

EXTENDED ABSTRACT

## Correlation Between the Acoustic and Cell Morphology of Polyurethane/Silica Nanocomposite Foams: Effect of Various Proportions of Silica at Low Frequency Region

Marziye Pirani<sup>1,\*</sup>, Mohammad Raza Monazzam<sup>2</sup>, Seyed Qasem Pourjandaghi<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Department of Polymer, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran Iran

Received: 2019-06-08

Accepted: 2020-11-25

### ABSTRACT

**Introduction:** Reducing noise pollution has become an essential issue due to the increase in public concern and also social demands for a better lifestyle. Using sound absorption materials is a preferred method to reduce the noise pollution. Undesirable properties of pure polyurethane such as poor absorption of mechanical energy in narrow frequency ranges can be improved by providing polymeric nanocomposites. The main purpose of this study is to synthesize the polyurethane nanocomposite foams in order to improve its acoustic properties.

**Material and Methods:** At the first stage, pure polyurethane foam was synthesized using the pre-polymer method. Afterwards, nanocomposite foams were synthesized with different mass fractions of Nano silica. The cellular morphology of prepared nanocomposite foams was investigated by scanning electron microscopy (SEM). Utilizing a two-microphone impedance tube, sound absorption coefficient ( $\alpha$ ) was calculated in the frequency ranges of 100 Hz to 1600 Hz in order to investigate the acoustic properties of the new absorbant.

**Results:** According to the microscopic investigations, morphology of the cells changed after adding silica nanoparticles. Also, the cell sizes were observed to be decreased by increasing the amount of silica nanoparticles. Furthermore, the acoustic analysis of nanocomposite foams indicated that the sound absorption increased by enhancing the load of silica nanoparticles.

**Conclusion:** In the current study, the effect of silica nanoparticles additive amount on acoustic properties of the polyurethane-based nanocomposite was investigated. Our findings depicted that the polyurethane-based nanocomposites were able to promote the sound absorption coefficient.

**Keywords:** Polyurethane, Nanoparticles, Sound absorption coefficient, Low frequency.

### 1. INTRODUCTION

Nowadays, undesirable and potentially hazardous noises are considered as one of the important problems in human life with a severe harmful influence on people's health. Therefore, controlling noises becomes more and more important for countries all around the world. Sound absorption and sound insulation are the most common ways to control the noises. Sound absorption for both

mid and high frequencies can be easily obtained by porous absorbers due to the fact that thicker materials are needed for longer wavelengths. Hence, it is often impossible to absorb low frequencies. Polymeric polyurethane (PU) foams have been widely used to absorb sounds and also to reduce noises, due to their attractive properties such as excellent viscoelasticity, relatively simple processing, cheapness, and lightness. However, the sound absorption of polyurethane (PU) foams is

\* Corresponding Author Email: [marziepirani@yahoo.com](mailto:marziepirani@yahoo.com)



Table 1. Results derived from Sound absorption curves of PU pure reinforced with Nanoparticles

Content of Nano silica /%	Average absorption coefficient /%	Frequency range of absorption peak/Hz
0	37.5	1150 – 1300
0.5	40.1	1300 – 1400
1	56.5	1220 -1310
1.5	67.7	990-1100
2	42.5	1380 -1520

Table 2. Results from SEM test for pure PU and its nanocomposites at different content of Nano silica

Samples	Pure PU	Nanocomposite foams			
		0.5% SiO <sub>2</sub>	1% SiO <sub>2</sub>	1.5% SiO <sub>2</sub>	2% SiO <sub>2</sub>
Cell Size ( $\mu\text{m}$ )	410 $\pm$ 3	404 $\pm$ 3	390 $\pm$ 3	377 $\pm$ 3	368 $\pm$ 2
Cell Density ( $\times 10^5 \frac{\text{cell}}{\text{cm}^3}$ )	4.48 $\pm$ 0.5	5.2 $\pm$ 0.5	6.42 $\pm$ 0.4	7.68 $\pm$ 0.1	8 $\pm$ 0.1

strong in high-frequency regions but is relatively weak in low-frequency regions. This is due to the low capacity of sound energy attenuation. Recently, polyurethane nanocomposite foams have considerably attracted the attention of researchers as new materials for the absorption of sounds. The aim of this study was, therefore, to use various amounts of silica nanoparticles to improve the acoustic properties of the polyurethane foams, especially at low frequencies.

## 2. MATERIAL AND METHODS

Poly (tetraethylene glycol) (PTMG  $\cdot$  Sigma Aldrich) with an average molecular weight of 2000 g/ mol, trimethylolpropane (TMP), and 1/4 butane diol (BD) were purchased from Merck and were used for polymerization. Azodicarbonamide (ADCA) as a chemical blowing agent was obtained from Chechen Co. Ltd. Nano silica particles with diameter of 20-30 nm and purity of 99%, were provided from Sigma-Aldrich. PU foams were synthesized using the pre-polymer method. First, PTMG was poured into a 100 ml three-necked reaction bottle, and was then placed under vacuum till its moisture was completely removed. Meanwhile, the temperature was kept fixed in the ranges of 70-75  $^{\circ}\text{C}$ . TDI was slowly added to the mixture in order to initiate the reaction between OH and NCO groups. The mixture was then heated for 55 min until the reaction was completed and NCO-terminated PU pre-polymer was obtained. BD/TMP mixture was then used as a chain-extending and a crosslinking agent. Finally, ADCA as a foaming agent was added to the mixture and was homogeneously mixed. After a few minutes, the mixture was poured

