Journal of Health and Safety at Work 2025; 15(4): 904-931

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Development and Fabrication of a Natural and Eco-Friendly Sound Absorber from Walnut Shell Waste: A Mathematical Modeling and Acoustic Performance Evaluation Approach

Mohammad Javad SheikhMozafari[1,2], Ebrahim Taban[3], Ali Mohsenian[4], Keith Attenborough[5], Mohammad Faridan[6*]

[1]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2]Students' Scientific Research Center, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[3]Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
[4]Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
[5]School of Engineering and Innovation, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes MK7 6AA, United Kingdom
[6]Environmental Health Research Center, Department of Occupational Health and Safety at Work Engineering, Lorestan University of Medical Sciences, Khorramabad, Iran

Received: 30-9-2025 Accepted: 8-11-2025

ABSTRACT

Introduction: Environmental and health concerns regarding synthetic sound absorbers necessitate natural, sustainable alternatives. Agricultural waste like walnut shells is promising due to its inherent porosity. This study evaluates the acoustic properties of walnut shell composites, investigating the influence of key design parameters like thickness and chopping level on sound absorption performance.

Material and Methods: Porous granular samples were fabricated from walnut shells at three chopping levels (minimally, moderately, finely) and four thicknesses (20, 40, 60, and 80 mm). The sound absorption coefficient was measured via the impedance tube method. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) analyzed the material's morphology, and results were validated with Slanted Slit (SS) and Non-uniform Pore Size Distribution (NUPSD) mathematical models.

Results: Both increased thickness and chopping level significantly enhanced sound absorption. For finely chopped samples, increasing thickness from 20 to 80 mm shifted the absorption peak from 2000 Hz to 630 Hz. At a constant 80 mm thickness, intensified chopping boosted the absorption coefficient at 630 Hz from 0.48 to 0.97. This improvement correlated directly with increased density, tortuosity, and airflow resistivity. Model predictions showed the best agreement for the most finely chopped samples.

Conclusion: Walnut shell waste, especially after intensive mechanical processing, is a highly effective and sustainable sound-absorbing material. The chopping process optimizes the acoustic structure by activating the material's inherent micro-porosity, yielding excellent performance in the speech frequency range (500-2000 Hz). This material shows significant potential as a green alternative to synthetic absorbers for indoor noise control.

Keywords: *Walnut shell waste, Impedance Tube, Slanted slit, Non-uniform pore size distribution*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

SheikhMozafari M.J., Taban E., Mohsenian A., Attenborough K., Faridan M. Development and Fabrication of a Natural and Eco-Friendly Sound Absorber from Walnut Shell Waste: A Mathematical Modeling and Acoustic Performance Evaluation Approach. J Health Saf Work. 2025; 15(4): 904-931.

* Corresponding Author Email: *mfereidan@yahoo.com*

Copyright © 2025 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

1. INTRODUCTION

Urbanization has intensified noise pollution, which contributes to health issues such as hearing loss, cardiovascular problems, and reduced work performance. One effective solution is using sound-absorbing materials, historically beginning with asbestos (later banned for health risks) and followed by synthetic fibers like glass and mineral fibers. Although effective, synthetic fibers raise environmental concerns due to non-biodegradability, toxic emissions, and high energy demands during production. In response, research has shifted toward natural fibers and granular materials (e.g., jute, flax, cotton, coconut, wood fibers, wool, and animal hair). These show good sound absorption, especially at mid-to-high frequencies (≥500 Hz), and offer advantages such as biodegradability and low toxicity. However, they have limitations: poor performance at low frequencies, low durability, and restrictions in sensitive environments like hospitals. Granular materials like fruit stones and nutshells are seen as promising alternatives. Walnut shells, in particular, are durable, abundant as agricultural waste, and environmentally friendly, yet their acoustic properties remain largely unexplored. This study, therefore, investigates the sound absorption performance of walnut shells using impedance tube measurements and mathematical modeling (slanted slit and non-uniform pore size distribution approaches).

2. MATERIAL AND METHODS

This study utilized walnut shells in three forms—minimally, moderately, and finely chopped—sourced from industrial and household waste due to their abundance, durability, and recyclability. The shells were cleaned, treated with boric acid to resist fungal and insect damage, and oven-dried at 70 °C for 24 hours. Panels were fabricated with polyvinyl alcohol (PVA) as an eco-friendly adhesive, using minimal quantities, and molded into 10 cm diameter discs at four thicknesses (20, 40, 60, and 80 mm) with bulk densities of 400–700 kg/m³.

Surface morphology was analyzed using FE-SEM after gold sputtering. Acoustic performance was evaluated by measuring the sound absorption coefficient (SAC) with an impedance tube (ISO 10534-2 standard) under controlled conditions. Each sample was tested multiple times, with averages taken as results. Airflow resistivity (σ) was also measured in line with ISO 9053 to assess its influence on SAC.

In addition to experimental testing, two mathematical models—the uniform parallel slanted slit (SS) model and the non-uniform pore size distribution (NUPSD) model—were employed to estimate and compare the absorption behavior of the walnut shell panels, providing predictive insight into their acoustic performance.

For SS model, as per Stinson et al., the expressions for the complex density and complex compressibility within a uniform pore of any shape are formulated as:

$$\rho(\omega) = \rho_0 / H(\lambda) \tag{1}$$

$$C(\omega) = (\gamma P_0)^{-1}\left[\gamma - (\gamma - 1) H\left(\lambda\sqrt{N_{Pr}}\right)\right] \tag{2}$$

The equation involves the time-dependent factor $e^{-i\omega t}$, where ω stands for the angular frequency. The function $H(\lambda)$ possesses established analytical formulations for various ideal pore shapes, with λ representing a dimensionless parameter.

resistivity of a medium featuring uniform parallel slits is expressed as follows:

$$\sigma = \frac{3\mu\alpha_\infty}{\phi b^2} \tag{3}$$

In equations (6) and (7), ϕ denotes porosity while α_∞ represents tortuosity.

If the slits are uniform, parallel, and inclined at an angle θ to the surface normal:

$$\alpha_\infty = 1/(\cos\theta)^2 \cdot \tag{4}$$

The complex density ($\rho(\omega)$) and complex compressibility ($C(\omega)$) for the bulk material are determined from those for an individual slit through equations (5) and (6):

$$\rho_b(\omega) = (\alpha_\infty / \phi)\rho(\omega) \tag{5}$$

$$C_b(\omega) = \phi C(\omega) \tag{6}$$

The bulk propagation constant (($k(\omega)$ and relative characteristic impedance ($Z_C(\omega)$) of the porous material, which comprises parallel slits with a width of 2b and edge-to-edge separation of $b(1-\phi)/\phi$, are computed using equations (7) and (8).

$$k(\omega) = \omega\sqrt{\rho_b(\omega)\ C_b(\omega)} \tag{7}$$

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

$$Z_C(\omega) = (\rho_0 c_0)^{-1} \sqrt{\rho_b(\omega) / C_b(\omega)} \quad (8)$$

The surface impedance of a hard-backed porous layer with a thickness of d is given by:

$$Z(d) = Z_C(\omega) \coth(-ik(\omega)d) \quad (9)$$

The plane wave reflection coefficient, R(d), and normal incidence absorption coefficient, α(d), for a hard-backed porous layer are expressed by equations (10) and (11) respectively:

$$R(d) = \frac{\rho_0 c_0 - Z(d)}{\rho_0 c_0 + Z(d)} \quad (10)$$

$$\alpha(d) = 1 - \left| (R(d))^2 \right| \quad (11)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

Image analysis was used to determine particle diameters and porosities of the walnut shell samples, showing clear morphological differences among minimally, moderately, and finely chopped forms. Variations in surface roughness, elevations, and hole depths strongly affected sound absorption, as increased roughness and hardness enhanced friction with airflow, promoting greater energy dissipation. These structural differences also altered tortuosity, which in turn shifted quarter-wavelength resonance peaks and influenced overall acoustic behavior. Noise Reduction Coefficient (NRC) increased with sample thickness. Thicker panels improved absorption efficiency and shifted peaks toward lower frequencies. For finely chopped samples, increasing thickness from 20 mm to 80 mm moved the absorption peak from 2000 Hz (α = 0.47) to 630 Hz (α = 0.97), with the absorption at 630 Hz rising from 0.09 to 0.97. This confirmed the λ/4 relationship, where thicker porous absorbers are more effective at low frequencies due to increased distance from the rigid backing surface. Density also played a key role: at constant thickness, higher density enhanced SAC because of greater airflow resistivity and tortuosity. Elevated resistivity imposed stronger resistance to airflow penetration, thereby increasing frictional interaction between air molecules and the material surface—an essential factor for efficient sound absorption. The degree of crushing significantly affected absorption. Finer particles increased the effective surface area for interaction with incident sound waves and altered internal structure, producing higher tortuosity and airflow resistivity. These changes resulted in enhanced absorption across the frequency range, especially at lower frequencies. Notably, increasing tortuosity from 2.217 to 2.42 shifted the first resonance peak toward lower frequencies, demonstrating its role as a mechanism to improve low-frequency absorption—an inherent limitation of porous absorbers. In summary, walnut shell panels exhibited superior acoustic performance with increasing thickness, density, and crushing degree. These factors collectively improved surface area, airflow resistivity, and tortuosity, leading to substantial enhancements in SAC, particularly in the low-frequency region. These findings align with results reported in previous studies.

The results indicate that both the uniform slanted slit (SS) and non-uniform pore size distribution (NUPSD) models are promising approaches for predicting the sound absorption behavior of walnut shell panels. Their predictions showed reasonable agreement with the experimental data, comparable to those obtained from the widely used Johnson–Champoux–Allard (JCA) and Johnson–Champoux–Allard–Lafarge (JCAL) models, but with the advantage of requiring fewer input parameters. In addition to sample thickness, the SS and NUPSD models rely on porosity, airflow resistivity, and tortuosity. Since tortuosity was not measured independently, it was treated as an adjustable parameter and tuned approximately by trial-and-error to align with the measured absorption spectra. The predictive accuracy of the models varied with the degree of walnut shell crushing: they were least accurate for minimally chopped samples, more accurate for moderately chopped samples, and most accurate for finely chopped samples. This trend highlights the influence of particle size and internal structure on model applicability.

4. CONCLUSIONS

This study evaluated walnut shell panels in three chopping configurations and four thicknesses using FE-SEM, impedance tube testing, and SS/NUPSD modeling. Results showed that walnut shells are a viable eco-friendly alternative to synthetic absorbers, especially within the speech frequency range. Increasing thickness improved NRC and SAA and shifted absorption peaks to lower frequencies—for example, in finely chopped samples, the peak

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

moved from 2000 Hz (20 mm) to 630 Hz (80 mm), with the absorption coefficient at 630 Hz rising from 0.48 to 0.97. Greater chopping enhanced low-frequency absorption by increasing surface area, tortuosity, and airflow resistivity. Among the models, SS and NUPSD gave the most reliable predictions for finely chopped samples, confirming their potential for describing the acoustic behavior of walnut shell absorbers.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank all those who contributed to the completion of this research.

6. FUNDING

There is no funding for this research.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار
جلد ۱۵/ شماره ۴/ زمستان ۱۴۰۴ صفحات ۹۰۴-۹۳۱

توسعه و ساخت جاذب صوت طبیعی و زیست‌سازگار از پسماند پوست سخت گردو با رویکرد مدل‌سازی ریاضی و ارزیابی عملکرد آکوستیکی

محمدجواد شیخ‌مظفری[۱،۲]، ابراهیم تابان[۳]، علی محسنیان[۴]، کیت اتنبرو[۵]، محمد فریدن[۶*]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]مرکز تحقیقات علمی دانشجویان، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۳]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران
[۴]گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران
[۵]دانشکده مهندسی و نوآوری، دانشگاه اوپن، میلتون کینز، انگلستان
[۶]مرکز تحقیقات بهداشت محیط، گروه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشگاه علوم پزشکی لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۸ ، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۷

چکیده

مقدمه: با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با جاذب‌های صوتی الیاف مصنوعی، نیاز به یافتن جایگزین‌های طبیعی، پایدار و زیست‌تخریب‌پذیر بیش از پیش احساس می‌شود. پسماندهای کشاورزی مانند پوست سخت گردو به دلیل ساختار متخلخل ذاتی، پتانسیل بالایی در این زمینه دارند. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی جامع خواص آکوستیکی کامپوزیت‌های ساخته شده از پوست گردو و بررسی تاثیر پارامترهای کلیدی طراحی مانند ضخامت و میزان خردایش بر عملکرد جذب صوتی آن‌ها است.

روش کار: در این مطالعه تجربی و تحلیلی، نمونه‌های جاذب صوت متخلخل گرانوله از پوست گردو در سه سطح خردایش (کم، متوسط و زیاد) و چهار ضخامت (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلیمتر) ساخته شدند. ضریب جذب صوتی نمونه‌ها با استفاده از روش استاندارد لوله امپدانس اندازه‌گیری شد. به‌منظور درک ساختار داخلی و مورفولوژی، از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی (FESEM) استفاده گردید. در نهایت، نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های دو مدل ریاضی معتبر Slanted Slit (SS) و Non-uniform pore size distribution (NUSPD) مقایسه و اعتبارسنجی شد.

یافته ها: نتایج نشان داد که افزایش ضخامت و میزان خردایش، هر دو به طور معناداری عملکرد جذب صوتی را بهبود می‌بخشند. افزایش ضخامت از ۲۰ به ۸۰ میلیمتر در نمونه‌های با خردایش زیاد، قله جذب را از فرکانس ۲۰۰۰ هرتز به ۶۳۰ هرتز (محدوده فرکانس‌های میانی) منتقل کرد. همچنین، افزایش میزان خردایش در ضخامت ثابت ۸۰ میلیمتر، ضریب جذب را در فرکانس ۶۳۰ هرتز از ۰.۴۸ به ۰.۹۷ (نزدیک به جاذب کامل) ارتقا داد. این بهبود عملکرد ارتباط مستقیمی با افزایش همزمان چگالی، تورتوزیته و مقاومت به جریان هوا داشت که در اثر فرآیند خردایش شدید رخ می‌دهد. مدل‌های ریاضی نیز بالاترین انطباق را با نتایج تجربی نمونه‌های با خردایش زیاد نشان دادند.

