

Polymerization
Quarterly, 2021
Volume 11, Number 3
Pages 14-21
ISSN: 2252-0449

Effect of Nanoparticles on Acoustics Properties of Polyurethane Foam

Mohammad Amin Abbaszadeh and Amir Ershad-Langroudi*

Department of Color, Resin and Coatings, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 6 December 2020, Accepted: 7 February 2020

Abstract

Nowadays, with the increase of population growth and development of industry, noise pollution is increasing, which has been the source of many social and urban anomalies. In addition, noise pollution causes exhaustion and decrease workers productivity in the workplace. Sound is a mechanical wave that requires an environment to transmit. Polymers minimize and remove wave energy due to their viscoelastic properties, especially in viscous regions. This is done through the viscous loss and the sound is absorbed. The literature review shows that the addition of nanoparticles improves the properties of polyurethane foams, especially their acoustic properties. These nanoparticles increase the sound propagation paths through the polymer sample and increase the probability of sound wave attenuation through viscous loss. Depending on the aspect ratio, nanoparticles are divided into various forms including plate-like nanoparticles such as graphene and graphene oxide, nanotubes containing carbon nanotubes and particulate nanoparticles containing metal oxides such as zinc oxide and nanoclays that examined by many researchers to study the effect of each of these nanoparticles on sound absorption in polyurethane foam samples. In this article, first the sound and its properties, then polyurethane as one of the most important members of the polymer family are discussed. Also, among the various forms of polyurethane, polyurethane foams is reviewed.

Key Words

acoustics,
polyurethane,
foam,
nanoparticle,
nanocomposite

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.ershad@ippi.ac.ir

اثر نانوذرات بر خواص آکوستیکی اسفنج پلی یورتان

محمد امین عباسزاده، امیر ارشاد لنگرودی*

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند پلیمرها، گروه رنگ، رزین و روکش های سطح،

صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

در عصر حاضر با افزایش جمعیت و پیشرفت صنعت، آلودگی صوتی که منبع بسیاری از ناهنجاری های اجتماعی و شهری بوده، در حال افزایش است. افزون بر این، آلودگی صوتی باعث خستگی و کاهش بازده کارگران در محیط های کاری می شود. صوت، نوعی موج مکانیکی است که برای انتقال، نیاز به محیط دارد. پلیمرها به خاطر خواص گرانبوی کشسانی، به ویژه در نواحی گرانبوی انرژی موج را کاهش می دهند و از بین می برند. این کار از طریق اتلاف گرانبوی انجام شده و صدا جذب می شود. مرور مقالات نشان می دهد، اضافه کردن نانوذرات باعث بهبود خواص اسفنج های پلی یورتان، به ویژه خواص آکوستیکی آن ها می شود. این نانوذرات با افزایش مسیرهای عبور صوت از نمونه پلیمری، احتمال میرایی موج صوتی را از طریق اتلاف گرانبوی افزایش می دهند. با توجه به نسبت ابعادی، نانوذرات به انواع مختلف نانوذرات صفحه ای مثل گرافن و گرافن اکسید، نانوذرات لوله ای شامل نانولوله های کربنی و نانوذرات ذره ای شامل اکسیدهای فلزی مانند روی اکسید و نانورس ها دسته بندی می شوند. پژوهشگران بسیاری اثر هر یک از این نانوذرات را بر جذب صوت در نمونه اسفنج پلی یورتان بررسی کرده اند. در این مقاله، ابتدا صوت و ویژگی های آن بیان شده و سپس به پلی یورتان به عنوان یکی از مهم ترین عضوهای خانواده پلیمرها پرداخته شده است. همچنین از میان شکل های مختلف پلی یورتان، اسفنج های پلی یورتان بررسی شده اند.

چکیده



محمد امین عباسزاده



امیر ارشاد لنگرودی

واژگان کلیدی

آکوستیک،
پلی یورتان،
اسفنج،
نانوذره،
نانو کامپوزیت

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

a.ershad@ippi.ac.ir

مقدمه

کشسان را شامل می‌شود. صوت نوعی انرژی مکانیکی محسوب می‌شود و هنگامی به وجود می‌آید که ذرات حول مرکز تعادل خود نوسان کنند [۳]. مهم‌ترین پارامترهای توصیف صوت شامل طول موج (λ)، بسامد (f)، دامنه نوسان (d)، سرعت موج (c) و غیره هستند. بسامد، پارامتر موج یا هر ذره نوسان‌کننده بوده و عبارت از تعداد نوسان ذره نوسان‌کننده در هر ثانیه که برحسب Hz بیان می‌شود. طول موج، فاصله ذرات همفاز است، برای مثال، فاصله ذراتی که همگی در حداکثر دامنه نوسان قرار دارند که برحسب m بیان می‌شود. در واقع، طول موج مسافتی است که موج صوتی هنگام کامل کردن یک چرخه طی می‌کند و حاصل تقسیم سرعت صوت بر بسامد آن است. دامنه نوسان (d) به صورت حداکثر فاصله جابه‌جایی ذره نوسان‌کننده از مرکز نوسان است و با واحد متر (m) بیان می‌شود [۳].

