

## بررسی رفتار جذب صوت و میزان زبری سطح دیواره‌های سلولی فوم‌های منعطف پلی‌یورتان

سحر عبداللهی باغبان<sup>۱</sup>، دکتر منوچهر خراسانی<sup>۲\*</sup>

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران



تاریخ دریافت:

۹۷/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش:

۹۷/۱۲/۰۷

چکیده

چکیده: در این مطالعه، ارتباط بین جذب صوت و میزان زبری سطح دیواره‌های سلولی فوم‌های پلی‌یورتان منعطف بررسی شد. فوم‌های پلی‌یورتان با استفاده از متیلن دی‌فنیل‌دی‌ایزوسیانات، پلی‌استرهای خطی اشباع آلیفاتیک سنتز شده از الکل‌های چند عاملی و دی‌اسید مختلف و مواد افزودنی دیگر تهیه شدند. همچنین محتوای آب و شاخص ایزوسیانات آنها به ترتیب بر روی ۵ درصد و ۱۱۰ تنظیم شد. رفتار جذب صوت این فوم‌ها و میزان زبری سطح دیواره‌ی سلولی آنها به ترتیب با استفاده از دستگاه تیوپ امپدانس و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی و خواص فیزیکی فوم‌ها مانند چگالی و محتوای سلول باز نیز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان زبری سطح از ۶۹/۵۸ تا ۱۷۲/۹ نانومتر ناشی از افزایش میزان جدایش میکروفازی، عملکرد جذب صوت فوم‌ها تا ۴۳/۰۷٪ به دلیل افزایش میزان بازتاب، انتشار و جذب امواج صوتی افزایش داشته است؛ به طوری که بیشینه ضریب جذب صوت و مساحت زیر سطح نمودار جذب صوت به ترتیب به ۹۸/ و ۳۳۰۰ هرتز رسیدند. به این ترتیب مشخص شد که فوم‌های پلی‌یورتان با میزان زبری سطح در حدود ۱۷۰-۱۸۰ نانومتر می‌تواند به عنوان یک جاذب صوت عمل کند.

فوم پلی‌یورتان، جذب صوت، زبری سطح، جدایش میکروفازی، میکروسکوپ نیروی اتمی.

واژگان کلیدی

## ۱) مقدمه

آلودگی صوتی یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست محیطی است که اهمیت آن با توجه به افزایش سرعت رشد جمعیت، صنایع و حمل و نقل، روز به روز بیشتر می‌شود [۱]. تجهیزات صنعتی و وسایل حمل و نقل مانند اتومبیل‌ها مهم‌ترین منابع تولیدکننده آلودگی صوتی هستند [۲]. تجمع امواج صوتی در محدوده‌ی ۳۰ تا ۸۰۰۰ هرتز برای انسان‌ها بسیار آزاردهنده است؛ از اینرو یافتن روشی برای کاهش و یا حذف این امواج بسیار مهم است [۳-۴]. استفاده از عایق‌ها و جاذب‌های صوتی جز مرسوم‌ترین روش‌های حذف امواج صوتی مضر است [۲-۶]. فوم‌های پلیمری مانند پلی‌یورتان، پشم شیشه و پارچه‌های بافته‌شده و غیربافته شده از جمله مهم‌ترین جاذب‌های صوتی هستند که در مکان‌های آلوده نصب می‌شوند [۳-۱۰]. فوم‌های پلی‌یورتان، کامپوزیت‌های جامد-گازی هستند که می‌توانند بر اساس ساختار (سلول باز و سلول بسته) و بر اساس سختی (منعطف و سخت) تقسیم شوند [۸-۱۶]. تا به امروز، موثرترین جاذب صوت، فوم پلی‌یورتان منعطف با رفتار ویسکوالاستیک و حاوی میزان زیادی از تخلخلات و سلول‌های باز وابسته به هم است [۹، ۱۲-۱۹].

کارایی جاذب‌های صوت توسط ضریب جذب صوتی ( $\alpha$ ) تعیین می‌شود که وابسته به ویژگی‌های فاز جامد، ریزساختار فوم شامل تخلخلات، مقاومت جریان هوا، چگالی ماکروسکوپی، متوسط اندازه‌ی سلول‌ها، توزیع اندازه‌ی سلول‌ها، ضخامت دیواره‌ی سلول‌ها و دیواره‌ها است [۱۳-۲۰]. ائتلاف انرژی امواج صوتی به دلایل مختلفی همچون اصطکاک امواج صوتی با سطح دیواره سلولی، با مولکول‌های هوای موجود در داخل سلول‌ها و همچنین در اثر حرکت زنجیره‌های پلیمری موجود در ساختار فوم پلی‌یورتان و تبدیل انرژی این امواج به گرما صورت می‌گیرد [۱۴، ۱۷-۲۳].

