



## ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Investigating the Acoustic Behavior of Polyurethane Foam Reinforced with Clay Nanoparticles

Gholamreza Moradi<sup>1\*</sup>, Sana Mohammadi<sup>2</sup>, Abdolrasoul Safaiyan<sup>2</sup>, Saeid Ahmadi<sup>3</sup>, Mehrnia Lak<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Biostatistics and Epidemiology, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Received: 30 - 5 - 2023

Accepted: 16 - 3 - 2024

### ABSTRACT

**Introduction:** Disturbing noise can cause physical and mental illnesses among workers; for this reason, it is necessary to restrain it, especially in workplaces. Using sound-absorbing materials with suitable acoustic properties has been a growing trend in mitigating noise. This study aimed to improve the acoustic properties of polyurethane foam (PUF) as a sound absorber.

**Material and Methods:** In the present study, PUF was synthesized with different percentages of clay nanoparticles (0-1.2 wt.%), and then the Sound Absorption Coefficient (SAC) of the synthesized PUF was measured by the acoustic impedance tube in the frequency range of 63 to 6400 Hz according to the ISIRI 9803 standard. The morphology of the foam was also investigated by Scanning Electron Microscope (SEM).

**Results:** The results showed that the addition of clay nanoparticles to PUF improved the sound absorption behavior of the samples, and the best sound absorption behavior was for PUF with 1.2% weight of nanoparticles at low frequencies (500-2600 Hz). This increase in the absorption coefficient can be due to the increase in the number and smaller size of the pores with the increase in the amount of nanoparticles in PUF.

**Conclusion:** This study illustrates that the incorporation of clay nanoparticles into PUF at varying percentages results in an enhanced absorption coefficient. The presence of clay nanoparticles leads to a reduction in cell size and an increase in the number of pores, consequently enhancing surface friction. The absorption coefficient was observed to increase with the growing concentration of clay nanoparticles in PUF.

**Keywords:** Polyurethane foam, Clay nanoparticles, Sound absorption coefficient

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Moradi G, Mohammadi S, Safaiyan A, Ahmadi S, Lak M. Investigating the Acoustic Behavior of Polyurethane Foam Reinforced with Clay Nanoparticles. *J Health Saf Work.* 2024; 14(1): 40-53.

### INTRODUCTION

Noise pollution is one of the three types of pollution in today's society. therefore, many scientists are trying to control this type of pollution. One of the different types of noise pollution control

methods is the use of sound-absorbing materials. Porous materials are the main sound absorbers, which can be divided into three categories based on their structure: granular, fibrous, and cellular. Among the cellular sound-absorbing materials, polyurethane foams (PUFs) have received more

\* Corresponding Author Email: [moradig@tbzmed.ac.ir](mailto:moradig@tbzmed.ac.ir)

attention due to having a wide range of properties and the ability to bond with various materials. In recent years, PUF has been widely used in the industry due to their good mechanical, electrical, thermal, and acoustic properties. In general, the sound absorption capacity of polyurethane (PU) absorbers is strong in the high-frequency range. However, due to their limited sound energy capacity, they exhibit weaker performance in the low-frequency range. Additional constraints include diminished thermal stability and the potential for ignition.

The addition of clay nanoparticles to PUF results in an increase in the number of pores and improved morphology, consequently enhancing sound absorption. In addition, improving acoustic properties can enhance thermal properties and ignition resistance. Among the polymer materials,

PUF was chosen as a sound absorber for this study due to its low density, easy production, low production cost, and high porosity. This study aimed to improve the acoustic properties of PUF as a sound absorber through the addition of clay nanoparticles.

**MATERIALS AND METHOD**

To fabricate the PU composite foams, the required materials consisted of two components as listed as follows:

(i) component-A (KONIX FA-717 as polyol (average molecular weight: 3500, Hydroxyl number: 48 mg KOH/g), Niax silicone L-618 as a surfactant (surface active agent, Sigma-Aldrich Company, Germany), DABCO 33-LV Catalyst (Simultaneous effectiveness on foaming and gelling reactions, Hydroxyl number: 560 mg KOH/g, Air

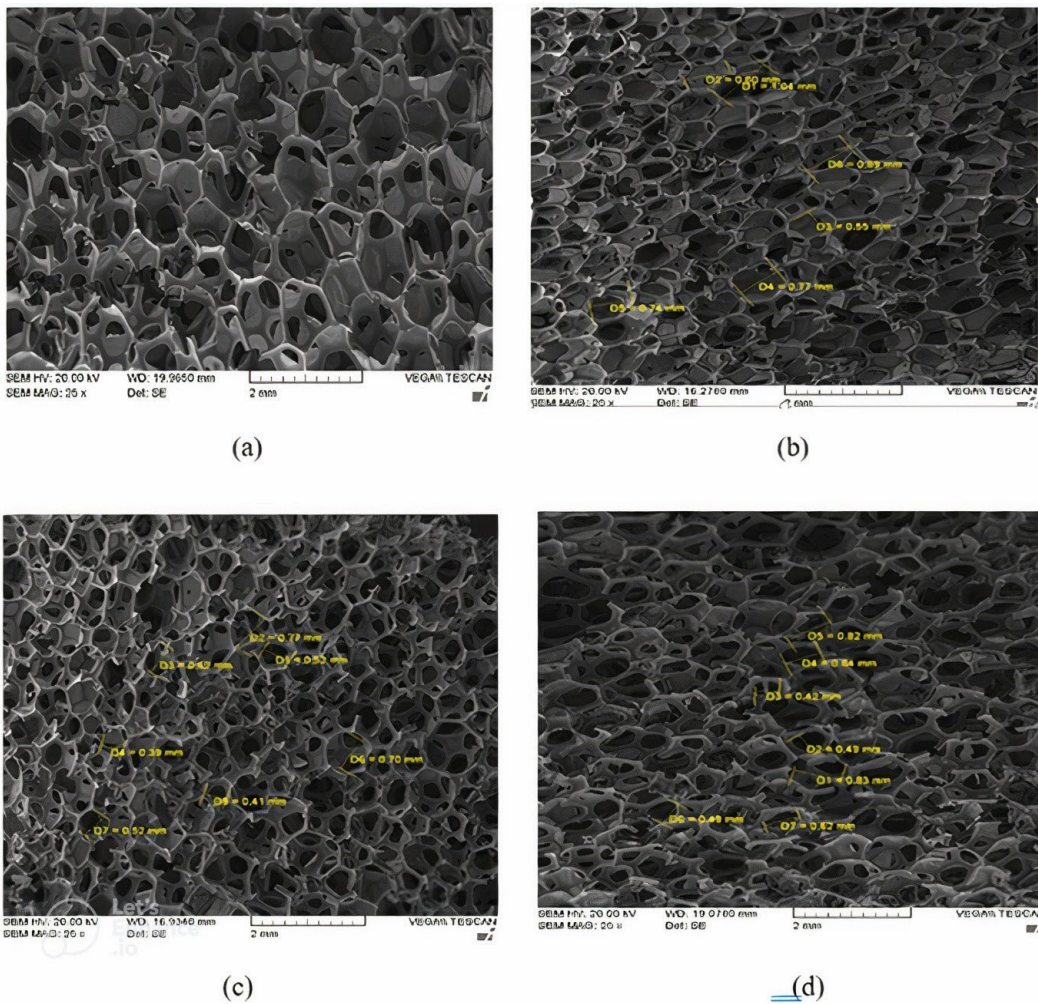


Fig. 1: Scanning Electron Microscope image of the surface of PUF made: a) Pure b) 0.3 wt.% c) 0.6 wt.% d) 1.2 wt.%