سرعت صوت فاصله‌ای است که یک موج صوتی در مدت زمان $1 s$ در یک سیال می‌پیماید. سرعت صوت از یک ماده به ماده دیگر متفاوت است. صوت در مایعات و جامدات نامتخلخل سریع‌تر از هوا حرکت می‌کند. می‌توان گفت، سرعت صوت در آب حدود $3-4$ برابر ($1484 m/s$) و در آهن تقریباً 15 برابر ($5120 m/s$) سرعت آن در هوای $20^\circ C$ است. صوت از محیط‌های غیرمادی نمی‌تواند عبور کند. با توجه به ماهیت مکانیکی امواج صوتی و از آنجا که هر موج انرژی به‌شمار می‌رود، صوت نیز انرژی مکانیکی است که به آن انرژی آکوستیک می‌گویند. مقدار انرژی خروجی در واحد زمان از منبع صوتی را توان صوتی می‌نامند که واحد آن W است. فشار آکوستیکی عبارت از مجذور میانگین مربعات اختلاف فشار صوت با فشار اتمسفر است که به وسیله عبور صوت از یک فضا پدید آمده و با واحد Pa اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که صوت منتشر می‌شود، انرژی آن در طول فاصله کم می‌شود. برای اندازه‌گیری شدت صوت در فاصله‌های مختلف، از متغیر سطح فشار صوت استفاده می‌شود. شدت صوت به صورت مقدار متوسط انرژی که صوت در واحد سطح در یک راستای مشخص منتقل می‌کند، تعریف می‌شود که واحد آن W/m^2 است. سطح شدت صوت با dB نسبت به یک سطح مرجع بیان می‌شود.

سازوکار انتقال صوت

معمولاً دو نوع سازوکار انتقال صوت شامل هوابرد و ضربه وجود دارد [۱۱، ۱۲]. در سازوکار هوابرد، آلودگی صوتی مستقیم از راه هوا از منبع صوتی مانند سروصدای خودروها در خیابان، تجهیزات مکانیکی، سامانه‌های تهویه و سامانه سینمای خانگی همسایه مجاور

صوت و آلودگی صوتی دو مفهومی است که با پیشرفت بشر بیش از پیش مطرح شده‌اند. با پیشرفت تمدن و صنعت، آلودگی صوتی بیشتر شده است [۱]. منظور از آلودگی صوتی امواج ناخواسته‌ای است که در شرایط مکانی و زمانی ویژه بر فعالیت موجودات زنده، مخصوصاً انسان، اثر می‌گذارند و می‌توانند عوارض متعدد جسمی و روحی، به‌ویژه اختلال در اعصاب شنوایی را ایجاد کنند [۲]. صوت نوعی موج مکانیکی است که قوانین فیزیک حاکم بر امواج مکانیکی آن را کنترل می‌کنند [۳]. صوت برای انتشار به محیط نیاز دارد. با افزایش چگالی محیط، سرعت صوت بیشتر می‌شود، به طوری که سرعت انتشار آن در زیر آب حدود 5 برابر سرعت انتشار آن در هواست [۴]. انتشار صوت بسته به اینکه در محیط باز یا بسته انجام پذیرد، رفتار متفاوتی دارد. در یک محیط باز امواج صوتی بدون برخورد با مانع، روند انتشار را تا مرز میرایی ادامه می‌دهند [۵]. شرایط محیط اثر انکارناپذیری بر چگونگی انتشار صوت دارند. گرچه انسان به سروصدا عادت دارد، ولی درحقیقت آلودگی صوتی عامل خستگی بوده و ظرفیت کار انسان را چه در مشاغل فکری و چه بدنی و ساده کاهش می‌دهد [۶].