فوم‌های منعطف پلی‌یورتان با استفاده از پلی‌ال، گسترش‌دهنده‌های زنجیر، عامل حباب‌زا، کاتالیزر ژلاسیون و حباب‌زا، عوامل سطح فعال و ایزوسیانات ساخته می‌شوند. در هنگام ساخت فوم پلی‌یورتان دو نوع واکنش شیمیایی ژلاسیون و حباب‌زایی رخ می‌دهد. در واکنش ژلاسیون، گروه‌های هیدروکسیل پلی‌ال و ایزوسیانات با یکدیگر واکنش می‌دهند و در نهایت گروه‌های یورتان ایجاد می‌شوند. در واکنش‌های حباب‌زایی، گروه‌های ایزوسیانات با آب به عنوان عامل حباب‌زای شیمیایی وارد واکنش می‌شوند و کاربامیک اسید به عنوان محصولی ناپایدار تولید می‌شود که سریعاً به کربن دی‌اکسید و آمین تجزیه خواهد شد. کربن دی‌اکسید تولیدشده عامل اصلی رشد حباب در ساختار فوم می‌باشد [۱۸، ۲۲، ۲۴-۲۸]. به این صورت با کنترل واکنش‌های ژلاسیون و حباب‌زایی می‌توان خواص فوم نهایی را کنترل کرد. به این ترتیب فوم‌های منعطف پلی‌یورتان حاوی دو بخش سگمنت سخت (شامل گروه‌های ایزوسیاناتی) و سگمنت نرم متشکل از زنجیره‌های پلی‌ال خواهد بود. در مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که با استفاده از بهینه‌سازی وزن مولکولی، ساختار شیمیایی و

عدد هیدروکسیلی پلی‌ال، نوع و شاخص ایزوسیانات، محتوای آب، نوع گسترش‌دهنده‌های زنجیر، استفاده از فیلرهای آلی و معدنی و یا لیاف گوناگون می‌توان رفتار جذب صوت فوم‌های پلی‌یورتان را ارتقا بخشید [۲۱-۳۰]. با اینکه مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار جذب صوت فوم‌های صوت صورت گرفته است، اما هنوز مطالعه‌ی جامعی بر روی تاثیر زبری سطح دیواره‌های سلول‌های پلی‌یورتان بر میزان جذب صوت فوم پلی‌یورتان انجام نشده است. هدف از این مطالعه، بررسی میزان جذب صوت فوم‌های پلی‌یورتان و ایجاد زبری‌های مختلف بر روی سطح دیواره‌ی سلولی با استفاده از ساختارهای مختلف رزین پلی‌استر خطی آلیفاتیک است که با استفاده از مونومرهای مختلف با روش استریفیکاسیون سنتز شده‌اند.

