسبت به مش‌های ۲۰ و ۱۶ را می‌توان چنین بیان کرد که با کوچکتر شدن اندازه ذرات، تراکم ذرات در ضخامت و چگالی ثابت بیشتر و منافذ بسته‌تر خواهند شد در نتیجه میزان انعکاس افزایش یافته و جذب کاهش می‌یابد.

در مطالعه مروری Mamtaz (۲۰۱۶) اندازه، مهم‌ترین پارامتر هندسی و فیزیکی برای افزایش عملکرد جذب صدا در هر ماده فیبری بیان شد. کاهش قطر فیبر منجر به افزایش مقدار ضریب جذب صدا می‌شود. به این دلیل که الیاف بیشتری برای رسیدن به چگالی حجمی یکسان

۰/۹۹ بوده است، همسو می‌باشد (۱).

افزایش چگالی بالک بطور قابل توجهی سبب افزایش ضریب جذب درگستره فرکانسی میانی و پایین می‌شود. (۱۲) که در مطالعات مختلف به تاثیر مستقیم ضخامت و چگالی بر عملکرد جاذب صوتی اشاره شده است. در مطالعه الرحمن و همکاران، تأثیر اندازه الیاف و چگالی ظاهری بر روی نمونه‌های ریز متخلخل برگ نخل و الیاف پوسته نارگیل بررسی گردید. در مطالعه آنان، نتایج نشان داد که جذب صوتی این مواد با الیاف در اندازه کوچکتر و چگالی ظاهری بالا بهبود می‌یابد (۳۷). مطالعه Dev-eikyte و همکاران (۲۰۱۲) بر روی نمونه‌های کاه دارای چگالی سطحی تقریبی ۸۸ کیلوگرم بر مترمربع در ضخامت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر انجام و پیش‌بینی نمودند که نمونه‌های ضخیم تر عایق صوتی بهتری هستند. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که با افزایش ضخامت در نمونه‌های مورد بررسی، میزان جذب بویژه در محدوده فرکانس‌های بالا بیشتر بوده است که همسو با یافته‌های مطالعات گذشته است (۳۸). در مطالعه‌ای رفتار صوتی الیاف ضایعات خرما با ضخامت‌های مختلف (۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ میلی‌متر) و دانسیته (۲۵ و ۱۷۵ کیلوگرم در مترمکعب) در اتاق بازآوا مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، نمونه‌هایی با ضخامت ۵۵ میلی‌متر و چگالی ۱۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین عملکرد جذب صدا را در فرکانس‌های میانی و بالا داشته‌اند (۳۹).

در نمونه‌های مش ۲۰ و ۱۶ با افزایش ضخامت و دانسیته، ضریب جذب افزایش یافته است. علت وجود ارتباط مستقیم در مش ۲۰ را شاید بتوان به ریزتر بودن ذرات و قرارگیری یکنواخت ترذرات در کنار یکدیگر نسبت داد که سبب ایجاد شرایط همگون تر در داخل نمونه شده است که با مطالعه Mamtaz مبنی بر این که فیبر نازک راحت‌تر از فیبر ضخیم در امواج صوتی حرکت می‌کند و با ایجاد ارتعاش در هوا سبب افزایش جذب ناشی از افت ویسکوزیته خواهد شد (۳۰)، همراستا است ولی در مش ۱۶ در فرکانس ۱۵۰۰ این روند معکوس بوده است که

