



## Modelling of date palm fibre composite acoustic behaviour using differential evolution algorithm

**Ebrahim Taban**, PhD Student, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Ali Khavanin**, (Corresponding author) Associate Professor, Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [khavanin@modares.ac.ir](mailto:khavanin@modares.ac.ir)

**Abdolreza Ohadi**, Professor, Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran.

**Ahmad Jonidi Jafari**, Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

**Mohammad Faridan**, Assistant Professor, Department of occupational health Engineering, School of health and nutrition, Lorestan University of Medical Sciences, Khorramabad, Iran.

### Abstract

**Background and aims:** In recent years, the provision of a calming environment without disturbing noise has become a need, which has subsequently led to significant growth in noise control techniques. It is now well documented that prolonged over-exposure to the excessive levels of environmental noise not only induces disabling hearing impairment but also contributes to numerous adverse health effects such as stress, irritability, hypertension, cardiovascular diseases, annoyance, and sleep disturbance. Based on the WHO, occupational noise accounts for 16% of the disabling hearing loss in adults (more than four million DALYs), with estimates of disease burden ranging from 7% in developed countries to 21% in underdeveloped and developing nations. One of the methods of controlling sound propagation path is the use of insulation and sound absorption. Increasing concerns about the adverse effects of the use of synthetic sound absorbing materials on the health of individuals has provided a favorable ground for the development of research on the use of natural fibers as insulators and absorbents. During the last two decades, there has been considerable interest in the use of lignocellulosic fibres for various purposes such as sustainable acoustic absorbers. Bio-based composites of acoustic absorbers are mainly biodegradable and non-toxic and have low weight, low density and low cost and can be used as alternatives to the absorbers made of synthetic fibres. Every year, in Iran, significant amounts of agricultural waste containing lignocellulosic fibres are burnt or disposed of improperly due to the lack of a proper recycling system and reusing mechanisms. Iran as the second largest producer of dates in the world, and having large date palm plantations, faces the scourge of harvesting and pruning palm trees each year, which are largely suitable for use. Therefore, the purpose of the present study was to investigate the acoustic behaviour of composite samples made of date palm natural fibres by predicting their sound absorption coefficients with the related experimental models and comparing the results with the data obtained from the experimental tests.

**Methods:** In this study, the natural date palm waste fibers were procured from Tabas city in Southern Khorasan province in Iran. Having transferred to the laboratory, the raw DPFs were rinsed with distilled water before being placed inside an oven at 70 °C for 24 hours to dry and get a fixed weight. The DPFs were then cut into smaller pieces by a pair of scissors and crushed and pressed through a 2 mm mesh sieve to make their size fairly homogenous. In order to bind the fibers together and form a composite, polyvinyl alcohol (Sigma-Aldrich) was utilized. PVA is a polymeric chemical binder with high solubility in water and is known to be a biodegradable material reportedly used as natural fiber binder in previous studies. In order to prepare 5% PVA concentration, 5 g of the substance was first weighed by a scale and later dissolved in 100 ml of distilled water. The solution was then stirred with a magnet at 80 °C for 3 hours. Having prepared the solution, the fibers were soaked with it to bind. The fibers were then shaped by an aluminum mold (by compression molding) to be fitted inside the impedance tube (internal diameter of 100 mm) and form samples with thicknesses of 20, 30 and 40 mm with a constant density of 200 kg/ m<sup>3</sup>. After the molding process, the samples were left at room temperature for 12 hours to dry completely before being transferred to the laboratory for absorption coefficient measurement. SEM images showed that outer diameter of the DPFs

### Keywords

Sound absorption coefficient,  
Impedance tube,  
Date palm fibres,  
Experimental model,  
Differential evolution algorithm

Received: 24/06/2018

Accepted: 23/12/2018

ranged from 200 to 720  $\mu\text{m}$  and the mean diameter, the density and porosity of them were 420  $\mu\text{m}$ , 930  $\text{kg}/\text{m}^3$  and  $>80\%$  respectively. The measurement of normal incidence absorption coefficients of the samples with a constant density and three different thicknesses a different air gaps was performed by an impedance tube and based on ISO 10534-2. Afterwards, by creating the appropriate codes in MATLAB software, using the differential equation algorithm, the predicted sound absorption coefficients for the Delany-Bazley, Micky, and Johnson-Champoux-Allard models were calculated. Therefore, the experimental sound absorption curve for the samples of the corresponding date palm fibers was first determined by the impedance tube system. We followed the same method proposed by Atalla and Panneton.

**Results:** The results from the laboratory data for the three thicknesses of 20, 30 and 40 mm of the sample absorbers of DPF and the impact of the air gaps on their sound absorption coefficients are presented. Using the mathematical model, the sound absorption coefficient in the frequency range of 125-6300 Hz was next coded by MATLAB software. The results showed that the sound absorption coefficients of the samples fabricated from date palm fibres, significantly increased with increasing the frequency. Moreover, the increase in the thickness of the samples with a constant density has a major role in attenuating the sound waves, especially in lower frequencies (less than 1000 Hz). Comparison of experimental data and models output showed that by increasing the thickness, the predicted values for the acoustic absorption coefficient of the samples approach the values obtained from the experimental tests. The JCA model has a fair accuracy in predicting the absorption coefficient in different thicknesses compared to the Delany-Bazley and Micki models. Thus, this model at 20, 30- and 40-mm thickness and lower frequency range (63-1600 Hz) showed different prediction accuracies of 23%, 6% and 11% respectively, while at higher frequency range (1600-6300 Hz) came up with 9%, 6% and 4% prediction accuracies. Thus, such agreement is considered as significant in the higher frequency range. Introduction of air gap behind the DPF samples in the impedance tube transfers the maximum values of sound absorption coefficient from the upper to the lower frequency range. The results indicate that, as the sample distance from the rigid surface of the backing (up to 30 mm) increases, the sound absorption coefficient at frequencies lower than 1000 Hz will rise as well. As a result, used in this study absorbing materials with an air cavity behind them seems to play a significant role in lower production cost, and thinner layers of absorbing materials yield better absorption coefficients. The reason for this behavior is probably due to the increased impedance of absorbing material. In this case, the acoustic resonance transferred towards lower frequencies and thus improved the values of absorption performance in that range. As a result, it seems that the use of absorbing material, while having a layer of air behind them, can reduce the cost and material consumption. Thus, thinner samples made of coir fibers would provide superior values of sound absorption coefficients.

**Conclusion:** Date palm fibres have a great potential for attenuating the energy of sound waves. Elevated levels of sound absorption can be attributed to a longer dissipative process of viscous and thermal conduction between air and the absorber. Therefore, increasing the thickness of the sample will contribute to higher amounts of sound absorption coefficient.

On the other hand, natural fibers are still not as popular as synthetic fibers due to the properties such as low adhesion, high fiber diameter, low resistance to moisture and vulnerability to fungi. Therefore, it is obvious that these factors can affect the absorption coefficient of sound and the quality and durability of acoustic panels made of such natural fibers. In order to eliminate these defects, nanotechnology can be employed to achieve superior properties and better conditions by utilizing the best of these natural materials. Evidently this is the issue that should be taken into account in developing sound absorbers which are originated from the natural fibers.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** Tarbiat Modares University

### How to cite this article:

Taban E, Khavanin A, Ohadi A, Jonidi Jafari A, Faridan M. Modelling of date palm fibre composite acoustic behaviour using differential evolution algorithm. *Iran Occupational Health*. 2019 (Jun-Jul);16(2):94-108.

This work is published under [CC BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/) licence



## مدلسازی رفتار آکوستیکی کامپوزیت الیاف طبیعی نخل خرما با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

ابراهیم تابان: دانشجو دکتری، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

علی خوانین: (نویسنده مسئول) دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. [khavanin@modares.ac.ir](mailto:khavanin@modares.ac.ir)

عبدالرضا اوحدی همدانی: استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

احمد جنیدی: استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

محمد فریدن: استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی لرستان، لرستان، ایران.