نتیجه گیری: پسماند پوست گردو، به ویژه پس از فرآوری مکانیکی از طریق خردایش شدید، یک ماده جاذب صوت بسیار کارآمد، پایدار و زیست‌سازگار است. فرآیند خردایش با فعال‌سازی تخلخل‌های درونی ماده، ساختار آکوستیکی آن را بهینه کرده و عملکردی مطلوب در بازه فرکانس گفتار (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز) ایجاد می‌کند. این ماده پتانسیل بالایی برای استفاده به عنوان جایگزین جاذب‌های مصنوعی در کاربردهای داخلی مانند کنترل نویز در ساختمان‌ها و فضاهای بسته را داراست.

کلمات کلیدی: *پسماند پوسته گردو، لوله امپدانس، مدل slanted slit، مدل non-uniform pore size distribution، مواد متخلخل گرانوله*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *mfereidan@yahoo.com*

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

مقدمه

توسعه و گسترش شهرنشینی، صنعتی‌تر شدن فرایندها و گسترش چشمگیر صنایع در دهه‌های اخیر، در کنار مزایا متعدد، باعث ایجاد مشکلات متعددی از جمله تولید ترازهای بسیار بالای صوتی هم برای عموم مردم و هم برای شاغلان شده است (۱). مواجهه طولانی‌مدت با ترازهای بالای فشار صوت پیامدهای جبران ناپذیر متعددی همچون کاهش شنوایی، تحریک‌پذیری اجتماعی، اختلال در گفتار، مشکلات خواب، عوارض قلبی—عروقی، اختلالات روانی، بی‌نظمی‌های متابولیک، تشدید شرایط سرطانی، افزایش استرس اکسیداتیو و کاهش تمرکز کاری به‌دنبال دارد (۲).

به‌کارگیری مواد جاذب صوت در محیط‌های داخلی (مسکونی، اداری، صنعتی و ...) برای مدیریت و کاهش بازتاب صدا یکی از روش‌های مؤثر و مقرون‌به‌صرفه در کنترل صدا محسوب می‌شود. استفاده از جاذب‌های صوتی طی دهه‌های گذشته به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۳). در طی ۵۰ تا ۶۰ سال اخیر، بهره‌گیری از مواد مختلف جاذب صدا به منظور کاهش و کنترل تراز بالای آلودگی صوتی به شکل چشمگیری گسترش یافته است. این روند توسعه عمدتاً ناشی از پیشرفت فناوری‌های جذب صدا و افزایش دغدغه‌های عموم مردم نسبت به سروصدا در زندگی روزمره بوده است.

عموما تصور بر این است که نخستین ماده جاذب صوت به‌کاررفته آزبست بوده است، اما به دلیل آثار زیان‌آوری همچون بروز مزوتلیوما و سرطان‌های ریه، حنجره و تخمدان استفاده از آن در سراسر جهان ممنوع شد. پس از آن، الیاف مصنوعی همچون فایبرگلاس و الیاف معدنی به‌عنوان مواد اصلی کنترل صدا جایگزین آزبست شدند (۴).

الیاف مصنوعی مزایای متعددی همچون جذب صوت بالا، عایق حرارتی مطلوب و استحکام مکانیکی بالا داشتند. با این حال، مشکلاتی نیز ایجاد کردند که از آن جمله می‌توان به مسائل زیست‌محیطی نظیر زیست تخریب پذیر نبودن، غیر قابل بازیافت بودن و انتشار گازهای سمی از جمله منواکسیدکربن (CO) و دی‌اکسیدکربن (CO_2) در صورت سوزاندن آن‌ها اشاره کرد. همچنین، تولید صنعتی آن‌ها نیازمند مصرف بالای انرژی بوده و منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروس در جو می‌شود (۵-۷). از سوی دیگر الیاف مصنوعی به دلیل پخش شدن ذرات الیاف در محیط اثرات مخرب بسیار زیادی بر سلامت پوست، چشم و ریوی انسان می‌گذارد.

ازاین‌رو، بسیاری از کشورها قوانینی در زمینه مصالح ساختمانی پایدار و دوستدار محیط زیست وضع کرده‌اند تا محققین و عموم مردم به استفاده از موادی سازگار با محیط‌زیست که در فرآیند تولید آلودگی کمتری دارند و در پایان چرخه عمر نیز قابلیت بازیافت داشته باشند تشویق شوند (۸). در نتیجه، توجه پژوهشگران به استفاده از مواد طبیعی گرانوله و یا الیافی به‌عنوان جایگزینی برای الیاف مصنوعی جلب شد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این مواد طبیعی دارای ویژگی‌های مطلوبی از جمله زیست تخریب پذیری، وزن و چگالی کمتر، مقاومت الکتریکی بالاتر، استحکام ویژه مناسب، صرفه اقتصادی و غیرسمی‌بودن هستند (۹, ۱۰).

بر این اساس، پژوهشگران به بررسی اجزای مختلف گیاهی و جانوری همچون ساقه‌ها (مانند جوت، کتان، شاهدانه)، برگ‌ها (مانند سیسال، موز، آناناس، یوکا)، دانه‌های گیاهی (مانند پنبه، نارگیل، نخل روغنی، خرما)، الیاف حاصل از علف و کاه (مانند گندم، برنج و ذرت)، هسته میوه‌ها (مانند هلو، زردآلو، گیلاس)، انواع الیاف چوبی و اجزای حیوانی نظیر ابریشم، پشم، و موی بز و گوسفند به‌عنوان جاذب‌های طبیعی صدا پرداخته‌اند (۴, ۱۱).

هر یک از این مواد طبیعی مذکور عملکرد قابل‌قبولی در جذب صدا به‌ویژه در بازه فرکانسی متوسط تا بالا (۵۰۰ هرتز به بالا) از خود نشان داده‌اند.

به عنوان مثال، الیاف همپ (Hemp) به دلیل عملکرد عالی، توانسته‌اند به ضریب جذب صدای بسیار بالایی ($\alpha \approx$ ۰,۹۹) در فرکانس‌های میانی دست یابند که

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن‌هاست (۱۲). در مطالعه‌ای دیگر، نشان داده شد که الیاف کناف (Kenaf) می‌توانند عملکردی فراتر از جاذب‌های مصنوعی رایج مانند پشم سنگ ارائه دهند، هرچند برای دستیابی به این ویژگی به ضخامت بیشتری نیاز دارند (۱۳). همچنین، الیاف لوفا (Luffa) به دلیل ساختار طبیعی اسفنجی و توخالی خود، پتانسیل بالایی برای عملکرد همزمان به عنوان جاذب صوتی و عایق حرارتی در ساختمان‌ها از خود نشان داده‌اند (۱۴).

مواد متخلخل الیافی طبیعی اگرچه جذب مناسبی در فرکانس‌های متوسط و بالا دارند، اما در فرکانس‌های پایین کارایی محدودی داشته و به دلیل پراکندگی الیاف و دوام مکانیکی پایین، استفاده از آن‌ها در برخی محیط‌های حساس و صنعتی با محدودیت همراه است. در مقابل، مواد گرانوله سخت و مقاوم مانند هسته میوه‌ها، پوسته سخت پسته و گردو می‌توانند گزینه‌های مؤثرتری برای رفع این چالش‌ها باشند. در مقابل، استفاده از مواد گرانوله سخت و مقاوم مانند هسته میوه‌ها (۱۵, ۱۶)، پوسته سخت پسته (۱۷) و پوسته سخت گردو می‌تواند رویکردی مؤثر برای رفع این چالش‌ها باشد.

پوسته سخت گردو به‌عنوان یک پسماند کشاورزی فراوان و بادوام شناخته می‌شود که در برابر تخریب مقاومت بالایی داشته و در صنایع مختلف مانند تولید نانولوله‌های کربنی نیز کاربرد یافته است (۱۵). تاکنون مطالعات بروی خواص آکوستیکی مواد گرانوله مثل هسته میوه، پوست سخت پسته و ... انجام شده است و نتایج آن‌ها نشان داده است که این مواد به دلیل ساختار سلولی متخلخل خود می‌توانند در جذب صوت مؤثر باشند، با وجود این، شواهد اندکی درباره ارزیابی ویژگی‌های آکوستیکی پوست سخت گردو هم به صورت تجربی و هم به صورت تئوری به‌عنوان یک جاذب صوت سازگار با محیط‌زیست گزارش شده است. ازاین‌رو، هدف پژوهش حاضر بررسی جامع رفتار آکوستیکی پوسته سخت گردو و تحلیل تأثیر پارامترهای ساختاری همچون ضخامت، چگالی بالک، و نحوه خردایش آن‌ها بر عملکرد جذب آن است. در این راستا، علاوه بر آزمون تجربی با استفاده از لوله امپدانس، پیش‌بینی رفتار آکوستیکی نمونه‌ها از طریق مدل‌های ریاضی Slanted Slit (SS) و Non-uniform Pore Size Distribution (NUPSD) انجام گرفت.

روش کار

آماده سازی نمونه

در این مطالعه از پوسته سخت گردو در سه وضعیت مختلف شامل خردایش کم، خردایش متوسط و خردایش زیاد استفاده شد. پوسته سخت گردو به دلایلی همچون فراوانی، زیست تخریب پذیر بودن و قابلیت بازیافت، از پسماندهای صنعتی و خانگی تهیه شدند. یکی دیگر از دلایل اصلی انتخاب آن‌ها برای انجام این مطالعه، سختی و دوام قابل توجه‌شان بود که عمدتاً ناشی از میزان بالای لیگنین موجود در ساختار آن‌هاست (۱۶)، که این موضوع کاربردپذیری آن‌ها را به عنوان جاذب صوت برای محیط‌ها و شرایط سخت و دشوار هموارتر می‌کند.

در ابتدا، پوسته‌های سخت گردو با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها حذف شوند. سپس به‌منظور افزایش مقاومت در برابر رشد قارچ، حمله حشرات و فعالیت‌های آنزیمی، با غلظت مشخصی از اسید بوریک شستشو داده شدند. پس از این مرحله، نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند.

برای ساخت پنل‌های جاذب صوت، از پلی‌وینیل الکل (PVA) به‌عنوان رزین استفاده شد که به دلیل سازگاری زیست‌محیطی و قابلیت انحلال در آب در بسیاری از مطالعات استفاده میگردد (۱۸). تعیین مقدار چسب به‌صورت تجربی و از طریق روش آزمون و خطا انجام گرفت؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن نه آن‌قدر کم باشد که اتصال بین ذرات ضعیف شود و نه آن‌قدر زیاد که با پر کردن منافذ، بر عملکرد آکوستیکی و میزان جذب صدا تأثیر منفی بگذارد، به‌طوری‌که برای نمونه‌های با خردایش متوسط و بیشینه، تنها معادل یک‌سوم وزن و برای نمونه‌های با خردایش کم، معادل نصف وزن چسب مصرف شد.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

در فرآیند ساخت نمونه‌ها، پوست گردو پس از تعیین میزان خردایش (کم، متوسط و زیاد) با نسبت مشخصی از چسب پلی‌وینیل الکل (PVA) مخلوط شد تا خمیری یکنواخت حاصل گردد. مخلوط تهیه‌شده در قالب‌های دایره‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر (برابر با قطر داخلی لوله امپدانس) و ضخامت‌های مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر) ریخته شد. برای اطمینان از توزیع یکنواخت ذرات، نمونه‌ها به‌صورت مرحله‌ای در قالب قرار داده شده و در هر مرحله به‌آرامی متراکم شدند. پس از پر شدن قالب، فشار تراکمی ثابت برابر با ۲۰۰ بار توسط دستگاه پرس هیدرولیکی اعمال گردید تا سطح نهایی صاف و ساختار داخلی نمونه‌ها کاملاً همگن گردد. نمونه‌های فشرده‌شده در دمای محیط به مدت ۴۸ ساعت خشک و سپس در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شدند تا رطوبت باقی‌مانده به‌طور کامل تبخیر شود. بررسی چشمی و اندازه‌گیری چگالی نشان داد که توزیع ذرات در کل حجم یکنواخت بوده است، که این موضوع نشان‌دهنده همگنی مطلوب و تکرارپذیری مناسب در فرآیند ساخت است. نمونه‌های ساخته شده در سه حالت خردایش در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

ساخت نمونه در چگالی و ضخامت‌های مختلف

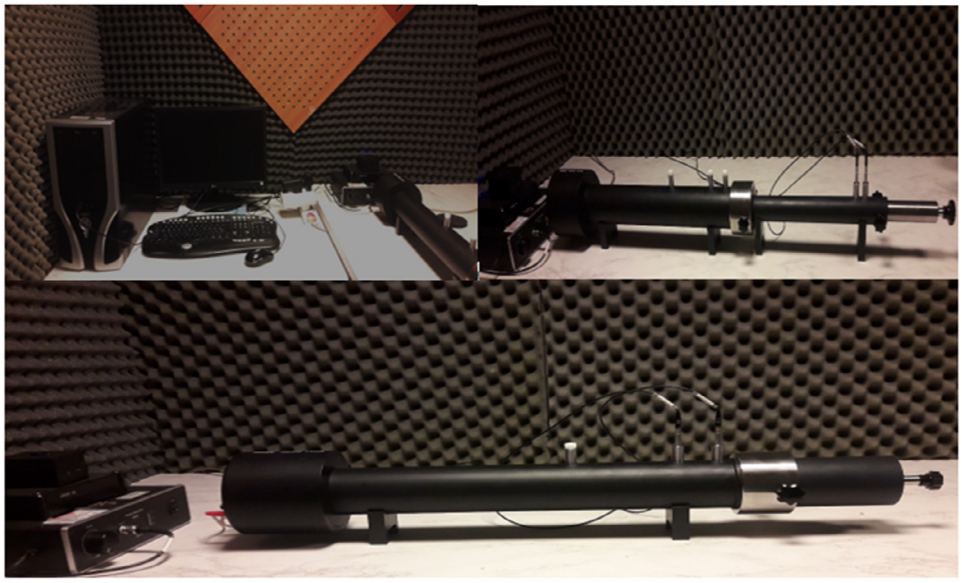
نمونه‌های جاذب صوت ساخته شده از پوسته گردو، با ضخامت‌های بین ۲۰ تا ۸۰ میلی‌متر و چگالی بالک ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مطابق با اهداف مطالعه تهیه شدند. ضخامت هر نمونه ده بار طبق رویه استاندارد ASTM D۱۰۳۷ اندازه‌گیری شد. جدول ۱ یافته‌های مربوط به ضخامت و چگالی بالک نمونه‌ها را نشان می‌دهد