دلیل آن را شاید بتوان به فاصله بیشتر ذرات در دانسیته پایین و همچنین بزرگتر بودن ذرات و عدم پیروی از نظم خاص در چینش مش ۱۶ نسبت به ۲۰ مرتبط دانست. پارامتر امپدانس سطحی مواد در واقع یک عدد مختلط<sup>۱</sup> است که بخش حقیقی<sup>۲</sup> آن نشان‌دهنده جذب صدا از طریق اتلاف انرژی آکوستیکی درون ماده می‌باشد و عموماً با عنوان مقاومت<sup>۳</sup> ماده بیان می‌شود. از سوی دیگر بخش مجازی<sup>۴</sup> این پارامتر نشان‌دهنده جذب صدا بواسطه تغییرات فاز موج صوتی برخوردی به ماده می‌باشد که با عنوان راکتانس<sup>۵</sup> ماده می‌باشد. با بررسی امپدانس سطحی یک جاذب می‌توان اطلاعات عمیق‌تری در مورد عملکرد جذب ماده در مقایسه با ضریب جذب به دست آورد (۴۰). هرچه، قدر مطلق مقادیر بخش حقیقی (ریزیستانس) امپدانس ماده‌ای کمتر و یا بخش مجازی (راکتانس) آن بیشتر باشد ماده مقاومت بیشتری در برابر امواج صوتی از خود نشان می‌دهد در نتیجه جذب کمتری خواهد داشت. در شکل ۸ مقادیر بخش حقیقی و مجازی مش ۱۶ در مقایسه با مش ۲۰ بیشتر می‌باشد که به ترتیب به مفهوم مقاومت بیشتر در مقابل امواج صوتی و بازتاب بیشتر امواج در مش ۱۶ نسبت به مش ۲۰ می‌باشد در نتیجه جذب کمتری اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر نمونه A در مقایسه با B دارای رکتانس بیشتر و در نتیجه جذب کمتری می‌باشد. هرچه فاصله بین بخش حقیقی و مجازی امپدانس بیشتر باشد نشان‌دهنده راکتیو عمل کردن نمونه می‌باشد. در نمونه A نسبت به B این فاصله بیشتر می‌باشد در نتیجه نمونه A دارای واکنش گری (راکتیویته) بیشتر و متناسب با آن جذب کمتری نسبت به نمونه B می‌باشد. دلیل اختلاف را می‌توان در بخش حقیقی و مجازی به ترتیب با تقویت بیشتر امواج (Superimpose) در نمونه A و تضعیف بیشتر امواج (Wave cancelation) در نمونه B توجیه کرد. در نواحی از طیف فرکانسی که موج بزرگتر و برجسته‌تری دارد به مفهوم وقوع

1. Complex number
2. Real part
3. Resistance part
4. Imaginary
5. Reactance

متخلخل، بخش مجازی امپدانس تحت تأثیر عواملی مانند اتصال منافذ، خواص منافذ سیال (pore fluid) و وجود مواد ویسکوالاستیک در منافذ قرار دارد (۴۲). در این مطالعه منحنی‌های حقیقی و مجازی با ساختار ذرات مبنی بر جذب و انعکاس مطابقت دارند لذا وجود چنین شرایطی نشان می‌دهد که علیرغم پسیو بودن ماده، بخشی بصورت راکتیو عمل می‌کند و جاذب از نوع پسیو - راکتیو می‌باشد که در نمودار امپدانس قابل مشاهده است (شکل ۸). بنابراین می‌توان با بررسی امپدانس سطحی یک جاذب اطلاعات عمیق‌تری در مورد عملکرد جذب ماده در مقایسه با ضریب جذب به دست آورد (۴۰).

در جاذب‌های متخلخل در مضارب فردی از  $\frac{1}{4}$  پیک جذبی و در مضارب زوج آن کمترین جذب دیده می‌شود. بر اساس شکل ۷ پیک جذبی برای مش ۱۶ در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز و برای مش ۲۰ در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز می‌باشد در این فرکانس‌ها با توجه به مقادیر جذب این نمونه‌ها می‌بایست به ترتیب جاذب‌هایی با ضخامت‌های ۷ و ۵ سانتی متر داشته باشیم ولی نمونه‌های حاصل از نی Arundo Donax مورد بررسی در این مطالعه با ضخامت ۳ سانتی متر بیشترین میزان جذب را داشته‌اند. از این رو جاذب‌های حاصل از نی در ضخامت‌های کم توانایی جذب بالایی از موج صوتی را دارند.