روش‌های متعددی برای کنترل صوت مطرح شده‌اند که از میان آن‌ها، استفاده از پلیمرها به دلیل رفتار گرانبه‌کشانایی این مواد جایگاه ویژه‌ای یافته است [۷]. از آنجا که صوت موج مکانیکی است، با ورود به محیط گرانبه، انرژی آن تلف می‌شود و از بین می‌رود. اما استفاده از محیط گرانبه، به دلیل نداشتن خواص مکانیکی مناسب برای کاربرد، ناممکن است. بنابراین، پلیمرها که هم رفتار گرانبه و هم خواص مکانیکی درخور توجهی دارند، جایگاه ویژه‌ای در جلوگیری از انتشار صوت پیدا کرده‌اند [۸]. با در نظر گرفتن نقش چگالی و رفتار گرانبه‌کشانایی پلیمرها، بهترین گزینه برای جلوگیری از انتشار امواج صوتی اسفنج‌ها هستند [۹]. اسفنج‌های پلی‌یورتان یکی از پرکاربردترین خانواده مواد پلیمری هستند که به دلیل ویژگی‌های درخور ملاحظه آن‌ها مانند وزن سبک، چگالی کم، دوست‌دار محیط زیست بودن، جذب ضربه و کشسانی درخور توجه، به طور گسترده در پدیده جذب صوت به کار گرفته شده‌اند [۱۰]. در این مقاله، صوت و عوامل مؤثر بر جذب آن، نقش اسفنج‌های پلی‌یورتان و اثر نانوذرات بر صوت بررسی می‌شود.

مفهوم صوت

در فیزیک، صوت ارتعاش مکانیکی یک فضای گازی، مایع یا جامد

منتقل می‌شود. در سازوکار ضربه، آلودگی صوتی از درون خود اجزای سازه منتقل می‌شود، مانند صدای قدم‌زدن افراد واحدهای بالاسر، ضربه به دیوار مجاور و بستن درب [۱۱].

سازوکارهای جذب صوت

اتلاف گرانو

در هنگام برخورد صوت با مواد دارای خاصیت گرانروی کشسانی، به علت وجود پیوندهای عرضی کم و سرخوردن زنجیرها روی یکدیگر انرژی صوت جذب می‌شود و مواد در اثر خاصیت گرانو با ایجاد مقاومت در برابر جریان باعث اتلاف انرژی موج صوتی می‌شوند. پدیده اصطکاک در بسامدهای کم دارای اهمیت است، بدین علت که اثر ورودی کم بوده، اما کشش گرانو نسبتاً زیاد است [۱۳].

اتلاف گرمایی

برخورد امواج به زنجیرهای پلیمری باعث ایجاد ارتعاش آن‌ها می‌شود، در نتیجه انرژی صوت صرف ارتعاش زنجیرها می‌شود. در این باره، استحکام زنجیرهای پلیمری و همچنین دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر بسیار مهم است. دمای انتقال شیشه‌ای بسیار زیاد باعث می‌شود تا زنجیرهای پلیمر نتوانند در هنگام اعمال تنش از راه ارتعاش باعث اتلاف انرژی آن شوند [۱۳].

پلی یورتان و جذب صوت

تاکنون بیشترین پژوهش‌ها درباره اسفنج‌های پلی یورتان، به دلیل خواص بی نظیر مانند وزن سبک، دوست‌دار محیط زیست بودن، چگالی کم، جذب ضربه و شوک، فرایندپذیری و خاصیت کشسانی زیاد و نیز کاربردهای متعدد آن‌ها انجام شده است [۱۰]. پلی یورتان اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط اتو بایر ساخته شد و به عنوان یکی از مهم‌ترین خانواده‌های پلیمرها به شمار می‌آید [۱۴]. در طول سال‌ها، روش‌های مختلفی برای ساخت اسفنج‌های پلی یورتان به منظور دستیابی به خواص مطلوب استفاده شده‌اند. طیف گسترده‌ای از پلی‌ال‌ها و ایزوسیانات‌ها می‌توانند به عنوان مواد اولیه برای ساخت پلی یورتان استفاده شوند [۱۵، ۱۶]. خواص پیش‌گفته موجب شده‌اند تا پژوهشگران و تولیدکنندگان از پلی یورتان در کاربردهای وسیعی مانند دباغی، خودروها، مبلمان، یخچال‌ها، حمل و نقل، مواد عایق و کاربردهای دریایی استفاده کنند. چنین گستره وسیعی از کاربردها با تغییر مواد اولیه (پلی‌ال و ایزوسیانات) ممکن شده است [۱۵]. از این رو، پلی یورتان را