شکل ۱: نمونه‌های ساخته شده از پوست سخت گردو در سه حالت خردایش کم (راست) متوسط (وسط) و زیاد (سمت چپ) به عنوان جاذب صوت

جدول ۱: ویژگی‌های پایه و پارامترهای فیزیکی نمونه‌های ساخته شده از پوست سخت گردو

پیکربندی نمونه	ضخامت (مم)	وزن (گرم)	قطر (مم)	چگالی بالک (کیلوگرم/متر^3)	مقاومت جریان هوا $\sigma(Nm^{-4}s)$	تخلخل Ø (%)	تورتوزیته (α_∞)
خردایش کم	۲۰	۷۲	۱۰۰	۴۵۸	۴۸۹۰	۵۸.۶	۱.۲۱۷
	۴۰	۱۳۷	۱۰۰	۴۳۸	۴۴۶۰	۵۸.۱۵	۱.۲۱۷
	۶۰	۲۲۱	۱۰۰	۴۶۹	۴۰۷۹	۵۷.۷	۱.۲۱۷
	۸۰	۲۷۱	۱۰۰	۴۳۱	۳۷۶۰	۵۷.۳۵	۱.۲۱۷
خردایش متوسط	۲۰	۹۲	۱۰۰	۵۸۵	۵۲۴۰	۶۰.۷۵	۱.۷۰
	۴۰	۱۶۵	۱۰۰	۵۲۴	۴۹۰۵	۶۰.۳	۲.۴۲
	۶۰	۲۵۲	۱۰۰	۵۳۴	۴۶۳۰	۵۹.۹۵	۱.۳۳۳
	۸۰	۳۳۵	۱۰۰	۵۳۵	۴۳۹۰	۵۹.۶	۱.۱۳۲
خردایش زیاد	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۳۸	۵۶۷۰	۶۱.۹	۲.۴۲
	۴۰	۱۸۳	۱۰۰	۵۸۵	۵۴۰۵	۶۱.۴۵	۲.۴۲
	۶۰	۲۹۲	۱۰۰	۶۲۰	۵۱۸۰	۶۱.۱۵	۲.۴۲
	۸۰	۳۵۹	۱۰۰	۵۷۱	۵۰۰۹	۶۰.۷۵	۲.۰۰

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



شکل ۲: ستاپ امپدانس تیوب استفاده شده برای اندازه‌گیری ضریب جذب

اندازه‌گیری‌های تجربی

بررسی ساختار درونی و مورفولوژیکی نمونه‌ها

ویژگی‌های مورفولوژیکی سطح نمونه‌های ساخته شده از پوسته سخت گردو با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) بررسی شد (۱۹). روش FESEM یک روش پیشرفته برای تصویربرداری با وضوح بالا است که برای مشخصه‌یابی مورفولوژی و توپوگرافی سطح مواد در مقیاس نانومتری به کار می‌رود. در این تکنیک، از یک تفنگ انتشار میدانی (Field Emission Gun) برای تولید پرتوی الکترونی متمرکز با قطر بسیار کوچک استفاده می‌شود که منجر به قدرت تفکیک فضایی بالاتری (تا ۱.۵ نانومتر و بهتر) در مقایسه با میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) متداول می‌گردد. برهم‌کنش این پرتو با سطح نمونه، منجر به تولید سیگنال‌های مختلفی از جمله الکترون‌های ثانویه می‌شود که توسط آشکارسازها جمع‌آوری شده و تصویری با جزئیات دقیق از ساختار سطح ایجاد می‌کنند.

قابل ذکر است که قبل از انجام این آزمایش، این پوسته‌ها با استفاده از تجهیزات MIRA۳ TESCAN FE-SEM تحت پوشش‌دهی طلا قرار گرفتند، چرا که برای نمونه‌های غیررسانا مانند پوسته گردو، انجام پوشش‌دهی با لایه‌ای نازک از طلا (Sputtering) پیش از آنالیز، به منظور جلوگیری از انباشت بار الکتریکی و افزایش کیفیت تصویر ضروری است.

بررسی رفتار آکوستیکی نمونه‌های ساخته شده

اندازه‌گیری مستقیم ضریب جذب صوت

برای بررسی مستقیم عملکرد آکوستیکی پنل‌های ساخته‌شده از پوسته گردو، از تکنیک اندازه‌گیری ضریب جذب صوت با استفاده از لوله امپدانس دو میکروفونه مدل BSWA SW422 ساخت شرکت BSWA چین و مطابق با استاندارد ISO10534-2 و روش تابع انتقال استفاده شد (۲۰). ستاپ آزمایشگاهی این دستگاه شامل یک بلندگو، آمپلی‌فایر PA50، سیستم جمع‌آوری داده، دو میکروفون خازنی ¼ اینچ (مدل MPA416)، نرم‌افزار VA-Lab و ... می‌باشد که پیش‌تر در مطالعات ما نیز به همین منظور بکار رفته است. شکل ۲، شماتیک امپدانس تیوب استفاده شده را نشان می‌دهد.

مقادیر ضریب جذب از طریق قرار دادن نمونه‌ها در

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

هولدر دستگاه و بررسی عملکرد جذب صوتی آن‌ها محاسبه شد. برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوت در این روش، فشار موج صوت در دو نقطه به صورت همزمان بررسی می‌شود. اندازه‌گیری همزمان فشار موج صوتی در دو موقعیت مجزا درون لوله، محاسبه تابع انتقال مختلط بین دو میکروفن را با استفاده از یک آنالیزور فرکانسی دیجیتال دو کاناله ممکن می‌سازد. تابع انتقال به عنوان پایه‌ای برای تعیین ویژگی‌های آکوستیک کلیدی مثل ضریب بازتاب، ضریب جذب صوت و امپدانس سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای دستیابی به این محاسبات، تبدیل فوریه (FT) فشار صوتی اندازه‌گیری‌شده در موقعیت‌های میکروفن، که با x_1 و x_2 درون لوله نشان داده می‌شوند، اعمال می‌گردد. این فرآیند با تبدیل داده‌های فشار صوتی از حوزه زمانی به حوزه فرکانسی آغاز می‌شود که امکان تحلیل دقیق رفتار آکوستیک در فرکانس‌های مختلف را فراهم می‌آورد. این تبدیل، درک جامعی از چگونگی برهمکنش صوت با ماده را ممکن ساخته و محاسبه دقیق پارامترهای آکوستیک مورد نظر را تسهیل می‌نماید.

معادلات ۱ تا ۷ این فرآیند را نشان می‌دهند:

$$P_1(x_1,f)=P_i(x_1,f)+P_r(x_1,f)= A_0(f)e^{jk_0x_1}+R(f).A_0(f)e^{-jk_0x_1} \quad (۱)$$

$$P_2(x_2,f)=P_i(x_2,f)+P_r(x_2,f)= A_0(f)e^{jk_0x_2}+R(f).A_0(f)e^{-jk_0x_2} \quad (۲)$$

در این معادلات، زیرنویس‌های i و r به ترتیب به امواج صوتی برخوردی و بازتاب شده از ماده اشاره دارند. عبارات $P_r(x_1)$ و $P_r(x_2)$ نشان‌دهنده فشارهای صوتی بازتاب‌شده در موقعیت‌های x_1 و x_2 درون لوله امپدانس هستند. A_0 دامنه مختلط موج برخوردی را نشان می‌دهد، در حالی که R نمایانگر ضریب بازتاب است. توابع انتقال مربوط به امواج صوتی بازتاب‌شده به شرح زیر محاسبه شدند:

$$H_i(f)=\frac{P_i(x_2,f)}{P_i(x_1,f)}=\frac{A_0(f)e^{jk_0x_2}}{A_0(f)e^{jk_0x_1}}=e^{-jk_0x_2} \quad (۳)$$

$$H_r(f)=\frac{P_i(x_2,f)}{P_i(x_1,f)}=\frac{A_0(f)e^{-jk_0x_2}}{A_0(f)e^{-jk_0x_1}}=e^{jk_0x_2} \quad (۴)$$

تابع انتقال نهایی برای میدان صوتی درون لوله به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$H_{12}(f)=\frac{P_2(x_2,f)}{P_1(x_1,f)}=\frac{e^{jk_0x_2}+R(f).e^{-jk_0x_2}}{e^{jk_0x_1}+R(f).e^{-jk_0x_1}}=e^{-jk_0x_2} \quad (۵)$$

ضریب انعکاس فشار با استفاده از فرمول برآورد گردید

$$R_{(f)}=\frac{H_{12}(f)-H_i(f)}{H_r(f)-H_{12}(f)} \quad (۶)$$

و در نهایت ضریب جذب صوت با استفاده از معادله زیر در بازه فرکانسی مد نظر برای نمونه‌های ساخته شده بدست آمد:

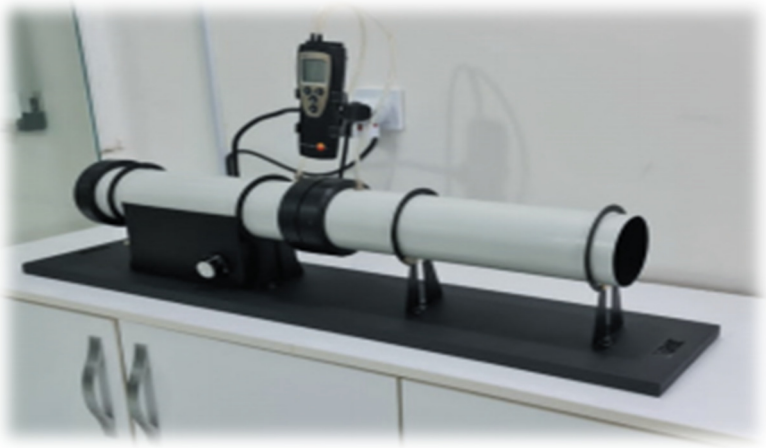
$$\mathrm{SAC}=1-|R|^2 \quad (۷)$$

قابل ذکر است که پیش از انجام هر اندازه‌گیری‌ها، میکروفون‌ها با استفاده از کالیبراتور BSWA در فرکانس ۱ کیلوهرتز و تراز فشار صوتی معادل ۱۱۴ دسی‌بل کالیبره شدند. آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۵ درصد و فشار اتمسفری ۱٫۰۱۳۲۵ × ۱۰ ^5 پاسکال انجام گرفت. برای هر نمونه سه آزمایش مجزا و در هر آزمایش چهار اندازه‌گیری صورت پذیرفت که میانگین این مقادیر به‌عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد.

پس از محاسبه ضریب جذب صوت (SAC) برای پانل‌ها در محدوده فرکانسی مد نظر، ضریب کاهش صدا (NRC) به منظور ارزیابی جامع‌تر عملکرد آکوستیک ماده تعیین گردید. NRC به عنوان میانگین حسابی مقادیر SAC در چهار فرکانس مشخص ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز به صورت زیر محاسبه می‌شود (۲۱):

$$NRC=\frac{250+500+1000+2000}{4} \quad (۸)$$

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



شکل ۳: ستاپ دستگاه اندازه‌گیری مقاومت جریان هوا

این مقدار، معیاری ساده‌شده از توانایی ماده در جذب صوت در یک محدوده فرکانسی استاندارد ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها درک روشن‌تری از اثربخشی پانل در کاهش نویز در کاربردهای عملی ارائه می‌نمایند.

تعیین پارامترهای غیرآکوستیکی

اندازه‌گیری تخلخل

تخلخل نشان‌دهنده حجم هوای موجود در مواد متخلخل است و مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر می‌باشد (۲۲). بررسی تصاویر FE-SEM ارائه‌شده در شکل ۳ امکان محاسبه میزان تخلخل نمونه‌ها را فراهم کرد (۲۶) که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

$$\varnothing = 1 - \frac{V_{pores}}{V_{Total}} \qquad (۹)$$

مقاومت جریان هوا

مقاومت جریان هوا (σ) نقش مهمی در اندازه‌گیری ضریب جذب صوت ایفا می‌کند، طبق استاندارد ISO ۹۰۵۳. این پارامتر بر اساس نسبت اختلاف فشار دو طرف ماده به سرعت متوسط جریان هوا بر واحد ضخامت تعیین می‌شود (رابطه ۱۰) (۲۳). به‌طور کلی، مواد متخلخل با تخلخل کمتر، مقاومت جریان هوای بالاتری از خود نشان می‌دهند چرا که برای عبور جریان هوا از میان آن‌ها به انرژی بیشتری نیاز است (۱۶). در این مطالعه فرآیند اندازه‌گیری σ سه بار تکرار شد تا دقت نتایج تضمین گردد و مقادیر گزارش‌شده به‌عنوان میانگین واقعی ارائه شوند. شکل ۳ ستاپ دستگاه اندازه‌گیری مقاومت جریان هوا را نشان می‌دهد.

تورتوزیته

تورتوزیته (Tortuosity) نشان‌دهنده پیچیدگی ساختار درونی واقعی مواد متخلخل است و مسیر پرپیچ‌وخمی را که درون آن‌ها وجود دارد، توصیف می‌کند. این ویژگی به‌صورت نسبت طول مسیر مؤثر به کوتاه‌ترین طول مسیر تعریف می‌شود، به همین دلیل مقدار آن همواره بزرگ‌تر از یک است ($\alpha_\infty > 1$) (۲۴). تورتوزیته نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های آکوستیکی مواد ایفا می‌کند و تغییرات آن جایگاه قله‌هایی را که در فواصل یک‌چهارم طول‌موج رخ می‌دهند، به‌طور قابل‌توجهی جابه‌جا می‌کند. بررسی تورتوزیته به درک بهتر ویژگی‌های مواد متخلخل جاذب صدا، به‌ویژه در فرکانس‌های بالا، کمک می‌کند (۲۵).