into a Teflon mold and was then placed in an oven at a temperature of 70  $^{\circ}\text{C}$  for 18-24 h. Afterward, different weight percentages of nano-silica (0/5 wt%, 1 %wt, 1/5 %wt, 2 %wt) were mixed with PTMG in order to synthesize PU nanocomposite foams. The sound absorption coefficient was measured using a two-microphone impedance tube of SW422 series according to ISO-10534-2.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Table. 1 shows the sound absorption coefficient of PU nanocomposite foams with different wt% of silica nanoparticles. As can be implied from this table, the maximum sound absorption for pure PU foam is approximately in the frequency range of 37.5% at 1150 to 1300 Hz. Adding 0.5% wt of Nano silica has a negligible influence on the absorption coefficient while the addition of 1% wt of nano silica particles leads to a significant increase in the absorption coefficient than that of pure foam. Reduced cell size and increased cell density in the nanocomposite foams are the primary reasons for improving sound absorption (see also Table 2).

Generally, for the porous absorber materials, sound propagation takes place in a network of interconnected pores and cells such that viscous and thermal interactions cause the sound and mechanical vibrational energy to be dissipated and then transformed into heat. In addition, the absorption coefficient improvement could be due to the increased energy dissipation as heat through the hysteresis phenomenon. Moreover, when the nano silica content is 1.5% wt, the average sound absorption reaches its maximum value at the

frequency range of 990 to 1100 HZ. The increase in the absorption coefficient for nanocomposite foam with 1.5 wt% nano silica compared to nanocomposites containing 0.5 wt% and 1wt% nano silica can be attributed to both increased open porosities and tortuous paths formed in the polymer foam. On the other hand, when the nano silica content increases to 2% wt, the sound absorption of the nanocomposite foam decreases and is even less than that of pure PU foam. It might be attributed to increased viscosity. Overall, the results show that the sound absorption is significantly enhanced up to a certain load of nano silica and then is decreased, as the amount of silica nanoparticles increases.

#### 4. CONCLUSIONS

Research shows that noise is one of the harmful factors in the workplaces, injuring people's health both physically and emotionally. Therefore, many

studies have been carried out on the sound absorption and control. PU foams are widely used as absorbent materials. The acoustic characteristics of PU foams are not proper for a wide range of undesired properties. Therefore, they cannot be used practically. Numerous studies have been performed to improve the PU properties by modifying the chemical structure or adding various types of organic/inorganic fillers to the foams. In the current study, our findings demonstrated that the PU-based nanocomposites were able to improve the sound absorption coefficient. Adding silica nanoparticles to the pure foam enhanced the number of cells and increased the stiffness of the cell walls, followed by an increase in the absorption coefficient.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

The study was funded by Tehran University of Medical Sciences (TUMS).

## ارتباط بین مورفولوژی سلولی و آکوستیک در فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان / سیلیکا: تاثیر نسبت های مختلف نانو سیلیکا در نواحی فرکانس پایین

مرضیه پیرانی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا منظم<sup>۲</sup>، سید قاسم پورجندقی<sup>۳</sup>

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

<sup>۲</sup> گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

### چکیده

**مقدمه:** به دلیل افزایش نگرانی عمومی در مورد آلودگی صوتی و تقاضا برای سبک زندگی بهتر، کاهش سر و صدا امری بسیار مهم است، یکی از روش های ارجح برای کاهش سروصدا، استفاده از مواد جاذب صوت است. فوم های پلی یورتان دارای جذب صوت مطلوبی بوده و توانایی تبدیل انرژی مکانیکی به گرما و در نتیجه امکان استفاده به عنوان یک جاذب را دارند. خواص نامطلوب پلی یورتان خالص مانند جذب ضعیف انرژی مکانیکی در گستره باریک فرکانسی می تواند از طریق تهیه نانوکامپوزیت های پلیمری بهبود یابد. لذا هدف این مطالعه، سنتز فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان با بکارگیری نانو ذرات سیلیکا به منظور بهبود خواص آکوستیکی آن می باشد.

**روش کار:** در مرحله اول فوم پلی یورتان خالص با استفاده از روش پیش پلیمر سنتز شد، سپس در مرحله دوم فوم های نانوکامپوزیت با افزودن درصد های وزنی مختلف از نانوذرات سیلیکا سنتز شدند. به منظور مشاهده مورفولوژی فوم ها، از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای بررسی خواص آکوستیکی، ضریب جذب صوت ( $\alpha$ ) فوم های استوانه ای شکل به قطر ۱۰۰ mm، ضخامت ۱۰ mm با استفاده از امپدانس تیوب دو میکروفنه در محدوده ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز اندازه گیری شد.

**یافته ها:** نتایج حاصل از ارزیابی میکروسکوپی نشان داد که مورفولوژی سلول ها با افزودن نانوذرات سیلیکا تغییر کرده و با افزایش مقدار نانوذرات سایز سلولی کاهش یافته است. همچنین نتایج آنالیز آکوستیکی نشان داد که ضریب جذب نانوکامپوزیت ها، با افزایش مقدار نانو سیلیکا افزایش می یابد. برای فوم نانوکامپوزیت حاوی ۱/۵٪ وزنی نانوذرات سیلیکا پیک فرکانسی جذب به سمت فرکانس های پایین کشیده شده است و جذب صوت به بیشینه مقدار خود افزایش یافته است.

