



## تولید پلی یورتان فوم نرم تقویت شده با نانو ذرات آلومینا و بررسی رفتار آکوستیکی و مکانیکی آن

حمید یزدانپناه<sup>1</sup>، انوشیروان فرشیدیانفر<sup>2\*</sup>، علی احمدپور<sup>3</sup>، علی فائزیان<sup>4</sup>، فرید مختاری<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 3- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 4- استادیار، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی خراسان، مشهد  
 \* مشهد، صندوق پستی 9177948974، um.ac.ir، farshid@um.ac.ir

### چکیده

کاهش صداهای مزاحم و ناخواسته در جوامع امروزی از اهمیت بسیاری برخوردار است. این صداها سلامت روحی و جسمی شهروندان را به خطر می‌اندازد. از این رو محققین همواره به دنبال روش‌هایی جدید برای کاهش صداهای ناخواسته هستند. به همین دلیل استفاده از مواد جاذب صوت با خواص آکوستیکی مناسب در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته است. در مقاله پیش رو در ابتدا مواد مورد نیاز برای ساخت پلی‌یورتان فوم و فرایند ساخت آن شرح داده شده و ضریب جذب صوتی پلی‌یورتان فوم اندازه‌گیری گردیده است. برای بهبود خواص مکانیکی و آکوستیکی پلی‌یورتان فوم، درصدهای وزنی متفاوت از ذرات نانو آلومینا به ساختار پلی‌یورتان فوم اضافه گردیده است. سپس تأثیر حضور ذرات نانو آلومینا بر خواص مکانیکی و آکوستیکی پلی‌یورتان فوم بررسی شده است. در این پژوهش به‌صورت همزمان خواص آکوستیکی، فیزیکی و مکانیکی پلی‌یورتان فوم تقویت شده با ذرات نانو آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها به کمک نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده دلایل بهبود و یا عدم بهبود ضریب جذب صوتی پلی‌یورتان فوم‌های تقویت شده با نانو ذرات آلومینا بررسی گردیده است. در این مقاله از روش اندازه‌گیری دو میکروفن در لوله مقاومت برای اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی استفاده شده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 12 اردیبهشت 1395  
 پذیرش: 29 خرداد 1395  
 ارائه در سایت: 02 مرداد 1395  
 کلید واژگان:  
 پلی‌یورتان فوم  
 نانو آلومینا  
 ضریب جذب صوتی  
 لوله مقاومت

## Production Method and Analysis of the Acoustic and Mechanical Properties of Soft Polyurethane Foam Reinforced by Nano-alumina Particles

Hamid Yazdanpanah<sup>1</sup>, Anoshirvan Farshidianfar<sup>1\*</sup>, Ali Ahmadpour<sup>2</sup>, Ali Faezian<sup>3</sup>, Farid Mokhtari<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Chemical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Food Machinery Design Department, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, farshid@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 01 May 2016  
 Accepted 18 June 2016  
 Available Online 23 July 2016

#### Keywords:

Polyurethane foam  
 Nano-Alumina  
 Sound absorption coefficient  
 Impedance tube

### ABSTRACT

Reduction of unwanted noises is an important issue in the current societies regarding their potential negative impact on the mental and physical health of the peoples. Researchers are trying to find a new method to reduce the damage unwanted sound. Accordingly, the use of sound absorbing materials with appropriate acoustic properties has increased in recent years.

In this article, first the production of polyurethane foam is explained and sound absorption coefficient of pure PUF is measured. In order to improve the mechanical and acoustical properties of polyurethane foam, various quantities of Nano-Alumina powder are added to the structure of the foam. The effects of this additive material on the acoustic and mechanical properties of the foam are then measured. In this work, for the first time, the mechanical, physical and acoustical properties of the polyurethane foam improved by Nano-Alumina are studied. Finally, the change of the sound absorption coefficient of the produced composite material is analyzed based on the mechanical and physical experimental results. The sound absorption coefficient of this foam is then measured using Two microphone method with Impedance tubes.

یکی از روش‌های کنترل شدت صدای مزاحم، استفاده از مواد جاذب صوت می‌باشد. مواد متخلخل قسمت اصلی مواد جاذب صوت را تشکیل می‌دهند. این مواد را براساس ساختار می‌توان به مواد سلولولی، دانه‌ای، فیبری

### 1- مقدمه

آلودگی صوتی یکی از سه نوع آلودگی موجود در جوامع به حساب می‌آید، از این‌رو کنترل این آلودگی مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار گرفته است.