می‌توان در حالت‌های مختلف مثل مایعات گرانو، اسفنج‌های نرم با چگالی کم و اسفنج‌های انعطاف‌پذیر، نیمه انعطاف‌پذیر و سخت تولید کرد [۱۵]. اسفنج‌های پلی یورتان را می‌توان با چگالی‌های مختلف از 10 kg.m^{-3} تا 800 kg.m^{-3} تولید کرد. جدا از خواص بی نظیر، مزیت اصلی دیگر پلی یورتان، قیمت مناسب نسبت به خواص آن است که تولیدکنندگان را مجاب کرده است تا از این ماده به عنوان جایگزینی برای سایر پلیمرهای از پیش شناخته شده، استفاده کنند. پلیمری با دمای انتقال شیشه‌ای در محدوده دمای کارکرد، بیشترین اتلاف و جذب صوت را در دمای کارکرد دارد. از میان پلیمرهای شناخته شده فقط پلی یورتان‌ها هستند که می‌توان بدون اضافه کردن افزودنی و فقط با تغییر نوع و نسبت پلی‌ال به ایزوسیانات، دمای انتقال شیشه‌ای آن‌ها را تغییر داد و در عین حال خواص مکانیکی آن‌ها چندان کاهش نیابد. این نوع تغییر آسان دمای انتقال شیشه‌ای، مهم‌ترین علت انتخاب پلی یورتان‌ها از میان پلیمرها برای جذب صوت است.

از روش‌های تولید پلی یورتان با استحکام بیشتر، استفاده از تقویت‌کننده‌های مختلف مانند نانوذرات است. بسته به نوع تقویت‌کننده، کامپوزیت حاصل شده ویژگی‌های متفاوتی نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران پلی یورتان را با استفاده از نانوذرات مختلف تقویت کرده‌اند و خواص نانوکامپوزیت آن را افزایش داده‌اند [۱۱، ۱۷].

اسفنج‌های پلیمری گرانوکشسان با توجه به عملکرد فوق‌العاده‌ای که در جذب صوت دارند، به عنوان جاذب صوت برای سروصدا استفاده می‌شوند. پلیمرهای گرانوکشسان از جمله پلی یورتان، قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی به گرما را دارند [۱۸]. در این نوع اسفنج‌ها، ساختار یورتانی نقش فاز جامد و هوا فاز سیال را به عهده دارد. در واقع، وجود هم‌زمان ساختار انعطاف‌پذیر یورتانی با هوا، این اسفنج‌ها را بهترین محیط برای میرایی انرژی صوت ساخته است. صرف‌نظر از انتشار موج صوتی در یک ساختار متخلخل، سازوکارهای متفاوتی برای میرایی انرژی صوتی وجود دارد. تغییر شکل ساختار جامد و حفره‌ها به وسیله موج صوتی، اصطکاک گرانو میان زنجیرهای پلیمر و اصطکاک بین مولکول‌های هوا در سلول‌ها به اتلاف انرژی به صورت گرما منجر می‌شود. بازتاب و پخش موج صوتی که در دیواره سلول‌ها اتفاق می‌افتد، سازوکار دیگری برای تضعیف انرژی صوت است. وجود مسیرهای پرپیچ و خم در پیش روی موج صوتی در حال انتقال در محیط متخلخل، سازوکار میرایی را در هر سلول تکرار می‌کند که نتیجه آن جذب انرژی صوتی است [۱۹].

نقش نانوذرات در خواص آکوستیک

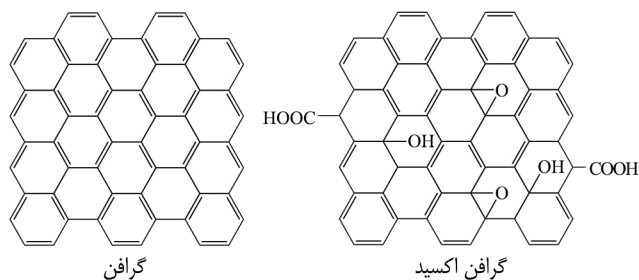
افزودن نانوذرات به مخلوط‌های پلیمری، بهبود درخور توجهی در خواص مکانیکی، گرمایی و صوتی نشان داده است. خواص نامطلوب پلی‌یورتان معمولی مانند جذب ضعیف انرژی مکانیکی در گستره باریک بسامدی می‌تواند به کمک تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری بهبود یابد [۱۸]. صرف نظر از خواص آکوستیکی، اسفنج‌های پلی‌یورتان نیمه سلول‌باز که حاوی انواع متفاوتی از نانوذرات هستند، افق جدیدی را به سمت مواد با قابلیت جذب صوت زیاد ایجاد کرده‌اند.