**نتیجه گیری:** در مطالعه حاضر نتایج حاصل نشان داد که جاذب های صوتی بر پایه کامپوزیت پلی یورتان و نانوذرات سیلیکا توانسته سبب بهبود ضریب جذب صوتی گردد بدین صورت که اضافه شدن نانوذرات به فوم خالص منجر به افزایش دانسیته سلولی و کاهش سایز روزه ها شده است و با افزایش درصد نانوذرات، افزایش جذب صوت در فوم های نانوکامپوزیت مشاهده گردید.

**کلمات کلیدی:** پلی یورتان، نانوذرات، ضریب جذب صوت، فرکانس پایین

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [marziepirani@yahoo.com](mailto:marziepirani@yahoo.com)

باتوجه به اینکه سروصدای ناخواسته و بالقوه مخاطره آمیز یکی از مهم ترین مشکلات در زندگی امروزه بشر است و تاثیرات شدیدی بر سلامتی افراد دارد، کنترل سروصدا برای کشورها در سراسر جهان اهمیت زیادی دارد (۱). راههای اصلی کنترل سروصدا، جذب صوت و عایق صوت است که از بین آنها جذب و میرایی صوت به طور گسترده تری استفاده می شود (۲، ۳). جاذب های صوت عملکرد بالاتر و کاربردهای بیشتری در این زمینه داشته و در صنایع مختلفی شامل ساختمان، اتومبیل، حمل و نقل و محیط های صنعتی استفاده می شوند. یکی از انواع جاذب های صوتی، جاذب های متخلخل هستند که ذرات هوا می توانند توسط امواج آکوستیک در میان منافذ ماده عبور کند، بنابراین انرژی صوت هنگام انتشار در میان این منافذ کوچک، توسط اتلافات ویسکوز و حرارتی جذب می شود. جذب صوت در فرکانس میانی و بالا می تواند به آسانی توسط جاذب های متخلخل قابل دستیابی باشد اما برای طول موج های بلندتر مواد با ضخامت بیشتر لازم می باشد بنابراین برای جذب فرکانس های پایین اغلب غیرعملی می باشد (۳، ۴). فوم های پلیمری پلی یورتان نمونه ای از مواد متخلخل هستند که قبلاً به عنوان عایق حرارتی استفاده می شدند و بعداً به طور عمده ای برای آکوستیک و مواد کوسن استفاده شدند. این فوم ها به طور گسترده ای برای جذب صوت و کاهش سروصدا استفاده می شوند که ویژگی های جالبی شامل ویسکوالاستیسیته عالی، فرایند نسبتاً ساده و در دسترس بودن تجاری دارند. باین وجود جذب صوت فوم های پلی یورتان در نواحی فرکانسی بالا قوی بوده اما در نواحی فرکانسی پایین بخاطر توانایی کم تضعیف و میرایی انرژی صوت نسبتاً ضعیف است. در حالی که مهم ترین فرکانس های منبع آلودگی صوتی در طیف فرکانسی میانی و پایین هستند. منابع مختلف و زیادی برای سروصدای کم فرکانس وجود دارد اما اغلب بخش صنعتی آن مرتبط با پمپ ها، کمپرسورها و ژنراتورها می باشد (۵).

بسیاری محققان انواع مختلفی از پرکننده ها را برای

بهبود عملکرد آکوستیک فوم های پلی یورتان به ویژه در نواحی کم فرکانس پیدا کردند. خواص آکوستیک فوم های پلی یورتان معمولاً با ترکیب پرکننده های میکروسایز در ساختار آنها بهبود می یابد زیرا که دانسیته بالاتر و مورفولوژی بهتری را بدنبال دارد. از طرفی استفاده از مقادیر بالای این پرکننده ها می تواند منجر به افزایش وزن فوم و کاهش کارایی جذب صوت شود، در حالی که استفاده از مقادیر کمتر نمی تواند اثرات مطلوبی داشته باشد. در سال های اخیر، فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان بعنوان موادی جدید برای جذب صوت توجه محققان را جلب کرده است. کاربرد حتی درصد خیلی کمی از نانومواد از جمله نانوذرات، نانوفیبرها و نانولوله ها می تواند منجر به بهبود معنی داری در جذب صوت بدون هر گونه اثرات منفی، بویژه افزایش وزن شود (۳، ۴، ۶، ۷). تحقیقات اخیر در زمینه ساخت کامپوزیت های تقویت شده توسط نانو ذرات نشان می دهد که بارگذاری فوم پلی یورتان با نانو مواد سبب افزایش ضریب جذب صوت می گردد. نتایج مطالعه ی تینگ نشان داد که افزودن نانوذرات کروی به فوم های پلی یورتان باعث افزایش جذب صوت در نواحی فرکانسی پایین می شود (۸). در ادامه لی و همکاران اثبات نمودند حضور ۵/۱ درصد وزنی نانوذرات کروی بهترین ضریب جذب صوتی را در محدوده فرکانسی ۱۰۰ الی ۱۸۰۰ هرتز ارائه می دهد (۹). گیاتری و همکاران حضور نانوذرات کروی، صفحه ای و نانولوله ای را در ساختار فوم پلی یورتان با یکدیگر مقایسه نمودند، آنها گزارش کردند حضور ۴/۱ درصد وزنی برای هر سه ماده بهترین نتایج را برای جذب صوت دارد و در مجموع عملکرد نانوذرات کروی از سه ذره افزودنی دیگر بهتر بوده است (۵). وردجو و همکاران یافتند که بارگذاری مقدار کمی از نانولوله های کربنی در فوم های پلی یورتان انعطاف پذیر تاثیر نسبتاً بالایی در جذب صوت دارد حتی ۰/۱ درصد از نانو لوله ها می تواند جذب آکوستیک را به طرز چشمگیری افزایش دهد که این برای فوم پلیمری خالص به افزایش پیک ضریب جذب منجر خواهد شد (۱۰). هدف از این مطالعه استفاده از مقادیر متفاوت