Please cite this article using:

H. Yazdanpanah, A. Farshidianfar, A. Ahmadpour, A. Faezian, F. Mokhtari, Production Method and Analysis of the Acoustic and Mechanical Properties of Soft Polyurethane Foam Reinforced by Nano-alumina Particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 261-266, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## جدول 1 درصد وزنی مواد

نام ماده	درصد وزنی
پلی‌ال	58%
ایزوسیانات	36%
کاتالیست	0.8%
فعال ساز سطحی	1.2%
آب	4%

## 2-3- ساخت فوم تقویت شده با ذرات نانو آلومینا

نانوذرات آلومینا به پلی‌ال اضافه شده و توسط همزن مغناطیسی به مدت 30 دقیقه مخلوط گردیده است. سپس جهت پخش شدن هر چه بهتر ذرات درون ماده، این مخلوط به دستگاه حمام فراصوت انتقال داده شده و به مدت 3 ساعت تحت امواج فراصوت قرار گرفته است. در مرحله بعدی مقادیر مناسب کاتالیست و عامل فعال‌ساز سطحی براساس جدول 1 به ترکیب اضافه شده و برای 30 دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط گردیده است. در ادامه ایزوسیانات را به این مخلوط اضافه کرده و بعد از 10 ثانیه همزدن در هنگام ژله‌ای شدن ساختار، به داخل ظرف مدل ساخته شده از استیل انتقال داده شده است تا نمونه‌های ضریب جذب صوتی آماده شود (شکل 1).

## 2-4- میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر مربوط به ساختار پلی‌یورتان فوم‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی به مدل لئو 1450<sup>1</sup> تهیه شده است. نمونه‌های مورد استفاده در این دستگاه در نیتروژن مایع شکسته شده و توسط آلیاژ طلا- پالادیوم پوشش داده شده‌اند.

## 2-5- ضریب جذب صوتی

جهت اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی از روش دو میکروفون در دستگاه لوله امیدانس استفاده شده است (شکل 2). میکروفون‌های مورد استفاده در این دستگاه ساخت شرکت برول و کجیر<sup>2</sup> دانمارک می‌باشد. این اندازه‌گیری بر طبق استاندارد ای اس تی ام ئی 1050<sup>3</sup> انجام گرفته است. 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 پس از برخورد به نمونه به سه قسمت تقسیم می‌شود، مقداری از ماده عبور می‌کند، مقداری جذب ماده می‌شود و مقداری از سطح ماده برگشت داده می‌شود. مقدار امواج عبور کرده از جسم پس از برخورد به جسم صلب برگشت داده می‌شود. ضریب جذب صوتی از تقسیم مقدار شدت صدای جذب شده به شدت صدای فرستاده شده به دست می‌آید.

## 2-6- آزمون کشش

اندازه‌گیری مقدار تنش و کرنش کششی بر طبق استاندارد ای اس تی ام دی 3574<sup>4</sup> انجام گرفته است. برای این منظور نمونه‌ها با ضخامت 10 میلی‌متر، به صورت دمبلی برش زده شده‌اند. نمونه‌های آماده شده در دستگاه زویک زد 250<sup>5</sup> قرار داده شده و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفته‌اند. در این آزمون از سلول دو کیلو نیوتنی استفاده شده است.