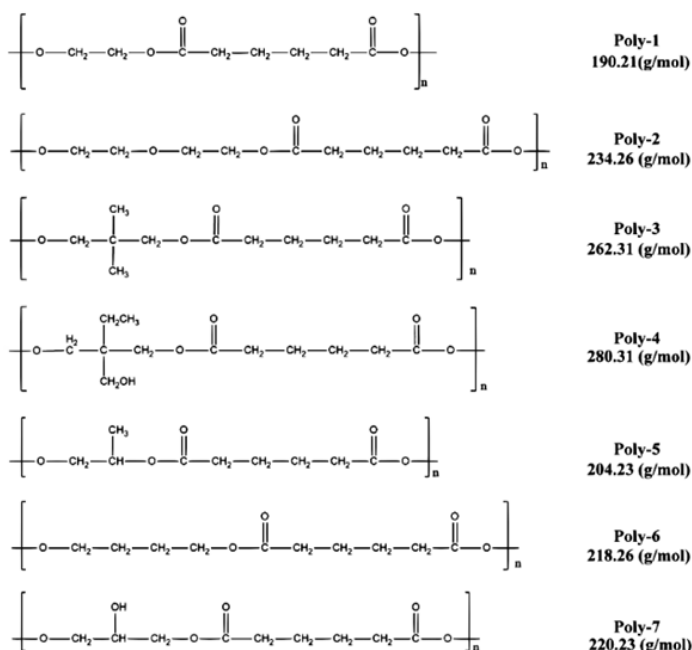
## ۲) بخش تجربی

در ابتدا رزین پلی‌استر آلیفاتیک خطی اشباع با استفاده از مونومرهای اتیلن گلاکول، ۱ و ۲ پروپان دی‌ال، گلیسرین، دی اتیلن گلاکول، تری متیلول پروپان، ۱ و ۴ بوتان دی‌ال، نئوپنتیل پلاکول به عنوان الکل‌های چندعاملی و آدیپیک اسید به عنوان دی‌اسید تهیه شد. تمامی این مونومرها مطابق با جدول (۱) در یک بالن چهاردهانه‌ی یک لیتری مجهز به داماسنج، گرم‌کن، گاز نیتروژن، مبرد رفلاکس ریخته شد و واکنش استریفیکاسیون در دمای ۲۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت انجام شد. عدد اسیدی و هیدروکسیلی رزین‌های سنتز شده به ترتیب مطابق استاندارد ASTM D1639-90 و DIN 53240-2 (روش رفلاکس فتالسیون) اندازه‌گیری شد. از روی این دو مقدار، محتوای هیدروکسیلی (%OH) رزین‌ها برای ارائه‌ی فرمولاسیون فوم محاسبه شد. متوسط وزن مولکولی عددی و وزنی و پراکندگی جرم مولکولی رزین‌های سنتز شده نیز اندازه‌گیری و در جدول (۱) گزارش شد. ساختار شیمیایی رزین‌های سنتز شده به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای ساخت فوم‌های پلی‌یورتان همان‌طور که در جدول (۲) گزارش شده است، از رزین پلی‌استر سنتز شده، متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات، اتیلن دی‌آمین به عنوان گسترش‌دهنده‌ی زنجیره، تری‌اتیلن دی‌آمین، تری‌اتیلن آمین به عنوان کاتالیزر حباب‌زا، دی‌بوتیل تین دی‌لاورات به عنوان کاتالیزر ژلاسیون، آب دی‌یونیزه شده به عنوان عامل حباب‌زای شیمیایی، نونیل فنل اتوکسیلات به عنوان عامل فعال سطح برای پایدارسازی تخلخلات و حفرات استفاده شد. محتوای ایزوسیانات مطابق با استاندارد ASTM D2572-97 اندازه‌گیری شد و برابر با  $33/5 \pm 0/5\%$  بود. تمامی مواد به جز ایزوسیانات مطابق با جدول (۲) با استفاده از همزن مکانیکی با دور ۱۵۰۰ rpm به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس ایزوسیانات به این مخلوط از پیش تهیه‌شده اضافه شد و به مدت ۱۰ ثانیه با دور ۱۰۰۰ rpm هم خورد. بعد از این فرآیند اختلاط، مخلوط سریعاً به داخل قالب‌های آلومینیومی ریخته شد و نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۶۰ °C

جدول ۱: ویژگی‌های رزین پلی استر سنتز شده با استفاده از مونومرهای مختلف.

Poly-1	Poly-2	Poly-3	Poly-4	Poly-5	Poly-6	Poly-7	پلی استر
AA (100)	AA (100)	AA (100)	AA (100)	AA (100)	AA (100)	AA (100)	دی اسید
EG (42.47)	DEG (72.62)	NPG (71.27)	TMP (91.81)	PG (52.07)	BD (61.67)	GL (63.02)	الکل‌های چند عاملی
۱/۲۶	۶/۳۲	۱۲/۹۵	۱۸/۸	۱۱/۱	۱۲	۳/۶۶	عدد اسیدی (mg KOH/g)
۳۶	۳۵/۹۱	۲۹/۶	۳۱/۸۹	۳۳/۴۲	۳۵/۴۹	۴۶/۲۵	عدد هیدروکسیلی (mg KOH/g)
۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۲۹	۱/۵۴	۱/۳۵	۱/۴۴	۱/۵۲	محتوای هیدروکسیل (OH %)
۱۰۰۵۰	۱۱۱۰۰	۱۲۴۰۰	۱۰۰۰۰	۱۱۷۰۰	۱۲۰۹۰	۹۸۰۰	M <sub>w</sub>
۲۴۲۲۰/۵	۲۴۹۷۵	۳۱۳۷۲	۲۶۰۰۰	۲۶۷۹۳	۳۰۳۴۵/۹	۲۳۴۲۲	M <sub>n</sub>
۲/۴۱	۲/۲۵	۲/۵۳	۲/۶	۲/۲۹	۲/۵۱	۲/۳۹	PDI



شکل ۱: ساختار شیمیایی رزین پلی استر به صورت شماتیک.