### چکیده

**زمینه و هدف:** پیشرفت‌های کنترل صدا با کمک جاذب صوتی، فرصت مناسبی را برای مطالعه روش‌های کاهش سروصدا و تضعیف آکوستیکی به وسیله انواع مختلفی از مواد متخلخل فراهم کرده است. افزایش نگرانی‌ها درباره اثرات نامطلوب به کارگیری جاذب‌های صوتی ساخته شده از مواد و الیاف مصنوعی بر سلامت افراد، زمینه مساعدی را برای توسعه تحقیقات در مورد کاربرد الیاف طبیعی به عنوان عایق‌ها و جاذب‌های صوتی فراهم کرده است. در دو دهه گذشته استفاده از الیاف لیگنوسلولزی برای مقاصد مختلف به دلیل وجود خواصی چون زیست‌تخریب‌پذیری، وزن سبک، چگالی کم، قیمت ارزان و غیر سمی بودن، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده و به عنوان جایگزینی برای جاذب‌های آکوستیکی ساخته شده از الیاف مصنوعی مطرح شده است. سالانه در ایران مقادیر قابل توجهی از ضایعات کشاورزی حاوی الیاف لیگنوسلولزی به علت فقدان سازوکار بازیافت و به کارگیری مجدد، سوزانده شده یا به شکل نامناسبی دفع می‌شود. این در حالی است که می‌توان بخش زیادی از چنین ضایعاتی را برای مصارف مختلف به کار گرفت. کشور ایران به عنوان دومین تولیدکننده خرما در جهان و داشتن نخلستان‌های وسیع، هر ساله با معضل ضایعات پر حجم حاصل از برداشت و هرس درختان خرما روبرو است که عمدتاً به شکل مناسبی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. از این رو، هدف این پژوهش بررسی رفتار آکوستیکی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف طبیعی نخل خرما از طریق پیش‌بینی ضریب جذب صوت با مدل‌های تجربی و تحلیلی مربوطه و مقایسه آن با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی بوده است.

**روش بررسی:** در این مطالعه، برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی نرمال نمونه‌های ساخته شده از الیاف خوشه‌های نخل خرما با چگالی ثابت ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در سه ضخامت مختلف بافاصله‌های هوایی مختلف در پشت نمونه، از دستگاه لوله آمپدانس استفاده شد. سپس با نوشتن کد در نرم‌افزار متلب، با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی، ضریب جذب صوتی پیش‌بینی شده برای ۳ مدل دلانی-بازلی، میکی و جانسون-چمپو-آلارد محاسبه گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که خاصیت جذب صوتی نمونه‌های تهیه شده از الیاف نخل خرما به طور قابل توجهی با افزایش بسامد، بیشتر می‌شود و افزایش ضخامت مواد در چگالی ثابت، نقش عمده‌ای در تضعیف امواج صوتی به ویژه در بسامدهای پایین‌تر (کمتر از ۱۰۰۰ هرتز) دارد. مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش و مدل‌های تجربی نشان داد که با افزایش ضخامت، مقادیر پیش‌بینی شده برای ضریب جذب آکوستیکی مواد، به داده‌های حاصل از آزمایش نزدیک می‌شوند. افزایش فاصله هوایی در پشت نمونه تا ۳ سانتیمتر، در بسامدهای کمتر از ۱۰۰۰ هرتز، افزایش ضریب جذب صوتی را به همراه خواهد داشت.

**نتیجه‌گیری:** نمونه‌های ساخته شده از الیاف نخل خرما، پتانسیل خوبی برای تضعیف انرژی امواج صوتی دارند. افزایش جذب صوت می‌تواند ناشی از فرآیند استهلاک طولانی‌تر انتقال حرارتی و ویسکوز، بین هوا و مواد جاذب در کامپوزیت باشد؛ که با افزایش ضخامت کامپوزیت موجب افزایش میزان جذب صوت نیز خواهد شد. از سوی دیگر الیاف طبیعی به دلیل خاصیت چسبندگی کم، قطر زیاد الیاف، مقاومت کم در برابر رطوبت و آسیب‌پذیری در برابر قارچ‌ها هنوز به اندازه الیاف مصنوعی محبوبیت نیافته‌اند. لذا بدیهی است که این عوامل می‌توانند بر روی ضریب جذب صوتی و کیفیت و ماندگاری پائل‌های آکوستیکی ساخته شده از الیاف طبیعی تأثیر بگذارد. به همین منظور جهت رفع این عیوب، می‌توان از فناوری نانو استفاده کرد تا با بهره‌گیری از خاصیت مواد در این حالت، به شرایط بهتر و بهبود یافته دست‌یافت. به نظر می‌رسد که این مسأله‌ای است که باید در ساخت جاذب‌های صوتی ساخته شده از الیاف طبیعی در نظر گرفت.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.

**منبع حمایت‌کننده:** دانشگاه تربیت مدرس

شیوه استناد به این مقاله:

Taban E, Khavanin A, Ohadi A, Jonidi Jafari A, Faridan M. Modelling of date palm fibre composite acoustic behaviour using differential evolution algorithm. *Iran Occupational Health*. 2019 (Jun-Jul);16(2):94-108.

\*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با [CC BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/) صورت گرفته است

### کلیدواژه‌ها

ضریب جذب صوت،

لوله آمپدانس،

الیاف طبیعی نخل خرما،

مدل تجربی،

الگوریتم تکامل تفاضلی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۰۲

## مقدمه

در طی سال‌های اخیر در اغلب کشورهای جهان، تأمین یک محیط آرام و بدون صدای آزاردهنده به یک نیاز تبدیل شده است که متعاقباً منجر به رشد قابل توجهی در روش‌های کنترل صدا شده است. به‌منظور کاهش آلودگی صوتی و کنترل صدای محیط کار روش‌های مختلفی وجود دارد؛ یکی از روش‌های کنترل صدا در مسیر و محیط انتشار، استفاده از عایق‌ها و جاذب‌های صوتی می‌باشد (۱-۳). در حال حاضر جاذب‌های صوتی مورد استفاده در فضاهای داخلی و خارجی در گروه‌های مواد گرانوله، سلولی و الیافی طبقه بندی می‌شوند. جاذب‌های متخلخل ساخته شده بر پایه الیاف رشته‌ای به دلیل داشتن شبکه‌هایی از حفره‌های به هم پیوسته، در هنگام اندرکنش موج صوتی با دیواره‌های آنها، انرژی صوتی را به انرژی حرارتی تغییر می‌دهند (۴-۶). امروزه، محبوب‌ترین عایق‌های صوتی موجود در بازار، مواد متشکل از الیاف شیشه‌ای یا الیاف معدنی هستند. این مواد، علی‌رغم مزایای قابل توجه‌شان، می‌توانند تأثیر منفی بر روی سلامت افراد داشته باشند و ممکن است به سیستم تنفسی و بینایی آنها آسیب بزنند و یا در صورت تماس فیزیکی، منجر به عوارض پوستی شوند. از سوی دیگر، الیاف طبیعی سلولزی، برخلاف الیاف شیشه‌ای، مشکوک به ایجاد عوارض ریوی مانند سرطان ریه نیستند (۷-۹). افزایش نگرانی‌ها دربارهٔ تأثیر الیاف شیشه‌ای و معدنی بر سلامت افراد، زمینه را برای به کارگیری الیاف طبیعی<sup>۱</sup> (به عنوان جایگزین الیاف مصنوعی) در ساخت جاذب‌های صوتی فراهم کرده است. استفاده از پانل‌های آکوستیکی ساخته شده از الیاف طبیعی، به دلیل وجود خواص زیست تخریب پذیری بیشتر، وزن سبک‌تر، چگالی کمتر، مقاومت الکتریکی بالاتر، استحکام ویژه قابل قبول، قیمت ارزانتر و غیر سمی بودن، باعث شده است تا این مواد به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای جاذب‌های آکوستیکی ساخته شده از الیاف مصنوعی مطرح شوند (۱۰-۱۳). از این رو، نگرانی روزافزون در مورد مسائل ایمنی و سلامتی انسان، افزایش گازهای گلخانه‌ای به دلیل انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و حجم

عظیم ضایعات و زباله‌های حاصل از به کارگیری الیاف مصنوعی، سازندگان، مهندسان و طراحان را به سمت جستجو برای شناخت خواص الیاف طبیعی دوست‌دار محیط زیست که جایگزینی برای الیاف مصنوعی هستند سوق داده است (۱۴-۱۶).

الیاف طبیعی به دلیل خواص فیزیکی مطلوب و مزایای اقتصادی و زیست محیطی‌شان به عنوان کامپوزیت‌هایی با عملکرد بالا به حساب می‌آیند (۱۷، ۱۸). انواع بسیاری از این کامپوزیت‌ها در قالب الیاف طبیعی لیگنوسلولزی<sup>۲</sup> در دسترس هستند و می‌توان از آنها به عنوان جاذب‌های آکوستیکی پایدار استفاده کرد. الیاف لیگنوسلولزی، بر حسب اینکه از کدام قسمت گیاه تهیه شده‌اند، به ۵ دسته کلی تقسیم می‌شوند: الیاف ساقه‌ای (جوت، کتان، گیاه شاهدانه، رامی، کنف)، الیاف برگ‌ی (سیسال، موز، آناناس، یوکا)، الیاف دانه‌ای (پنبه، نارگیل، نخل روغنی و نخل خرما)، علف و الیاف نی‌مانند (گندم، برنج و ذرت) و سایر انواع الیاف چوبی و ریشه‌ها (۸، ۱۹-۲۶).