شکل ۱. فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان

و NCO آغاز گردد، پس از اتمام افزایش، مخلوط به منظور تکمیل واکنش به مدت ۵۵ دقیقه حرارت داده شد تا پیش پلیمر با گروههای انتهایی NCO بدست آید. سپس از مخلوط ۱ و ۴ بوتان دی ال و تری متیلول پروپان به عنوان عامل توسعه دهنده زنجیر و شبکه شدن برای شبکه پلی یورتان استفاده گردید. در انتها، عامل فوم زای آزو دی کربن آمید به داخل مخلوط اضافه گردید و اختلاط ادامه یافت. بعد از گذشت زمان پنج دقیقه، مخلوط به داخل قالب تفلونی ریخته شد و برای مدت ۱۸ - ۲۴ ساعت درون آن با دمای ۷۰-۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا عملیات پخت کامل شود (۱۱، ۱۲). به منظور سنتز فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان در ابتدا درصد های وزنی متفاوت از نانوذرات سیلیکا (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲) با پلی تترامتیلن اترگلیکول مخلوط شد، سپس جهت انجام پلیمریزاسیون نانوکامپوزیت ها کلیه مراحل ذکر شده در بالا انجام گردید و مخلوط مجدد قالب گیری شده و جهت تکمیل عملیات پخت و تهیه فوم های نانوکامپوزیت درون آن قرار گرفت (۱۳، ۱۴).

بررسی خصوصیات فوم های نانوکامپوزیت پلی یورتان  
ارزیابی میکروسکوپی

برای بررسی مورفولوژی فوم های نانوکامپوزیت و دیدن تفاوت ساختار حفره ها میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل FEI ESEM QUANTA 200

نانوذرات سیلیکا برای بهبود خواص آکوستیک فوم پلی یورتان به ویژه در فرکانس های پایین است.

### ≡ مواد و روش کار

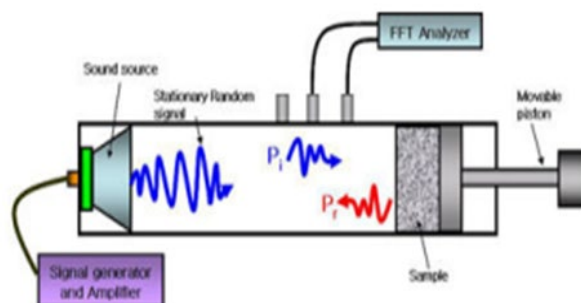
مواد اولیه مصرفی

در این پژوهش از پلی تترامتیلن اترگلیکول با وزن مولکولی ۲۰۰۰ گرم بر مول تهیه شده از شرکت سیگما آلد ریچ آمریکا، ۱ و ۴ بوتان دی ال، تری متیلول پروپان و تولوئن دی ایزوسیانات تهیه شده از شرکت مرک آلمان و آزو دی کربن آمید تهیه شده از شرکت ژکم چین، استفاده گردید. نانوسیلیکای بکار رفته در این مطالعه دارای اندازه ذرات ۲۰-۳۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۹ درصد بوده که از شرکت سیگما آلد ریچ آمریکا تهیه شده است.

### ≡ روش کار

سنتز فوم پلی یورتان خالص و فوم نانوکامپوزیت پلی یورتان

در ابتدا پلی تترامتیلن اترگلیکول که از پیش به خوبی خشک گردیده در یک بالن سه دهانه ۱۰۰ میلی لیتر ریخته شد و ظرف تحت خلاء قرار گرفت تا رطوبت هوای موجود در آن کاملاً تخلیه شود سپس دمای بالن با استفاده از یک حمام روغن در محدوده ۷۵-۷۰ درجه ثابت نگه داشته شد. تولوئن دی ایزوسیانات به تدریج به محیط واکنش اضافه گردید تا واکنش میان گروههای OH



شکل ۲. شماتیک اجزاء لوله امپدانس بر اساس روش تابع انتقال

سیلیکا تغییر کرده است عبارتی تعداد حفرات فوم های نانوکامپوزیت نسبت به فوم خالص بیشتر شده و همزمان، اندازه آنها نیز کوچکتر شده است.

ساخت کشور آمریکا استفاده گردید. قابل ذکر است نمونه ها قبل از ارزیابی با پوشش هادی از طلا پوشیده شدند و در ولتاژ ۱۲/۵ کیلو ولت بررسی و از آنها تصویر تهیه شد.

#### آنالیز آکوستیکی

پس از آماده سازی نمونه ها رفتار جذب صوت آنها از طریق تغییر در مقدار نانوذرات سیلیکا ارزیابی شد. در شکل ۴ نمودار مقایسه ای ضریب جذب برای مقادیر متفاوت نانوذرات سیلیکا در یک ضخامت یکسان در یک سوم اکتاو باند و محدوده فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز نشان ارائه گردیده است.