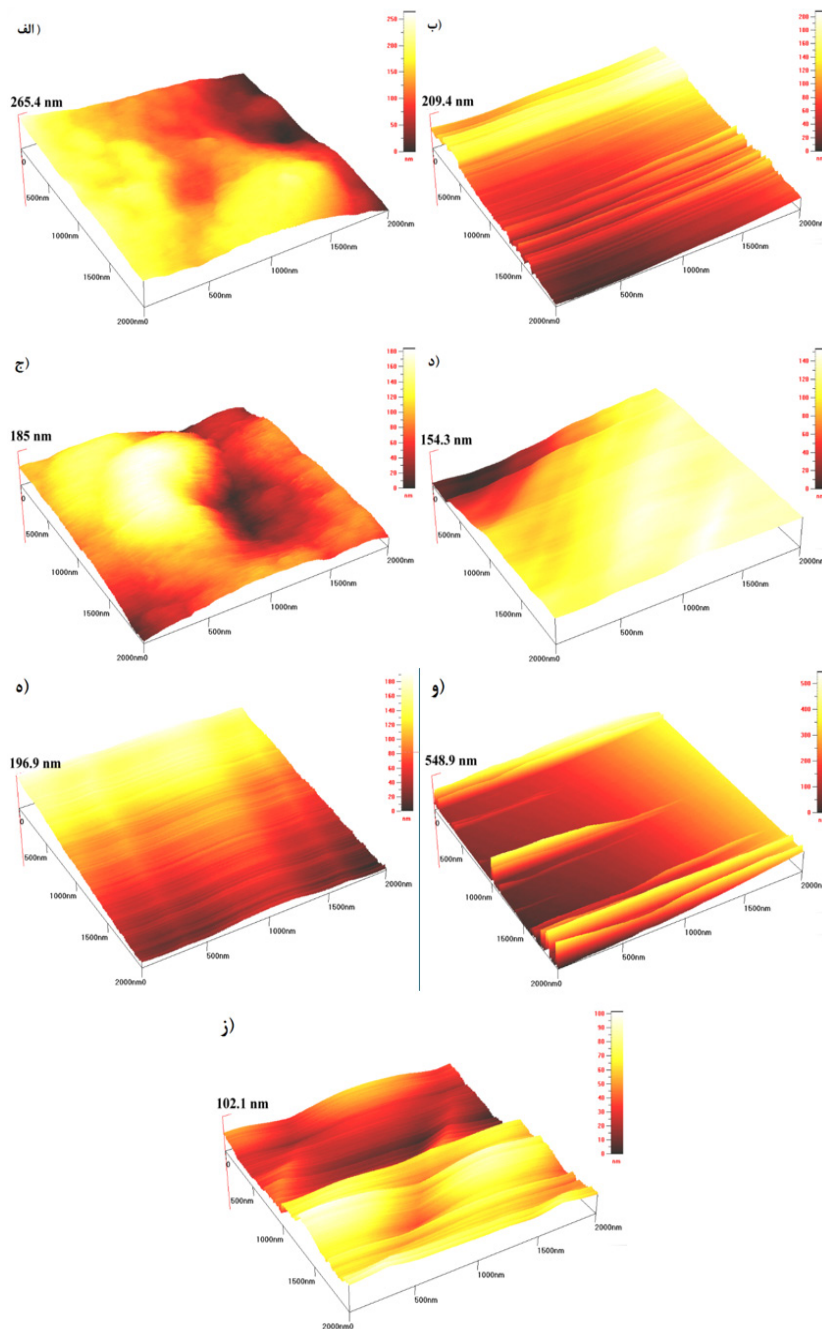
جدول ۲: فرمولاسیون تهیه فوم پلی یورتان منعطف.