با توجه به فراوانی مکانی هر یک از این منابع گیاهی، مطالعاتی دربارهٔ قابلیت آنها در جذب امواج صوتی انجام شده است. براردی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که افزایش تراکم نمونه‌های الیاف طبیعی کنف، باعث افزایش ضریب جذب صوتی در محدودهٔ بسامدهای میانی و بالا می‌شود (۲۷). فولادی و همکاران نیز در خصوص الیاف طبیعی نارگیل، ذرت و نیشکر، گزارش کردند که تخلخل بیشتر در نمونه‌های تهیه شده از این الیاف موجب افزایش مقدار ضریب جذب صوت توسط آنها می‌شود (۲۸). الرحمان و همکاران نشان دادند که کاهش اندازهٔ قطر الیاف در مواد میکرومتخلخل مانند الیاف نخل و الیاف نارگیل، موجب افزایش مقاومت جریان هوا و ضریب جذب آکوستیکی می‌شود (۲۹). آزمون‌های انجام شده بر روی خواص آکوستیکی الیاف نخل روغنی نشان داده است که با افزایش ضخامت، ضریب جذب صوت نیز بالاتر می‌رود درحالی‌که پیک ضریب جذب صوت به سمت فرکانس‌های پایین‌تر حرکت می‌کند (۳۰).

فراوانی منابع گیاهی حاوی الیاف در هر منطقه، یکی

<sup>2</sup> Lignocellulosic fiber

<sup>1</sup> Natural fiber

رفتار آکوستیکی کامپوزیت الیاف طبیعی نخل خرما و ارائه مدل‌های تجربی مربوط به پیش بینی ضریب جذب صوت و مقایسه آن با داده‌های آزمایشی الیاف مورد نظر انجام شده است.

### روش بررسی

آماده سازی نمونه: در این بررسی ضایعات الیاف طبیعی نخل خرما (شامل الیاف لیگنوسلولزی خوشه‌های خرما) از شهرستان طبس واقع در استان خراسان جنوبی (بیرجند) تهیه و پس از حمل به آزمایشگاه، با استفاده از آب مقطر شستشو داده شدند. سپس نمونه‌ها جهت خشک شدن و ثابت شدن وزن در داخل آون در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. همانطوری که در شکل ۱ مشاهده می‌شود نمونه‌ها پس از خشک شدن توسط قیچی به اندازه‌های کوچکی بریده شده و جهت به دست آوردن مش یکسان ( $2 \times 2$  میلیمتر) از الک‌هایی به روزه ۲ میلی متر عبور داده شدند. جهت همبندی<sup>۱</sup> الیاف مربوطه (کنارهم گذاشتن الیاف منفرد)، از پلی وینیل الکل<sup>۲</sup> ساخت شرکت سیگما استفاده گردید. پلی وینیل الکل (PVA)، پلیمری با قابلیت انحلال بالا در آب بوده و به عنوان ماده ای زیست تخریب پذیر شناخته می‌شود و در تحقیقات مختلف به عنوان همبند الیاف طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است (۳۳). برای ساخت غلظت ۵ درصد PVA، ابتدا ۵ گرم ماده توسط ترازوی دقیق Prezisa ساخت سوییس مدل SMA-FR ۲۶۲ وزن گردید و در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر حل شدند. سپس یک مگنت مغناطیسی درون محلول قرار داده شد و به مدت ۳ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد بر روی دستگاه هم‌زن قرار گرفت. پس از آماده شدن محلول، الیاف توسط محلول مورد نظر همبندی شدند. در مرحله بعد، نمونه‌های مورد نظر (به شکل الیاف توده شده) در درون قالبی مطابق با ابعاد لوله امیدانس، یعنی به قطر داخلی ۱۰ و ۳ سانتی متری به ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ سانتیمتر با چگالی ثابت ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شدند. کلیه نمونه‌ها پس از قالب گیری به مدت ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار

از فاکتورهای مهم، در به کارگیری آنها در انواع کامپوزیت‌ها است. برطبق آمار فائو، کشور ایران در سال ۲۰۱۶ بعد از مصر دومین کشور تولیدکننده خرما بوده است (۳۱). بر این اساس، الیاف طبیعی حاصل از درختان نخل خرما (*Phoenix dactylifera L.*) با سطح کشت وسیع در مناطق جنوبی، شرقی و حتی مرکزی ایران، یکی از گزینه‌های مناسب برای تولید کامپوزیت‌ها و جاذب‌های صوتی با منشأ طبیعی هستند. بر مبنای اطلاعات موجود به دلیل ضعف در مدیریت ضایعات کشاورزی در کشور، متأسفانه بخش زیادی از مواد تولید شده و به جا مانده از محصولات کشاورزی که می‌توانند در مصارف دیگر مورد استفاده قرار گیرند، سوزانده یا دفن می‌شوند. تخمین‌های کارشناسان نشان می‌دهد که حدود ۲۲۰۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی ایران به کشت خرما اختصاص دارد که این میزان، در حدود ۲۰ درصد از وسعت کل نخلستان‌های دنیا را شامل می‌شود. با توجه به اینکه تولید خرما با کیفیت در گرو هرس منظم درخت نخل است، سالیانه ضایعات قابل توجهی مثل الیاف لیگنوسلولزی در نخلستان‌های کشور تولید می‌شود. هر نخل به طور متوسط در حدود ۳۴ کیلو ضایعات حاصل از هرس و برداشت محصول تولید می‌نماید که با در نظر گرفتن ۲۰ تا ۲۷ میلیون تنه نخل در کشور، چیزی در حدود ۲۰۰ هزار تن ماده لیگنوسلولزی که قابلیت استفاده در صنایع تبدیلی از جمله انواع کامپوزیت‌ها را دارند، شامل می‌شود (۳۲). حجم زیاد این ضایعات، انگیزه‌ای است برای محققین ایرانی، تا به دنبال راه‌های جدید استفاده از آن باشند.

در طی سالهای اخیر، پژوهش و مطالعه ضریب جذب صوتی الیاف طبیعی روند رو به رشد و چشمگیری داشته است. ولی تعداد اندکی از پژوهشگران بر روی خواص آکوستیکی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی نخل خرما متمرکز شده‌اند. بدین منظور، با توجه به ویژگی‌های بافت‌های نرم گیاهی در جذب امواج صوتی، در این مطالعه، امکان ساخت چنین جاذب‌های با استفاده از الیاف‌های طبیعی نخل خرما مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با توجه به اینکه ایجاد و توسعه مدل‌های تجربی، پیش‌بینی و اندازه‌گیری خواص آکوستیکی (از جمله ضریب جذب) این الیاف طبیعی را آسان‌تر و سریع‌تر کرده‌است، مطالعه حاضر، بررسی

<sup>1</sup> Binder

<sup>2</sup> Polyvinyl alcohol



شکل ۱- مراحل آماده سازی الیاف طبیعی نخل خرما جهت تعیین ضریب جذب آکوستیکی

تأثیرگذار بر جذب صوت در مواد متخلخل، مقاومت در برابر جریان هوا ( $\sigma$ ) است که برابر است با نسبت اختلاف فشار در دو طرف ماده متخلخل به سرعت متوسط هوای عبوری بر واحد ضخامت. هر چه سلول‌های ماده متخلخل کوچکتر و ماده متخلخل بسته‌تر باشد، جریان هوا برای عبور با موانع بیشتری روبرو بوده و بنابراین مقاومت جریان افزایش می‌کند (۳۵).

تورتوزیته<sup>۴</sup>: تورتوزیته ( $\alpha_{\infty}$ ) موجود در مواد متخلخل، یک پارامتر ساختاری بدون بُعد است که اثر ساختار داخلی حفره را بر سرعت ماکروسکوپی جریان هوا موجود در مواد متخلخل نشان می‌دهد و تنها تابع هندسه ماده متخلخل بوده و به نوع جریان هوایی که داخل ماده متخلخل بوده بستگی دارد (۳۶).

طول مشخصه ویسکوز<sup>۵</sup>: طول مشخصه ویسکوز کمیته اسکالر (تانسور) از مرتبه دو بوده و برای توصیف اثر تغییرات ویسکوزیته در فرکانس‌های بالا به کار می‌رود و با نماد  $\Lambda$  نشان داده می‌شود. این پارامتر برای یک ماده ایزوتروپیک، توسط جانسون (۳۷) بصورت زیر تعریف شده است.

$$\Lambda = 2 \frac{\int V_{fluid}^2 dA}{\int V_{fluid}^2 dV} \quad (2)$$

که در صورت کسر یک انتگرال بر روی حجم المان و در مخرج کسر یک انتگرال بر روی سطح المان قرار دارد. مقدار طول مشخصه ویسکوز تنها به هندسه

می‌گرفتند تا رطوبت آنها کاملاً خشک شود. نهایتاً پس از این مرحله نمونه‌ها برای ارسال به آزمایشگاه آکوستیک دانشگاه تربیت مدرس آماده شدند.