همانطور که مشاهده می شود بیشترین مقدار جذب صوت برای فوم پلی یورتان خالص در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز، ۰/۳۸ می باشد. برای فوم نانوکامپوزیت حاوی ۱/۵٪ نانوذرات سیلیکا، پیک فرکانسی به سمت فرکانس های پایین کشیده است و برای فرکانس های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز نسبت به سایر درصدهای وزنی بیشترین مقدار را داشته ضمن اینکه، بیشینه جذب صوت در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز رخ داده است. در فرکانس ۱۲۵۰ هرتز جذب صوت برای فوم حاوی ۱٪ وزنی نانوسیلیکا نسبت به درصدهای دیگر به بالاترین میزان ممکن، ۰/۵۶ رسیده است و در درصد وزنی ۲٪ در کل طیف فرکانسی تا ۱۴۵۰ هرتز کمترین مقدار را داشته بعد از آن همواره با افزایش فرکانس به صورت پیوسته افزایش

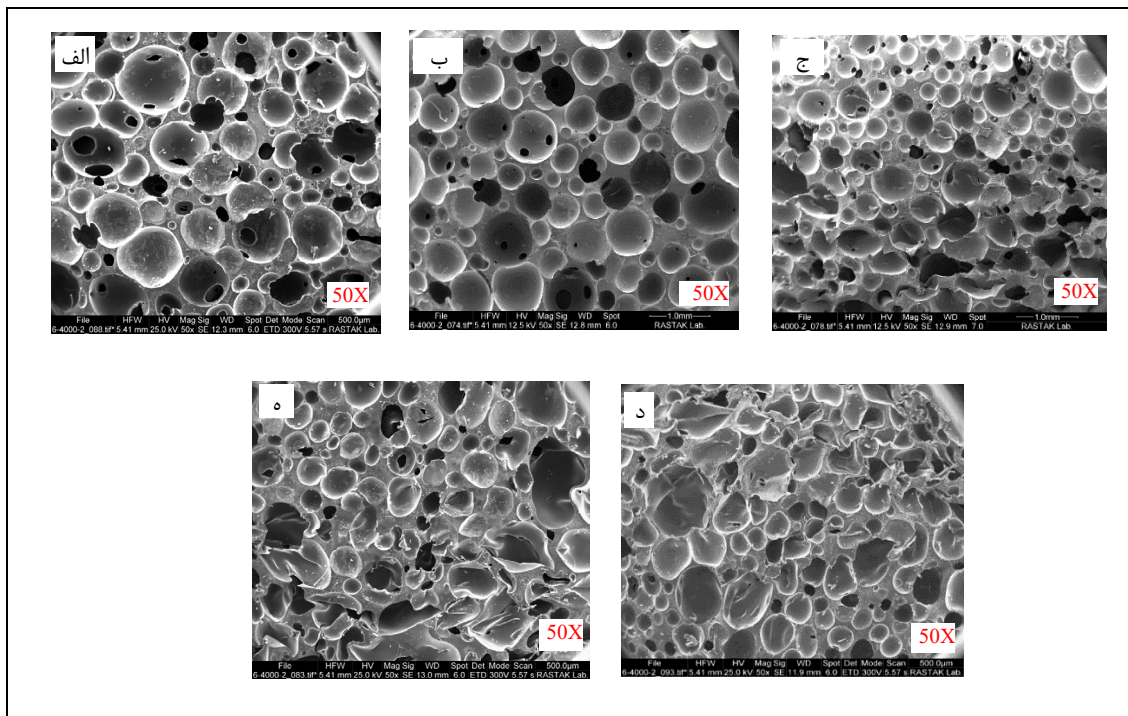
#### آنالیز آکوستیکی

جهت اندازه گیری ضریب جذب صوتی فوم ها از لوله امپدانس مدل SW422 شرکت BSWA ساخت کشور چین براساس استاندارد ISO 2-10534 در محدوده فرکانسی ۱۰۰ الی ۱۶۰۰ هرتز استفاده گردید مطابق شکل ۱ همه نمونه ها ضخامت ۱۰ میلی متر داشتند.

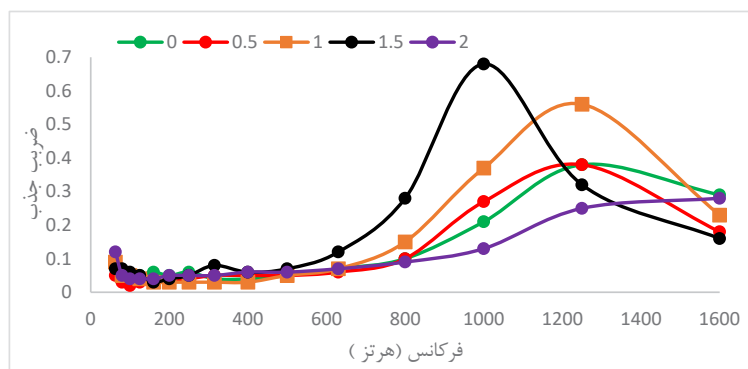
اندازه گیری ضریب جذب صوت مطابق استاندارد در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۴۰٪ و چگالی هوا  $1,2 \frac{kg}{m^3}$  صورت گرفت، که در این شرایط سرعت صوت در هوا  $342 \frac{m}{s}$  و امپدانس صوتی  $413 \frac{pa \cdot s}{m}$  تعیین شد. شکل ۲ شماتیک سنجش ضریب جذب صوت با استفاده از لوله امپدانس بر اساس روش تابع انتقال را نشان می دهد.