### نتیجه گیری

تأثیر

چگالی و ضخامت مواد متخلخل با تأثیرگذاری بر سطوح متخلخل و مقاومت نمونه تحت آزمایش، تأثیر مستقیمی بر عملکرد جذب صوتی آن دارند. در این مطالعه با افزایش ضخامت و چگالی، ضریب جذب صوتی نمونه‌ها افزایش و گستره جذب به سمت فرکانس‌های پایین میل کرده است. از سوی دیگر نقش مش ذرات به عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر ضریب جذب در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج تنها با افزایش یا کاهش مش، نمی‌توان انتظار افزایش یا کاهش ضریب جذب را در جاذب‌های حاصل

Superimpose و تقویت موج‌ها می‌باشد که مقاومت بیشتری را نشان می‌دهد و در نواحی از طیف فرکانسی که فرورفتگی وجود دارد Wave cancelation و خنثی شدن امواج رخ داده است. لذا هرچه عمق دره کمتر باشد جذب بیش‌تر خواهد بود (نمونه B).

باتوجه به مقادیر امپدانس‌ها و تحلیل مقادیر متناظر بخش‌های حقیقی و مجازی چنین می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات در نمودار ضریب جذب از تغییرات بخش حقیقی و مجازی امپدانس پیروی می‌کند و ایجاد نمودارهای جذب با باند باریک احتمالاً ناشی از غلبه فرآیندهای راکتانس در نمونه می‌باشد. به نظر می‌رسد در چنین شرایطی همانند جاذب‌های تشدیدی، عملکرد جذب صوتی نمونه ناشی از تغییرات فاز موج صوتی در برخورد با نمونه بیش از تغییرات اتلاف انرژی صوتی در فضاهای خالی می‌باشد. لذا تغییرات بخش حقیقی و مجازی را شاید بتوان به فضاهای خالی بین الیاف که با توجه به ساختار استوانه‌ای ذرات نی می‌تواند به شکل کانال باشد و هم چنین رزونانس در فضای داخل نمونه نسبت داد. از طرف دیگر بدلیل وجود ناپیوستگی امپدانس<sup>۱</sup> در ساختار نی، بعضی از ذرات سطح سفت و ذرات دیگر سطح نرم و تا اندازه‌ای متخلخل دارند بنابراین الگوی برگشت امواج تابشی در برخورد با ذرات نی در مقایسه با الیاف طبیعی دیگر متفاوت به نظر می‌رسد که سبب شده است در بعضی فرکانس‌ها super impose و در بعضی فرکانس‌ها wave cancelation اتفاق بیافتد که به ترتیب جذب و انعکاس را شاهد باشیم. به طور کلی اثر ناپیوستگی سطح به انتخاب ماده بستگی دارد (۴۱). بخش واقعی امپدانس که به عنوان مقاومت (R) نیز شناخته می‌شود، معیاری برای سنجش توانایی ماده در اتلاف انرژی یا مقاومت در برابر جریان عبوری است. در مواد متخلخل، این مقاومت تحت تأثیر عواملی مانند اندازه و شکل منافذ، توزیته و زبری سطح می‌باشد. بخش مجازی امپدانس به عنوان راکتانس (X) می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی ماده برای ذخیره یا آزاد کردن انرژی در پاسخ به جریان صوتی است. برای مواد

1. Impedance discontinuity

مش ۲۰ با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و دانسیته ۲۵۰ کیلوگرم بر مکعب بعنوان مش بهینه معرفی شده است.