اندازه‌گیری خواص فیزیکی: پتانسیل مواد و الیاف متخلخل در جذب انرژی آکوستیکی به عوامل بسیاری بستگی دارد. برای پیش‌بینی ضریب جذب صوتی مواد، ابتدا باید پارامترهای فیزیکی آنها اندازه‌گیری شوند و سپس در مدل‌های ارائه شده وارد شوند. به طور کلی، پارامترهای اساسی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل آکوستیکی الیاف به شرح ذیل هستند.

تخلخل ( $\emptyset$ ): نسبت هوای موجود (در واحد حجم) در مواد متخلخل را تخلخل گویند (۳۴). میزان تخلخل در مواد متخلخل در محدوده ۰ تا ۱ قرار دارد. شکل ۲ تصاویری را نشان می‌دهد که با میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> از سطح الیاف نخل خرما گرفته شده‌اند. قطر بیرونی الیاف طبیعی نخل خرما در محدوده بین ۷۲۰-۲۰۰ میکرومتر قرار دارد. میانگین قطر و چگالی الیاف نخل خرما همبند شده به ترتیب ۴۶۵ میکرومتر و ۹۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و میزان تخلخل نمونه‌ای که توسط SEM از این الیاف تهیه شده، بر طبق رابطه زیر بیشتر از ۸۰ درصد است.

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{fiber}} \quad (1)$$

مقاومت جریان هوا<sup>۳</sup>: یکی از پارامترهای مهم و

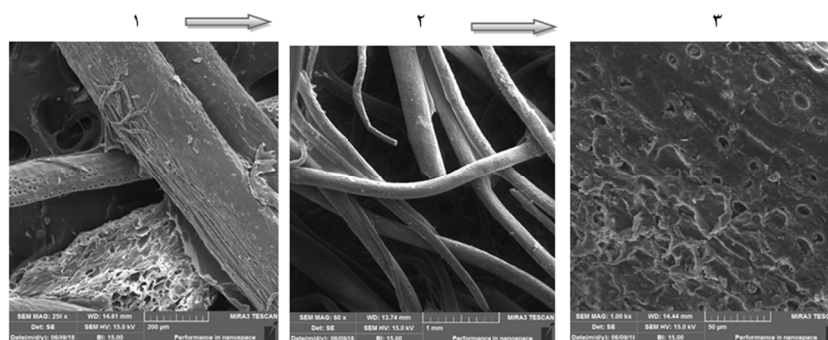
<sup>۴</sup> Tortuosity

<sup>۵</sup> Viscous Characteristic Length

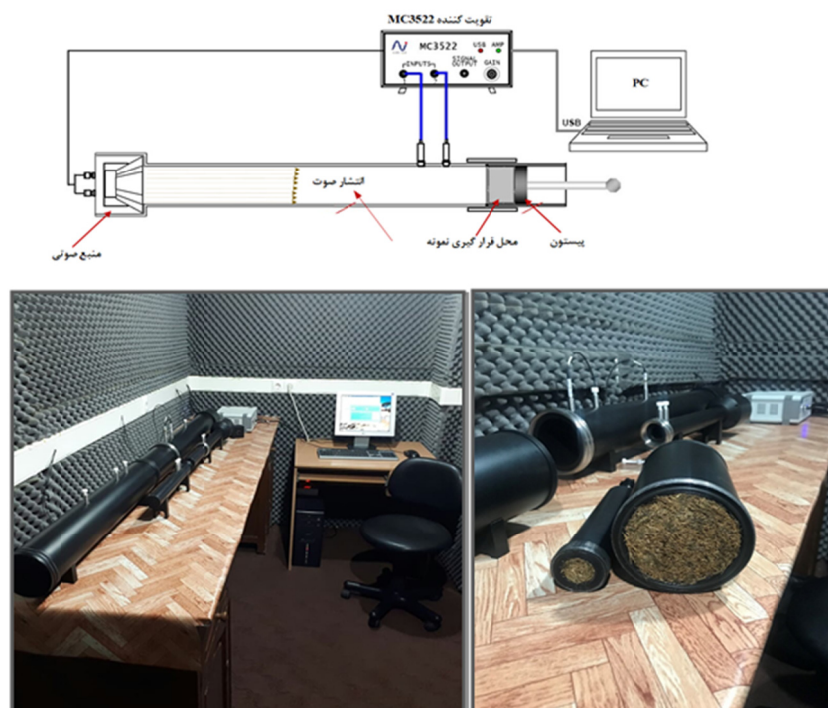
<sup>۱</sup> Porosity

<sup>۲</sup> Scanning electron microscopy

<sup>۳</sup> Airflow Resistivity



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی الیاف نخل خرما با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر



شکل ۳- نمای شماتیک از دستگاه لوله امپدانس تیوپ مدل ۴۷۷ در اتاق آکوستیک دانشگاه تربیت مدرس

فریم را نشان می‌دهد و فقط به هندسه سلول‌های ماده متخلخل ماده بستگی داشته و به نوع حرکت سیال درون سلول‌ها بستگی ندارد.

اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی الیاف: به طور کلی، روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری ضریب جذب مواد جاذب صوت وجود دارد. در مطالعه حاضر ضریب جذب صوت، توسط لوله امپدانس<sup>۲</sup> و براساس روش تابع انتقال (با در نظر گرفتن استاندارد ISO10534-2) اندازه‌گیری شد (۳۹). همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، لوله امپدانس ساخت شرکت BSWA چین مدل

سلول‌های ماده متخلخل بستگی دارد و با تغییر هندسه و تغییر ابعاد سلولی، این مقدار تغییر پیدا می‌کند.

طول مشخصه حرارتی<sup>۱</sup>: طول مشخصه حرارتی کمیته اسکالر است که با  $\Lambda'$  نمایش داده می‌شود و برای توصیف اثرات حرارتی در فرکانس‌های بالا به کار می‌رود. طبق پژوهش چامپو و همکاران (۳۸) بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{2}{\Lambda'} = 2 \frac{\int dA}{\int dV} = \frac{A}{V} \quad (3)$$

که بیانگر نسبت حجم فاز سیال به سطح در تماس با

<sup>2</sup> Impedance tube

<sup>1</sup> Thermal Characteristic Length

$$K_c = \omega/c_0 \left[ 1 + 0.0978(X)^{-0.7} - i0.189 \left( \rho_0 f / \sigma \right)^{-0.595} \right]$$

$$X = \rho_0 f / \sigma \quad (6)$$

$$Z_s = -jZ_c \cot(kd) \quad (7)$$

$$R = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \quad (8)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (9)$$

به طوریکه  $Z_c$  امپدانس مشخصه،  $K_c$  عدد موج مشخصه،  $C_0$  سرعت صوت در محیط متخلخل،  $\rho_0$  چگالی هوا،  $f$  بسامد،  $\sigma$  مقاومت در برابر جریان هوا و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $Z_s$  امپدانس سطح و  $d$  ضخامت ماده هستند. لازم به ذکر است که به کارگیری این مدل، تنها در محدوده  $0.01 < \frac{\rho_0 f}{\sigma} < 1.0$  جایز است، و استفاده از آن در خارج از محدوده مورد نظر توصیه نمی‌شود.

مدل میکی<sup>۳</sup>: میکی (۴۱) یک مدل بهبود یافته از امپدانس و ثابت‌های انتشار ارائه نمود که پیشتر توسط دلانی-بازلی ارائه شده بود. این مدل در ویژگی حقیقی مثبت بودن بخش‌های حقیقی و موهومی این عبارات صدق می‌کند؛ از این رو این مدل مقادیر منفی مربوط به بخش حقیقی امپدانس سطح را به دست نمی‌دهد. ثابت‌های انتشار و امپدانس مشخصه بهبود یافته به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 5.05 \left( 10^3 f / \sigma \right)^{-0.632} - j8.43 \left( 10^3 f / \sigma \right)^{-0.632} \right] \quad (10)$$

$$K_c = \omega/c_0 \left[ 1 + 7.81 \left( 10^3 f / \sigma \right)^{-0.618} - j11.41 \left( 10^3 f / \sigma \right)^{-0.618} \right] \quad (11)$$

همچنین مشخص شده است که مدل میکی در مقایسه با مدل اصلی دلانی-بازلی، قابلیت پیش بینی بالاتری به ویژه در محدوده فرکانس  $f < 400 \text{ Hz}$  دارد. مدل جانسون-چمپو-آلارد (JCA)<sup>۴</sup>: پس از دلانی-بازلی افراد مختلفی سعی در تصحیح ضرائب موجود در معادله آنها کردند. یکی از جدیدترین مدل‌های تحلیلی و پدیدارشناختی<sup>۵</sup> توسط آلارد و چامپو در سال ۱۹۹۲