تقسیم‌بندی نمود [1]. در میان مواد جاذب صوت سلولی، پلی‌یورتان فوم‌ها به دلیل داشتن دامنه وسیعی از خواص و توانایی پیوند دهی با مواد گوناگون از اهمیت بیش‌تری برخوردارند. پلی‌یورتان فوم، ساختاری از گاز می‌باشد که درون بدنه‌ای از پلیمر قرار گرفته است. فرایند تشکیل پلی‌یورتان فوم دو مرحله اصلی دارد. مرحله اول دمش نامیده می‌شود. در این مرحله گاز کربن دی‌اکسید جهت ساخت سلول‌ها تولید می‌شود. مرحله دوم پخت نامیده می‌شود که با تولید گرما باعث استحکام در ساختار پلیمر می‌گردد. این دو مرحله باید به صورت هم‌زمان انجام بگیرند [2]. باید توجه داشت ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی، صوتی پلی‌یورتان فوم‌ها برای دامنه وسیعی از خواص مناسب نمی‌باشد. به همین جهت تحقیقاتی در زمینه ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده توسط نانو ذرات و مواد افزودنی انجام گرفته است. نانوذرات به کار رفته در این تحقیقات را می‌توان به دو دسته فیبری و دایروی تقسیم‌بندی نمود. وردجو و همکاران [3] گزارش نمودند، حضور درصد کمی نانولوله کربنی در ساختار پلی‌یورتان فوم، خواص آکوستیکی و مکانیکی را به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌دهد. در ادامه بندریان و همکاران [4] در تحقیقی اثبات نمودند حضور گروه عاملی کربوکسیل بر سطح نانولوله کربنی خواص مکانیکی و آکوستیکی پلی‌یورتان فوم را بهتر از گروه‌های عاملی دیگر افزایش می‌دهد. جوانی و همکاران اثبات کردند، حضور ذرات نانوسیلیکا در ساختار پلی‌یورتان، خواص مکانیکی و فیزیکی را بهبود می‌دهد [5]. در ادامه لی و همکاران اثبات نمودند حضور 1.5 درصد وزنی نانوسیلیکا بهترین ضریب جذب صوتی را ارائه می‌دهد [6]. گیاتری و همکاران حضور نانوسیلیکا، خاک رس و براده لاستیک را در ساختار فوم با یکدیگر مقایسه نمودند، آن‌ها گزارش کردند حضور 1.5 درصد وزنی هر سه ماده بهترین نتایج را ارائه نمود. در مجموع عملکرد نانوسیلیکا از سه ذره افزودنی دیگر بهتر بوده است [7].

در این پژوهش خواص آکوستیکی، مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات کروی آلومینا بررسی خواهد شد. برای اولین بار خواص آکوستیکی پلی‌یورتان فوم تقویت شده با ذرات نانو آلومینا مورد بررسی قرار گرفته است. حضور ذرات نانو آلومینا به دلیل کروی بودن و چگالی پایین می‌تواند تأثیر مناسبی بر ضریب جذب صوتی پلی‌یورتان فوم بگذارد.

## 2- مواد و روش تحقیق

## 2-1- مواد اولیه

اجزاء اصلی ساخت پلی‌یورتان فوم شامل پلی‌ال، ایزوسیانات، کاتالیست و عامل فعال ساز سطحی از شرکت کبودان شیمی زرین تهیه شده است. در این پژوهش عامل فوم ساز آب می‌باشد و از آمین نوع سوم به‌عنوان کاتالیست و از سیلیکون گلایکول به‌عنوان فعال ساز سطحی استفاده شده است. نانوذرات آلومینا استفاده شده نیز از شرکت فناوران دانش گستر سپهر آئین با درصد خلوص 95% و ابعاد 60-80 نانومتر تهیه گردیده است.

## 2-2- ساخت فوم خالص

پلی‌یورتان فوم خالص مورد استفاده در این پژوهش براساس درصد وزنی مواد داده شده در جدول 1 ساخته شده است. در مرحله اول کاتالیست، فعال ساز سطحی و آب به پلی‌ال اضافه شده و به مدت 30 دقیقه با سرعت 1500 دور بر دقیقه توسط همزن مکانیکی مخلوط گردیده است. سپس ایزوسیانات به این مخلوط اضافه شده و به مدت 10 ثانیه با همزن دستی مخلوط شده و در انتها به درون قالب برای رشد آزاد انتقال یافته است.

<sup>1</sup> LEO 1450 VP<sup>2</sup> Brüel & Kjær<sup>3</sup> ASTM E1050-08<sup>4</sup> ASTM D3574 - 03<sup>5</sup> Zwick - z250

شانس بیشتری برای خروج از ساختار پلی‌یورتان را دارند در هنگام خروج از ساختار به دلیل چسبندگی پلی‌ال، ساختاری قارچ مانند را در سطح فوم به وجود می‌آورند (شکل 4 ج).