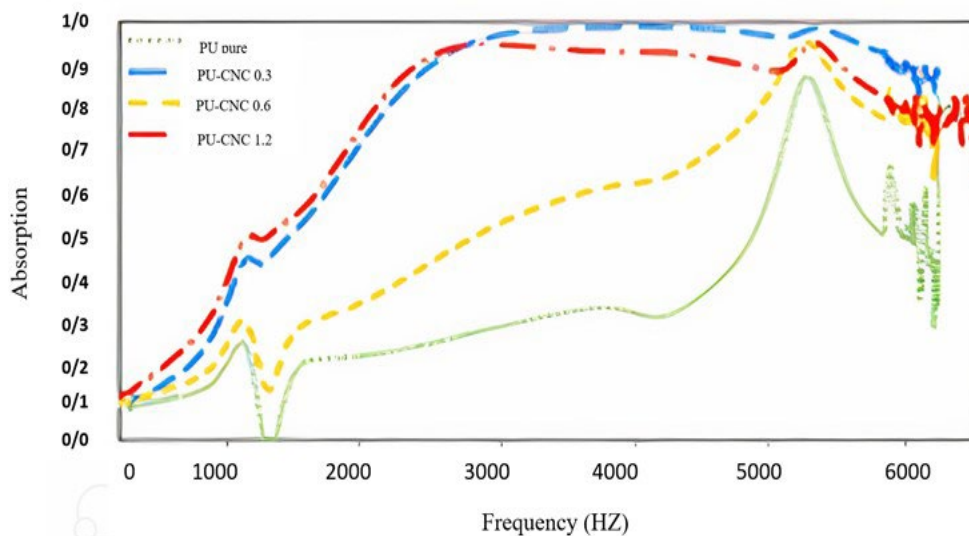


Fig. 2: Absorption coefficient curve in the frequency range of 500-6400 Hz for PUF reinforced with Clay nanoparticles (0 to 1.2 wt.%). The vertical graph shows the Sound Absorption Coefficient (0 to 1).

Product Company), DABCO T-9 catalyst (stannous octoate) (Polymerization catalyst or gelling reaction catalyst, Hydroxyl number: 687 mg KOH/g, Essen Company, Germany), Water as blowing agent and (ii); component-B as Toluene Di isocyanate 80/20 (TDI 80/20) (Merk Company, Germany, Purity of  $\geq 99.5\%$ ). CLOISITE 30 B Nano clay as filler was provided from Kava Sanat Payor in Iran.

First, a specified amount of component-A was transferred into a container. These materials were mixed with a mechanical stirrer at 2000 rpm for 2 minutes. Then component-B containing the TDI, was quickly fed into the ingredients of component-A; mixing was carried out at 2000 rpm for 8s. Then, the full mixture was poured into a Teflon mold (15\*15\*15) and the port of that closed. To prepare PUF with different percentages of Nano clay particles, the first 0.3, 0.6, and 1.2 g of these nanoparticles were weighed by accurate scales and each of them was added separately to component A. Then, these materials were placed on an ultrasonic device for 3 hours. After homogenization by ultrasonic device, these materials were mixed again with a mechanical stirrer at 2000 rpm for 2 minutes, and in the final stage, TDI was poured into them and the mixture was poured into the Teflon mold. The morphology of the foams was investigated by a Scanning Electron Microscope (SEM), model Leo 11450, made in Hungary. Also, the Sound Absorption Coefficient was measured using a two-microphone impedance tube (b& k

4206T, Denmark) according to ISIRI 9803 standard at the frequency range of 63-6300 HZ.

## RESULTS AND DISCUSSION

By comparing the results of the scanning electron microscope images, it can be seen that increasing the weight percentage of nanoparticles in PUF has led to an increase in the number of pores and a decrease in their size, which itself leads to an increase in the sound absorption coefficient (Fig. 1). The increase in the sound absorption values of composite samples can be due to the nucleation process, which means that adding clay nanoparticles in the polymer matrix leads to an increase in the number of pores and energy loss. As a result, these samples show better sound absorption. The impedance tube results showed that all composite samples have a higher sound absorption coefficient than pure PUF in all frequency ranges. Also, sound absorption at frequencies of 500-1250 Hz had slight changes, while from 1250-6400 Hz, it had significant changes. By adding different filler contents of modified clay nanoparticles (CLOISITE 30B) to PU, the absorption coefficient of the foams first increased significantly in all frequencies and then decreased in the same frequency range and finally improved significantly in all frequencies (from 500-1370 and 1600-5600 Hz) (Fig. 2). Therefore, adding nanoparticles to pure PUF leads to the formation of clay nanocomposites with a higher sound absorption coefficient. The reason for this increase in the absorption coefficient

can be related to the increase in cell space in the wave path. Also, recent studies have shown that with the increase in the number of cell pores in foam, the sound absorption coefficient increases significantly in the low-frequency range due to the increase in airflow resistance created by the cell walls of the pores. Pore properties such as smaller pore size and thicker cell walls provide a good basis for vibration-damping properties and higher sound absorption performance, especially at low frequencies.

## CONCLUSIONS

This research aimed to improve the sound

absorption properties of PUF, especially at low frequencies. For this purpose, PUF was made with different weight percentages of clay nanoparticles (0-1.2 wt%). It was concluded from the conducted investigations that adding different percentages of clay nanoparticles to PUF is a practical solution to improve the acoustic performance of the foam.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This article is the result of the project approved by the Research Council of Tabriz University of Medical Sciences under the code of IR.TBZMED.REC.1399.733.

## بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

غلامرضا مرادی<sup>۱\*</sup>، سنا محمدی<sup>۱</sup>، عبدالرسول صفائیان<sup>۲</sup>، سعید احمدی<sup>۳</sup>، مهرنیا لک<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> گروه ایمنی و بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

### چکیده

**مقدمه:** صداهای مزاحم می توانند باعث ایجاد بیماری های جسمی و روحی در کارگران شوند. به همین دلیل کاهش صداهای مزاحم به خصوص در محیط های کاری امری ضروری است. برای کاهش میزان صدا، استفاده از مواد جاذب صوت با خواص آکوستیکی مناسب روند رو به رشدی داشته است. هدف از مطالعه حاضر، بهبود خاصیت آکوستیکی فوم پلی یورتان (PUF) به عنوان جاذب صوت می باشد.