از نی داشت بلکه علاوه بر ضخامت و دانسیته، در اندازه مش نیز باید به حد بهینه‌ای دست یافت. در این مطالعه

## REFERENCES

- Haghighat M, SSE, Amininasab S, Faridan F, Mehrzad SH, Sheikhmozafari MJ, Taban E. The Impact of Fiber Size on the Sound Absorption Behavior of Composites Made from Sugarcane Bagasse Wastes Fibers. *J Nat Fibers*. 2023;20(1):2175760.
- AL-Rahman LA, Raja RI, Rahman RA, Ibrahim Z. Acoustic properties of innovative material from date palm fibre. *Am J Appl Sci*. 2021;9(9):1390.
- McRae JD, Naguib HE, Atalla N. Mechanical and acoustic performance of compression-molded open-cell polypropylene foams. *Appl Polym*. 2010;116(2):1106-1115.
- Yilmaz ND, Powell NB, Banks-Lee P, Michielsen S. Hemp-fiber based nonwoven composites: Effects of alkalization on sound absorption performance. *Fibers Polym*. 2012;13:915-922.
- Tang X, ang X. Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2017;101:360-380.
- Gai XL, Xing T, Li XH, Zhang B, Wang WJ. Sound absorption of microperforated panel mounted with helmholtz resonators. *Appl Acoust*. 2016;114:260-265.
- Sakagami K, Morimoto M, Yairi M. A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers. *Appl Acoust*. 2009;70:1131-1136.
- Fazlin A Khair AP, Mohd Jailani MN and Selamat MZ. Analysis of sound absorption of hollow tube absorbers. *Int J Automot Mech Eng (IJAME)*. 2016;13(2):3492 - 3502.
- Taban E, Khavanin A, Ohadi A, Putra A, Jonidi Jafari A, Faridan M, Soleimani A. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibres: Experimental and theoretical approaches. *Build Environ*. 2019;161(1):106274
- Laurent G, Lea S. Sound insulation of lightweight extensive green roofs. *Build Sci*. 2017;116:130-139
- Keyvani S, Monazzam Esmailpour M, Fasih-Ramandi F, Ahmadi Asour A, Kolahdouzi M, Hashemi Z. Impact of Layout Sequence of the Natural and Synthetic Adsorbents in Double-Layered Composites on Improving the Natural Fiber Acoustic Performance Using the Numerical Finite Element Method. *J Health Saf Work*. 2021;11(3):368-383.
- Taban E, Abdi D, Amininasab S. Mathematical and experimental investigation of sound absorption behavior of sustainable kenaf fiber at low frequency. *Int J Environ Sci Technol (Tehran)*. 2021;18(9):2765-2780.
- Perdue RE. Arundo donax: source of musical reeds and industrial cellulose. *Econ Bot*. 1985;12(4):368-404.
- Belakroum R, Gherfi A, Bouchema K, Gharbi A, Kerboua Y, Kadja M, Lachi M. Hygric buffer and acoustic absorption of new building insulation materials based on date palm fibers. *J Build Eng*. 2017;12:132-139.
- Mahzan S, Ahmad Zaidi AM, Ghazali MI, Yahya MN, Ismail M. Investigation on Sound Absorption of Rice-Husk Reinforced Composite. *Proceedings of MUCEET 2009 Malaysian Technical Universities Conference on Engineering and Technology June 20-22, 2009, MS Garden, Kuantan, Pahang, Malaysia*.
- Tang X, Zhang X, Zhang H, Zhuang X, Yan X. Corn husk for noise reduction: Robust acoustic absorption and reduced thickness. *Appl Acoust*. 2018;134:60-68.
- Putra A, Abdullah Y, Efendy H, Mohamad W, Salleh NL. Biomass from paddy waste fibers as sustainable acoustic material. *Adv Acoust Vib*. 2013; ID 605932
- Putra A, Abdullah Y, Efendy H, Farid WM, Ayob MR, Py MS. Utilizing sugarcane wasted fibers as a sustainable acoustic absorber. *Procedia Eng*. 2013;53:632-638.
- Bell GP. Ecology and management of Arundo donax, and approaches to riparian habitat restoration in Southern California. *The Nature Conservancy of New Mexico* 1997; 212 E Marcy Street, Suite 200, Santa Fe, NM 87501 USA.
- Saltonstall K, Lambert A, Meyerson A. Genetics and Reproduction of Common (Phragmites australis) and Giant Reed (Arundo donax). *Invasive Plant Sci Manag*. 2010;4(3):495-505.