افزون بر نوع نانوذرات، پارامترهای دیگری هستند که می‌توانند بر قابلیت نهایی اسفنج‌های نانوکامپوزیتی مؤثر باشند. برای مثال، استفاده از درصد‌های بارگذاری متفاوت نانوذرات به بهبود خواص نهایی در سطوح مختلف منجر شده است [۱۸]. کسر بارگذاری، درصد وزنی نانوذرات را بر وزن کلی نمونه نشان می‌دهد. مقدار کم و ناکافی بارگذاری ممکن است باعث برهم‌کنش ضعیف میان زنجیر پلیمر و نانوذرات شود، که نتیجه آن بهبود کم خواص صوتی است [۲۰].

از سوی دیگر، مقدار زیاد نانوذرات نیز رضایت‌بخش نیست، چراکه آن‌ها تمایل زیادی به جمع شدن و تشکیل کلوخه دارند. کلوخگی نانوذرات در ماتریس پلیمری ممکن است، باعث قرارگیری روی هم ساختارهای اسفنج در حین فرایند تولید شود. افزون بر کسر بارگذاری، اندازه نانوذرات یکی دیگر از پارامترهای برهم‌کنش میان نانوذرات و زنجیر پلیمری است [۲۰].

خواص مکانیکی نیز از ویژگی‌هایی است که پژوهشگران حوزه نانوکامپوزیت به آن علاقه دارند. پژوهشگران متعددی برای دست‌یابی به خواص مکانیکی بهتر در اسفنج‌های انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان از نانوذرات استفاده کرده‌اند [۹]. در برخی از این پژوهش‌ها، تقویت ماتریس با بهبود میرایی صوتی همراه بوده [۹]، ولی در برخی دیگر قابلیت جذب صوت با خواص مکانیکی همسو نبوده است [۲۰].

انتشار صوت در مواد متخلخل انعطاف‌پذیر با مدل‌های مختلف تحلیل شده است [۱۹]. در همه این مدل‌ها از پارامترهای توصیفی مانند درجه تخلخل (ϕ)، مقاومت جریان هوا (σ)، پیچ و خم (α_m)، طول ناحیه گرانو (Λ) و طول ناحیه گرمایی (Λ') استفاده شده است که پارامترهای غیرصوتی نامیده شده‌اند. خواص صوتی مواد متخلخل مانند ضریب جذب صوت به وسیله پارامترهای غیرصوتی کنترل می‌شوند و هر تغییری در آن‌ها باید با تغییر این پارامترها دیده شود.



شکل ۱- ساختار شیمیایی گرافن و گرافن اکسید.

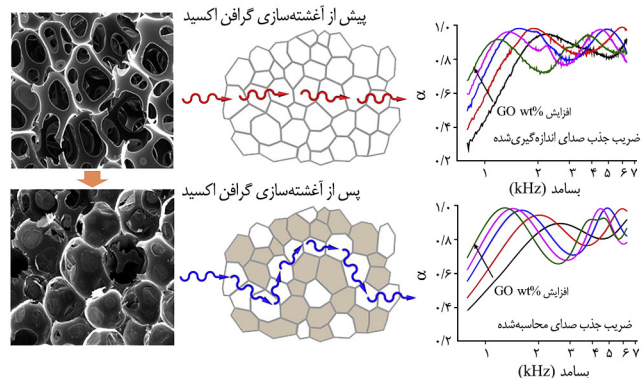
انواع نانوذرات

انواع مختلفی از پرکننده‌ها با اندازه‌های نانو و میکرو به منظور کنترل خواص صوتی در اسفنج‌های پلیمری ارائه شده‌اند [۹، ۲۱]. با این حال سه نوع پرکننده مانند نانوذرات صفحه‌ای [۲۲]، نانولوله‌ها [۲۳، ۲۴] و نانوذرات کروی [۲۴] به طور گسترده به منظور افزایش میرایی اسفنج‌های پلی‌یورتان استفاده شده‌اند. مهم‌ترین عوامل برای داشتن مواد نانوکامپوزیتی مناسب، مقدار پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری و برهم‌کنش مناسب بین نانوذرات و پلیمر است. گاهی نانوذرات اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی شیمیایی، کارایی بهتری در مقایسه با پرکننده‌های اصلاح‌نشده نشان می‌دهند [۲۰، ۲۳].