**روش کار:** در مطالعه حاضر PUF با درصدهای مختلف نانوذرات خاک رس (۱/۲ wt.% - ۰) سنتز شدند و سپس ضریب جذب صوتی PUF سنتز شده توسط لوله امپدانس صوتی در محدوده بسامد ۶۳ تا ۶۴۰۰ هرتز مطابق با استاندارد ISIRI 9803 اندازه گیری شد. مورفولوژی فوم ها نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد.

**یافته ها:** نتایج نشان داد افزودن نانو ذرات خاک رس به PUF منجر به بهبود رفتار جذب صوتی نمونه ها می شود و بهترین رفتار جذب صوتی برای PUF با ۱/۲ درصد وزنی نانوذره در فرکانس های پایین (۲۶۰۰-۵۰۰ هرتز) بود. این افزایش در ضریب جذب می تواند به دلیل افزایش تعداد و کوچک شدن منافذ با افزایش میزان نانوذره در PUF باشد.

**نتیجه گیری:** نتایج مطالعه حاضر نشان داد ضریب جذب صوت PUF با افزودن درصدهای مختلف نانو ذره خاک رس به PUF بهبود یافته است. حضور نانو ذرات خاک رس منجر به کاهش اندازه سلولی و افزایش تعدا منافذ و اصطکاک سطحی شده است که با افزایش درصد نانو ذرات، افزایش ضریب جذب صوت در PUF مشاهده گردید

**کلمات کلیدی:** فوم پلی یورتان، نانو ذرات خاک رس، ضریب جذب صوت

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [moradig@tbzmed.ac.ir](mailto:moradig@tbzmed.ac.ir)



بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

### مقدمه

آلودگی صوتی یکی از سه نوع آلودگی موجود در جوامع امروزی می‌باشد، از این جهت، دانشمندان زیادی در حال تلاش برای کنترل این نوع آلودگی می‌باشند (۱). یکی از انواع مختلف روش‌های کنترل آلودگی صوتی، استفاده از مواد جاذب صوت می‌باشد. مواد متخلخل، بخش اصلی تشکیل دهنده جاذب صوت می‌باشند. این مواد را می‌توان براساس ساختار به سه دسته دانه‌ای، فیبری و سلولی تقسیم‌بندی کرد (۲). فوم‌های پلی‌یورتان (PUF) به دلیل داشتن دامنه گسترده‌ای از خواص و توانایی پیونددهی با مواد گوناگون مورد توجه بیشتری قرار دارند (۳). از میان مواد پلیمری، PUF به دلیل چگالی کم، تولید آسان، هزینه کم تولید و تخلخل بالا به عنوان جاذب صوت برای این مطالعه انتخاب شد (۴). فوم می‌تواند ساختار سلولی باز، نیمه باز یا بسته داشته باشد (۵). در سال‌های اخیر، PUF به دلیل داشتن خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و صوتی مناسب به طور گسترده در صنعت‌هایی همچون خودروسازی، مبلمان، صنایع خواب (تشک و بالش) و ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۶). علی‌رغم کاربردهای وسیع این مواد و ظرفیت جاذب صوت جاذب‌های PUF در محدوده فرکانس بالا نگرانی‌هایی درباره مشکلاتی نظیر پایین بودن ظرفیت انرژی صوتی در فرکانس پایین، پایداری حرارتی پایین و احتمال اشتعال آن وجود دارد (۷). فرآیند تشکیل PUF شامل دو مرحله اصلی می‌باشد. مرحله اول دمش است که در این مرحله گاز دی اکسید کربن برای ساخت سلول‌ها تولید می‌شود. مرحله دوم پخت نام دارد که باعث تولید گرما و استحکام در ساختار پلیمر می‌شود. این دو مرحله می‌بایست به صورت همزمان انجام گیرند (۳). خاصیت جاذب صوتی PUF معمولاً با ترکیب پرکننده‌هایی با سایز ریز بهبود می‌یابد، زیرا باعث ایجاد چگالی بالاتر و مورفولوژی بهتر می‌شود اما مقادیر زیاد پرکننده منجر به افزایش وزن فوم و در نتیجه کاهش راندمان جاذب صوت می‌شود. از این رو مطالعاتی با مواد نانو صورت گرفته است که می‌تواند

منجر به بهبود قابل توجهی در جذب صدا بدون تأثیرات منفی زیادی به خصوص در افزایش وزن شود (۸، ۹). نانوکامپوزیت‌های پلیمری-رس اخیراً به عنوان جاذب صوت، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، زیرا با افزودن تنها مقدار کمی از خاک رس به مواد سازنده فوم، باعث افزایش عملکرد جاذب صوت می‌شوند (۸). تحقیقات نشان داده است که میزان قابل قبولی از پراکندگی نانو خاک رس در ماتریس پلیمری منجر به بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی می‌شود (۸). گایاتری و همکاران نشان دادند افزودن ۱/۴ درصد وزنی از نانوذرات سیلیس، خاک رس و لاستیک به PUF، خاصیت جاذب صوتی نانوکامپوزیت‌ها را در محدوده فرکانسی پایین بهبود می‌بخشد (۸). وردجو و همکاران نشان دادند وجود مقدار پایینی از نانو لوله کربنی در ساختار PUF، منجر به بهبود خواص آکوستیکی و مکانیکی فوم می‌شود (۶). همچنین بندریان و همکاران در مطالعه خود اثبات کردند وجود گروه عاملی کربوکسیل بر روی سطح نانو لوله کربنی، نسبت به دیگر گروه‌های عاملی، تأثیر بیشتری در بهبود خواص مکانیکی و آکوستیکی PUF دارد (۱۰). مطالعه احمدی و همکاران نشان داد که افزودن درصد‌های مختلف نانو ذرات خاک رس منجر به بهبود خواص آکوستیکی ماده پلیمری آکریلونیتریل بوتادین استایرن<sup>۲</sup> (ABS) شده است. نتایج نشان داد که در فرکانس‌های بالا و پایین، بهترین توزیع مولکولی و بیشترین افت انتقال صدا به ترتیب در نمونه‌های حاوی (۴ wt.%) و (۸ wt.%) نانو ذرات خاک رس به دست آمده است (۱۱).