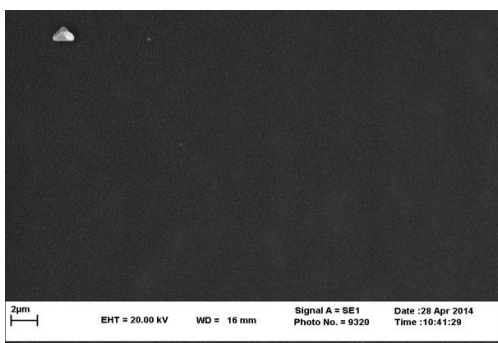


Fig. 3 SEM image of the neat PU foam

شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پلی‌یورتان فوم خالص

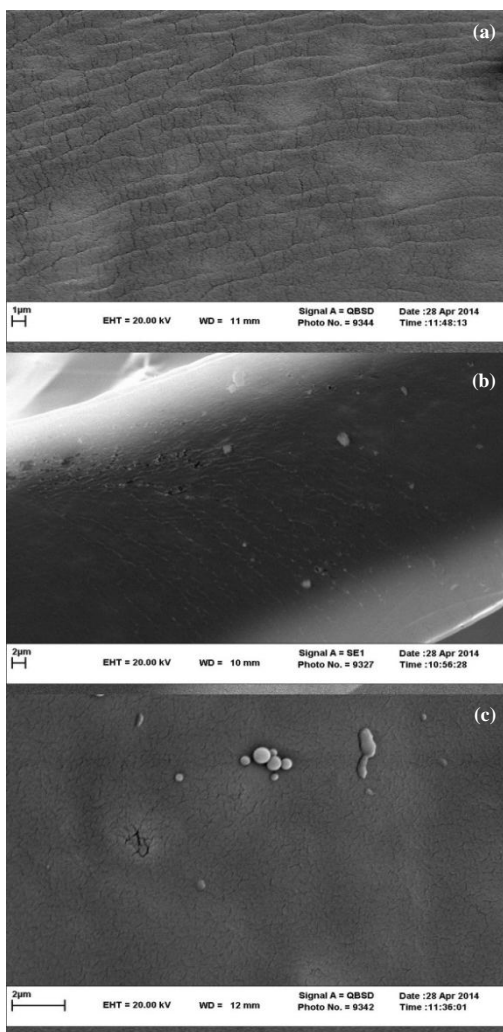


Fig. 4 SEM image of the PU/Al surface (a) wrinkle (b) crack (c) PU layer around Nano Al

شکل 4 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پلی‌یورتان فوم تقویت شده با ذرات نانو آلومینا (الف) چروکیدگی در سطح (ب) ترک در سطح (ج) ایجاد لایه در اطراف نانو آلومینا



Fig. 1 Samples of sound absorption coefficient test

شکل 1 نمونه های آزمون ضریب جذب صوتی

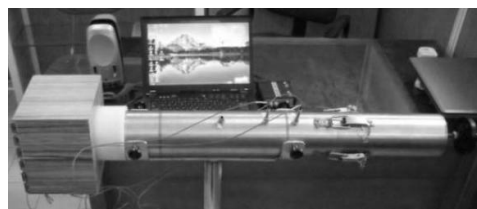


Fig. 2 Impedance tube used in this investigation

شکل 2 لوله امپدانس مورد استفاده در این پژوهش

## 7-2- آزمون فشار

اندازه‌گیری مقدار تنش فشاری مطابق استاندارد ای اس تی ام دی 3574 انجام گردیده است. برای این منظور نمونه‌ها با ابعاد  $20 \times 45 \times 45$  میلی‌متر برش داده شده است. نمونه‌های آماده شده در دستگاه زو یک زد 250 قرار گرفته و با سرعت 50 میلی‌متر بر دقیقه تحت فشار قرار گرفته است.

## 8-2- اندازه سلولی

برای اندازه‌گیری ابعاد سلولی از نرم‌افزار پردازش تصویر ام آی پی 4<sup>1</sup> استفاده شده است. به کمک این نرم‌افزار، اطلاعات دستگاه میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته است.

## 9-2- چگالی

در این پژوهش چگالی بر طبق استاندارد ای اس تی ام دی 3574 اندازه‌گیری شده است. مکعب‌هایی با ابعاد  $20 \times 45 \times 45$  میلی‌متر برش داده شده و به کمک ترازویی با دقت پنج رقم اعشار، وزن نمونه‌ها به دست آمده است. سپس چگالی نمونه‌ها محاسبه گردیده است.

## 3- نتایج و بحث

با بررسی نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان مشاهده کرد سطح پلی‌یورتان فوم خالص کاملاً مسطح و بدون هیچ‌گونه چروکیدگی و ترک خوردگی می‌باشد (شکل 3). باید اشاره کرد حضور ذرات نانو آلومینا باعث ایجاد چروکیدگی در سطح پلی‌یورتان شده است. دلیل این چروکیدگی، حضور ذرات افزودنی در مسیر حرکت پلی‌یورتان در زمان تشکیل فوم می‌باشد (شکل 4 الف). حضور ذرات افزودنی علاوه بر ایجاد چروکیدگی باعث ایجاد ترک‌هایی بر سطح فوم شده است (شکل 4 ب). احتمالاً این ترک‌ها به دلیل شکسته شدن این نمونه‌ها درون نیتروژن مایع به وجود آمده است. در زمان شکل‌گیری فوم به دلیل این‌که ذرات نانو آلومینا ناخالصی هستند تمایل دارند از ساختار فوم خارج شوند. به همین دلیل مقداری از این ذرات در ساختار دیواره فوم باقی می‌مانند که باعث ایجاد چروکیدگی می‌شوند. همچنین مقداری از این ذرات که به دلیل نزدیک بودن به سطح خارجی فوم،