#### یافته ها

بررسی مورفولوژی فوم نانوکامپوزیت پلی یورتان تصاویر SEM تهیه شده از نانوکامپوزیت های پلی یورتان با درصدهای مختلفی از نانوذرات سیلیکا بارگذاری شده بر آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مورفولوژی سلول ها با افزودن نانوذرات



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی فوم های نانوکامپوزیت حاوی الف) فوم خالص ب) ۰/۵ درصد نانوسیلیکا ج) ۱ درصد نانوسیلیکا د) ۱/۵ درصد نانوسیلیکا ه) ۲ درصد نانوسیلیکا



شکل ۴. نمودار ضریب جذب صوت فوم نانوکامپوزیت پلی یورتان با مقادیر متفاوت ذرات سیلیکا در طیف فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز

یورتان به ویژه در فرکانس های پایین انجام گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی میکروسکوپی نشان داد که حضور نانوذرات سیلیکا باعث شکل گیری منافذ بیشتر در کامپوزیت های پلی یورتان می شود. طبق تئوری هسته گذاری کلاسیک، عامل اصلی مشخص کننده تعداد حفره های تولیدی در فوم، نرخ هسته گذاری می باشد

یافته تا در فرکانس ۱۶۰۰ هرتز که به ماکزیمم مقدار یعنی ۰/۴۳ رسیده است.

### بحث

مطالعه حاضر با هدف استفاده از مقادیر متفاوت نانوذرات سیلیکا برای بهبود خواص آکوستیک فوم پلی

متخلخل از جمله فوم ها، ناشی از تبدیل انرژی امواج صوتی به انرژی حرارتی در اثر حرکت این امواج در مسیرهای نامنظم درون این مواد و حرکت دادن دیواره های فوم و اصطکاک با آنها و همچنین بازتابها و پراکندگی های متعدد از دیواره ها و لبه های حفره های فوم می باشد در نتیجه هرچه مسیر عبوری موج صوتی در هم پیچیده تر و نامنظم تر باشد احتمال برخورد امواج با طول موج بلندتر در طول مسیر عبوری، بیشتر شده که این افزایش برخوردها منجر به اتلاف صوت بیشتری به خصوص در فرکانس های پایین تر می شود (۱۸).

مطابق شکل ۲ افزایش در جذب صوت در مقایسه با پلیمر خالص می تواند مرتبط با عواملی چون افزایش استحکام دیواره ها، کوچک شدن سایز حفرات و افزایش تعداد سلول ها باشد که حضور نانوذرات در ماتریس پلیمری دلیل بر این افزایش می باشد. زیرا افزایش نانوذرات کرومی مانند سیلیکا باعث افزایش  $\frac{3}{p}$  در نسبت سطح به حجم می شود از اینرو برهمکنش های پلیمر - ذره اهمیت بیشتری پیدا می کند زیرا که کسر بیشتری از پلیمر در نزدیکی سطح ذرات پراکنده با سایز نانو قرار می گیرد، که این باعث افزایش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت نهایی در مقایسه با پلیمر خالص می گردد. نهایتاً این افزایش خواص مکانیکی باعث ایجاد دیواره هایی مستحکم تر نسبت به پلیمر خالص شده، که این افزایش استحکام دیواره منجر به افزایش میرایی صوت از طریق انعکاس و پراکندگی موج صوتی می شود (۱۸، ۱۹).

همچنین هر چه پراکندگی نانوذرات در ماتریس پلیمری یکنواخت تر باشد علاوه بر تقویت بیشتر خواص مکانیکی، اتلاف انرژی به شکل گرما از طریق پدیده هیستریزس افزایش می یابد (۹). از سوی دیگر مطابق آنچه در قبل تر ذکر شد حضور نانوذره باعث کاهش سد انرژی هسته گذاری شده که این کاهش سد انرژی در نرخ هسته گذاری منجر به ایجاد تعداد سلول های بیشتر می شود. طبیعی است که با افزایش تعداد سلول ها حین پروسه هسته گذاری و رشد حفره ها، میزان ثابت گاز

بطوریکه نرخ هسته گذاری بیشتر به معنای تعداد حفره تولیدی بیشتر است. بر اساس این تئوری، افزودن یک فاز جدید باعث تغییر در انرژی آزاد گیبس می شود در واقع افزودن این فاز جدید نیاز به یک انرژی اولیه برای غلبه بر انرژی سطح فاز دارد در نتیجه هرچه انرژی اولیه یا سد انرژی مورد نیاز کمتر باشد نرخ هسته گذاری بیشتر می شود. از این رو در هسته گذاری ناهمگن به دلیل وجود پرکننده ها سد انرژی هسته گذاری کاهش می یابد پس علاوه بر افزایش در نرخ هسته گذاری، رشد همزمان سلول ها هم درون ماتریس پلیمری رخ می دهد. بطور کلی تعداد زیادی از نانو پرکننده ها، سایت های هسته گذاری بیشتری ایجاد می کنند، بنابراین افزودن ذرات معدنی علاوه بر وقوع هسته گذاری ناهمگن و ایجاد سایت های هسته گذاری بیشتر، منجر به افزایش تعداد سلول و متعاقباً کوچکتر شدن سایز سلول ها می شود (۱۵، ۱۶). از سوی دیگر خواص مورفولوژیکی شامل پورسایز و توزیع حفره و منافذ تاثیر مهمی بر جذب صوت فوم های پلی یورتان دارد. توانایی جذب صوت بهتر در فوم های نانوکامپوزیت با سایز کوچک، می تواند مرتبط با دانسیته بالای سلول و در نتیجه اتلاف بیشتر انرژی صوت از طریق میرایی ارتعاش باشد (۱۷).