۴۷۷ به شکل استوانه و از جنس مواد سخت با سطحی یکنواخت، مستقیم و غیرمتخلخل است که در یک انتهای آن محل قرار گیری نمونه و در انتهای دیگر آن منبع (بلندگوی) تولید صدا قرار دارد. این وسیله را می‌توان برای تعیین ضریب جذب و افت انتقال صوت در مواد متخلخل و یا برای تعیین امپدانس سطحی آکوستیکی مواد متخلخل به کار برد. در این دستگاه، امواج صوتی توسط یک منبع تولید صدا در لوله ایجاد می‌شوند. از طریق اندازه‌گیری فشارهای آکوستیکی در دو مکان ثابت با استفاده از میکروفون‌های نصب شده بر دیواره لوله و سپس محاسبه تابع تبدیل آکوستیکی مختلط، جذب صوت در حالت برخورد عمود و نسبت‌های امپدانس ماده جاذب محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود. سیستم لوله امپدانس صوتی مجهز به لوله با قطر بزرگ (۱۰ سانتیمتر) برای اندازه‌گیری ضریب جذب و افت انتقال صوت در بسامدهای پایین (۶۳-۱۶۰۰ هرتز) و لوله با قطر کوچک (۳ سانتیمتر) برای اندازه‌گیری ضریب جذب و افت انتقال صوت در بسامدهای بالا (۱۶۰۰-۶۳۰۰ هرتز) کاربرد دارد.

مدل‌های تجربی و تحلیلی<sup>۱</sup>: برای محاسبه ضریب جذب صوتی مواد متخلخل، ابتدا لازم است امپدانس مشخصه و ثابت انتشار ماده متخلخل محاسبه شود. هدف مدل‌های تجربی این است که این دو پارامتر را برای مواد متخلخل در گستره زیادی از فرکانس‌ها ارائه دهند. تحقیقات زیادی برای مدل سازی و محاسبه دو کمیت مذکور برای مواد متخلخل انجام شده است که از میان آنها، می‌توان به مدل دلانی-بازلی، مدل میکی و مدل جانسون-چمپو-آلارد اشاره نمود. که در مطالعه حاضر این سه مدل استفاده گردید.

مدل دلانی-بازلی<sup>۲</sup>: اولین مدل پذیرفته شده تجربی که در چند دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفته است، مدل دلانی-بازلی است (۴۰) که در جاذب‌های صوتی ساخته شده از الیافی مانند پشم شیشه و پشم سنگ با تخیل نزدیک به ۱ به کار می‌رود، و به صورت معادله زیر است:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0.0571(X)^{-0.754} - i0.087 \left( \rho_0 f / \sigma \right)^{-0.732} \right] \quad (4)$$

<sup>3</sup> Miki

<sup>4</sup> Johnson-Champoux-Allard model

<sup>5</sup> Phenomenological model

<sup>1</sup> Empirical and analytical models

<sup>2</sup> Delany-Bazley models



و میکی فقط به مقاومت جریان هوا در داخل نمونه وابسته است در نتیجه با اندازه گیری مقاومت جریان هوا و قرار دادن آن در داخل مدل ضریب جذب آکوستیکی الیاف نخل خرما محاسبه گردید.

### یافته‌ها

نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای ۳ ضخامت مختلف (۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر) از جاذب تهیه شده و اثرات فاصله‌های هوایی<sup>۱</sup> (در پشت جاذب) بر ضرایب جذب صوتی آنها در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. سپس با استفاده از مدل های تجربی ارائه شده، ضریب جذب صوتی در بازه بسامدی ۶۳-۶۳۰۰ هرتز توسط نرم افزار متلب برنامه نویسی شد (شکل ۶). همان طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر پیش بینی شده پارامترهای فیزیکی الیاف طبیعی نخل خرما توسط الگوریتم تکامل تفاضلی، در نرم افزار متلب و با داشتن داده‌هایی مثل ضخامت، چگالی، مقاومت جریان هوا و ضریب جذب حاصل از داده‌های آزمایشگاهی محاسبه گردید. همچنین میزان خطای پیش بینی شده<sup>۲</sup> با مدل جانسون- چمپو-آلارد، که روی محورهای سمت راست شکل ۶ نشان داده شده اند، با داده‌های حاصل از آزمایش مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

### بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از لوله امپدانس، ضرایب جذب صوتی نمونه‌های تهیه شده از الیاف طبیعی نخل خرما در دامنه بسامدی پایین (۶۳ Hz-۱۶۰۰) و بالا (۱۶۰۰-۶۳۰۰ Hz) در ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۴) خاصیت جذب صوتی الیاف نخل خرما با افزایش بسامد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ به طوری که در بسامدهای پایین، ضرایب جذب کم و در بسامدهای بالا، ضرایب جذب افزایش می‌یابند. ضخامت مواد، به ویژه در بسامدهای پایین‌تر، نقش بسیار عمده‌ای در تضعیف انرژی صوتی دارد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، در چگالی ثابت و بسامد ۱۰۰۰ هرتز، ضریب جذب صوتی جاذب ۴ سانتی

ارائه شد (۴۲). آلارد و چمپو، مدول بالک و چگالی معادل را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\rho(\omega) = \alpha_{\infty} \rho_0 \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_{\infty}} \left( 1 + \frac{4i \alpha_{\infty}^2 \eta \omega \rho_0}{(\sigma \Lambda \phi)^2} \right)^{1/2} \right] \quad (12)$$

$$K(\omega) = k p_0 \left( k - (k - 1) \left[ 1 + \frac{\sigma' \phi}{i \omega \rho_0 \alpha_{\infty} N_{pr}} \left( 1 + \frac{4i \alpha_{\infty}^2 \eta N_{pr} \omega \rho_0}{(\sigma' \Lambda \phi)^2} \right)^{1/2} \right]^{-1} \right) \quad (13)$$

$$\sigma' = \frac{8 \eta \alpha_{\infty}}{\Lambda^2 \phi} \quad (14)$$

پارامترهای فیزیکی نمونه شامل مقاومت جریان هوا  $\sigma$ ، تخلخل  $\phi$ ، تور توسیته  $\alpha_{\infty}$ ، طول مشخصه و اسکوز  $\Lambda$  و طول مشخصه حرارتی  $\Lambda'$  می‌باشد. در این میان روابط  $\rho_0$  برابر چگالی هوا،  $N_{pr}$  عدد پرانتل برای هوا،  $\eta$  ویسکوزیته هوا،  $k$  نسبت گرمای ویژه برای هوا و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای است. ملاحظه می‌شود که شرایط هوایی در به دست آمدن چگالی و مدول بالک معادل بسیار با اهمیت هستند.

برای بیان امپدانس مشخصه  $Z_c(\omega)$  و عدد موج مشخصه  $K_{\omega}$ ، امپدانس آکوستیکی سطحی  $Z$  را می‌توان با معادله‌های زیر تخمین زد (۴۳).

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\rho(\omega) \cdot K(\omega)} \quad (15)$$

$$K_c(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (16)$$

$$Z_s = -i \frac{Z_c(\omega)}{\phi} \cdot \cot(K_c(\omega) \cdot d) \quad (17)$$

در مدل جانسون- چمپو-آلارد مشخصات تخلخل و مقاومت جریان هوای نمونه توسط کاربر داده می‌شود و سپس با نوشتن کد در نرم افزار متلب و با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی می‌توان ۳ خاصیت مجهول تور توسیتی، طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی را به دست آورد. در واقع، الگوریتم ذکر شده، آن قدر مشخصه تعیین شده برای ۳ خاصیت بالا را جستجو می‌کند تا اختلاف منحنی جذب تئوری (که با ۳ خاصیت مجهول بالا و دیگر خواص معلوم هستند) رسم، و منحنی جذب تجربی کمینه می‌شود. بنابراین ابتدا منحنی تجربی جذب صوت برای الیاف طبیعی نخل خرما مد نظر، توسط سیستم لوله امپدانس در آزمایشگاه تربیت مدرس تعیین شد و سپس بر روی الگوریتم مورد نظر پیاده‌سازی گردید. مدل دلانی-بازلی