اندازه‌گیری غیر مستقیم ضریب جذب به منظور پیشبینی رفتار آکوستیکی با استفاده از مدل‌های ریاضی

با وجود آنکه اندازه‌گیری مستقیم ضرایب جذب صوتی، مناسب‌ترین روش برای ارزیابی توانایی جذب

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

مواد متخلخل به شمار می‌رود، اما این فرایند می‌تواند با محدودیت‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، دسترسی محدود به تجهیزات و نیاز به امکانات تخصصی آکوستیکی مواجه شود. از این‌رو، استفاده از روش‌های جایگزین برای تعیین ویژگی‌های آکوستیکی این مواد ضروری است. مدل‌های ریاضی گزینه‌های کارآمدی برای برآورد ویژگی‌های جذب صوتی چنین جاذب‌هایی محسوب می‌شوند. بنابراین، بررسی امکان به‌کارگیری این مدل‌ها برای پیش‌بینی طیف ضرایب جذب نمونه‌های پوسته گردو اهمیت دارد. در این پژوهش، مقایسه‌ای میان دو مدل انجام گرفته است: مدل slanted slits (SS) و مدل non-uniform pore size distribution (NUPSD). این مدل‌ها بر پایه فرضیات متفاوتی از ریزساختار نمونه‌ها بنا شده‌اند و از پارامترهای متمایزی بهره می‌گیرند.

مدل *IDENTICAL UNIFORM PARALLEL SLANTED SLITS MODEL (SS)*

مدل SS بر اساس معادلات استینسون و همکاران (۲۶)، روابط مربوط به چگالی مختلط و تراکم‌پذیری مختلط در یک منفذ یکنواخت با هر شکلی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\rho(\omega)=\rho_0/H(\lambda), \quad (۱۰)$$

$$C(\omega)=(\gamma P_0)^{-1}\left[\gamma-(\gamma-1)H\left(\lambda\sqrt{N_{Pr}}\right)\right] \quad (۱۱)$$

در این معادله از ضریب زمانی $e^{-i\omega t}$ استفاده می‌شود که در آن ω نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای است. تابع $H(\lambda)$ دارای فرمول‌های تحلیلی مشخصی برای انواع اشکال ایده‌آل منافذ است، و قابل ذکر است که λ یک پارامتر بی‌بُعد است. همچنین، عبارت $(\gamma P_0)^{-1}=(\rho_0 c_0^2)^{-1}$ وارون تراکم‌پذیری آدیاباتیک هوا را بیان می‌کند؛ که در آن، γ، P_0 ، N_{pr} به‌ترتیب نسبت گرمای ویژه سیال درون منفذ، فشار اتمسفری و عدد پرانتل هستند.

برای یک شکاف با اضلاع موازی خواهیم داشت:

$$H(\lambda)=1-\tanh\left[\lambda\sqrt{(-i)}\right]/\lambda\sqrt{(-i)} \quad (۱۲)$$

اگر عرض شکاف برابر با 2b باشد، پارامتر بی‌بُعد λ را می‌توان به صورت $\lambda=b\sqrt{\omega/\nu}$ بیان کرد، که در آن $\nu=\mu/\rho_0$ است؛ به‌طوری‌که μ ضریب ویسکوزیته دینامیکی و ρ_0 چگالی هوا را نشان می‌دهد. برای نوسانات جریان لایه‌ای در نزدیکی یک صفحه تخت، ضخامت لایه مرزی ویسکوزیته برابر است با:

$$d=\sqrt{2\nu/\omega} \quad (۱۳)$$

بنابراین، $\sqrt{2}/\lambda=\delta/b$ بخشی از نیم‌عرض شکاف منفذ را که توسط لایه مرزی ویسکوزیته اشغال می‌شود، نشان می‌دهد و این بخش به فرکانس وابسته است.

فرکانس بحرانی (۲۷) جایی که نیروهای اینرسی بر نیروهای ویسکوزیته غالب می‌شوند، به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_c=3\nu/\left(2\pi b^2\right) \quad (۱۴)$$

در این فرکانس بحرانی، تقریباً $\sqrt{2/3}$ یا ۸۱٫۶ درصد از شکاف توسط لایه مرزی ویسکوز اشغال می‌شود. در مقایسه، ضخامت لایه مرزی حرارتی $\delta/\sqrt{N_{PR}}$ است که معمولاً به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر از لایه مرزی ویسکوز می‌باشد.

پارامتر بی‌بُعد λ با استفاده از فرمول Kozeny-Carman با مقاومت جریان هوای پایای (σ) ماده متخلخل ارتباط دارد (۲۸).

$$\sigma=\frac{2\mu\alpha_\infty s_0}{\phi r_h^2} \quad (۱۵)$$

بنابراین، برای یک شکاف موازی با نیم‌عرض b، شعاع

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

هیدرولیکی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_h = \frac{\text{"wetted" area}}{\text{perimeter}} = b \quad (۱۶)$$

و فاکتور شکل جریان پایا (s_0) برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، مقاومت جریان محیطی که شامل شکاف‌های یکنواخت و موازی باشد، به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma = \frac{3\mu\alpha_\infty}{\phi b^2} \quad (۱۷)$$

در روابط ۱۵ و ۱۷، ϕ تخلخل و α_∞ تورتوزیته را نشان می‌دهند. اگر شکاف‌ها یکنواخت، موازی و با زاویه θ نسبت به سطح متمایل باشند:

$$\alpha_\infty = 1/(\cos\theta)^2 \quad (۱۸)$$

چگالی مختلط ρ(ω) و تراکم‌پذیری مختلط C(ω) برای یک ماده بالک از روابط مربوط به یک شکاف منفرد و از طریق معادلات ۱۹ و ۲۰ تعیین می‌شوند:

$$\rho_b(\omega) = (\alpha_\infty/\phi)\rho(\omega) \quad (۱۹)$$

$$C_b(\omega) = \phi C(\omega) \quad (۲۰)$$

ثابت انتشار بالک $k(\omega)$ و امپدانس مشخصه نسبی $Z_C(\omega)$ ماده متخلخل که شامل شکاف‌های موازی با عرض 2b و جدایی لبه به لبه $b(1-\phi)/\phi$ است، از طریق معادلات (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شوند:

$$k(\omega) = \omega\sqrt{\rho_b(\omega)\, C_b(\omega)} \quad (۲۱)$$

$$Z_C(\omega) = (\rho_0 c_0)^{-1}\sqrt{\rho_b(\omega)/C_b(\omega)} \quad (۲۲)$$

امپدانس سطحی یک لایه متخلخل با لایه پشتی سخت و ضخامت d به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(d) = Z_C(\omega)\coth(-ik(\omega)d) \quad (۲۳)$$

ضریب بازتاب موج تخت R(d) و ضریب جذب صوت در برخورد عمودی $\alpha(d)$ برای یک لایه متخلخل با لایه پشتی سخت به‌ترتیب توسط روابط (۲۴) و (۲۵) بیان می‌شوند:

$$R(d) = \frac{\rho_0 c_0 - Z(d)}{\rho_0 c_0 + Z(d)} \quad (۲۴)$$

$$\alpha(d) = 1 - \left|(R(d))^2\right| \quad (۲۵)$$

علاوه بر ضخامت لایه (d)، مدل SS برای محاسبه ضریب جذب یک لایه متخلخل با لایه پشتی سخت، نیازمند سه پارامتر کلیدی است: مقاومت جریان (σ)، تخلخل (φ) و تورتوزیته (α_∞). زاویه تمایل شکاف (θ) از طریق معادله (۱۸) و بر اساس مقدار تورتوزیته تعیین می‌شود. همچنین نیم‌عرض منفذ شکاف (b) با استفاده از مقادیر تورتوزیته، مقاومت جریان و تخلخل و بر اساس معادله (۱۷) محاسبه می‌گردد.

مدل NON-UNIFORM CYLINDRICAL PORES WITH a LOG NORMAL RADI-US DISTRIBUTION (NUPSD)

این مدل که منافذ استوانه‌ای غیر یکنواخت با توزیع لگ-نرمال شعاع را توصیف می‌کند (۲۹)، یک تقریب پاده (Padé) برای چگالی مختلط بالک مواد متخلخل ارائه می‌دهد:

$$\rho_b(\omega) = (\alpha_\infty/\phi)\left[1 + F_\rho(\varepsilon_\rho)/(\varepsilon_\rho^2)\right] \quad (۲۶)$$

$$F_\rho(\varepsilon) = \frac{1 + a_{\rho1}\varepsilon_\rho + a_{\rho2}\varepsilon_\rho^2}{1 + b_{\rho1}\varepsilon_\rho} \quad (۲۷)$$

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

در این معادلات، $\varepsilon_\rho = \sqrt{\left(\frac{-i\omega\rho_0\alpha_\infty}{\phi\sigma}\right)}$ ، $a_{\rho1} = \theta_{\rho1}/\theta_{\rho2}$ ، $a_{\rho2} = \theta_{\rho1}$ ، $b_{\rho1} = a_{\rho1}$ ، $\theta_1 = \frac{1}{3}$ ، $\theta_{\rho2} = e^{-\frac{1}{2}(\beta\log2)^2}$ و β

انحراف معیار توزیع اندازه منفذها در واحد φ است، به‌گونه‌ای که بعد منفذ بر حسب میلی‌متر برابر است با $2^{-\varphi}$.

تقریب پاده متناظر برای تراکم‌پذیری بالک به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_b(\omega) = (\gamma P_0)^{-1}\left[\gamma - (\gamma-1)/\left(1 + F_C(\varepsilon_C)/(\varepsilon_C{}^2)\right)\right] \quad (۲۸)$$

$$F_C(\varepsilon) = \frac{1 + a_{C1}\varepsilon_C + a_{C2}\varepsilon_C{}^2}{1 + b_{C1}\varepsilon_C} \quad (۲۹)$$

در معادلات بالا $\varepsilon_C = \sqrt{\left(\frac{-i\omega\rho_0\alpha_\infty N_{Pr}}{\phi\sigma'}\right)}$ ، $a_{C1} = \theta_{C1}/\theta_{C2}$ ، $a_{C2} = \theta_{C1}$ ، $b_{C1} = a_{C1}$ ، $\theta_{C1} = \frac{1}{3}$ ، $\theta_{C2} = e^{-\frac{3}{2}(\beta\log2)^2}/\sqrt{2}$ است.

اگر شعاع متوسط منفذ $\bar{r}$ باشد، آنگاه:

$$\sigma = \left[\frac{8\mu}{\phi\bar{r}^2}\right]e^{6(\beta\log2)^2} \quad (۳۰)$$

$$\sigma' = \mu/k_0' = \left[\frac{8\mu}{\phi\bar{r}^2}\right]e^{-6(\beta\log2)^2} \quad (۳۱)$$

همچنین:

$$\alpha_\infty = e^{4(\beta\log2)^2} \quad (۳۲)$$

از معادلات (۲۹)، (۳۰) و (۳۱) می‌توان نتیجه گیری که $\sigma' = \sigma e^{-12(\beta\log2)^2}$ و $\varepsilon_C = \varepsilon_\rho e^{6\beta\log2}$ می‌باشد.

دستیابی به مقادیر غیرآکوستیکی نظیر مقاومت جریان، تخلخل و انحراف معیار (β) توزیع اندازه منفذها، نیاز به هرگونه پارامتر تنظیمی یا برازش داده‌شده در مدل لگ-نرمال منافذ غیر یکنواخت را از بین می‌برد. تعیین β با استفاده از معادله ۳۱ انجام می‌شود.

مدل NUPSD (۳۰) روابطی را بین طول‌های مشخصه، بعد متوسط منفذ و انحراف معیار توزیع لگ-نرمال اندازه منافذ برقرار می‌سازد:

$$\Lambda = \bar{r}e^{-5/2(\beta\log2)^2} \quad (۳۳)$$

$$\Lambda' = \bar{r}e^{3/2(\beta\log2)^2} \quad (۳۴)$$

این بدان معناست که نسبت طول‌های مشخصه ($\frac{\Lambda'}{\Lambda} = e^{4(\beta\log2)^2}$) صرفاً به انحراف معیار توزیع اندازه منفذها بستگی دارد.

یافته ها

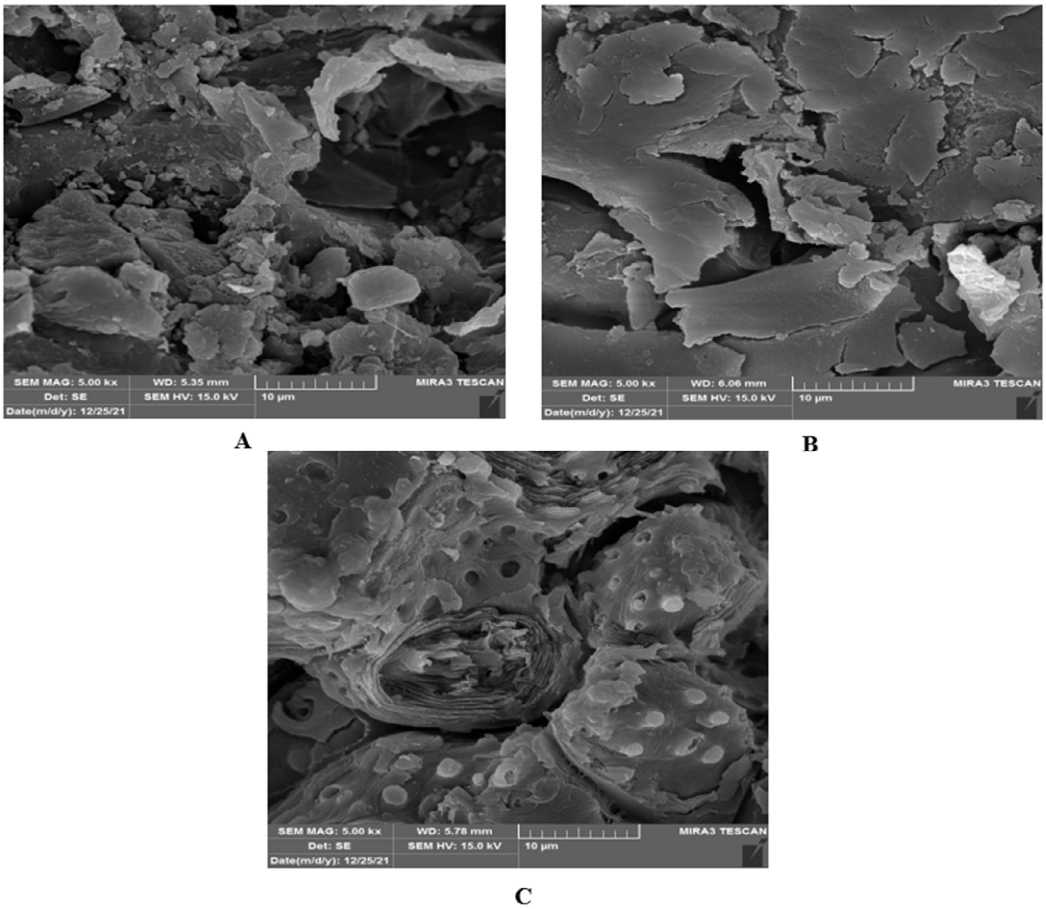
مشخصات مورفولوژیکی

شکل ۴ نتایج بررسی خصوصیات مورفولوژیکی نمونه‌ها را با استفاده از FESEM نشان می‌دهد.