F1-5	F2-5	F3-5	F4-5	F5-5	F6-5	F7-5	کد فوم پلی یورتان
Poly-1	Poly-2	Poly-3	Poly-4	Poly-5	Poly-6	Poly-7	کد پلی استر
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مقدار پلی استر (g)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	DBTDL (g)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	NP-10 (EO) (g)
۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	DI آب
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	TEDA (g)
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	TEA (g)
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	n-MA (g)
۹۹/۴	۹۹/۳	۱۰۵/۱	۹۹/۹	۹۹/۶	۱۰۵/۱۲	۹۹/۱	MDI
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	EDA (g)
110%	110%	110%	110%	110%	110%	110%	شاخص ایزوسیانات



نگهداری شدند. نمونه‌های فوم برای آزمون‌های تعیین‌کننده‌ی خواص فیزیکی و جذب صوت، با استفاده از کاتر برش خوردند. همچنین چگالی و محتوای باز سلول‌های فوم پلی‌یورتان به ترتیب با استفاده از استانداردهای ASTM D۱۶۲۲-۱۴ و ASTM D۲۶۲۶-۱۵ اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری زبری سطح دیواره‌ها و بررسی توپولوژی سطح، از میکروسکوپ نیروی اتمی (Ambios tech. USA) استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های مورد استفاده در آزمون AFM، نمونه‌های فوم در داخل نیتروژن مایع قرار گرفتند و با اندازه‌ی

۱ cm×۱ cm برش خوردند و بر روی زیرآیند سیلیکونی چسبانده شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند. فرکانس رزونانسی دستگاه بر روی ۱۵۰ kHz و ثابت جهش آن بر روی ۳۸ N/m تنظیم شد. اندازه‌گیری‌ها با نرخ اسکن ۲ هرتز و در حالت غیر تماسی انجام شد. تصاویر حاصل با استفاده از نرم افزار Q port بررسی و زبری هر نمونه محاسبه شدند. برای ارزیابی میزان جذب صوت فوم‌های پلی‌یورتان از دستگاه تیوپ امپدانس (Type 4002 Standing Wave Impedance) استفاده (Tube, B&K Co. Ltd) و استاندارد ISO۱۰۵۳۴-۲ استفاده



شکل ۲: تصاویر توپولوژی سطح دیواره‌های فوم پلی‌یورتان برای محاسبه میزان زبری (الف: F1-5، ب: F2-5، ج: F3-5، د: F4-5، ه: F5-5، و: F6-5 و ز: F7-5).

است. در پلی‌یورتان‌ها امتزاج‌پذیری سگمنت‌های سخت و نرم سازنده زنجیره‌ی پلیمر پایین است و به دلیل اختلاف در پارامتر حلالیت این دو سگمنت، جدایی فازی رخ خواهد داد؛ اما به دلیل حضور پیوندهای کوالانسی بین آنها، جدایش به صورت جدایش میکروفازی خود را بروز می‌دهد. جدایش میکروفازی به توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی بایندتیت بین گروه‌های اوره تولید شده در زنجیره‌های بلوکه‌شده پلی‌یورتان-اوره مرتبط است و با افزایش میزان پیوندهای هیدروژنی، بلورهای مکعب-مستطیلی حاصل از جدایش میکروفازی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و در نهایت فراساختارهای کروی را ایجاد می‌کنند که منجر به افزایش زبری سطح دیواره‌ها و پایه‌های سلول‌های فوم می‌شوند. به این ترتیب با افزایش میزان جدایش میکروفازی تا ایجاد فراساختارهای کروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. جدایش میکروفازی و توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی بایندتیت وابسته به ساختار شیمیایی، قطبیت، بلورینگی و پارامتر حلالیت سگمنت نرم و همچنین محتوای سگمنت سخت است. به‌طور کلی هر چه ممانعت فضایی و قطبیت سگمنت‌های متصل به ساختار اوره کمتر باشد، جدایش میکروفازی در آن ساختار افزایش پیدا می‌کند [۲۲-۲۸].

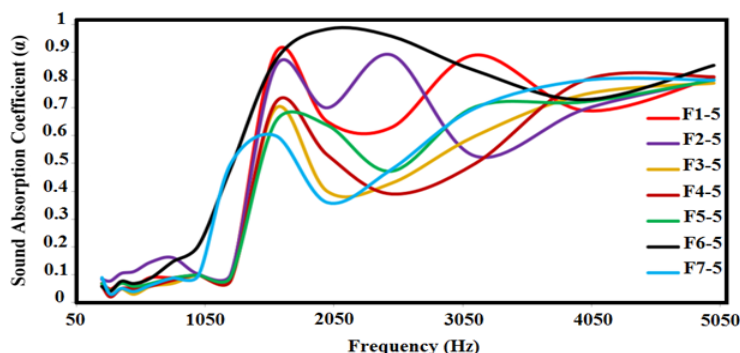
همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، poly-1, Poly-6 و poly-2 به ترتیب کم‌ترین میزان قطبیت، بیشترین طول زنجیره و کمترین ممانعت فضایی را دارند، از این‌رو به ترتیب بیشترین