<sup>1</sup> MIP4

افزایش یافته است. یکی از دلایل کاهش مدول الاستیک کاهش سلول‌های بسته است که باعث نرم شدن ساختاری فوم می‌شود.

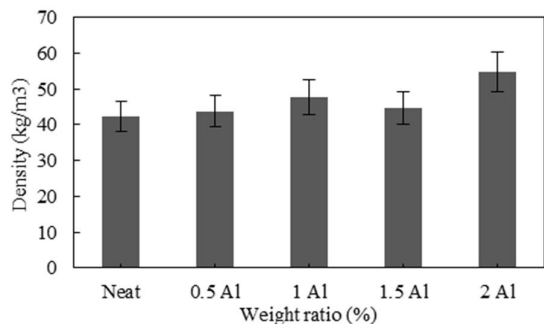


Fig. 5 Density for PU/Al foam

شکل 5 چگالی پلی‌پورتان فوم تقویت شده با نانو آلومینا

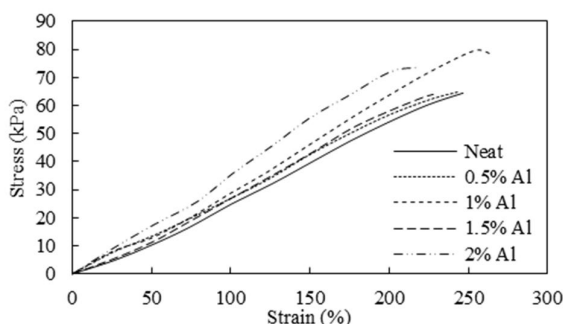


Fig. 6 Tensile stress-strain plot for PU/Al

شکل 6 تنش-کشش کششی پلی‌پورتان فوم تقویت شده با نانوالومینا

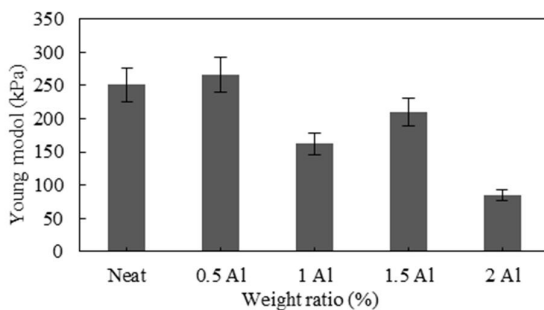


Fig. 7 Specific Young's modulus for PU/Al

شکل 7 مدول یانگ پلی‌پورتان فوم تقویت شده با نانو آلومینا

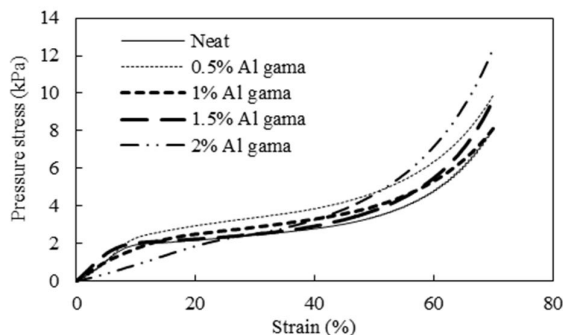


Fig. 8 Compression stress-strain plot for PU/Al

شکل 8 تنش-کرنش فشاری پلی‌پورتان فوم تقویت شده با نانوالومینا

همان‌طور که در "شکل 5" مشاهده می‌شود، چگالی کامپوزیت‌ها با افزایش درصد وزنی نانوذرات آلومینا افزایش می‌یابد، این روند کاملاً طبیعی می‌باشد. برطبق نتایج تحقیق‌ها گذشته [5] واکنش شیمیایی خاصی میان ساختار پلی‌پورتان فوم و ذرات نانوالومینا به وجود نیامده است. بنابراین می‌توان این نتیجه را تأیید کرد که با افزودن این ذرات مقدار چگالی نیز افزایش می‌یابد. باید اشاره کرد حضور نانوذرات سیلیکا در ساختار فوم باعث افزایش ریز ساختارهایی در ابعاد نانو می‌شود که این اتفاق چگالی را افزایش می‌دهد [5].