<sup>1</sup> Air gap

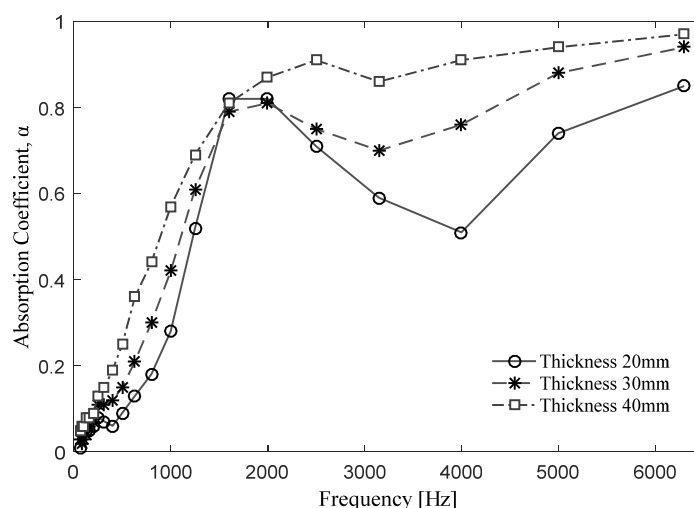
<sup>2</sup> Prediction error rate

**جدول ۱-** مقادیر پیش بینی شده پارامترهای فیزیکی الیاف طبیعی نخل خرما

طول مشخصه حرارتی $\Lambda'(\mu m)$	طول مشخصه ویسکوز $\Lambda(\mu m)$	تورنوسیتی $\alpha_{\infty}$	تخلخل $\emptyset(\%)$	مقاومت در برابر جریان هوا $\sigma(Nm^{-4}s)$	چگالی توده $\rho_{bulk}(kg/m^3)$	ضخامت نمونه d(cm)
۵۰۶	۱۴۷	۳/۸	۷۸/۹۸	۵۷۶۸	۲۰۰	۲
۴۳۰	۱۳۵	۱/۸۳	۸۰/۳۳	۵۵۸۰	۲۰۰	۳
۳۷۸	۹۲	۱/۰۰	۸۰/۸۷	۵۴۷۰	۲۰۰	۴

میانگین قطر الیاف طبیعی نخل خرما  $(\mu m)$ : ۴۲۰

میانگین چگالی الیاف  $(kg/m^3)$ : ۹۳۰



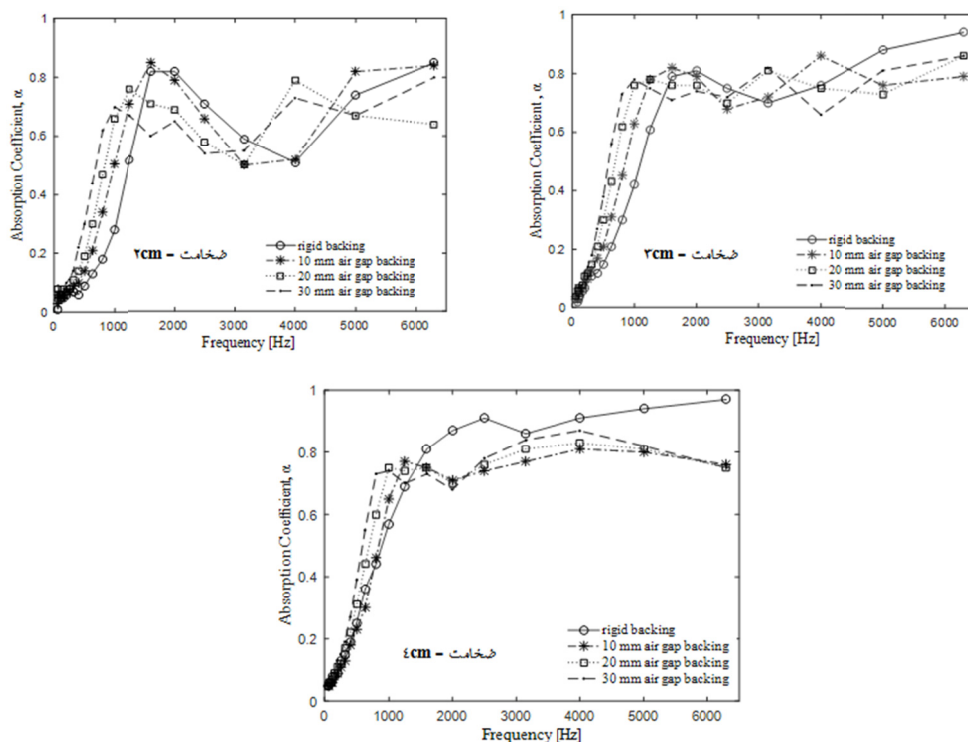
**شکل ۴-** تاثیر ضخامت‌های مختلف جاذب بر روی ضرایب جذب صوت الیاف طبیعی نخل خرما

خرما و الیاف نخل روغنی نشان داده‌است که با افزایش ضخامت لایه، ضریب جذب صوت نیز افزایش می‌یابد و این در حالی است که پیک ضریب جذب صوت به سمت بسامدهای پایین‌تر می‌رود (۴۹). بنابراین، همچنانکه مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت مواد جاذب صوت، بدون در نظر گرفتن نوع جاذب (الیافی یا متخلخل)، اثر یکسانی بر میزان جذب صوت دارد.

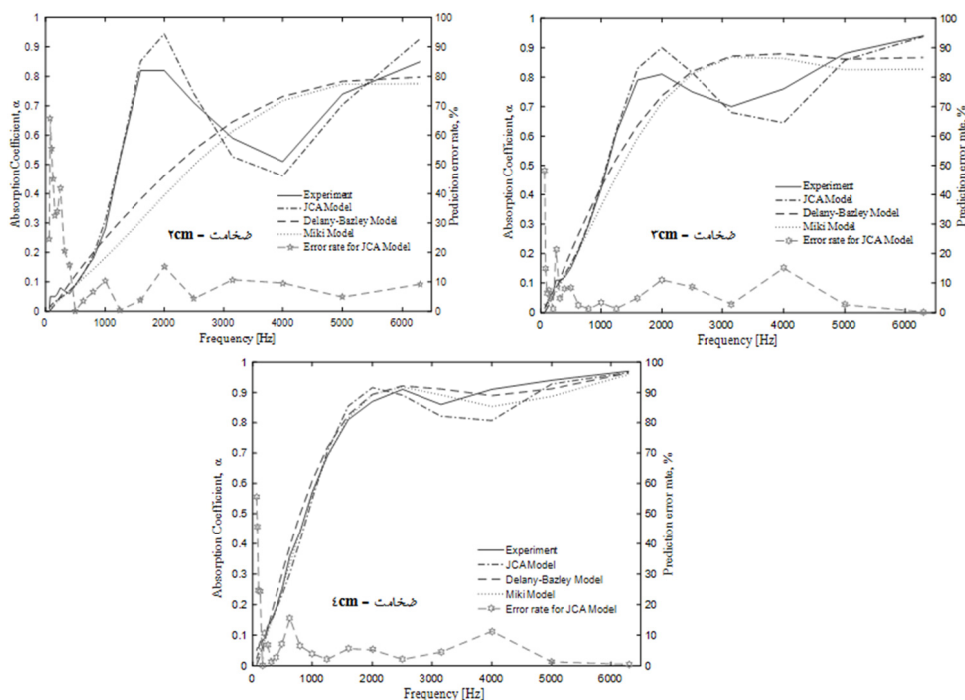
نتایج برگرفته از جدول ۱ حاکی از آن است که تخلخل (ناشی از افزایش ضخامت) باعث ارتقای میزان ضریب جذب صوتی مواد می‌شود. فولادی و همکاران نیز در خصوص الیاف طبیعی همچون الیاف نارگیل، الیاف ذرت، الیاف نیشکر گزارش کردند که افزایش تخلخل در این الیاف موجب بیشتر شدن مقدار ضریب جذب صوت در آنها می‌شود (۵۰).

مقاومت مواد در برابر جریان هوا یکی از پارامترهای بسیار مهم در میزان جذب صوت در مواد متخلخل محسوب می‌شود. به لحاظ فیزیکی، مقاومت مواد

متری بالاتر از ضریب جذب صوتی جاذب ۲ سانتی متری است (به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۲۵). در نتیجه، در بسامدهای پایین‌تر، اثربخشی و کارایی مواد جاذب در تضعیف صوت مستقیماً مرتبط با میزان ضخامت آنها است. همچنین در راستای نتایج تاثیر ضخامت، Xie و همکاران نیز دریافته‌اند که با زیاد شدن ضخامت و تخلخل، ضریب جذب مواد افزایش پیدا می‌کند (۴۴). افزایش جذب صوت می‌تواند ناشی از فرآیند استهلاکی طولانی‌تر در رسانایی حرارتی و ویسکوز میان هوا و مواد جاذب در کامپوزیت باشد که با افزایش ضخامت کامپوزیت موجب افزایش میزان جذب صوت خواهد شد (۴۵). آزمون‌های انجام شده بر روی موادی از قبیل گاه شالی، ضایعات نساجی، پشم شیشه، لاستیک خرد شده، نمد الیاف و مواد پلی استر، همگی نشان داده‌اند که افزایش ضخامت مواد جاذب باعث بیشتر شدن جذب صوت، به ویژه در بسامدهای پایین‌تر خواهد شد (۴۶-۴۸). آزمون‌های آکوستیکی انجام شده روی الیاف نخل



شکل ۵- تاثیر فاصله‌های هوایی پشت جاذب بر روی ضریب جذب صوتی ایفای طبیعی نخل خرما



شکل ۶- مقایسه ضرایب جذب اندازه گیری شده ایفای طبیعی نخل خرما با خروجی‌های مدل تجربی

جریان هوا، استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد و در ضخامت معین و نیز در فرکانس پایین، ضریب جذب صوتی بیشتر می‌شود (۵۱).