با توجه به مطالب ذکر شده PUF قابلیت اشتعال و ایجاد حریق را دارد. مدستی و همکاران نشان دادند که افزودن نانو ذرات خاک رس به PUF به عنوان یک مانع فیزیکی در مقابل حریق بر روی سطوح عمل می‌کند، که از آزاد شدن مواد تراکم‌پذیر و اکسیژن جلوگیری می‌کند (۱۲). الفتاح و همکاران از شاخص اکسیژن محدود<sup>۳</sup> (LOI) که یک شاخص نیمه کمی است برای تعیین مقاومت یک

2. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene  
3. Imited Oxygen Index

1. Polyurethane Foam

مواد از شرکت کبودان شیمی زرین تهیه شده‌اند و جزء B شامل تولوئن دی ایزوسیانات<sup>۱</sup> (TDI) است که ساخت شرکت Sigma-Aldrich می‌باشد. در این پژوهش عامل فوم ساز آب می‌باشد و از قلع و آمین به عنوان کاتالیست و از روغن سیلیکون به عنوان فعال ساز سطحی استفاده شده است. نانو ذرات خاک رس با دانسیته ۱,۹۸ با رطوبت ۲٪ با میانگین قطر کمتر از  $1\mu m$  نیز از شرکت کاوا صنعت پایور تهیه گردیده است. لازم به ذکر است استفاده بیش از حد از پرکننده‌ها منجر به تشکیل نامتعارف PUF می‌شود (۱۲) و با توجه به مطالعات گذشته مشخص شده که بهبود ضریب جذب صوت PUF با افزودن نانو ذرات در محدوده (۲wt% - 0.1) امکان پذیر است که در این مطالعه درصدهای وزنی ۰/۳، ۰/۶ و ۱/۲ مورد استفاده قرار گرفت (۱۷). در این پژوهش PUF نرم با چگالی ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب تهیه می‌گردد.

#### ساخت فوم خالص

PUF خالص مورد استفاده در این پژوهش براساس مقادیر ذکر شده در جدول ۱ ساخته شده است. در مرحله اول کاتالیست، فعال ساز سطحی و آب به پلی ال اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط شده است. سپس TDI به این مخلوط افزوده شده و به مدت ۸ ثانیه با همزن مکانیکی مخلوط شده و در انتها به درون قالب برای رشد آزاد انتقال یافته است و در قالب بسته شده و حدوداً ۳۰ دقیقه زمان گذاشته می‌شود تا بتوان فوم را به راحتی از قالب خارج کرد (۱۸).

#### ساخت فوم تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

جهت تولید PUF با درصدهای وزنی مختلف نانو ذره خاک رس، مقادیر مختلف نانو ذره به جزء A اضافه شدند و توسط همزن مکانیکی به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس جهت پخش شدن هر چه بهتر ذرات درون ماده، این مخلوط به دستگاه حمام فراصوت انتقال داده شد و به مدت ۳ ساعت تحت امواج فراصوت قرار گرفت. در مرحله

1. Toluene Diisocyanate

ماده در برابر حریق استفاده کرده‌اند. هرچه اکسیژن مورد نیاز ماده برای حریق بیشتر باشد (LOI بالاتر)، قابلیت بازدارندگی آن ماده در برابر حریق بیشتر است. هوای استنشاقی حاوی ۲۱٪ اکسیژن می‌باشد بنابراین ماده‌ای با LOI کمتر از ۲۱٪ می‌تواند به راحتی در هوا بسوزد. نتایج این مطالعه نشان داد شاخص LOI، PUF خالص و PUF حاوی ۵ درصد وزنی نانو ذرات خاک رس به ترتیب ۲۰/۸ و ۲۷/۷ است، پس نانو ذرات خاک رس می‌توانند توانایی اشتعال PUF را کاهش دهند (۱۳). همچنین از دیگر عوامل محدود کننده کاربرد PUF در صنعت مقاومت حرارتی پایین آن می‌باشد (۱۴). چودهری و همکاران نشان دادند با افزودن نانو ذرات خاک رس به پلیمرها خواص هدایت حرارتی پلیمر بهبود پیدا می‌کند (۱۵). علت عملکرد پایین مواد پلیمری در زمینه عایق حرارتی ساختار زنجیره‌ای پیچیده و اندازه مولکولی بزرگ، و وجود شکاف محدود می‌باشد. افزودن نانوذرات به ساختار پلیمر باعث می‌شود این نانو ذرات شکافها را پر کرده و اندازه سلول‌های پلیمری را کاهش دهند. هرچه تعداد شکافها بیشتر باشد، پراکندگی فوتون‌ها در برخورد با این شکافها افزایش می‌یابد و این افزایش در پراکندگی فوتون‌ها منجر به کاهش هدایت حرارتی مواد پلیمری می‌شود (۱۶). در این پژوهش خواص آکوستیکی PUF تقویت شده با درصدهای مختلف نانو ذرات خاک رس و همچنین مورفولوژی نمونه‌ها بررسی خواهند شد. وجود نانو ذرات خاک رس در فوم به دلیل پراکندگی بهتر می‌تواند تأثیر زیادی در بهبود عملکرد جذب صوتی PUF بگذارد.

#### روش کار

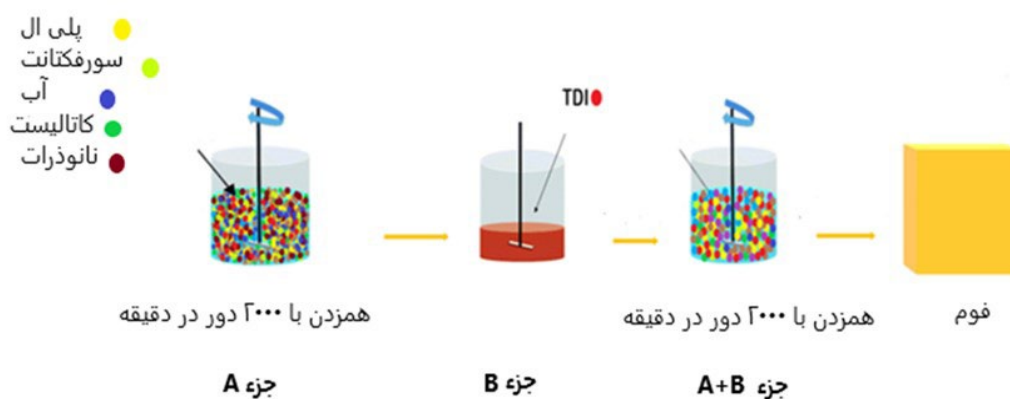
##### مواد اولیه

این مطالعه به صورت تجربی جهت تقویت ضریب جذب صوت PUF با نانو ذرات خاک رس انجام شد. مواد تشکیل دهنده فوم PU شامل دو جزء A و B می‌باشند که جزء A شامل پلی ال با عدد هیدروکسیل  $48 \text{ mg}_{\text{KOH}}/\text{g}$  و گرانیوی ۵۸۰ cps در ۲۵ درجه سانتی‌گراد، کاتالیست، عامل فوم ساز و عامل فعال ساز سطحی می‌باشد که این

بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

جدول ۱: مقدار مواد مصرفی جهت سنتز PUF با چگالی ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب

نام ماده شیمیایی	خالص PUF	با ۰/۳٪ نانوذره PUF	با ۰/۶٪ نانوذره PUF	با ۱/۲٪ نانوذره PUF
پلی ال	۷۱/۴۲	۷۱/۴۲	۷۱/۴۲	۷۱/۴۲
آب	۲/۱۴	۲/۱۴	۲/۱۴	۲/۱۴
روغن سیلیکون	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷
قلع	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱
آمین	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱
TDI	۳۵/۷۱	۳۵/۷۱	۳۵/۷۱	۳۵/۷۱
نانوذرات	۰	۰/۳	۰/۶	۱/۲