همانطورکه در شکل ۴ مشخص است تصاویر FESEM مورفولوژی و ساختار درونی نمونه‌ها را بر اساس درصد خردایش آن‌ها نشان می‌دهد. از طریق پردازش تصویر انجام شده، قطر ذرات تشکیل دهنده نمونه‌ها تعیین و امکان محاسبه تخلخل نمونه‌ها فراهم می‌شود. در جدول ۲ تخلخل ذرات مشخص گردیده است.

در تصویر (A) که مربوط به نمونه با حداقل خردایش (minimally chopped) است، ذرات بزرگ با سطوح نسبتاً صاف و لبه‌های شکسته تیز مشاهده می‌شود که ساختاری توده‌ای و متراکم را به نمایش می‌گذارد. در نمونه با خردایش متوسط (moderately chopped)، تصویر (B)، ذرات به ابعاد کوچکتر و با شکلی ورقه‌ای‌تر و کشیده‌تر دیده می‌شوند. در نهایت، تصویر (C) که مربوط به نمونه با خردایش زیاد (extensively chopped) است، مورفولوژی کاملاً متفاوتی را آشکار می‌سازد. در این تصویر، ساختار سلولی و متخلخل درونی دیواره پوست گردو به وضوح نمایان شده است و حفره‌های متعدد و منظمی بر روی سطح ذرات قابل مشاهده است که نشان‌دهنده دسترسی به تخلخل‌های داخلی ماده در اثر فرآیند خردایش شدید است.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



شکل ۴: تصاویر FESEM از نمونه‌های ساخته شده از پوست سخت گردو در پیکربندی‌های مختلف (A: خردایش کم، B: خردایش متوسط، C: خردایش زیاد)

اثر ضخامت بر ضریب جذب صوت نمونه‌ها

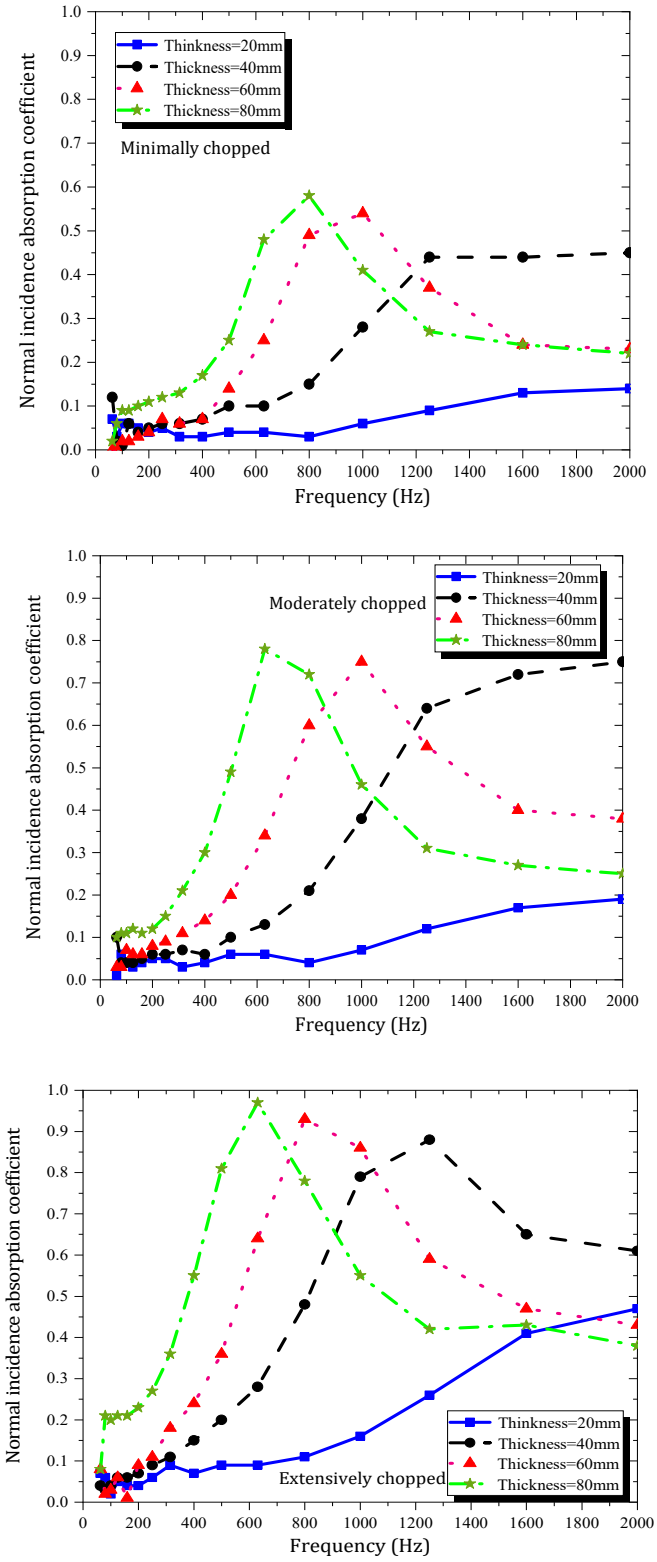
در شکل ۵ به بررسی تاثیر ضخامت بر رفتار آکوستیکی نمونه‌های ساخته شده در پیکربندی‌های مختلف پرداخته شده است.

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، ضریب جذب و شاخص NRC با افزایش ضخامت روند صعودی داشته و پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا می‌شود. در نمونه با خردایش کم (Minimally Chopped)، افزایش ضخامت از ۲۰ به ۸۰ میلی‌متر باعث تغییر اندک در فرکانس‌های پایین شد، اما در فرکانس‌های بالاتر بهبود محسوسی ایجاد گردید (مثلاً در ۲۰۰۰ هرتز از ۰.۱۴ به ۰.۲۲). در نمونه با خردایش متوسط (Moderately Chopped) نیز الگوی مشابهی مشاهده شد، به طوری که در ۱۲۵۰ هرتز، افزایش ضخامت از ۲۰ به ۸۰ میلی‌متر ضریب جذب را از ۰.۱۲ به ۰.۳۱ و NRC را از ۰,۰۹ به ۰,۳۴ ارتقا داد. در نمونه با خردایش زیاد (Extensively Chopped)، تأثیر ضخامت بسیار برجسته‌تر بود؛ برای مثال در ۱۰۰۰ هرتز، افزایش ضخامت از ۲۰ به ۶۰ میلی‌متر ضریب جذب را از ۰.۱۶ به ۰.۸۶ رساند. هرچند در ضخامت ۸۰ میلی‌متر در فرکانس‌های خیلی بالا افت جزئی دیده می‌شود، اما به طور کلی شاخص NRC از ۰,۲۰ در ضخامت ۲۰ میلی‌متر به حدود ۰,۵۰ در ضخامت ۸۰ میلی‌متر افزایش یافته است.

اثر چگالی بر ضریب جذب صوت نمونه‌ها

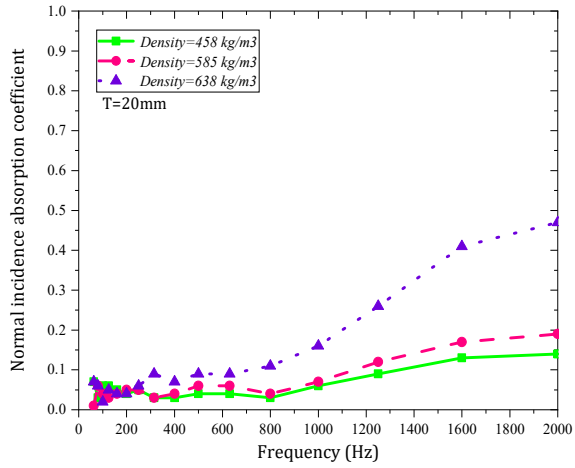
شکل ۶ به بررسی تاثیر چگالی بالک بر رفتار آکوستیکی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

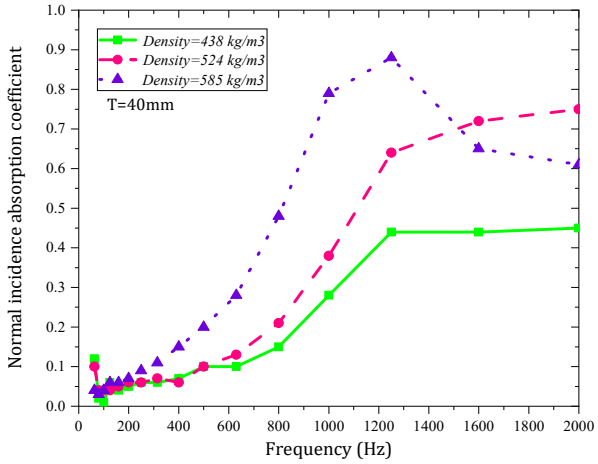


شکل ۵: تاثیر ضخامت بر رفتار آکوستیکی نمونه‌های ساخته شده در پیکربندی‌های مختلف با در نظر گرفتن تاثیر ضخامت‌های متفاوت

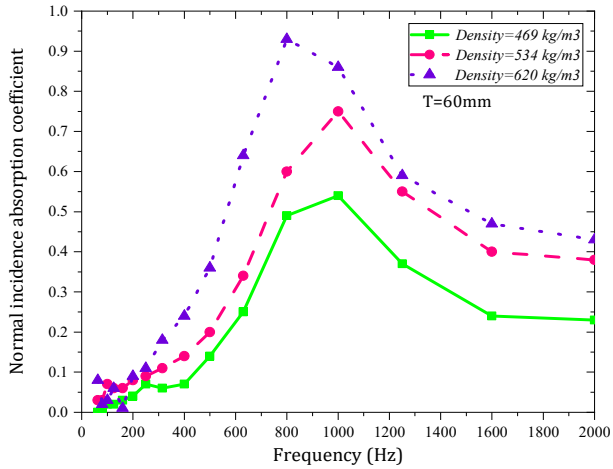
[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



الف: ضخامت 20 میلیمتر



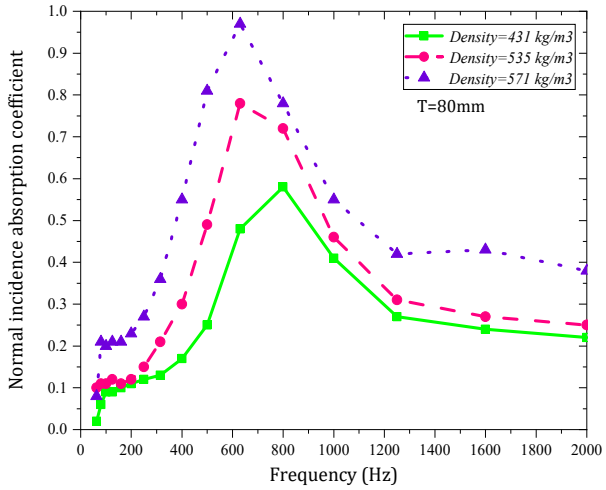
ب: ضخامت 40 میلیمتر



ج: ضخامت 60 میلیمتر

شکل ۶: تاثیر چگالی بالک بر رفتار آکوستیکی نمونه‌های ساخته شده در ضخامت‌های یکسان

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



د: ضخامت 80 میلیمتر

ادامه شکل ۶: تاثیر چگالی بالک بر رفتار آکوستیکی نمونه‌های ساخته شده در ضخامت‌های یکسان

نمونه‌های ساخته شده در ضخامت‌های یکسان میپردازد.

بررسی نتایج نشان داد که در تمامی ضخامت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر، افزایش چگالی موجب بهبود قابل توجه ضریب جذب صوتی شده است. به‌عنوان نمونه، در ضخامت ۲۰ میلی‌متر با افزایش چگالی از ۴۵۸ به ۶۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار NRC از ۰٫۰۷۲۵ به ۰٫۱۹۵ افزایش یافت. در ضخامت ۴۰ میلی‌متر این روند با افزایش NRC از ۰٫۲۲۲۵ به ۰٫۴۲۲۵ مشاهده شد و در ضخامت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر نیز مقدار NRC به‌ترتیب از ۰٫۲۴۵ به ۰٫۴۴ و از ۰٫۲۵ به ۰٫۵۰۲۵ ارتقا پیدا کرد. این یافته‌ها بیانگر آن است که افزایش چگالی در همه ضخامت‌ها موجب افزایش اتلاف انرژی صوتی و بهبود جذب شده و این اثر در ضخامت‌های کمتر چشمگیرتر است.

اثر پیکربندی‌های مختلف نمونه‌ها (خردایش کم، متوسط و زیاد) بر رفتار آکوستیکی نمونه‌ها

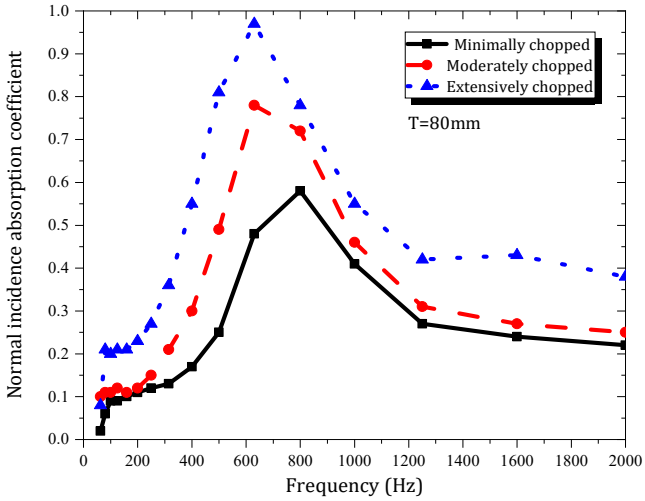
شکل ۷ به بررسی تاثیر میزان خردایش و پیکربندی نمونه‌ها بر رفتار آکوستیکی آن‌ها میپردازد تا پی ببریم کدام حالت بهترین رفتار آکوستیکی را ایجاد می‌کند. به منظور خلاصه‌تر شدن یافته‌ها تنها به بررسی این پارامتر در ضخامت ۸۰ میلیمتر میپردازیم.