در شکل ۲ جذب صوت نشان دهنده افزایش قابلیت جذب صوت فوم پلی یورتان در اثر اضافه شدن نانوذرات می باشد. همانطور که مشاهده می شود برای هر درصد وزنی روند خاصی برای جذب صوت در محدوده فرکانسی پایین قابل مشاهده است و با افزایش درصد نانوذرات تا ۱/۵ درصد، بهبود قابل توجهی در جذب صوت رخ داده است. بدین صورت که افزایش ۰/۵ درصد وزنی از نانوذرات سیلیکا تاثیر نسبتاً کمی بر ضریب جذب داشته اما افزودن ۱ درصد وزنی نانوذرات منجر به افزایش مطلوبی در جذب نسبت به فوم خالص شده است، از طرفی برای مقدار پرکننده ۱/۵ درصد از نانوذرات سیلیکا نسبت به سایر درصد های وزنی، بیشترین مقدار ضریب جذب مشاهده گردید. به طور کلی مکانیزم جذب صوت توسط جاذب های

بیشتری جهت انبساط پلیمر در طول فرایند فوم سازی لازم بوده در نتیجه بعلت تاثیر ویسکوزیته ناشی از افزایش مقدار نانوذرات پروسیتی کم می شود که در نهایت امر منجر به کاهش جذب می گردد (۲۰، ۲۲، ۲۴).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که جذب صوت تا یک سطح مشخص از نانوذرات سیلیکا، افزایش قابل توجهی دارد و بعد از رسیدن به یک سطح بهینه افزودن سیلیکای بیشتر در مشخصات جذب صوت تغییری ایجاد نمی کند.

### نتیجه گیری

امروزه علی رغم پیشرفت های صنعتی، مواجهه با صدای بیش از حد مجاز کماکان یکی از معضلات بهداشتی کارگران در دنیا محسوب می گردد در تحقیقات انجام شده مشخص شده است که صدا به عنوان یکی از عوامل زیان آور محیط کار موجب صدمات و اختلالاتی در سلامت جسمی و روحی افراد می شود، بنابراین مطالعات مختلفی در مورد جذب و کنترل صدا انجام شده است. در این خصوص فوم های پلی یورتان به عنوان مواد جاذب برای کنترل صوت و ارتعاش کاربردهای گسترده ای دارند. با توجه به اینکه ویژگی های صوتی فوم های پلی یورتان موجود برای دامنه وسیعی از خواص به اندازه کافی مناسب نمی باشد تا بتوان استفاده کاربردی از آن داشت لذا برای بهبود خواص پلی یورتان توسط تغییرات شیمیایی در ساختار مولکولی و یا افزودن فیلرهای آلی یا غیرآلی مطالعات متعددی صورت گرفته است. بدین منظور، هدف مطالعه حاضر نیز ساخت و بررسی فوم های نانو کامپوزیت پلی یورتان به منظور بهبود جذب صوت بویژه در فرکانس های پایین بوده است. در مطالعه حاضر نتایج حاصل نشان داد که جاذب های صوتی بر پایه کامپوزیت پلی یورتان و نانوذرات سیلیکا توانسته سبب بهبود ضریب جذب صوتی شود و این بهبود در ضریب جذب صوت فوم های نانو کامپوزیت میتواند مرتبط با افزایش سلول، درهم پیچیدگی و نامنظم تر شدن منافذ و استحکام دیواره های سلول باشد.

CO<sub>2</sub> تولیدی، صرف رشد تعداد حفره های بیشتری شده در نتیجه هر حفره سهم کمتری از آن داشته که منجر به تولید حفره هایی با سایز کوچکتر می شود. این افزایش در تعداد سلول ها و کاهش در سایز حفره ها، به منزله وجود مسیرها و کانال های نامنظم و درهم پیچیده بیشتری برای حرکت امواج صوتی در فوم می باشد. در نتیجه امواج صوتی با دیواره ها و لبه های بیشتری اصطکاک داشته و آنها را حرکت می دهند که باعث می شود انرژی صوتی بیشتری در فرکانس پایین به حرارت تبدیل و اتلاف شود (۱۸، ۲۰).

با توجه به تصاویر SEM و شکل ۴، علت افزایش ضریب جذب در درصد وزنی ۱/۵ نسبت به درصدهای وزنی ۰/۵ و ۱ می تواند بدلیل مورفولوژی و ریزساختار فوم ساخته شده باشد زیرا همانطور که در تصاویر SEM مشاهده می شود این درصد وزنی دارای منافذ درهم پیچیده و نامنظم تر بوده و از سوی دیگر پروسیتی بازتری نسبت به سایر درصدهای وزنی داشته است. در ارتباط با جذب صدا در مواد متخلخل با پروسیتی باز می توان چنین بیان کرد که انتشار صدا در شبکه ای از منافذ بهم متصل رخ می دهد به طوری که اتلافات ویسکوز و حرارتی باعث تبدیل انرژی صوتی به انرژی حرارتی می شود (۹، ۲۱). همچنین علت اینکه با افزایش درصد وزنی از ۱،۵٪ به ۲٪ مقدار جذب فوم نانو کامپوزیت از فوم خالص کمتر شده است می تواند افزایش ویسکوزیته باشد (۲۲).

همانطور که در بالا ذکر گردید نانوذرات پرکننده بعلت مساحت سطح به حجم بالایی که دارند می توانند در طول فرایند فوم سازی به عنوان عامل هسته گذاری حباب به طور موثر عمل کنند و منجر به افزایش پروسیتی شوند با این وجود ویسکوزیته پلیمر نقش مهمی در انبساط حباب ها در طول فرایند فوم سازی دارد. با افزایش مقدار نانوذرات به ۲درصد، افزایش ویسکوزیته رخ داده که می توان آنرا را مرتبط با ایجاد باندهای هیدروژنی بیشتر بین گروه های هیدروکسیل پلی ال و ذرات نانو سیلیکا دانست (۲۳). طی افزایش ویسکوزیته، پلیمر در برابر تغییر شکل به مقدار زیادی مقاومت کرده پس، نیروی

حمایت دانشگاه علوم پزشکی تهران انجام شده است. لذا نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی را از دانشگاه علوم پزشکی تهران به دلیل حمایت مالی، ابراز می نمایند.