شکل ۱: ساخت PUF

اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی از روش دو میکروفون در دستگاه لوله امپدانس استفاده شد. این دستگاه مدل b&k 4206T و ساخت کشور دانمارک می‌باشد. این اندازه‌گیری برطبق استاندارد ISIRI 9803 و شرایط محیطی مشخصی (دما: ۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت: ۱۷ درصد و فشار محیط: ۸۵۰ hpa) برای نمونه‌های استوانه‌ای با قطرهای ۳ و ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر در محدوده بسامد ۶۳-۶۴۰۰ هرتز انجام شد. در یک سمت این دستگاه نمونه قرار داده شده و در سمت دیگر بلندگو قرار می‌گیرد. از سمت بلندگو امواج صوتی با فرکانس و شدت صوتی مشخص انتشار داده می‌شود تا با نمونه برخورد کند. این امواج

بعدی، جزء B که شامل TDI می‌باشد براساس جدول ۱ به ترکیب اضافه شد و برای ۲ دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط شد (شکل ۱). جهت تهیه هر نمونه فوم با درصد وزنی مختلف نانوذره، این فرآیند صورت گرفت و در نهایت نمونه‌های فوم تهیه شدند (PUF ۰/۳، ۰/۶ و ۱/۲ درصد وزنی نانو ذره) (شکل ۲). سپس این مواد به داخل قالب انتقال داده می‌شوند تا نمونه‌ها آماده شوند (۱۸).

میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM)

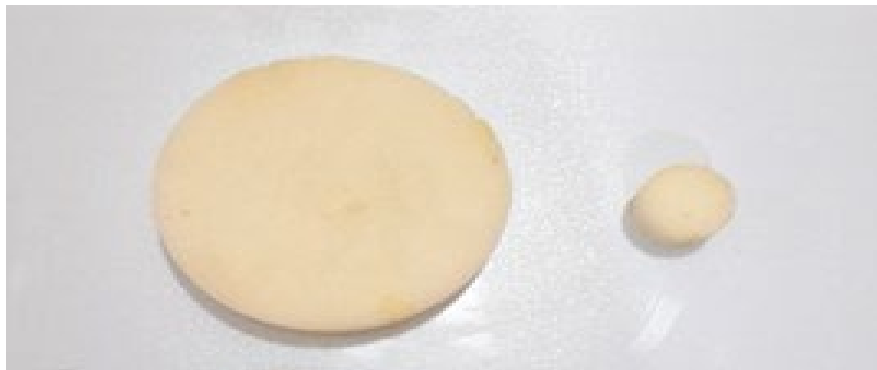
تصاویر مربوط به ساختار PUF توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل لئو ۱۱۴۵۰ ساخت کشور مجارستان تهیه شدند.

1. Scanning Electron Microscope





شکل ۲: فوم های ساخته شده



شکل ۳: نمونه های ۱۰ سانتی متری (نمونه بزرگ) و ۳ سانتی متری (نمونه کوچک) از PUF تهیه شده برای تست ضریب جذب صوت در فرکانس های پایین و بالا

بوده است (۱۹). قطر نمونه های ساخته شده جهت قرارگیری در لوله امیدانس ۱/۵ سانتی متر بوده است. محدوده فرکانس کامل برای ضرایب جذب صدا ارائه شده در این گزارش ترکیبی از مقادیر اندازه گیری شده در لوله بزرگ (۱۶۰۰-۶۳ هرتز) و لوله کوچک (۶۴۰۰-۱۶۰۰ هرتز) می باشد که محدوده فرکانس اندازه گیری شده ۶۳-۶۴۰۰ هرتز را نشان می دهد. اندازه گیری ضریب جذب صوت سه بار تکرار شد. نمونه هایی با قطر ۳ سانتی متر (کم) و ۱۰ سانتی متر (بالا) و ضخامت ۱/۵ سانتی متر جهت انجام این آزمایش تهیه شد (شکل ۳) (۱۹).

پس از برخورد به نمونه به سه قسمت تقسیم می شوند، مقداری از ماده عبور می کند، مقداری جذب ماده می شود و مقداری از سطح ماده برگشت داده می شود. مقدار امواج عبور کرده از جسم پس از برخورد به جسم صلب برگشت داده می شود. ضریب جذب صوتی از تقسیم مقدار شدت صدای جذب شده به شدت صدای ارسال شده به دست می آید. سیستم لوله امیدانس مورد استفاده در این آزمایش، شامل یک لوله بزرگ با قطر ۱۰ سانتی متر و یک لوله کوچک با قطر ۳ سانتی متر جهت اندازه گیری ضرایب جذب به ترتیب در فرکانس های پایین و متوسط (۱۶۰۰-۶۳ هرتز) و فرکانس های بالا (۶۴۰۰-۱۶۰۰ هرتز)

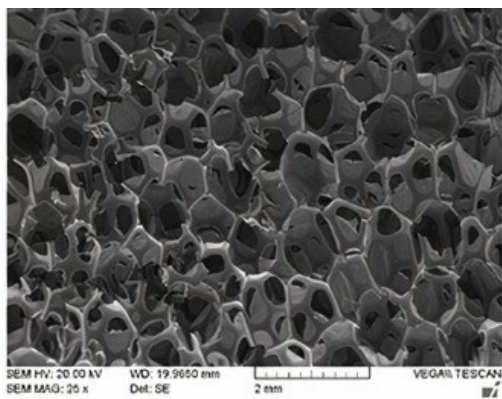
بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

می‌کنند، اطلاق می‌شود و از صفر (بدون کاهش) تا ۱۰۰٪ کاهش) متغیر می‌باشد. نتایج لوله امیدانس نشان داد که تمام نمونه‌های کامپوزیت دارای ضریب جذب صوت بالاتری نسبت به PUF خالص در همه محدوده‌های فرکانسی هستند (شکل ۵). همچنین، جذب صوتی در فرکانس‌های ۱۲۵۰-۵۰۰ هرتز تغییرات جزئی داشت، در حالی که از فرکانس ۶۴۰۰-۱۲۵۰ هرتز، جذب صوتی تغییرات قابل توجهی داشت. با افزودن محتویات مختلف پرکننده نانو ذرات خاک رس اصلاح شده (CLOISITE 30B) به PUF، ضریب جذب فوم‌ها ابتدا در همه فرکانس‌ها افزایش چشمگیری پیدا کرد و سپس در

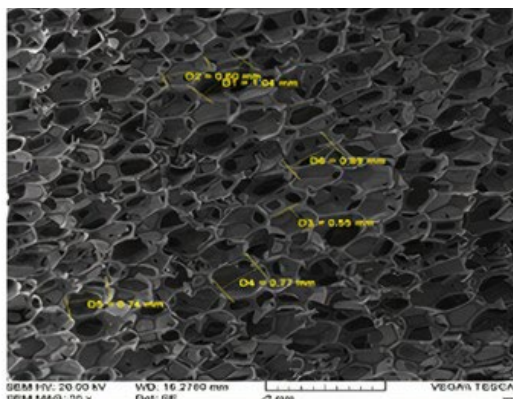
### یافته‌ها

بررسی مورفولوژی نمونه‌ها توسط SEM با بررسی نتایج تصاویر SEM مشاهده می‌شود که افزایش درصد وزنی نانوذره در PUF منجر به افزایش تعداد منافذ و کوچک شدن سایز آن‌ها شده است که این خود منجر به افزایش ضریب جذب صوت می‌شود (شکل ۴).