نانوذرات صفحه‌ای

مهم‌ترین نانوذرات صفحه‌ای، گرافن و گرافن اکسید هستند. هر دو این نانوذرات وقتی به ماتریس پلیمری اسفنج پلی‌یورتان اضافه می‌شوند، خواص جذب صوت را به‌علت ساختار شیمیایی و خواص مکانیکی ذاتی به شدت بهبود می‌دهند. شکل ۱ ساختار شیمیایی این دو نوع نانوذره را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، افزودن این دو نوع نانوذره به ماتریس پلیمری باعث افزایش مسیرهای پریچ و خم



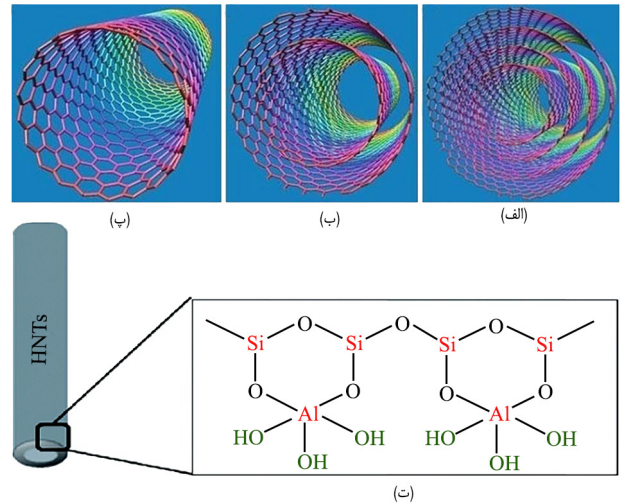
شکل ۲- سازوکار افزایش جذب صوت به وسیله نانوذرات [۲۵].

نانوذرات ذره‌ای

این نانوذرات که معمولاً اکسیدهای فلزی مانند ZnO_2 ، TiO_2 و غیره هستند، در بین نانوذرات کمترین مساحت ویژه را دارند، چراکه معمولاً کروی هستند. آن‌ها به دلیل قطبیتی که دارند، معمولاً با گروه عاملی یورتانی در اسفنج پلی‌یورتان برهم‌کنش خوبی می‌دهند [۹] و از طریق افزایش تعداد مسیرهای عبور صوت از نمونه باعث کاهش انرژی و جذب صوت می‌شوند. پژوهشگران زیادی اثر این نانوذرات را بر جذب صوت بررسی کرده‌اند [۲۷، ۲۸]. آن‌ها به دلیل سطح ویژه کمتر و نسبت طول به عرض نزدیک به یک نسبت به نانوذرات لوله‌ای و صفحه‌ای تمایل کمتری به کلوخگی دارند و در نسبت‌های وزنی بیشتر نسبت به سایر نانوذرات در ماتریس پلیمر استفاده می‌شوند. البته باید در نظر گرفت، گاهی علت استفاده از نانوذرات ذره‌ای با نسبت وزنی بیشتر، صرفاً چگالی ذاتی بیشتر آن‌هاست. زیرا این نانوذرات معمولاً معدنی هستند که این چگالی زیاد نیاز به وزن بیشتری را برای جبران حجم و سطح مورد نیاز مطرح می‌کند. گاهی به دلیل جدایش فازی و پراکنش نامناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری، آن‌ها را با استفاده از گروه‌های عاملی سازگار با ماتریس پلیمر اصلاح می‌کنند. مقالات متعددی درباره نانوذرات اصلاح شده به منظور بهبود پراکنش و ضریب جذب صوت منتشر شده است [۲۹، ۳۰].

نتیجه‌گیری

صوت نوعی موج مکانیکی است که برای عبور نیاز به محیط مادی دارد. صوت در هوا با به ارتعاش درآوردن مولکول‌های آن منتقل می‌شود. سرعت صوت در محیط‌های چگال‌تر، بیشتر است. اسفنج‌های پلی‌یورتان که کاربردهای گسترده‌ای دارند، به عنوان یکی از بهترین مواد برای جذب صوت به شمار می‌روند. صوت در اسفنج‌های پلی‌یورتان به دو صورت جذب می‌شود. اسفنج پلی‌یورتان شامل دو فاز گرانرو (ماتریس پلیمری) و سیال (حفره‌های حاوی هوا) است. صوت در اسفنج‌های پلی‌یورتان از راه اتلاف گرمایی در فاز سیال و دادن انرژی به مولکول‌های هوا و از طریق اتلاف گرانرو در فاز گرانرو جذب می‌شود. هر قدر مسیر عبور صوت از نمونه اسفنج پلی‌یورتان بیشتر باشد، جذب صوت نیز افزون‌تر می‌شود. افزودن نانوذرات به اسفنج‌های پلی‌یورتان، تعداد مسیرهای عبور صوت از نمونه را بیشتر و طولانی‌تر کرده و جذب را بیشتر می‌کند. نوع نانوذره



شکل ۳- ساختار شیمیایی نانولوله‌های: کربنی (الف) چنددیواره، (ب) دودیواره و (پ) تک‌دیواره و (ت) غیرکربنی هالوسیت [۲۶].