## REFERENCES

1. Kalantary S, Dehghani A, Yekaninejad MS, Omid L, Rahimzadeh M. The effects of occupational noise on blood pressure and heart rate of workers in an automotive parts industry. *ARYA atherosclerosis*. 2015;11(4):215.
2. He L, Liu F, Liu T, Chen F, Fang P. Preparation, structure, and properties of polyurethane foams modified by nanoscale titanium dioxide with three different dimensions. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 2012;17(5):377-82.
3. Bandarian M, Shojaei A, Rashidi AM. Thermal, mechanical and acoustic damping properties of flexible open-cell polyurethane/multi-walled carbon nanotube foams: effect of surface functionality of nanotubes. *Polymer International*. 2011;60(3):475-82.
4. Kalantary S, Golbabaie F, Yazdanirad S, Farhang Dehghan S. Review of literature on occupational exposure to the dusts in Iran over the past 14 years. *JOURNAL OF HEALTH AND SAFETY AT WORK*. 2019.
5. Gayathri R, Vasanthakumari R, Padmanabhan CJIJoS, Research E. Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. 2013;4(5):301-8.
6. Yazdanirad S, Kalantary S, Golbabaie F. Investigation of occupational studies performed by environmental heat stress indices in Iran: A systematic review. *Health and Safety at Work*. 2019;9(4):265-82.
7. Pourhassan B, Golbabaie F, Pourmand MR, Farhang Dehghan S, Masoorian E. Examining performance of the conventional and photocatalytic HEPA filters on removal of the airborne microorganisms. *Health and Safety at Work*. 2018;8(3):251-64.
8. He L, Liu F, Liu T, Chen F, Fang PJWUJoNS. Preparation, structure, and properties of polyurethane foams modified by nanoscale titanium dioxide with three different dimensions. 2012;17(5):377-82.
9. Lee J, Kim GH, Ha CS. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *Journal of applied polymer science*. 2012;123(4):2384-90.
10. Verdejo R, Stämpfli R, Alvarez-Lainez M, Mourad S, Rodriguez-Perez M, Brühwiler P, et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. 2009;69(10):1564-9.
11. Moradi G, Nassiri P, Ershad-Langroudi A, Monazzam MRJHS. Preparation of Sound Absorption Material Based on Interpenetrating Polymer Network (PU/PMMA IPN). 2018(In Press).
12. Heintz AM, Duffy DJ, Hsu SL, Suen W, Chu W, Paul CWJM. Effects of reaction temperature on the formation of polyurethane prepolymer structures. 2003;36(8):2695-704.
13. Xiong J, Zheng Z, Qin X, Li M, Li H, Wang XJC. The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite. 2006;44(13):2701-7.
14. Omid F, Fallahzadeh RA, Dehghani F, Harati B, Barati Chamgordani S, Gharibi V. Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of exposure to volatile organic compounds (BTEX) using Monte-Carlo simulation technique in a steel industry. *Health and Safety at Work*. 2018;8(3):299-308.
15. Shafi M, Joshi K, Flumerfelt R. Bubble size distributions in freely expanded polymer foams. *Chemical Engineering Science*. 1997;52(4):635-44.
16. Wee D, Seong DG, Youn JR. Processing of microcellular nanocomposite foams by using a supercritical fluid. *Fibers and Polymers*. 2004;5(2):160.
17. Sung CH, Lee KS, Lee KS, Oh SM, Kim JH, Kim MS, et al. Sound damping of a polyurethane foam nanocomposite. 2007;15(5):443-8.
18. Bahrambeygi H, Sabetzadeh N, Rabbi A, Nasouri K, Shoushtari AM, Babaei MR. Nanofibers (PU and PAN) and nanoparticles (Nanoclay and MWNTs) simultaneous effects on polyurethane foam sound absorption. *Journal of Polymer Research*. 2013;20(2):72.
19. Mortezaei M, Famili MHN, Kokabi M. Influence of the

## تشکر و قدردانی

مقاله حاضر حاصل طرح مصوب دانشگاه علوم پزشکی تهران با کد ۳۵۹۷۳-۲۷-۰۳-۹۶ میباشد که با

- particle size on the viscoelastic glass transition of silica-filled polystyrene. *Journal of applied polymer science*. 2010;115(2):969-75.
20. Sung G, Kim JW, Kim JH. Fabrication of polyurethane composite foams with magnesium hydroxide filler for improved sound absorption. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2016;44:99-104.
21. Gayathri R, Vasanthakumari R, editors. Nanomaterials in PU foam for enhanced sound absorption at low frequency region. *Advanced Materials Research*; 2014: Trans Tech Publ.
22. Liu T, Mao L, Liu F, Jiang W, He Z, Fang P. Preparation, structure, and properties of flexible polyurethane foams filled with fumed silica. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 2011;16(1):29-32.
23. Rad AS, Ardjmand M. Use and Effect of Si/Silica Nano Materials in Polyurethane's Structure. *Asian Journal of Chemistry*. 2009;21(5):3313.
24. Willemsen AM, Rao MD. Sound absorption characteristics of nanocomposite polyurethane foams infused with carbon nanotubes. *Noise Control Engineering Journal*. 2015;63(5):424-38.