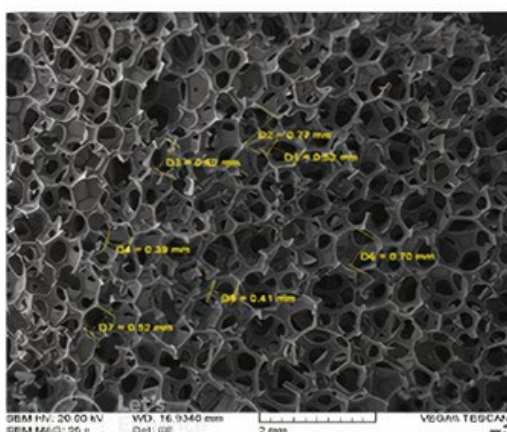
بررسی ضریب جذب نمونه‌های ساخته شده با توجه به مفهوم آکوستیک، ضریب جذب به کسری از موج صوتی، زمانی که امواج صوتی به نمونه برخورد



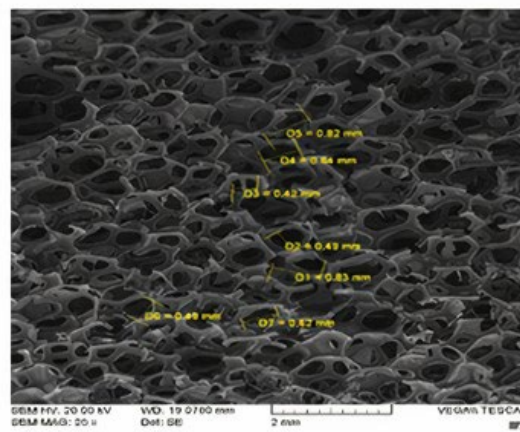
(الف)



(ب)

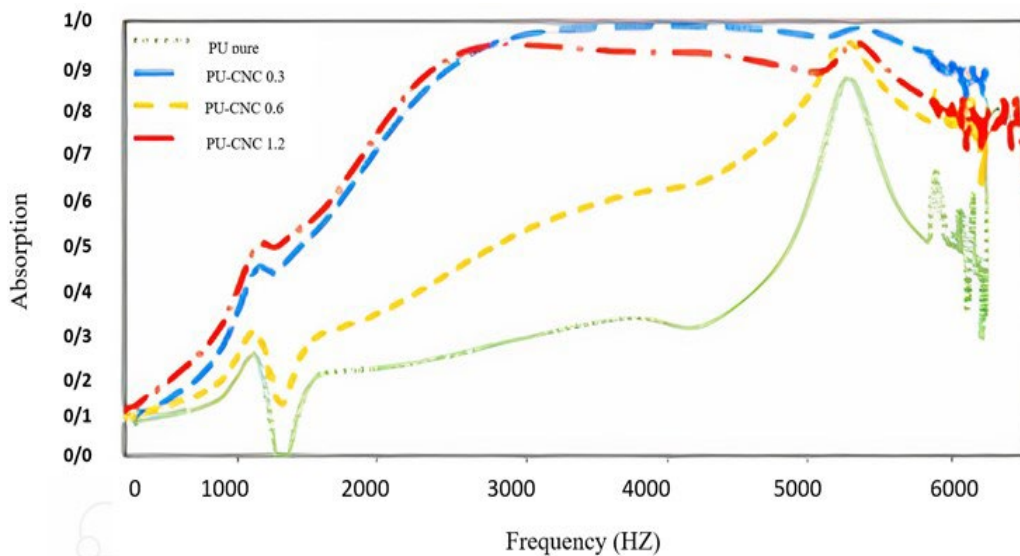


(ج)



(د)

شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح PUF ساخته شده. (الف) خالص (ب) ۰/۳ درصد وزنی (ج) ۰/۶ درصد وزنی (د) ۱/۲ درصد وزنی



شکل ۵: منحنی ضریب جذب در محدود فرکانسی ۴۰۰-۵۰۰ هرتز برای PUF تقویت شده با نانو ذرات خاک رس (۰ تا ۱/۲ درصد وزنی). نمودار عمودی ضریب جذب صوت را نشان می دهد (۰ تا ۱)

صوت بالاتر، به ویژه در فرکانس‌های پایین فراهم می‌کند (۱۸، ۲۰، ۲۱). نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپی نمونه‌های ساخته شده نشان داد که وجود نانو ذرات خاک رس باعث افزایش تعداد منافذ و کوچک شدن سایز آن‌ها در کامپوزیت‌های PU می‌شود. افزایش مقادیر جذب صوت نمونه‌های کامپوزیتی می‌تواند به دلیل فرآیند هسته‌ای شدن باشد، به این معنی که اضافه کردن نانو ذرات خاک رس در ماتریس پلیمری باعث افزایش تعداد منافذ و اتلاف انرژی می‌شود، در نتیجه این نمونه‌ها جذب صوتی بهتری از خود نشان می‌دهند (۲۰). ضریب جذب صوتی فوم تا حد بسیار بالایی تحت تأثیر مورفولوژی فوم شامل ویژگی‌های منافذ (شامل تعداد، پیچ و خم و اندازه) و چگالی آن (مرتبط با ضخامت دیواره سلولی) می‌باشد (۲۲). افزایش ضریب جذب صوت فوم‌های کامپوزیتی با نانو ذرات می‌تواند به دلیل کوچک شدن منافذ سلولی و افزایش مقاومت جریان هوا باشد که منجر به افزایش اصطکاک موج صوتی با دیواره‌های سلولی می‌شود که با نتایج حاصل شده از مطالعه چو و همکاران مطابقت دارد (۲۳). همچنین در مطالعه‌ای که توسط محمدی و همکاران صورت گرفت، افزودن درصد‌های مختلفی

محدوده فرکانسی یکسان کاهش یافت و در نهایت در همه فرکانس‌ها به میزان قابل توجهی بهبود یافت (از ۱۳۷۰-۵۰۰ و ۵۶۰۰-۱۶۰۰ هرتز). مقادیر متوسط ضریب جذب برای نمونه‌های فوم خالص، ۰/۳، ۰/۶ و ۱/۲ درصد وزنی نانو ذره خاک رس به ترتیب ۰/۲۹۹، ۰/۷۱۶، ۰/۴۶۶ و ۰/۶۹۹ می‌باشد، بنابراین افزودن نانو ذره به PUF خالص منجر به تشکیل نانو کامپوزیت‌های رسی با ضریب جذب صوتی بالاتر می‌شود.