21. Shatalov AA, T, Pereira H, Arundo donax L. reed: New perspectives for pulping and bleaching: 1.Raw material characterization. Tappi J. 2001;84(1):1-12.
22. Chilekwa V, Sieffert G, Egan CA, Oldham D. The acoustical characteristics of reed configurations. Acoustic Research Unit, University of Liverpool, Liverpool, L69 3BX, United Kingdom
23. Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S, Mencarelli N. Sound Absorption Properties of Reed. The 22nd International Congress on Sound and Vibration. 12-16 July 2015.Italy
24. Trematerra A, Antonio M, Iannace G. Use of Green Material for Acoustic Correction inside Rooms. J Sustain Archit Civ Eng. 2013;4(3).
25. Jiménez-Espada M, Oldham D. The acoustical characterization of Hungarian reed for placing in a novel sustainable noise barrier. 1st EAA-EuroRegio 2010, congress on sound and vibration 15-18 september 2010, slovenia
26. Seddeq HS. Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials, Australian Journal of Basic and Applied Sciences(AJBAB3), 3 (4): 4610-4617. ISSN 1991-8178
27. Uno Ingard. "Notes on Sound Absorption Technology, Poughkeepsie" 1994, NY: Noise Control Foundation.
28. Amelia Trematerra MA, Gino Iannace.Use of Green Material for Acoustic Correction inside Rooms. J Sustain Archit Civ Eng. 2013;3(4):33-38.
29. Giuseppe Ciaburro GI, Virginia Puyana-Romero and Amelia Trematerra. A Comparison between Numerical Simulation Models for the Prediction of Acoustic Behavior of Giant Reeds Shredded. Appl Sci. 2020;10(19):6881
30. Mehrzad SH, Samaei SE, Khavanin A. Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings. Build Environ. 2022;211:108753.
31. Samaei SE, Mousavi SM, Khavanin A, Faridan M. Optimization and sound absorption modeling of Yucca Gloriosa natural fiber composites. Iran Occup Health(IOH). 2021;18(1):1-17.
32. Chung JYB, Blaser DA. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. J Acoust Soc Am. 1980;68:907-913.
33. Jayaraman KA. Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens 2005. (A thesis The Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science Textile Management and Technology Raleigh 2005
34. Istana B, Batan ML, Sutikno, Khem S, Ubaidillah U, Yahya I.Influence of Particle Size and Bulk Density on Sound Absorption Performance of Oil Palm Frond-Reinforced Composites Particleboard. Polymers. 2023;15(3), 510.
35. Kino N. Further investigations of empirical improvements to the Johnson–Champoux– Allard model. Appl Acoust. 2015;96:153-70.
36. Mamtaz H, Fouladi MH, Al-Atabi M,Namasivayam SN.Acoustic Absorption of Natural Fiber Composites. Review Article. J Eng. 2016, Article ID5836107,11
37. Silva CCB da,Terashima FJH,Barbieri N,Lima KF de.Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods. Appl Acoust. 2019;156:92–1005.
38. Deveikytė S, Mazuolis J, Vaitėkė Onas P. Experimental Investigation In To Noise Insulation of Straw and Reed. Environ Sci Ecotechnol. 2012;4(5):415-422.
39. Taban E, Soltani P, Berardid U, Abdie DD, Samaei SE. Use of date palm waste fibers as sound absorption material. J Build Eng. 2021;41:102752.
40. Cox T, d'Antonio P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application: Crc Press; 2016.
41. Sulaeman ME, Dianne A, Abidin AZ. Influence of Surface Discontinuity on Sound Absorption Coefficient of Vehicle Interior Material. Mater Sci Eng. 2022;1244 120032021.
42. Oblak M, Pirnat M. Applications and Limitations of a Four-Microphone Impedance Tube in the Liquid Media in the Low-Frequency Range. 2019; INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise 19, Madrid, Spain: 2995-3992.