نتایج بیانگر آن است که افزایش خردایش از کم به زیاد، به‌ویژه در فرکانس‌های میانی و بالا، موجب بهبود چشمگیر جذب صوت و افزایش NRC می‌شود. در فرکانس‌های پایین (زیر ۵۰۰ هرتز) تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان نمونه‌ها وجود ندارد، اما در فرکانس‌های میانی برتری نمونه با خردایش زیاد مشهود است؛ به‌طور مثال در ۵۰۰ هرتز ضریب جذب این نمونه ۰٫۸۱ در برابر ۰٫۴۹ و ۰٫۲۵ برای حالت‌های متوسط و کم است. این روند در ۶۳۰ و ۸۰۰ هرتز ادامه یافته و مقادیر ۰٫۹۷ و ۰٫۷۸ برای خردایش زیاد ثبت شده است. در فرکانس‌های بالا نیز نمونه با خردایش زیاد بهترین عملکرد را حفظ می‌کند، هرچند در ۲۰۰۰ هرتز اندکی افت مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، NRC از ۰٫۲۵ در خردایش کم به ۰٫۳۴ در متوسط و ۰٫۵۰ در خردایش زیاد افزایش یافته است

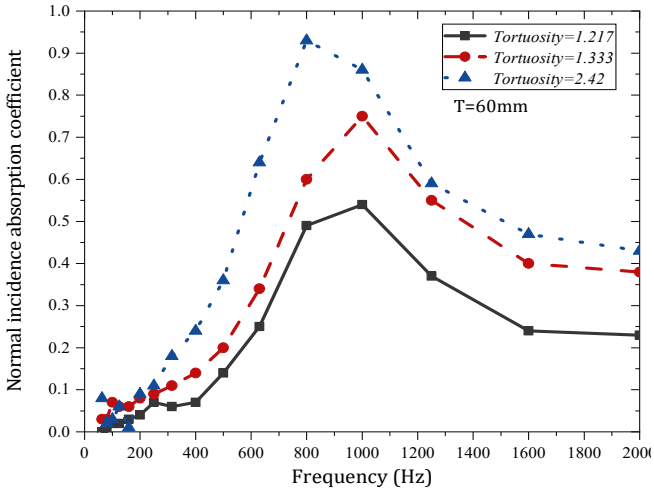
اثر مقاومت جریان هوا و تورتوزیته بر رفتار آکوستیکی نمونه‌ها

در شکل ۸ به بررسی تاثیر تورتوزیته نمونه‌ها بر میزان ضریب جذب صوتی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



شکل ۷: تاثیر میزان خردایش نمونه بر رفتار آکوستیکی آن

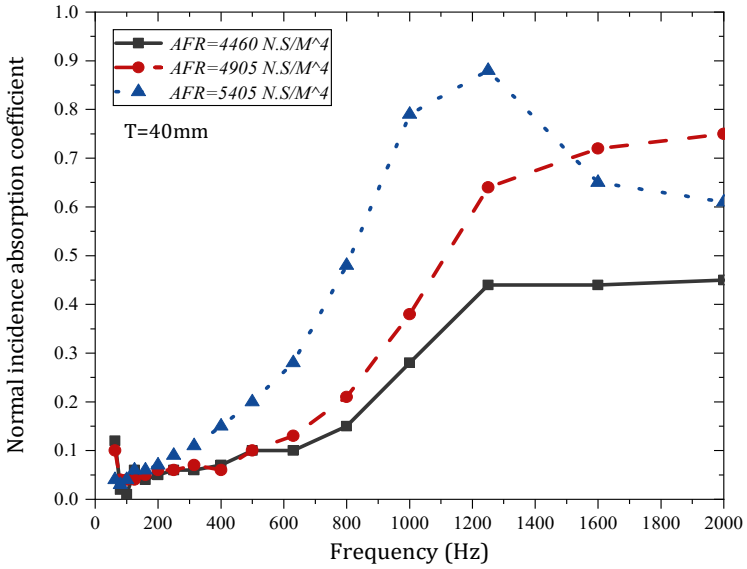


شکل ۸: تاثیر تورتوزیته بر رفتار آکوستیکی نمونه‌ها

شکل ۸ تأثیر تورتوزیته بر ضریب جذب صوتی نمونه‌های با ضخامت ۶۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. افزایش تورتوزیته که مستقیماً با میزان خردایش مرتبط است، موجب بهبود قابل توجه عملکرد آکوستیکی می‌شود. در نمونه (minimally chopped) با تورتوزیته ۱.۲۱۷، قله جذب در ۱۰۰۰ هرتز برابر ۰.۵۴ است، در حالی که در حالت خردایش متوسط (moderate-ly chopped) با تورتوزیته ۱.۳۳۳ این مقدار به ۰.۷۵ می‌رسد. بیشترین بهبود در حالت خردایش زیاد (exten-sively chopped) دیده می‌شود که با تورتوزیته ۲.۴۲، ضریب جذب حداکثری ۰.۹۳ در ۸۰۰ هرتز ثبت شد. شاخص NRC نیز به ترتیب از ۰,۲۴۵ برای خردایش کم به ۰,۳۵۵ و ۰,۴۴ در خردایش متوسط و زیاد افزایش یافته است، که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده تورتوزیته در بهبود رفتار آکوستیکی نمونه‌هاست

در شکل ۹ نیز به بررسی تاثیر مقاومت جریان هوای

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



شکل ۹: تاثیر مقاومت جریان هوا نمونه‌ها بر رفتار آکوستیکی آن‌ها

نمونه‌ها بر رفتار آکوستیکی آن‌ها پرداخته شده است.

نتایج، همانطور که در نمودار و جدول داده‌ها مشهود است، یک همبستگی مستقیم و قوی بین افزایش AFR و بهبود ضریب جذب صوتی را نشان می‌دهد. نمونه با کمترین مقاومت به جریان هوا (AFR=4460) که مربوط به حالت "خردایش کم" است، پایین‌ترین عملکرد جذب را داراست و ضریب جذب آن در فرکانس‌های بالا به حدود ۰.۴۵ محدود می‌شود. در مقابل، با افزایش میزان خردایش و رسیدن AFR به مقدار ۵۴۰۵ (حالت خردایش زیاد)، عملکرد جذب به طور چشمگیری بهبود می‌یابد و یک قله جذب برجسته با ضریب تقریبی ۰.۸۸ در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز ظاهر می‌شود. این بهبود قابل توجه در شاخص کلی کاهش نویز (NRC) نیز منعکس شده است، به طوری که با افزایش AFR از ۴۴۶۰ به ۵۴۰۵، مقدار NRC از ۰.۲۲۲۵ به ۰.۴۲۲۵ افزایش می‌یابد.

ارتباط بین تخلخل و مقاومت جریان هوای نمونه‌های ساخته شده در سه حالت خردایش

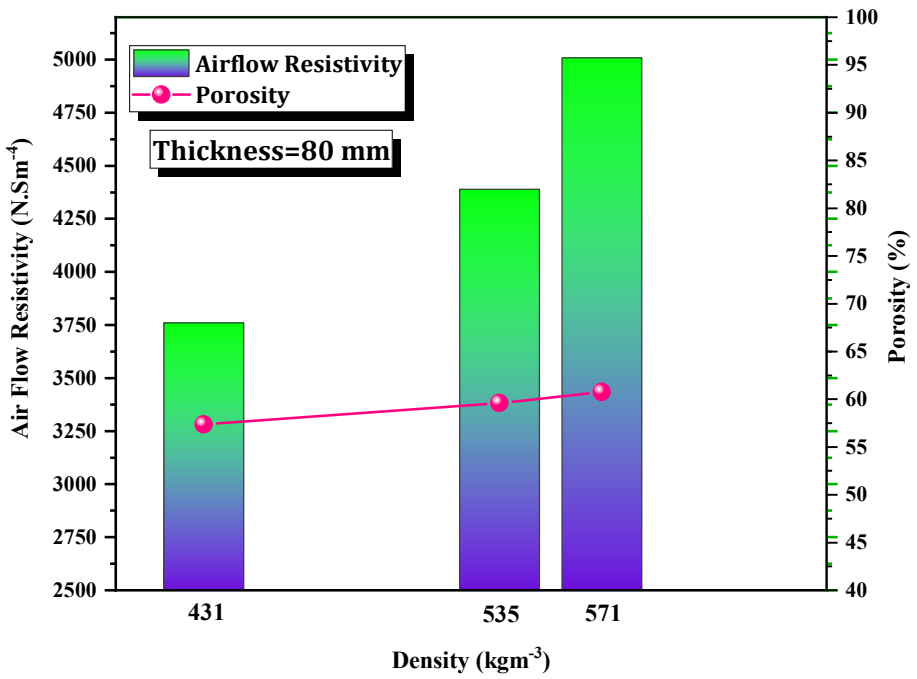
در شکل ۱۰ به بررسی ارتباط بین مقاومت جریان هوا و تخلخل نمونه‌های ساخته شده از پوست سخت گردو در سه حالت خردایش کم، متوسط و زیاد و در ضخامت ثابت ۸۰ میلیمتر پرداخته شده است.

شکل ۱۰ رابطه بین چگالی، مقاومت جریان هوا و تخلخل را برای نمونه‌های با ضخامت ثابت ۸۰ میلیمتر در سه سطح مختلف خردایش نشان می‌دهد. تحلیل نمودار یک همبستگی مثبت و مستقیم بین هر سه پارامتر را آشکار می‌سازد. با افزایش میزان خردایش و در نتیجه افزایش چگالی از ۴۳۱ کیلوگرم بر متر مکعب (خردایش کم) به ۵۷۱ کیلوگرم بر متر مکعب (خردایش زیاد)، مقاومت به جریان هوا به طور چشمگیری از ۳۷۶۰ به ۵۰۰۹ ($N.S/m^4$) افزایش یافته است. به طور همزمان و جالب توجه، تخلخل کل نمونه‌ها نیز یک روند صعودی ملایم اما پیوسته را طی کرده و از ۵۷.۳۵٪ به ۶۰.۷۵٪ رسیده است. این یافته نشان می‌دهد که فرآیند خردایش شدیدتر، به طور همزمان منجر به افزایش چگالی، مقاومت به جریان هوا و تخلخل کل در ساختار کامپوزیت نهایی شده است.

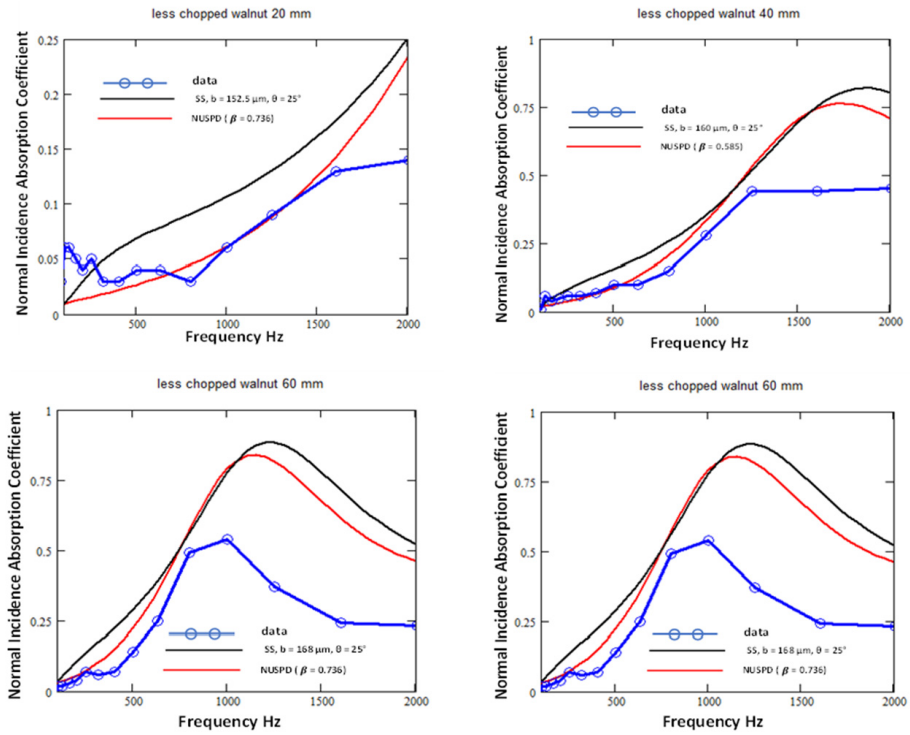
مقایسه نتایج اندازه‌گیری مستقیم و مدلسازی ریاضی

شکل ۱۱ به بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده در

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



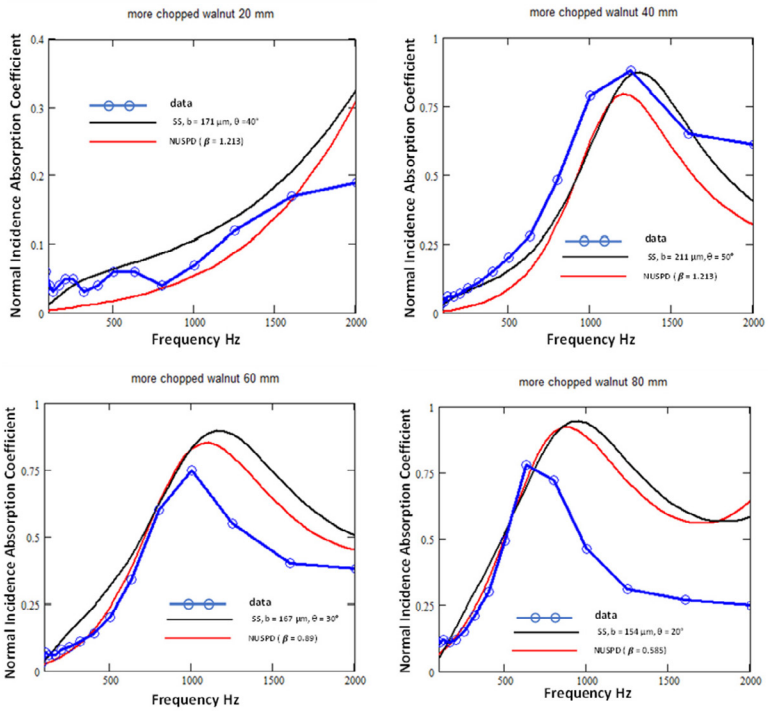
شکل ۱۰: ارتباط بین تخلخل و مقاومت جریان هوا نمونه‌ها در سه حالت خردایش کم (چگالی=۴۳۱)، متوسط (چگالی ۵۳۵) و زیاد (چگالی ۵۷۱)