### بحث

مطالعه حاضر با هدف به کار بردن مقادیر متفاوتی از نانو ذرات خاک رس برای بهبود خواص آکوستیکی PUF به خصوص در محدوده فرکانسی پایین صورت گرفت. مورفولوژی سلولی عامل بسیار مهمی برای تعیین ظرفیت جذب صوتی فوم‌های کامپوزیتی PU می‌باشد. زیرا امواج صوتی پس از برخورد‌های متوالی با سطوح و دیواره‌های سلول و اصطکاک با سطوح و مولکول‌های هوا بیشتر در منافذ متلاشی می‌شوند (۱۸). خصوصیات منافذ مانند اندازه منافذ کوچک‌تر و دیواره سلولی ضخیم‌تر، مبنای مناسبی برای خواص میرایی ارتعاش و عملکرد جذب

بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

فرکانس‌های پایین (۲۰۰-۱۰۰ هرتز) بهترین عملکرد فوم در جذب صوت را ایجاد می‌کند (۸). در این زمینه، ژانگ و همکاران در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که به دلیل بلندتر بودن طول امواج صوتی در محدوده فرکانسی پایین، ضریب جذب صوت در این محدوده پایین می‌باشد. به این دلیل می‌بایست برای بهبود عملکرد جذب صوت فوم‌ها در محدوده فرکانسی پایین، از موادی با چگالی بیشتر در ساختار فوم استفاده کرد (۲۶). لی و همکاران مطالعه‌ای در خصوص بررسی تأثیر چگالی، وزن مولکولی و اندازه منفذ سلولی بر ضریب جذب صوت فوم‌های تقویت شده با نانوذرات سیلیکا انجام دادند که نتایج نشان داد افزایش درصد نانو ذره سیلیکا در فوم، ضریب جذب صوت را در تمام محدوده فرکانسی افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش چگالی و کاهش سایز منفذ، ضریب جذب صوت افزایش یافت (۲۷). فروهر مجد و همکاران نشان دادند که پلی استایرن<sup>۱</sup> (PS) دارای بیشترین ضریب جذب صوت در محدوده فرکانسی ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز است. در این مطالعه بیشترین میزان ضریب جذب صوت PS در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز برابر با ۰/۷۵ بدست آمد. با افزودن ۰/۵ درصد وزنی خاک رس به PS بیشترین میزان ضریب جذب صوت در فرکانس ۲۵۰۰ هرتز برابر ۰/۸۹ ثبت گردید. با افزودن ۳ و ۷ درصد وزنی نانو ذرات خاک رس به PS به ترتیب باعث جابه جایی محدوده فرکانسی به سمت فرکانس بالاتر (۳۱۵۰ هرتز) با ضریب جذب صوت ۰/۹ و جا به جایی محدود فرکانسی به سمت فرکانس پایین‌تر (۲۰۰۰ هرتز) با ضریب جذب صوت ۰/۵۴ است. با توجه به نتایج بدست آمده با افزودن نانو ذرات خاک رس به PS محدود فرکانسی جا به جا و ضریب جذب صوت نیز بیشتر می‌شود و کارایی آن افزایش پیدا می‌کند (۲۸). که نتایج این مطالعه با مطالعه حاضر مطابقت دارد. مطالعه‌ای در زمینه بررسی خواص صوتی و حرارتی کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات خاک رس انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد با افزودن نانو ذرات خاک رس به اپوکسی میزان افت انتقال صوت نسبت به اپوکسی

1. Polystyrene

از الیاف پشم سنگ در مواد سازنده PUF نشان داد که بیشترین درصد الیاف (۱/۵ درصد) اضافه شده به PUF، باعث کوچک‌تر شدن منافذ سلولی و همچنین افزایش ضریب جذب صوت شد (۲۴).

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌های فوم با درصد‌های مختلف نانو ذرات، ضریب جذب صوت نسبت به نمونه خالص فوم PU pure افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین، نشان داده شد که در فرکانس‌های پایین، افزودن ۱/۲ درصد نانو ذره خاک رس باعث ایجاد بیشترین مقدار ضریب جذب صوت می‌شود. این اتفاق احتمالاً به دلیل میرایی بهتر نمونه در حالت ترکیب نسبت به نمونه خالص PU می‌باشد. علاوه بر این دلیل این افزایش در ضریب جذب را می‌توان به افزایش فضای سلولی در مسیر موج مربوط کرد. همچنین، افزایش مقادیر جذب صوت نمونه‌های کامپوزیت می‌تواند به دلیل فرآیند هسته‌ای شدن باشد، به این معنی که افزودن محتویات نانو ذره خاک رس در ماتریس پلیمری منجر به افزایش تعداد منافذ، کانال‌ها، اصطکاک سطحی و اتلاف انرژی می‌گردد و در نتیجه نمونه‌ها رفتار آکوستیک بهتری را نشان می‌دهند (۲۰). این نتایج با نتایج مطالعات مرتبط نیز مطابقت دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با افزایش تعداد منافذ سلولی در فوم، ضریب جذب صوت به دلیل افزایش مقاومت جریان هوای ایجاد شده به وسیله دیواره‌های سلولی منافذ، در محدوده بسامدی پایین افزایش چشمگیری می‌یابد (۲۵). همچنین در این مورد مطالعاتی نیز صورت گرفته است. در سال ۲۰۱۳، گایاتری و همکاران مطالعه‌ای تحت عنوان "جذب صدا، رفتار مکانیکی و حرارتی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو سیلیس، نانو خاک رس و تخته خرده چوب" انجام دادند. خواص جذب صدا، رفتار مکانیکی و حرارتی این پرکننده‌ها تا ۲ درصد جرمی مورد بررسی قرار گرفت. ۰/۳۵، ۰/۷، ۱/۴ و ۲ درصد از هر یک از این سه نانوذره به PUF اضافه شد. نشان داده شد که افزودن ۱/۴ درصد از هر یک از این سه نانو مواد به PUF در

شکل مناسبی افزایش یافته است. دلیل این بهبود، خواص مناسب نانو ذرات می‌باشد. این ذرات کروی هستند و در مسیر حرکت امواج ساختاری باعث ایجاد تغییر فاز می‌شوند و در نتیجه ضریب جذب صوتی را بهبود می‌دهند. حضور نانو ذرات اندازه سلولی را کاهش می‌دهد و تعداد منافذ و اصطکاک سطحی را افزایش می‌دهد که این امر منجر به به دام افتادن موج صوتی در منافذ و در نتیجه افزایش ضریب جذب می‌گردد. بنابراین، از بررسی‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جهت کنترل صدا در فرکانس‌های پایین، افزودن ۱/۲ درصد وزنی نانو ذره خاک رس به PUF جهت بهبود عملکرد آکوستیکی فوم مناسب‌تر می‌باشد. به طور کلی، با افزودن نانو ذرات خاک رس خواص صوتی PUF بهبود پیدا می‌کند که می‌تواند جایگزین مناسبی برای جاذب‌های صوتی سنتی باشد و در اتاقک‌های آکوستیک، اتاق مانیتورینگ، سینما و تئاتر از این ماده برای کنترل صدا استفاده کرد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح مصوب شورای پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تبریز به کد اخلاق IR.TBZMED. REC.1399.733 و جهت دفاع از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد.