در ماتریس پلیمر شده و از این طریق باعث افزایش جذب صوت می‌شود [۲۵]. افزون بر کنترل جهت‌گیری نانوذرات با ابعاد کم مانند گرافن و گرافن اکسید، دوباره جمع شدن، هم‌ترازی و پراکنش این نانوذرات چالشی در تهیه اسفنج‌های جاذب صوت به شمار می‌رود.

نانوذرات لوله‌ای

نانوذرات لوله‌ای به صورت کربنی و غیرکربنی وجود دارند [۲۶]. نانولوله‌های کربنی براساس ضخامت دیواره آن‌ها به تک‌دیواره، دودیواره و چنددیواره دسته‌بندی می‌شوند [۲۶]. مهم‌ترین نانولوله غیرکربنی، نانولوله هالوسیت است. شکل ۳ ساختار این نانوذرات را نشان می‌دهد.

پژوهشگران بسیاری اثر نانولوله‌های کربنی را بر جذب صوت بررسی کرده‌اند [۲۰، ۲۳]. افزودن این نانوذرات بر تعداد مسیرهای عبور صوت از اسفنج اثر می‌گذارد و بدین ترتیب موجب افزایش جذب صوت می‌شود. این نانولوله‌ها، مساحت ویژه زیادی دارند و از این طریق برهم‌کنش زیادی با زنجیرهای پلیمر ایجاد می‌کنند. نانولوله‌ها را به صورت اصلاح‌نشده [۱۸، ۲۰] یا اصلاح‌شده [۲۳] می‌توان استفاده کرد. بندریان و همکاران نشان داده‌اند، اصلاح نانولوله‌های کربنی با گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمیدی، ضریب جذب صوت را به مقدار درخور توجهی افزایش می‌دهد [۲۳]. آن‌ها همچنین مشاهده کردند، اصلاح نانولوله‌های کربنی با گروه‌های کربوکسیلی اثر بیشتری از دو روش دیگر اصلاح دارد، که علت آن می‌تواند پراکنش بهتر و برهم‌کنش بیشتر با ماتریس اسفنج پلی‌یورتان باشد.

اثرگذار بر جذب صوت در اسفنج های پلی یورتان هستند.

(صفحه ای، لوله ای و ذره ای)، پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمر و برهم کنش های نانوذرات با زنجیرهای پلیمری از عوامل