در درصد وزنی 1.5 مشاهده می‌شود که چگالی نمونه تا حدی کاهش یافته است. در این نمونه به‌طور خاص در هنگام شکل‌گیری فوم سرعت رشد و گرمای تولید نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است، این اتفاق احتمالاً به دلیل پخش مناسب ذرات در ساختار مخلوط می‌باشد. با افزایش درصد نانوذرات بیشتر از 1.5 درصد وزنی باعث ایجاد توده می‌شویم و در درصدهای کمتر ذرات نتوانسته‌اند در ساختار به‌صورت یک‌نواخت پخش شوند.

با توجه به نتایج "شکل 6" می‌توان بیان نمود با افزودن نانوذرات آلومینا، مقاومت کششی افزایش خواهد یافت. در "شکل 6" مشاهده می‌شود، بجز نمونه دارای 1.5 درصد وزنی ذرات آلومینا در سایر نمونه‌ها مقدار تنش گسست افزایش یافته است. در هنگام تشکیل فوم، این نمونه دارای سرعت رشد و حرارت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است، دلیل کاهش مقاومت گسست نیز می‌تواند همین عامل باشد. دلایل محیطی که قابل کنترل نبوده است نیز بر روی ساختار نمونه تأثیر گذاشته است. به دلیل افزایش سرعت رشد دیواره و ساختار سلولی پلی‌پورتان فوم، این نمونه فرصت تشکیل ساختار مناسب را پیدا نکرده است. در مجموع می‌توان گفت حضور ذرات در ابعاد نانو باعث بهبود خواص در ریز ساختارها می‌شود. ولی درصد این مواد بر روی خواص تأثیر متفاوتی دارد.

نتایج نمودار "شکل 6" بیان‌کننده این مطلب است که حضور ذرات نانو ساختار درونی پلی‌پورتان فوم را استحکام می‌بخشد. دلیل کاهش تنش در نمونه‌های دارای 0.5 و 1.5 درصد وزنی نانو ذره آلومینا، می‌تواند یکسان بودن زمان استفاده از دستگاه حمام فراصوت باشد. همان‌طور که در مقالات اشاره شده است زمان استفاده از این دستگاه برای درصد مواد متفاوت، تأثیری متغیر می‌گذارد [8]. استفاده بیش از حد دستگاه فراصوت خود باعث ایجاد توده در ساختار خواهد شد. در "شکل 7" مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار نانو ذرات در کامپوزیت، مقدار مدول الاستیک کاهش می‌یابد.

می‌توان بیان نمود که افزودن نانو ذرات باعث افزایش نرمی اولیه در این مواد یا کاهش استحکام اولیه در دیواره سلولی پلی‌پورتان فوم شده است. در "شکل 8" تغییرات رفتاری کامپوزیت‌ها تحت فشار مشاهده می‌شود که دارای سه ناحیه می‌باشد. این نواحی به ترتیب ناحیه افزایش اولیه تنش، ناحیه مسطح و ناحیه افزایش نهایی تنش می‌باشد. ناحیه اول دیواره‌ها فشرده می‌شوند. در ناحیه دوم هوای موجود در سلول‌ها تخلیه می‌شود و ناحیه سوم قسمتی است که ساختار پلی‌پورتان در حال فشرده شدن می‌باشد. با افزایش درصد نانوذرات آلومینا ساختار پلی‌پورتان فوم نرم‌تر می‌شود و با توجه به افزایش چگالی مقاومت نهایی بیشتری نسبت به نمونه خالص از خود نشان می‌دهد. افزایش مقاومت نهایی به دلیل افزایش چگالی ساختار پلی‌پورتان است. تقریباً برای تمام نمونه‌ها هر سه ناحیه افزایش یافته است بجز نمونه دارای 2 درصد وزنی نانو ذره که مقدار مدول یانگ آن به شدت کاهش یافته که نشان می‌دهد این نمونه نرم‌تر شده است، در حالی که مقاومت کششی آن