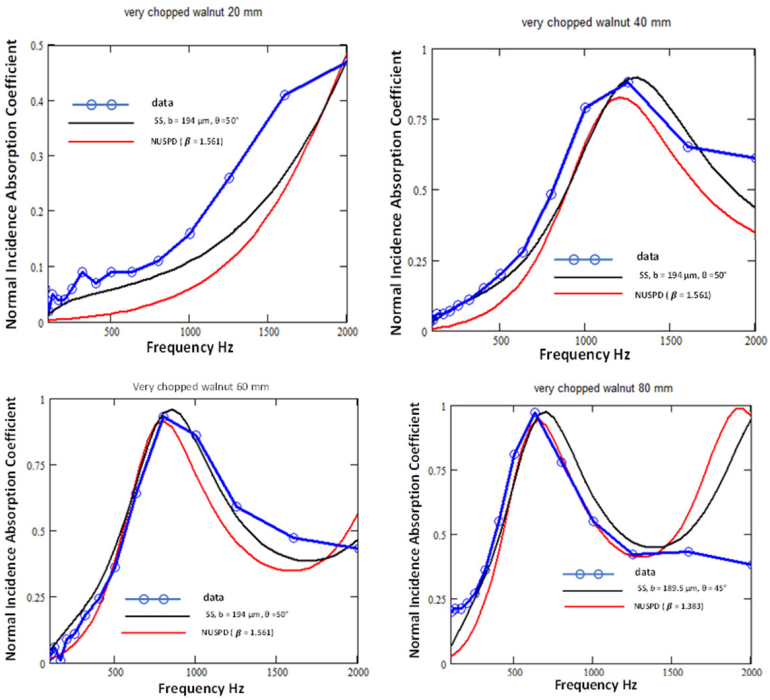
الف: خردایش کم

شکل ۱۱: مقایسه نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مستقیم و مدلسازی ریاضی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]



ب: خردایش متوسط



ج: خردایش زیاد

ادامه شکل ۱۱: مقایسه نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مستقیم و مدلسازی ریاضی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

دو حالت اندازه‌گیری مستقیم و مدلسازی ریاضی پرداخته است.

شکل ۱۱، نتایج ضریب جذب صوتی تجربی (data) را با پیش‌بینی‌های مدل‌های SS و NUSPD مقایسه می‌کند. تحلیل نمودارها یک روند واضح را نشان می‌دهد: دقت و انطباق هر دو مدل با افزایش میزان خردایش نمونه‌ها به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. برای نمونه‌های با خردایش کم (شکل ۱۱-الف)، به ویژه در ضخامت‌های پایین، مغایرت قابل توجهی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی‌ها مشاهده می‌شود و مدل‌ها در تخمین دقیق قله جذب ناموفق هستند. با افزایش میزان خردایش به حالت متوسط (شکل ۱۱-ب)، انطباق مدل‌ها بهبود یافته و این روند در نمونه‌های با خردایش زیاد (شکل ۱۱-ج) به اوج خود می‌رسد. در این حالت، برای ضخامت‌های ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلیمتر، هر دو مدل (به ویژه مدل NUSPD) هم‌پوشانی بسیار خوبی با داده‌های تجربی نشان داده و رفتار آکوستیکی، شامل محل و مقدار پیک جذب را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کنند.

بحث

در این مطالعه نمونه‌های ساخته شده از پوست سخت گردو در ۴ ضخامت مختلف ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلیمتر و در سه حالت پیکربندی خردایش کم، متوسط و زیاد از لحاظ آکوستیکی مورد ارزیابی دقیق قرار گرفتند. بررسی مورفولوژیکی نمونه‌های ساخته شده در سه سطح مختلف خردایش با استفاده از تکنیک FESEM انجام شد. تحلیل مورفولوژی سطح نمونه‌ها، یک تفاوت بنیادی در مکانیزم جذب صوتی را بر اساس میزان خردایش آشکار می‌سازد. در نمونه‌های با خردایش کم و متوسط، که دارای سطوح متراکم و غیرمتخلخل هستند، مکانیزم اصلی جذب به تخلخل‌های فضای بین ذرات (macro-porosity) محدود می‌شود. این ساختار ساده، منجر به مسیرهای صوتی کوتاه‌تر و در نتیجه مقاومت به جریان هوا (AFR) و تورتوزیته پایین‌تر می‌گردد که عملکرد آکوستیکی ضعیفی را به دنبال دارد. در مقابل، فرآیند خردایش شدید با شکستن دیواره‌های سلولی، ساختار متخلخل ذاتی (micro-porosity) پوست گردو را فعال می‌سازد. این دگرگونی، یک شبکه پیچیده و در هم تنیده از حفرات داخلی ایجاد می‌کند که به طور همزمان تورتوزیته و AFR را به شدت افزایش می‌دهد. مسیرهای طولانی‌تر و پرپیچ‌وخم‌تر، اصطکاک بین امواج صوتی و دیواره حفره‌ها را به حداکثر رسانده و منجر به استهلاک مؤثرتر انرژی صوتی می‌شود (۳۱). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد صوتی برتر نمونه‌های با خردایش زیاد، نه تنها به دلیل اندازه کوچکتر ذرات، بلکه عمدتاً به دلیل فعال‌سازی و در دسترس قرار گرفتن تخلخل‌های درونی ماده است که این موضوع به خوبی در تصویر FESEM مشهود است

همانطور که گفته شد نمونه‌ها در ضخامت‌های مختلفی ساخته شدند تا به بررسی تاثیر ضخامت نمونه‌ها بر رفتار آکوستیکی آن‌ها پرداخته شود. ضخامت نمونه به عنوان یک پارامتر کلیدی، تاثیر قابل توجهی بر مهندسی خواص آکوستیکی کامپوزیت‌های پوست گردو دارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزایش ضخامت نه تنها منجر به بهبود شاخص کلی جذب صوت (NRC) می‌شود، بلکه پیک جذب را به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا می‌کند. به عنوان نمونه، در کامپوزیت‌های با خردایش زیاد، افزایش ضخامت از ۲۰ به ۸۰ میلیمتر، پیک جذب را از فرکانس ۲۰۰۰ هرتز به ۶۳۰ هرتز منتقل کرد. این رفتار کاملاً با تئوری کلاسیک یک‌چهارم طول موج ($\lambda/4$) برای جاذب‌های متخلخل مطابقت دارد که بر اساس آن، مواد ضخیم‌تر قادر به جذب مؤثرتر طول موج‌های بلندتر هستند (۳۲). این نتایج با یافته‌های پژوهشگران دیگر نیز همخوانی دارد. به عنوان مثال، مالاواد و همکارانش در بررسی خواص آکوستیکی پوسته بادام زمینی، همبستگی مثبتی بین افزایش ضخامت (از ۱۰ به ۴۰ میلیمتر) و بهبود ضریب جذب گزارش کردند (۳۳). همچنین، بورل و همکارانش در مطالعه بر روی هسته میوه‌ها، به ضرایب جذب بالایی بین ۰.۷ تا ۰.۹۵ در محدوده فرکانسی ۵۵۰ تا ۱۵۰۰ هرتز دست یافتند که با نتایج این پژوهش برای نمونه‌های ضخیم‌تر همپوشانی دارد (۱۶). نکته قابل

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

تامل‌تر، شکل تیز قله‌های جذب در نمونه‌های ضخیم‌تر است. این پدیده نشان می‌دهد که مکانیزم جذب صرفاً به اتلاف انرژی از طریق اصطکاک در یک جاذب متخلخل ساده محدود نمی‌شود، بلکه ساختار داخلی کامپوزیت، رفتاری شبیه به رزوناتور از خود بروز می‌دهد. این پدیده رزونانس ساختاری، که توسط بورل و همکارانش نیز در مورد هسته میوه‌ها مشاهده شده، مکانیزم جذب را تقویت می‌کند (۱۶). در نتیجه، می‌توان گفت که افزایش ضخامت نه تنها به دلیل افزایش مسافت طی شده توسط موج صوت، بلکه با تنظیم فرکانس رزونانس سیستم، به طور موثری عملکرد جذب را در فرکانس‌های پایین‌تر، که کنترل آن‌ها معمولاً دشوارتر است، بهبود می‌بخشد. این رفتار آکوستیکی در مطالعه شیخ‌مظفری و همکاران نیز که بروی هسته‌های میوه کار میکرد دیده شد (۳۲).

مقایسه عملکرد نمونه بهینه این پژوهش (خردایش زیاد، ضخامت ۶۰ میلی‌متر) با جاذب‌های مصنوعی متداول نشان می‌دهد که پوسته سخت گردو قابلیت رقابت بالایی دارد. در حالی که مواد متداولی مانند پشم سنگ و فوم پلی‌یورتان با ضخامت مشابه معمولاً ضرایب جذب حدود ۰٫۷ و ۰٫۶ را در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز نشان می‌دهند (۳۴)، در این مطالعه نمونه‌های گردو ضرایب جذب ۰٫۹۳ در ۸۰۰ هرتز و ۰٫۸۶ در ۱۰۰۰ هرتز را ثبت کردند. این نتایج بیانگر عملکرد آکوستیکی بسیار مطلوب و کاربردپذیری بالای این ماده در محدوده فرکانس‌های گفتاری و فضاهای داخلی است.

تاثیر چگالی بالک بر عملکرد آکوستیکی، یکی دیگر از جنبه‌های کلیدی این پژوهش است. یافته‌ها به طور قاطع یک همبستگی مثبت و مستقیم را نشان دادند؛ به عنوان مثال، در نمونه‌های با ضخامت ۸۰ میلیمتر، افزایش چگالی منجر به دو برابر شدن مقدار NRC (از ۰.۲۵ به ۰.۵۰۲۵) گردید. این بهبود چشمگیر را نمی‌توان صرفاً به افزایش مقدار ماده در واحد حجم نسبت داد. در واقع، چگالی در این کامپوزیت‌ها به عنوان یک شاخص کلیدی برای تغییر در دو پارامتر بنیادی آکوستیکی عمل می‌کند: مقاومت به جریان هوا (AFR) و تورتوزیته. افزایش چگالی، که در این مطالعه از طریق خردایش بیشتر ذرات حاصل شد، ساختاری متراکم‌تر با حفرات ریزتر و مسیرهای عبور هوای پیچیده‌تر ایجاد می‌کند. این امر به طور همزمان منجر به افزایش AFR (تشدید اتلاف انرژی از طریق اصطکاک) و تورتوزیته (افزایش طول مسیر مؤثر موج صوت) می‌شود. این دو مکانیزم در کنار هم، استهلاک انرژی صوتی را به شدت تقویت می‌کنند. این نتایج که بر همبستگی مثبت بین چگالی، AFR، تورتوزیته و ضریب جذب تاکید دارند، با تحقیقات پیشین کاملاً همسو است (۳۵, ۳۶). با این حال، این روند صعودی نامحدود نیست. افزایش بیش از حد چگالی می‌تواند با کاهش شدید تخلخل باز (open porosity)، ماده را به یک سطح نفوذناپذیر و بازتابنده تبدیل کند (۳۷). اگر امواج صوتی نتوانند به طور مؤثر به ساختار داخلی نفوذ کنند، به جای جذب شدن، از سطح ماده منعکس شده و کارایی جاذب به شدت کاهش می‌یابد (۳۸). بنابراین، دستیابی به عملکرد آکوستیکی بهینه، مستلزم ایجاد یک توازن دقیق است: چگالی باید به اندازه‌ای بالا باشد که مقاومت و تورتوزیته را به حداکثر برساند، اما همزمان تخلخل کافی برای نفوذ امواج صوتی را حفظ کند.

یافته‌ها نشان داد که افزایش سطح خردایش از حالت کم به زیاد، یک جهش چشمگیر در ضریب جذب صوتی، به ویژه در محدوده فرکانس‌های میانی (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز)، ایجاد کرد و مقدار NRC را در نمونه ۸۰ میلیمتری از ۰.۲۵ به ۰.۵۰۲۵ رساند. این بهبود قابل توجه را می‌توان به دو مکانیزم فیزیکی اصلی که در اثر فرآیند خردایش شدید رخ می‌دهند، نسبت داد. اولاً، در مقیاس تک ذره، فرآیند خردایش با شکستن ساختار سلولی ماده، سطح ویژه (Specific Surface Area) و تخلخل ذاتی (inherent micro-porosity) ذرات را به شدت افزایش می‌دهد. این امر سطح تماس بین امواج صوتی و ماده جاذب را گسترش داده و تعاملات اصطکاکی را تقویت می‌کند. ثانیاً، در مقیاس ماکرو، این فرآیند مورفولوژی میکروسکوپی کامپوزیت را دگرگون می‌سازد. تجمع ذرات ریزتر با ساختار نامنظم، شبکه‌ای

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

پیچیده از حفرات و کانال‌های در هم تنیده ایجاد می‌کند که به طور همزمان منجر به افزایش دو پارامتر کلیدی آکوستیکی می‌شود: تورتوزیته (tortuosity) و مقاومت به جریان هوا (AFR). همانطور که پیش‌تر بحث شد، افزایش این دو پارامتر، اتلاف انرژی ویسکوز (viscous losses) را به حداکثر می‌رساند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد صوتی برتر نمونه‌های با خردایش زیاد، حاصل یک بهینه‌سازی ساختاری دوگانه است: افزایش سطح تماس در سطح میکرو و بهبود پیچیدگی مسیر و مقاومت در سطح ماکرو. این بهینه‌سازی، ماده را به یک جاذب صوتی بسیار کارآمد تبدیل می‌کند (۳۱).