### REFERENCES

- Moradi G, et al. Effects of noise on selective attention: The role of introversion and extraversion. *Appl Acoust.* 2019;146:213-7.
- Arenas JB, Crocker MJ. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound Vib.* 2010;44(7):12-8.
- Aneja A. Structure-property relationships of flexible polyurethane foams. Virginia Polytechnic Institute and State University; 2002.
- Hajizadeh R, et al. Investigation of acoustic properties of polymer nanocomposites regarding combined sound absorption and insulation characteristics. *J Health Saf Work.* 2019;9(4):311-28.
- Niaounakis M. Foaming and foamed products. In: *Biopolymers: processing and products*; 2015. p. 327-59.

خالص افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان افت انتقال صوت مربوط به نمونه اپوکسی حاوی ۱۰ درصد وزنی نانو ذرات خاک رس در فرکانس کمتر از ۱۰۰۰ هرتز است. افزایش افت انتقال صوت به علت توزیع یکنواخت نانو ذره و افزایش سطح نمونه است که باعث می‌شود مسیر عبور صوت پراکنده شود در نتیجه انرژی صوتی کاهش پیدا کند. در این مطالعه با افزودن نانو ذرات خاک رس به اپوکسی همانند مطالعه حاضر باعث بهبود عملکرد صوتی پلیمرها می‌شود (۲۹). در مطالعه حاضر بر اساس نتایج، بهترین رفتار جذب صوتی برای ۱/۲ درصد وزنی PUF در فرکانس‌های پایین‌تر (در محدوده فرکانس ۲۶۷۵-۵۰۰ هرتز) نشان داده شد.

### نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش بهبود خاصیت جذب صوتی PUF به خصوص در فرکانس‌های پایین بوده است. به این منظور PUF با درصدهای وزنی مختلف نانو ذرات خاک رس (۱/۲ wt% - ۰) ساخته شد. در این پژوهش مشاهده شد با حضور نانو ذرات خاک رس در ساختار PUF، ضریب جذب صوتی در فرکانس‌های پایین مقدار کمی افزایش یافته است ولی در فرکانس‌های میانی و بالا، ضریب جذب صوت به دلیل حضور نانو ذرات خاک رس به

- Verdejo R, et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Compos Sci Technol.* 2009;69(10):1564-9.
- Liu T, et al. Preparation, structure, and properties of flexible polyurethane foams filled with fumed silica. *Wuhan Univ J Nat Sci.* 2011;16(1):29-32.
- Gayathri R, Vasanthakumari R, Padmanabhan C. Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *Int J Sci Eng Res.* 2013;4(5):301-8.
- de Mello D, Pezzin SH, Amico SC. The effect of post-consumer PET particles on the performance of flexible polyurethane foams. *Polym Test.* 2009;28(7):702-8.
- Bandarian M, Shojaei A, Rashidi AM. Thermal,



بررسی رفتار آکوستیکی فوم پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات خاک رس

- mechanical and acoustic damping properties of flexible open-cell polyurethane/multi-walled carbon nanotube foams: effect of surface functionality of nanotubes. *Polym Int*. 2011;60(3):475-82.
11. Ahmadi S, et al. Sound transmission loss through nano-clay-reinforced polymers. *Iran Polym J*. 2015;24:641-9.
  12. Valipour F, Dehghan S, Hajizadeh R. The effect of nano-and microfillers on thermal properties of Polyurethane foam. *Int J Environ Sci Technol*. 2022;1-12.
  13. Abd El-Fattah M, et al. Studying the effect of organo-modified nanoclay loading on the thermal stability, flame retardant, anti-corrosive and mechanical properties of polyurethane nanocomposite for surface coating. *Prog Org Coat*. 2015;89:212-9.
  14. Beyer A, et al. Assessing long-range transport potential of persistent organic pollutants. *Environ Sci Technol*. 2000;34(4):699-703.
  15. Choudhary S, Sengwa R. Dielectric spectroscopy and confirmation of ion conduction mechanism in direct melt compounded hot-press polymer nanocomposite electrolytes. *Ionics*. 2011;17(9):811-9.
  16. Hiremath A, et al. Nanoparticles filled polymer nanocomposites: A technological review. *Cogent Eng*. 2021;8(1):1991229.
  17. Saha M, Kabir ME, Jeelani S. Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles. *Mater Sci Eng A*. 2008;479(1-2):213-22.
  18. Mohammadi B, et al. Evaluation of the acoustic performance of polyurethane foams embedded with rock wool fibers at low-frequency range; design and construction. *Appl Acoust*. 2021;182:108223.
  19. Moradi G, et al. Acoustical, damping and thermal properties of polyurethane/poly (methyl methacrylate)-based semi-interpenetrating polymer network foams. *Plast Rubber Compos*. 2018;47(5):221-31.
  20. Seddeq HS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Aust J Basic Appl Sci*. 2009;3(4):4610-7.
  21. Lu TJ, Hess A, Ashby M. Sound absorption in metallic foams. *J Appl Phys*. 1999;85(11):7528-39.
  22. Najib N, et al. Correlation between the acoustic and dynamic mechanical properties of natural rubber foam: Effect of foaming temperature. *Mater Des*. 2011;32(2):505-11.
  23. Choe H, Sung G, Kim JH. Chemical treatment of wood fibers to enhance the sound absorption coefficient of flexible polyurethane composite foams. *Compos Sci Technol*. 2018;156:19-27.
  24. Mohammadi B, et al. Mechanical and sound absorption properties of open-cell polyurethane foams modified with rock wool fiber. *J Build Eng*. 2022;48:103872.
  25. Pinto SC, et al. Hybrid structures made of polyurethane/graphene nanocomposite foams embedded within aluminum open-cell foam. *Metals*. 2020;10(6):768.
  26. Zhang C, et al. Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: Effect of interconnected porosity. *Mater Des*. 2012;41:319-25.
  27. Lee J, Kim GH, Ha CS. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *J Appl Polym Sci*. 2012;123(4):2384-90.
  28. Forouhar-Majd F, et al. Evaluation of Sound Absorption Coefficient of Various Proportions of Nanocomposite Polystyrene/Nanoclay at Different Frequencies. *J Health Syst Res*. 2017;12(4):454-9.
  29. Salih RM. Study of heat and sound insulation for polymeric composites reinforced with nano clay. *Polym Polym Compos*. 2021;29(9\_suppl):S1216-S1226.