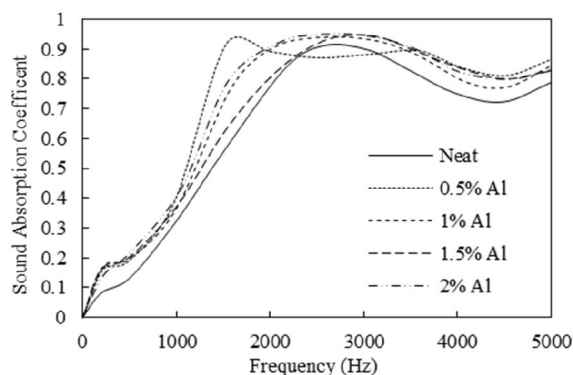


Fig. 11 Sound Absorption coefficient for PU/Al

شکل 11 ضریب جذب صوتی پلی یورتان فوم تقویت شده با ذرات نانوسیلیکا

که به این معنی می‌باشد که ساختار این مواد نرم‌تر شده است یا تعداد سلول‌های بسته کاهش یافته است. در تمام این نمونه‌ها سطح پلی‌یورتان فوم ناصاف شده است که خود عاملی برای افزایش مقاومت وزشی و طول گرمایی می‌باشد [12]. افزایش این دو مشخصه ضریب جذب صوتی را افزایش می‌دهد.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش مشاهده شده است با حضور ذرات نانوالومینا در ساختار پلی‌یورتان فوم، ضریب جذب صوتی در فرکانس‌های پایین مقدار کمی افزایش یافته است. تنها نمونه دارای 0.5 درصد وزنی آلومینا در فرکانس‌های پایین نزدیک به 30 درصد ضریب جذب صوتی را بهبود داده است. ولی در فرکانس‌های میانی و بالا، ضریب جذب صوتی به دلیل حضور ذرات نانوالومینا به شکل مناسبی افزایش یافته است و تقریباً برای تمام نمونه‌ها ضریب جذب صوتی میانگین نزدیک به 10 درصد بهبود یافته است که مقدار مطلوبی می‌باشد. دلیل این بهبود، خواص مناسب ذرات نانوالومینا 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 ذرات نانوالومینا اندازه سلولی میانگین را کاهش و چگالی نمونه‌ها را افزایش داده است. از جهتی با توجه به نتایج تست کشش می‌توان بیان کرد حضور ذرات نانوالومینا مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد و نتایج تست فشاری بیان کننده این نکته می‌باشد که حضور این نانوذرات باعث نرم‌تر شدن ساختار فوم می‌شود.

#### 5- تقدیر و تشکر

با تشکر از شرکت فناوران دانش گستر سپهر آئین که ذرات نانوالومینا مورد استفاده در این پژوهش را تهیه نموده‌اند. این پژوهش با حمایت دانشگاه فردوسی مشهد به شماره طرح 2/18193 انجام گرفته است.

#### 6- مراجع

- [1] J. P. Arenas, M. J. Crocker, Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, Vol. 44, No. 11, pp. 12-18. 2010.
- [2] A. Aneja, *Structure-property relationships of flexible polyurethane foams*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [3] R. Verdejo, R. Stämpfli, M. Alvarez-Lainez, S. Mourad, M. A. Rodriguez-Perez, P. A. Brühwiler, M. Shaffer, Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 10, pp. 1564-1569, 2009.
- [4] M. Bandarian, A. Shojaei, A. M. Rashidi, Thermal, mechanical and acoustic damping properties of flexible open-cell polyurethane/multi-walled carbon

در "شکل 9" تصاویر گرفته شده از سلول‌های پلی‌یورتان فوم خالص و پلی‌یورتان فوم تقویت شده با ذرات نانوالومینا آورده شده است. به کمک روش پردازش تصویر میانگین ابعاد سلولی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. با توجه به داده‌های "شکل 10" می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد نانوذرات آلومینا مقدار اندازه سلولی کاهش می‌یابد. این اتفاق عاملی مناسب برای افزایش ضریب جذب صوتی می‌باشد و دلیل آن افزایش چسبناکی مخلوط پلی‌الی و نانوذرات می‌باشد. از طرفی ساختار دارای 0.5 درصد وزنی آلومینا دارای توده‌هایی می‌باشد که با تولید گاز کربن دی‌اکسید باعث ایجاد حباب‌هایی بزرگتر شده است.