امروزه، روند توسعه و به کارگیری مدل‌های پیش

متخلخل در واقع اندرکنش ویسکوز مواد در رابطه با بسامد است (۳۵). طبق مطالعه دل ری و همکاران، مقاومت جریان هوا مستقیماً مرتبط با ظرفیت مواد در جذب انرژی صوتی است. بنابراین، با افزایش مقاومت

توده، مقاومت نمونه در برابر جریان هوا، تور توسیته، طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی مد نظر قرار می‌گیرد ولی مدل‌های دلانی-بازلی و میکی تنها به مقاومت جریان هوا در داخل نمونه و ضخامت آن وابسته هستند و هیچ گونه اطلاعاتی در خصوص نقاط اوج و رزونانس فریم در مدل ریاضی آن بررسی نشده است. قرارگرفتن نمونه تهیه شده از الیاف نخل خرما با فاصله از سطح سخت پشت آن در لوله آکوستیک، و در نتیجه ایجاد یک فاصله هوا در پشت لایه نمونه، موجب می‌شود تا مقدار حداکثر ضریب جذب صوت از محدوده بسامد بالا به محدوده بسامد پایین برود (۳۹). نتایج برگرفته از این مطالعه نشان می‌دهد که (شکل ۵) افزایش فاصله نمونه از سطح سخت پشت آن (تا ۳ سانتیمتر)، در بسامدهای کمتر از ۱۰۰۰ هرتز، افزایش ضریب جذب صوت را به همراه خواهد داشت. در مطالعه فاطمیا و همکاران مشاهده شد که بیشتر شدن فاصله پشت نمونه، باعث افزایش میزان کاهندگی صدا (NRC)، در الیاف جوت درجه TD5، می‌شود (۵۲). همچنین بر مبنای گزارش فولادی و همکاران، آزمون‌ها و بررسی‌های انجام شده بر روی الیاف نارگیل نشان می‌دهد که افزایش فاصله نمونه از سطح سخت پشت آن اثر مثبتی بر ضریب جذب صوت در محدوده بسامدهای پایین دارد. آنان دریافتند که با حرکت مقادیر حداکثر جذب به سمت بسامدهای پایین‌تر، ضرایب جذب صوت در بسامدهای متوسط و بالا کاهش می‌یابند (۵۳). دلیل این رفتار، احتمالاً ناشی از افزایش امپدانس مواد جاذب است. در این حالت، رزونانس آکوستیکی به سمت بسامدهای پایین‌تر حرکت می‌کند و در نتیجه موجب بهبود جذب در آن محدوده می‌شود. در نتیجه، به نظر می‌رسد استفاده از ماده جاذب، در حالی که یک لایه هوا در پشت آن با وجود دارد، نقش مهمی در کاهش هزینه مصرفی خواهد داشت؛ بدین ترتیب با ضخامت کمتری از مواد جاذب و می‌توان ضریب جذب بهتری را بدست آورد. با توجه به تحقیقات انجام شده، قابلیت بالقوه الیاف طبیعی به عنوان جایگزینی برای الیاف مصنوعی رایج در ساخت جاذب‌های آکوستیکی تأیید شده است. الیاف طبیعی نخل خرما، پتانسیل خوبی در تضعیف انرژی امواج صوتی دارد.

بینی‌کننده روز به روز در حال پیشرفت است و نیاز مبرمی برای ایجاد مدل‌های تجربی کاربردی، دقیق و آسان بیش از پیش احساس می‌شود. حوزه آکوستیک و جذب صدا نیز از این قاعده مستثنی نیست و مدل‌های ارائه شده در این خصوص باید به گونه‌ای باشند که قابلیت پیش بینی ضرایب جذب صوت را در جاذب‌های مختلف و از جمله جاذب‌های الیافی داشته باشند. از این‌رو، در مطالعه حاضر بررسی‌های مربوط به پیش بینی ضرایب جذب را با مهم‌ترین مدل‌های تجربی ارائه شده، همچون مدل دلانی-بازلی، میکی و جانسون-چمپو-آلرد انجام دادیم و سپس با داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمون‌های لوله امپدانس مقایسه کردیم. این عمل، دستیابی به درک جامعی از مدل‌های موجود و امکان انتخاب بهترین مدل برای پیش بینی مقادیر ضریب جذب صوتی را فراهم می‌سازد. با مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش در لوله امپدانس و خروجی‌های مدل‌های تجربی در شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش ضخامت لایه جاذب، مقادیر ضرایب جذب آکوستیکی پیش‌بینی شده مواد (توسط مدل‌ها)، به داده‌های حاصل از آزمون‌های انجام شده با لوله امپدانس نزدیک می‌شوند. در شکل ۶ مدل دلانی-بازلی و میکی در محدوده بسامد بالا، مقادیر بیشتری از مقادیر واقعی را پیش بینی می‌کنند ولی با افزایش ضخامت نمونه هر دو مدل، ضرایب جذب را در محدوده‌های بسامد بالا و پایین به درستی پیش بینی می‌کنند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل JCA، نسبت به دو مدل دیگر، در ضخامت‌های مختلف از دقت خوبی در پیش بینی ضریب جذب صوتی برخوردار است. لذا، این مدل در ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ سانتیمتر، در بسامدهای پایین (۶۳-۱۶۰۰ هرتز) دارای دقت پیش‌بینی به ترتیب با اختلاف‌های ۰.۲۳٪، ۰.۶٪ و ۰.۱۱٪ و در بسامدهای بالا (۱۶۰۰-۶۳۰۰ هرتز) دارای دقت پیش‌بینی به ترتیب با اختلاف‌های ۰.۹٪، ۰.۶٪ و ۰.۴٪ هستند. این یافته‌ها باز هم نشانگر این است که خروجی‌های مدل JCA در مقایسه با دو مدل دیگر، به داده‌های حاصل از آزمون‌های ضریب جذب نزدیک‌تر است. شاید بتوان گفت که در مدل JCA تمام پارامترهای خواص فیزیکی ماده نظیر ضخامت، چگالی

بایستی آن را در توسعه های آتی از مدل های تجربی الیاف طبیعی در نظر گرفت.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله لازم می دانند مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس که شرایط لازم برای انجام این تحقیق را فراهم آوردند اعلام نمایند.

### References

1. Zhao J, Wang XM, Chang JM, Yao Y, Cui Q. Sound insulation property of wood-waste tire rubber composite. *Compos Sci Technol*. 2010;70(14):2033-8.
2. Biabani A, Aliabadi M, Golmohammadi R, Farhadian M, Shahidi R. Evaluation of noise reduction rating of current earmuffs based on field microphone in real ear (FMIRE) in workplaces. *Iran Occup Health J*. 2017;14(4):121-03.
3. Golmohammadi R, Aliabadi M, Darvishi E. Enclosure design for noise control of air blower in a typical steel industry. *Iran Occup Health J*. 2014;11(2):1-12.
4. Arenas JP, Crocker MJ. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound Vibr*. 2010;44(7):12-8.
5. Bansod PV, Mittal T, Mohanty AR. Study on the acoustical properties of natural jute material by theoretical and experimental methods for building acoustics applications. *Acoust Australia*. 2016;44(3):457-72.
6. Rwaliire S, Tomkova B, Militky J, Hes L, Kale BM. Acoustic and thermal properties of a cellulose nonwoven natural fabric (barkcloth). *Appl Acoust*. 2017;116:177-83.
7. Jayamani E, Hamdan S, editors. Sound absorption coefficients natural fibre reinforced composites. *Adv Mat Res*. 2013: Trans Tech Publ.
8. Jawaid M, Khalil HA. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2011;86(1):1-18.
9. Taban E, Mortazavi SB, Vosoughi S, Khavanin a. Effect of Garlic intake on blood glucose and cortisol levels and body weight changes in noise-exposed male rats. *Iran Occup Health J*. 2017;14(3):130-40.
10. Kalia S, Kaith B, Kaur I. Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineer Sci*. 2009;49(7):1253-72.
11. Asdrubali F, editor Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control. *Proceed Euronoise*; 2006.