تحلیل عمیق‌تر نتایج در ارتباط با ناثیر تورتوزیته و مقاومت جریان هوا نشان می‌دهد که عملکرد آکوستیکی برتر نمونه‌های با خردایش زیاد، اساساً توسط دو پارامتر فیزیکی کلیدی تبیین می‌شود: تورتوزیته و مقاومت به جریان هوا (AFR). تورتوزیته ،فراتر از ایجاد یک مسیر طولانی‌تر برای امواج صوتی، نقشی تعیین‌کننده در مکان‌یابی قله‌های رزونانس در فرکانس متناظر با یک‌چهارم طول موج ایفا می‌کند. همانطور که نتایج نمونه ۶۰ میلیمتری نشان داد، افزایش تورتوزیته از ۱.۲۱۷ به ۲.۴۲، نه تنها مقدار جذب را به شدت افزایش داد، بلکه موقعیت قله جذب را از ۱۰۰۰ هرتز به فرکانس پایین‌تر ۸۰۰ هرتز منتقل کرد. این یافته بسیار حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که مهندسی ساختار داخلی ماده برای افزایش تورتوزیته، یک راهکار استراتژیک برای بهبود جذب در فرکانس‌های پایین و میانی است؛ محدوده‌ای که جاذب‌های متخلخل به طور سنتی در آن ضعف دارند (۲۴, ۲۵).

از سوی دیگر، مقاومت به جریان هوا (AFR) مستقیماً با مقدار ماکزیمم جذب در آن قله رزونانس مرتبط است. یکی از دلایل اصلی که کارایی مواد طبیعی را در مقایسه با جاذب‌های مصنوعی مرسوم مانند پشم سنگ محدود می‌کند، اغلب پایین بودن مقدار AFR در آن‌هاست. این پژوهش نشان می‌دهد که از طریق فرآیندهای مکانیکی مانند خردایش شدید، می‌توان AFR پوست گردو را به میزان قابل توجهی افزایش داد و عملکرد آن را به جاذب‌های کارآمد نزدیک‌تر کرد. افزایش AFR، با تشدید مقاومت در برابر نفوذ هوا، اتلاف انرژی از طریق اصطکاک را به حداکثر می‌رساند و بخش بیشتری از انرژی صوتی را به گرما تبدیل می‌کند (۳۹). بنابراین، فرآیند خردایش در این مطالعه به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی دوگانه عمل کرده است: از یک سو با افزایش تورتوزیته، فرکانس کارایی بهینه را به سمت محدوده مطلوب‌تری جابجا کرده و از سوی دیگر با افزایش مقاومت به جریان هوا، مقدار جذب در آن فرکانس بهینه را به حداکثر رسانده است.

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه، ارتباط بین مقاومت جریان هوا و تخلخل نمونه‌ها بود. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، رابطه میان چگالی، تخلخل و AFR نشان می‌دهد که فرآیند خردایش نقش کلیدی در مکانیزم جذب دارد. در نگاه اول، افزایش همزمان چگالی و تخلخل متناقض به نظر می‌رسد، اما این پدیده ناشی از تفاوت بین تخلخل بین‌ذره‌ای و درون‌ذره‌ای است. خردایش شدید با شکستن دیواره‌های سلولی، حفرات میکروسکوپی جدیدی ایجاد کرده و در حالی‌که موجب افزایش چگالی ظاهری می‌شود، تخلخل کلی سیستم را نیز بالا می‌برد. این تغییر ساختاری دلیل اصلی جهش در مقاومت جریان هواست، زیرا جایگزینی حفرات بزرگ با شبکه‌ای متراکم از کانال‌های ریز، مسیری پرپیچ‌وخم‌تر برای امواج صوتی ایجاد می‌کند. ترکیب تخلخل بالا و AFR زیاد شرایط ایده‌آل برای جذب مؤثر صدا فراهم کرده و نتایج آکوستیکی نیز این موضوع را تأیید می‌کنند؛ نمونه با خردایش زیاد با بیشترین تخلخل و AFR، بالاترین ضریب جذب (۰,۹۷ در ۶۳۰ هرتز) و بیشترین NRC (۰.۵۰۲۵) را ثبت کرده است.

نتایج مدل‌سازی ریاضی با مدل‌های SS و NUSPD نشان داد که دقت پیش‌بینی به شدت به مورفولوژی نمونه وابسته است. این مدل‌ها بر پایه فرض وجود یک محیط متخلخل همگن با منافذ پیچیده بنا شده‌اند. در نمونه‌های با خردایش کم که عمدتاً دارای تخلخل‌های درشت و نامنظم بین‌ذره‌ای هستند، این فرض‌ها برقرار نبوده و به

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

همین دلیل مدل‌ها عملکرد ضعیفی در پیش‌بینی رفتار آکوستیکی دارند. در مقابل، خردایش شدید با فعال‌سازی تخلخل‌های ریز درون‌ذره‌ای و ایجاد شبکه‌ای پیچیده از کانال‌های میکروسکوپی، ساختار ماده را به شرایط ایده‌آل مدل‌ها نزدیک‌تر می‌کند. در این حالت، پارامترهایی مانند تورتوزیته و مقاومت جریان هوا به‌درستی رفتار جذب را توصیف کرده و مدل‌ها دقت بالاتری در پیش‌بینی نشان می‌دهند. موفقیت بیشتر مدل NUSPD در نمونه‌های با خردایش زیاد نیز بیانگر انطباق بهتر مفروضات آن با واقعیت فیزیکی است. این نتایج علاوه بر تأیید یافته‌های تجربی، نشان می‌دهد که با فرآوری مناسب مواد طبیعی می‌توان رفتار آکوستیکی آن‌ها را به‌طور قابل اعتماد با مدل‌های تئوریک شبیه‌سازی و مهندسی کرد.

نتیجه گیری

در این پژوهش خواص آکوستیکی پوسته سخت گردو در شرایط مختلف خردایش، ضخامت و چگالی بالک ارزیابی شد. نتایج نشان داد که فرآوری مکانیکی مناسب باعث تغییر مورفولوژی، افزایش مقاومت به جریان هوا و تورتوزیته، و در نتیجه بهبود چشمگیر عملکرد جذب می‌شود. افزایش ضخامت و میزان خردایش هر دو تأثیر مثبتی بر ضریب جذب و شاخص NRC داشتند و به‌ویژه نمونه‌های با خردایش زیاد بالاترین کارایی را در محدوده فرکانس‌های گفتاری نشان دادند. علاوه بر این، مدل‌های ریاضی SS و NUSPD بیشترین دقت را در پیش‌بینی رفتار نمونه‌های با خردایش زیاد داشتند، که انطباق ساختار آن‌ها با فرضیات یک جاذب متخلخل ایده‌آل را تأیید می‌کند. با وجود عملکرد مطلوب نمونه‌ها در بازه فرکانس‌های میانی و بالا، جذب در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز همچنان محدود باقی مانده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، استفاده از ساختارهای چندلایه، ترکیب پوسته گردو با رزوناتورهای هلم‌هولتز یا بهینه‌سازی هندسه منافذ برای بهبود جذب در ناحیه فرکانس‌های پایین مورد بررسی قرار گیرد. در مجموع، یافته‌های این مطالعه پتانسیل بالای پوسته سخت گردو را به‌عنوان یک جاذب صوتی کارآمد و پایدار نشان داده و مبنایی برای توسعه و بهینه‌سازی مواد زیست‌پایه در کاربردهای آکوستیکی فراهم می‌کند.

REFERENCES

1. sheikhmozafari M J, Ahmadi O. Reliability and Validity Assessment of the Persian Version of the Noise Exposure Questionnaire (NEQ): An NIHL Predictor Tool. J Occup Health Epidemiol 2022; 11 (3) :209-222.
2. Sheikhmozafari M J, Mohammad Alizadeh P, Ahmadi O, Mazloomi B. Assessment of Noise Effect on Employee Comfort in an Open-Plan Office: Validation of an Assessment Questionnaire. J Occup Health Epidemiol 2021; 10 (3) :193-203.
3. Huang S, Li Y, Zhu J, Tsai DP. Sound-absorbing materials. Phys. Rev. Appl. 2023;20(1):010501.
4. Arenas JP, del Rey R, Alba J, Oltra R. Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. Sustainability. 2020;12(14):5533.
5. Haghighat M, Samaei SE, Amininasab S, Faridan M, Mehrzad S, Sheikhmozafari MJ, et al. 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.
6. Samaei SE, Amininasab S, Salimi F, Sheikhmozafari MJ, Nadianmehr R, kazemi Tabrizi A, et al. Investigation of the effect of nanoparticles on the acoustic and flammability behavior of natural kenaf fibers. IOH. 2022;19(1):167-82.
7. Valipour F, Taban E, Samaei SE, Pourtaghi G, Konjin ZN. Improvement of natural fiber's properties and evaluation of its applicability as eco-friendly materials in noise pollution control. J. environ. health sci. eng. 2022;20(2):647-56.
8. Arenas JP, Asdrubali F. Eco-materials with noise reduction properties. Handbook of ecomaterials: Springer; 2019. p. 3031-56.
9. Taban E, Khavanin A, Ohadi A. Experimental study and modelling of date palm fibre composite acoustic behaviour using differential evolution algorithm. IOH.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

2019;16(2):94-108.
10. Taban E, Amininasab S, Soltani P, Berardi U, Abdi DD, Samaei SE. Use of date palm waste fibers as sound absorption material. J. Build. Eng. 2021;41:102752.
11. Berardi U, Iannace G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. Build. Environ. 2015;94:840-52.
12. Gumanová V, Sobotová L, Dzuro T, Badida M, Moravec M. Experimental survey of the sound absorption performance of natural fibres in comparison with conventional insulating materials. Sustainability. 2022;14(7):4258.
13. Jang E-S. Sound Absorbing Properties of Selected Green Material—A Review. Forests. 2023;14(7):1366.
14. Halashi K, Taban E, Soltani P, Amininasab S, Samaei E, Moghaddam DN, et al. Acoustic and thermal performance of luffa fiber panels for sustainable building applications. Build. Environ. 2023:111051.
15. Roquia A, khalfan hamed Alhashmi A, hamed Abdullah alhasmi B. Synthesis and characterisation of carbon nanotubes from waste of Juglans regia (walnut) shells. Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct. 2021;29(11):860-7.
16. Borrell JG, Sanchis EJ, Alcaraz JS, Belda IM. Sustainable sound absorbers from fruit stones waste. Appl. Acoust. 2020;161:107174.
17. Hemmati N, Sheikhmozafari M, Taban E, Tajik L, Faridan M. Pistachio shell waste as a sustainable sound absorber: an experimental and empirical investigation. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2024:1-14.
18. Beheshti MH, Khavanin A, Safari Varyani A, Yahya MNB, Alami A, Khajenasiri F, et al. Improving the sound absorption of natural waste material-based sound absorbers using micro-perforated plates. J. Nat. Fibers. 2022;19(13):5199-210.
19. Mohammad Alizadeh P, Ahmadi O, Shekoohiyan S, Sheikhmozafari M. Comprehensive analysis of acoustic properties of cellulose nano fibers absorbers: experimental and FEM-based mathematical modeling evaluation. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2025;22(2):953-68.
20. Ikpekha OW, Simms M, editors. Effect of Acoustic Absorber Type and Size on Sound Absorption of Porous Materials in a Full-Scale Reverberation Chamber. Acoustics; 2025: MDPI.
21. Amran M, Fediuk R, Murali G, Vatin N, Al-Fakih A. Sound-absorbing acoustic concretes: A review. Sustainability. 2021;13(19):10712.
22. Lashgari M, Taban E, SheikhMozafari MJ, Soltani P, Attenborough K, Khavanin A. Wood chip sound absorbers: Measurements and models. Appl. Acoust.. 2024;220:109963.
23. Ružickij R, Romagnoli F, Grubliauskas R. Waste tyre textile fibre composite material: acoustic performance and life cycle assessment. Sustainability. 2024;16(15):6281.
24. Prabhune S, Munde Y, Shinde A, Siva I. Appraising the acoustic performance and related factors of natural fiber: A review. J. Nat. Fibers. 2022;19(16):13475-94.
25. Nordin M, Wan L, Zainulabidin M, Kassim A, Aripin A. Research finding in natural fibers sound absorbing material. ARPN J. Eng. Appl. Sci. 2016;11(14):79-85.
26. Stinson MR. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape. J. Acoust. Soc. Am. 1991;89(2):550-8.
27. Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 1956;28(2):179-91.
28. Wilson LH, Sibbitt WL, Jakob M. Flow of gases in porous media. J. Appl. Phys. 1951;22(8):1027-30.
29. Saati F, Hoppe K-A, Marburg S, Horoshenkov KV. The accuracy of some models to predict the acoustical properties of granular media. Appl. Acoust. 2022;185:108358.
30. Horoshenkov KV, Groby J-P, Dazel O. Asymptotic limits of some models for sound propagation in porous media and the assignment of the pore characteristic lengths. J. Acoust. Soc. Am. 2016;139(5):2463-74.
31. Hemmati N, Sheikhmozafari M, Taban E, Tajik L, Faridan M. Pistachio shell waste as a sustainable sound absorber: an experimental and empirical investigation. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2024;21(5):4867-80.
32. SheikhMozafari MJ, Taban E, Soltani P, Faridan M, Khavanin A. Sound absorption and thermal insulation performance of sustainable fruit stone panels. Appl. Acoust. 2024;217:109836.
33. Malawade UA, Jadhav MG. Investigation of peanut shell as alternative sound absorbing material. Am. J. Mech. Mater. Eng. 2019;3(3):53-60.
34. Khosro SK, Soltani P, SheikhMozafari MJ, Piégay C, Amininasab S, Faridan M, et al. Acoustical, thermal, and

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]

mechanical performance of Typha Latifolia fiber panels: Experimental evaluation and modeling for sustainable building applications. J. Build. Eng. 2025;99:111579.

35. Taban E, Soltani P, Berardi U, Putra A, Mousavi SM, Faridan M, et al. Measurement, modeling, and optimization of sound absorption performance of Kenaf fibers for building applications. Build. Environ. 2020;180:107087.
36. Mehrzad S, Taban E, Soltani P, 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.
37. Nandanwar A, Kiran M, Varadarajulu KC. Influence of density on sound absorption coefficient of fibre board. OJA. 2017;7(01):1.
38. Putra A, Prasetiyo I, Selamat Z. Green acoustic absorber from pineapple leaf fibers. Pineapple Leaf Fibers: Processing, Properties and Applications. 2020:143-65.
39. Seddeq HS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. Aust. J. Basic Appl. Sci. 2009;3(4):4610-7.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-03-15]