همان‌طور که در "شکل 11" مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌ها ضریب جذب صوتی افزایش محسوسی نسبت به نمونه خالص داشته است. این افزایش مربوط به کاهش اندازه سلولی و افزایش جانمایی سلولی در مسیر موج می‌باشد [10,9]. از جهتی در تمام نمونه‌ها مقدار چگالی افزایش یافته است؛ این افزایش چگالی بهبود ضریب جذب صوتی در فرکانس‌های بالاتر از 3000 هرتز را برای تمام نمونه‌ها، توجیه می‌کند [11]. در نمونه دارای 0.5 درصد وزنی ذرات نانوالومینا، مقاومت کششی و فشاری به مقدار مناسبی افزایش یافته است که می‌توان گفت ساختار این ماده سخت‌تر شده است؛ دلیل کاهش فرکانس تشدید می‌تواند این اتفاق باشد. عامل دیگر که احتمالاً بر کاهش مکان فرکانس تشدید موثر بوده است افزایش اندازه سلولی در این نمونه می‌باشد.

ضریب جذب صوتی نمونه‌های دارای 1 و 2 درصد نانوذره تا حدی به دلیل افزایش ضخامت نمونه افزایش یافته است. دلیل دیگر برای بهبود ضریب جذب صوتی در نمونه‌های 1، 1.5 و 2 درصد وزنی نانوالومینا کاهش اندازه سلولی این نمونه‌ها است. مدول الاستیک این سه نمونه نیز کاهش یافته است

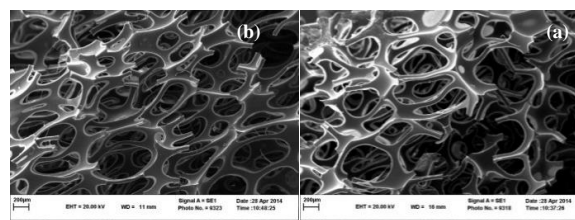


Fig. 9 Low-magnification SEM micrographs of (a) neat PU foam, (b) PU/Al foam

شکل 9 تصویر سلول سلول پلی‌یورتان فوم (الف) خالص (ب) پلی‌یورتان فوم تقویت شده با 1.5 درصد وزنی نانو آلومینا

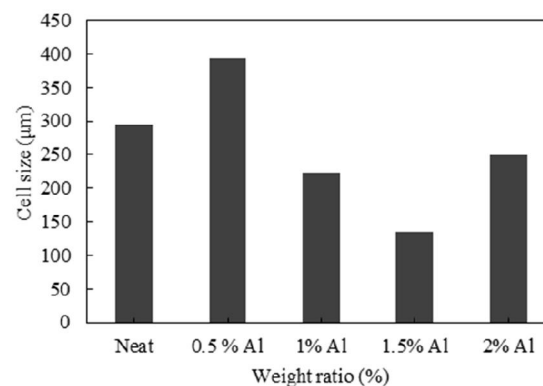


Fig. 10 Mean diameter of macroscopic PU cells

شکل 10 اندازه سلولی پلی‌یورتان فوم‌های تقویت شده با نانوالومینا

- nanofibers/polyurethane foam composite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 459, No. 1–2, pp. 111–116, 2007.
- [9] J. F. Allard, N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, Second Edition, Chichester, UK: John Wiley & Sons, pp. 78–82, 2009.
- [10] J. G. Gwon, S. K. Kim, J. H. Kim, Sound absorption behavior of flexible polyurethane foams with distinct cellular structures, *Materials & Design*, Vol. 387, No. 1, pp. 132, 2015.
- [11] H. Seddeq, Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 3, No. 4, pp. 4610–4617, 2009.
- [12] G. Sung, S. K. Kim, J. W. Kim, J. H. Kim, Effect of isocyanate molecular structures in fabricating flexible polyurethane foams on sound absorption behavior, *Polymer Testing*, Vol. 53, No. 8, pp. 156–164, 2016.
- nanotube foams: Effect of surface functionality of nanotubes, *Polymer International*, Vol. 60, No. 3, pp. 475–482, 2011.
- [5] I. Javni, W. Zhang, V. Karajkov, Effect of nano- and micro-silica fillers on polyurethane foam properties, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 38, No. 3, pp. 229–239, 2002.
- [6] J. Lee, G. Kim, C. Ha, Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 4, pp. 2384–2390, 2012.
- [7] R. Gayathri, R. Vasanthakumari, C. Padmanabhan, Sound absorption, Thermal and mechanical behavior of Polyurethane foam modified with Nano silica. Nano clay and Crumb rubber fillers, *ijser.org*, Vol. 4, No. 5, pp. 301–308, 2013.
- [8] M. E. Kabir, M. C. Saha, S. Jeelani, Effect of ultrasound sonication in carbon