به طور کلی مدل های تجربی بررسی شده در این مطالعه تنها در محدوده معینی از ضخامت، نتایج نسبتاً مطلوبی داشتند. همین امر باعث شده تا بسیاری الیاف طبیعی از روند مطالعاتی که با مدل ها انجام می شوند حذف شوند؛ چراکه بسیاری از این الیاف شکل نامنظم تر و قطر بیشتری از الیاف مصنوعی دارند و این خواص آنها، دقت پیش بینی مدل ها را کم می کند (۲۷). این مسأله جزء عواملی است که باید در هنگام ایجاد و توسعه مدل های تجربی آتی الیاف طبیعی در نظر گرفت. البته لازم به ذکر است که همواره امکان به کارگیری مدل های دقیق تری در زمینه پیش بینی ضریب جذب صوت مواد وجود دارد. همانگونه که در بالا توضیح داده شد، بسیاری از مدل ها در محدوده بسامد پایین عملکرد بهتری دارند در حالیکه برخی از آنها اغلب در محدوده بسامدهای بالا دقت بیشتری در پیش بینی ضریب جذب صوت را دارند. از این رو، می توان از مدل ها و رویکردهای ترکیبی در پیش بینی ضریب جذب صوت برای تمامی بسامدها استفاده نمود. همچنین، مدل جانسون-چمپو-آلارد، همچنان بهترین گزینه برای پیش بینی ضریب جذب صوت در جاذب های ساخته شده از الیاف طبیعی و کامپوزیت های آنها محسوب می شود. در نتیجه، انجام مطالعات در زمینه توسعه مدل های تجربی مبتنی بر عملکرد جاذب های صوتی با منشأ طبیعی بسیار سودمند خواهد بود زیرا مدل های تجربی مزیت هایی همچون صرفه جویی در زمان و هزینه و نیز ساده سازی فرآیند تعیین ضریب جذب را به همراه دارد. بنابراین نیاز به توسعه مدل های تجربی با قابلیت اندازه گیری دقیق ضریب جذب صوت در کامپوزیت های الیاف طبیعی به طور فزاینده وجود دارد.

الیاف طبیعی به دلیل خاصیت چسبندگی کم، قطر زیاد الیاف، مقاومت کم در برابر رطوبت و کیفیت ضدقارچ هنوز به اندازه الیاف مصنوعی محبوبیت نیافته است. لذا این عوامل میتواند تاثیر بر روی ضریب جذب صوتی و کیفیت و ماندگاری پانل های آکوستیکی ساخته شده از الیاف طبیعی بگذارد. به همین منظور جهت بهبود عیوب، از فناوری نانو استفاده می شود تا با بهره گیری از خاصیت مواد در حالت نانو، به شرایط بهتر و بهبود یافته دست یافت. این یک عاملی است که

12. Thakur VK, Thakur MK, Gupta RK. Raw natural fiber-based polymer composites. *Int Journal Polymer Analys Characteriz*. 2014;19(3):256-71.
13. Alsaeed T, Yousif B, Ku H. The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites. *Mat Design*. 2013;43:177-84.
14. Maderuelo-Sanz R, Nadal-Gisbert AV, Crespo-Amorós JE, Parres-García F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Appl Acoust*. 2012;73(4):402-8.
15. Sakamoto S, Takauchi Y, Yanagimoto K, Watanabe S. Study for sound absorbing materials of biomass tubule etc. *J Environ Engineer*. 2011;6(2):352-64.
16. Ekici B, Kentli A, Küçük H. Improving sound absorption property of polyurethane foams by adding tea-leaf fibers. *Arch Acoust*. 2012;37(4):515-20.
17. Ahmad F, Choi HS, Park MK. A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromol Mat Engineer*. 2015;300(1):10-24.
18. Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromol Mat Engineer*. 2014;299(1):9-26.
19. Pickering KL, Efendy MA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Appl Sci Manufact*. 2016;83:98-112.
20. Lau KT, Hung P-y, Zhu M-H, Hui D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. *Composites Part B: Engineering*. 2018;136:222-33.
21. Taban E, Tajpoor A, Faridan M, Samaei SE, Beheshti MH. Acoustic Absorption Characterization and Prediction of Natural Coir Fibers. *Acoust Australia*. 2019;47(1):67-77.
22. Soltani P, Taban E, Faridan M, Samaei SE, Amininasab S. Experimental and computational investigation of sound absorption performance of sustainable porous material: *Yucca Gloriosa* fiber. *Appl Acoust*. 2020;157:106999.
23. Silva CCBd, Terashima FJH, Barbieri N, Lima KFd. Sound absorption coefficient assessment of sisal, coconut husk and sugar cane fibers for low frequencies based on three different methods. *Appl Acoust*. 2019;156:92-100.
24. Taban E, Khavanin A, Faridan M, Samaei SE, Samimi K, Rashidi R. Comparison of acoustic absorption characteristics of coir and date palm fibers: experimental and analytical study of green composites. *Int J Environ Sci Technol*. 2019.
25. Taban E, Khavanin A, Jafari AJ, Faridan M, Tabrizi AK. Experimental and mathematical survey of sound absorption performance of date palm fibers. *Heliyon*. 2019;5(6):e01977.
26. Taban E, Khavanin A, Ohadi A, Putra A, Jafari AJ, Faridan M, et al. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibres: Experimental and theoretical approaches. *Build Environ*. 2019;161:106274.
27. Berardi U, Iannace G. Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. *Appl Acoust*. 2017;115:131-8.
28. Fouladi MH, Nor MJM, Ayub M, Leman ZA. Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel. *Appl Acoust*. 2010;71(3):241-9.
29. ALRahman LA, Raja RI, Rahman RA. Experimental study on natural fibers for green acoustic absorption materials. *Am J Appl Sci*. 2013;10(10):1307.
30. Or KH, Putra A, Selamat MZ. Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Appl Acoust*. 2017;119:9-16.
31. Top Production-Date-2012,. <http://faostat.faoorg/site/339/default.aspx>. available in 17 November 2014.
32. Hosseinkhani H. MDF production from date palm pruning residues in pilot plant scale. *Iranian J Wood Paper Sci Res*. 2015;29(4):591-604.
33. Chen C, Zhang Y, Sun G, Wang J, Wang G. Windmill palm fiber/polyvinyl alcohol coated nonwoven mats with sound absorption characteristics. *BioResources*. 2016;11(2):4212-25.
34. Egab L, Wang X, Fard M. Acoustical characterisation of porous sound absorbing materials: A review. *Int J Vehicle Noise Vibr*. 2014;10(1-2):129-49.
35. Allard J, Atalla N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e: John Wiley & Sons; 2009.
36. Maderuelo-Sanz R, Barrigón Morillas JM, Martín-Castizo M, Gómez Escobar V, Rey Gozalo G. Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin. *Latin Am J Solids Struct*. 2013;10(3):585-600.
37. Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mechanics*. 1987;176:379-402.
38. Champoux Y, Allard JF. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J Appl Physics*. 1991;70(4):1975-9.
39. ISO10534-2: I. Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method [Online]. [cited 2001]; Available from. URL: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=22851](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=22851).
40. Delany M, Bazley E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust*. 1970;3(2):105-16.
41. Miki Y. Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models. *J Acoust Soc Japan (E)*. 1990;11(1):19-24.

42. Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*. 1992;91(6):3346-53.
43. Allard JF, Daigle G. Propagation of sound in porous media: Modeling sound absorbing materials. ASA; 1994.
44. Xie ZK, Ikeda T, Okuda Y, Nakajima H. Characteristics of sound absorption in lotus-type porous magnesium. *Japanese J Appl Physics*. 2004;43(10R):7315.
45. Mamtaz H, Fouladi MH, Al-Atabi M, Narayana Namasivayam S. Acoustic absorption of natural fiber composites. *J Engineer*. 2016;2016.
46. Tiuc AE, Vasile O, Vermesan H. Acoustic performance of composite materials made from textile waste. *Romanian J Acoust Vibr*. 2015;12(2):111.
47. Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs. *J Acoust Soc Am*. 2008;123(5):3037.
48. Nick A, Becker U, Thoma W. Improved acoustic behavior of interior parts of renewable resources in the automotive industry. *J Polymers Environ*. 2002;10(3):115-8.
49. ALRahman LA, Raja RI, Rahman RA, Ibrahim Z. Comparison of acoustic characteristics of date palm fibre and oil palm fibre. *Res J Appl Sci Engineer Technol*. 2014;7(8):1656-61.
50. Fouladi MH, Nassir MH, Ghassem M, Shamel M, Peng SY, Wen SY, et al. Utilizing Malaysian natural fibers as sound absorber. *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices: InTech*; 2013.
51. Rey Tormos Rd, Alba Fernández J, Arenas JP, Ramis-Soriano J. Evaluation of Two Alternative Procedures for Measuring Airflow Resistance of Sound Absorbing Materials. 2013.
52. Fatima S, Mohanty A. Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied acoustics*. *Appl Acoust* 2011;72(2-3):108-14.
53. Fouladi MH, Ayub M, Nor MJM. Analysis of coir fiber acoustical characteristics. *Appl Acoust*. 2011;72(1):35-42.