مراجع

- Zangiabadi Z. and Hadianfard M.J., The Role of Hollow Silica Nanospheres and Rigid Silica Nanoparticles on Acoustic Wave Absorption of Flexible Polyurethane Foam Nanocomposites, *J. Cell. Plast.*, **56**, 395–410, 2020.
- Fuente A. and Hickson L., Noise-Induced Hearing Loss in Asia, *Int. J. Audiol.*, **50**, 3–10, 2011.
- Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., and Sanders J.V., *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., Wiley, 1999.
- Spiesberger J.L. and Metzger K., New Estimates of Sound Speed in Water, *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 1697–1700, 1991.
- Cox E.F., Sound Propagation in Air, In *Geophys. II/Geophysics II*, Springer, 455–478, 1957.
- Jazani R.K., Saremi M., Rezapour T., Kavousi A., and Shirzad H., Influence of Traffic-Related Noise and Air Pollution on Self-Reported Fatigue, *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, **21**, 193–200, 2015.
- Ivansson S.M., Sound Absorption by Viscoelastic Coatings with Periodically Distributed Cavities, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**, 3558–3567, 2006.
- Sperling L.H., Sound and Vibration Damping with Polymers: Basic Viscoelastic Definitions and Concepts, ACS, USA, 1990.
- Moradi G., Monazzam M., Ershad-Langroudi A., Parsimeher H., and Keshavarz S.T., Organoclay Nanoparticles Interaction in PU: PMMA IPN Foams: Relationship between the Cellular Structure and Damping-Acoustical Properties, *Appl. Acoust.*, **164**, 107295, 2020.
- Bhinder J. and Agnihotri P.K., Effect of Carbon Nanotube Doping on the Energy Dissipation and Rate Dependent Deformation Behavior of Polyurethane Foams, *J. Cell. Plast.*, **57**, 287-311, 2021.
- Oppenheimer C.H. and Dubowsky S., A Methodology for Predicting Impact-Induced Acoustic Noise in Machine Systems, *J. Sound Vib.*, **266**, 1025–1051, 2003.
- Vinokur R., Mechanism and Calculation of the Niche Effect in Airborne Sound Transmission, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**, 2211–2219, 2006.
- Nachman A.I., Smith III J.F., and Waag R.C., An Equation for Acoustic Propagation in Inhomogeneous Media with Relaxation Losses, *J. Acoust. Soc. Am.*, **88**, 1584–1595, 1990.
- Khan T., Acar V., Aydin M.R., Hülaga B., Akbulut H., and Seydibeyouglu M.Ö., A Review on Recent Advances in Sandwich Structures Based on Polyurethane Foam Cores, *Polym. Compos.*, **41**, 2355-2400, 2020.
- Prociak A., Malewska E., Kurańska M., Bąk S., and Budny P., Flexible Polyurethane Foams Synthesized with Palm Oil-Based Bio-Polyols Obtained with the Use of Different Oxirane Ring Opener, *Ind. Crop. Prod.*, **115**, 69-77, 2018.
- Członka S., Bertino M.F., Kośny J., Strąkowska A., Masłowski M., and Strzelec K., Linseed Oil as a Natural Modifier of Rigid Polyurethane Foams, *Ind. Crops Prod.*, **115**, 40-51, 2018.
- Li J.H., Hong R.Y., Li M.Y., Li H.Z., Zheng Y., and Ding J., Effects of ZnO Nanoparticles on the Mechanical and Antibacterial Properties of Polyurethane Coatings, *Prog. Org. Coat.*, **64**, 504-509, 2009.
- Moradi G., Nassiri P., Ershad-Langroudi A., and Monazzam M.R., Acoustical, Damping and Thermal Properties of Polyurethane/Poly(Methyl Methacrylate)-Based Semi-Interpenetrating Polymer Network Foams, *Plast. Rubber Compos.*, **47**, 221-231, 2018.
- Allard J. and Atalla N., *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2nd ed., John Wiley and Sons, 2009.
- Verdejo R., Stämpfli R., Alvarez-Lainez M., Mourad S., Rodriguez-Perez M.A., Brühwiler P.A. et al., Enhanced Acoustic Damping In Flexible Polyurethane Foams Filled with Carbon Nanotubes, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 1564-1569, 2009.
- Pan Y., Pan H., Yuan B., Hong N., Zhan J., Wang B. et al., Construction of Organic-Inorganic Hybrid Nano-Coatings Containing α -Zirconium Phosphate with High Efficiency for Reducing Fire Hazards of Flexible Polyurethane Foam, *Mater. Chem. Phys.*, **163**, 107-115, 2015.
- Oh J.H., Kim J.S., Nguyen V.H., and Oh I.K., Auxetic Graphene Oxide-Porous Foam for Acoustic Wave and Shock Energy Dissipation, *Compos. Part B: Eng.*, **186**, 107817, 2020.
- Bandarian M., Shojaei A., and Rashidi A.M., Thermal, Mechanical and Acoustic Damping Properties of Flexible Open-Cell Polyurethane/Multi-Walled Carbon Nanotube Foams: Effect of Surface Functionality of Nanotubes, *Polym. Int.*, **60**, 475-482, 2011.
- Hyuk Park J., Suh Minn K., Rae Lee H., Hyun Yang S., Bin Yu C., Yeol Pak S. et al., Cell Openness Manipulation of Low Density Polyurethane Foam for Efficient Sound Absorption, *J.*

- Sound Vib.*, **406**, 224-236, 2017.
25. Lee J. and Jung I., Tuning Sound Absorbing Properties of Open Cell Polyurethane Foam by Impregnating Graphene Oxide, *Appl. Acoust.*, **151**, 10-21, 2019.
 26. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Eklund P.C., and Rao A.M., *Carbon Nanotubes*, Springer, 2000.
 27. El Mogy S., Youssef R.S., and Abd El Megeed A.A., Processing of Polyurethane Nanocomposite Reinforced with Nanosized Zinc Oxide: Effect on Mechanical and Acoustic Properties, *Egypt. J. Chem.*, **62**, 333-341, 2019.
 28. Mohd Rus A.Z., Mat Hassan N.N., and Abd Rahim R., Influence of Multilayer Textile Biopolymer Foam Doped with Titanium Dioxide for Sound Absorption Materials, *Key Eng. Mater.*, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.750
 29. Nikje M.M.A., Moghaddam S.T., and Noruzian M., Preparation of Novel Magnetic Polyurethane Foam Nanocomposites by Using Core-Shell Nanoparticles, *Polimeros*, **26**, 297-303, 2016.
 30. Nikje M.M.A., Kalishomi R.G., and Akbar R., Preparation of Polyurethane Flexible Foam Nanocomposites by Incorporation of Fe₃O₄ Nanoparticles Modified by Reaction Product of GPTS and APTS, *Cell. Polym.*, **34**, 249-264, 2015.