شد و ضرایب جذب در حالت انتقالی محاسبه شدند. برای هر فرمولاسیون فوم، سه نمونه برای اندازه‌گیری ضریب جذب استفاده شد و نمونه‌ها در معرض امواج صوتی ساعت شده از میکروفون ۱/۴ اینچی در محدوده‌ی فرکانسی ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز قرار گرفتند.  $\alpha$  اختلاف بین انرژی ورودی و انرژی بازتابیده شده به سطح نمونه‌ها است. ضخامت قرص‌های فوم پلی‌یورتان برای اندازه‌گیری ضریب جذب ۱۰ و قطر آنها ۲۹ و ۹۹ میلی‌متر بود.

### (۳) نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول ۱ و ۲ مشخص است، فوم‌های F1-5, F2-5, F3-5, F4-5, F5-5, F6-5 و F7-5 به ترتیب از پلی‌استرهای Poly-1, Poly-2, Poly-3, Poly-4, Poly-5, Poly-6 و Poly-7 تشکیل شده‌اند. به عبارتی تنها تفاوت آنها در ساختار شیمیایی الکل چند عاملی آنهاست که F2-5, F3-5, F4-5, F5-5, F6-5 و F7-5 به ترتیب از EG, DEG, NPG, TMP, PG, BD و GL تهیه شده‌اند. تصاویر توپولوژی AFM نمونه‌های فوم در شکل (۲) نشان داده شده است.

زبری‌ها با استفاده از نرم افزار Q port آنالیز شدند و میزان آنها در جدول (۳) گزارش شدند. میزان زبری‌های سطح در پلی‌یورتان‌ها و پلی‌اوره‌ها به جدایش میکروفازی سگمنت‌های نرم و سخت در فوم نسبت داده می‌شود که این جدایش، حاصل پدیده‌ای ترمودینامیکی



شکل ۳: منحنی ضرایب جذب صوت در مقابل فرکانس.

جدول ۳: خواص فیزیکی و میزان جذب فوم‌های پلی‌یورتان منعطف.

F1-5	F2-5	F3-5	F4-5	F5-5	F6-5	F7-5	کد فوم پلی‌یورتان
۲۸۵۷/۵	۲۷۱۵/۳۶	۲۵۴۲	۲۳۳۷	۲۵۵۴	۳۳۰۱/۳	۲۳۰۸	مساحت زیر سطح نمودار جذب
۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۸۸	۰/۵۶	متوسط ضریب جذب بین (۱۵۰۰-۴۰۰۰ Hz)
۱۶۸/۹	۱۱۸/۲	۱۰۰/۰۷	۹۰/۶۳	۱۰۵/۳۷	۱۷۲/۹	۶۹/۵۸	زبری سطح دیواره‌های سلولی فوم (نانومتر)
۲۴/۳۷	۲۲/۳۸	۸/۴۵	۱۱/۹۱	۱۲/۳۸	۲۹/۷۶	۱۰/۶	محتوای سلول باز
۱۰۲/۶۱	۸۷/۵۲	۵۹/۱۸	۳۹/۳	۷۶/۶۵	۱۰۷/۸۹	۷۶/۰۲	چگالی (Kg.m <sup>-3</sup> )

## ۵ مراجع

- [1] J. G. Gwon, S. K. Kim, J. H. Kim, Sound absorption behavior of flexible polyurethane foams with distinct cellular structures, *Mater. Des.* 89 (2016) 448–454.
- [2] K. Gao, J. A. W. van Dommelen, M. G. D. Geers, Investigation of the effects of the microstructure on the sound absorption performance of polymer foams using a computational homogenization approach, *A/Solids, Eur. J. Mech.* 61 (2017) 330–344.
- [3] A. E. Tiuca, H. Vermeşana, T. Gabora, O. Vasileb, Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste, *Energy Procedia* 85 (2016) 559–565.
- [4] G. Sung, J. H. Kim, Effect of high molecular weight isocyanate contents on manufacturing polyurethane foams for improved sound absorption coefficient, *Korean J. Chem. Eng.* 34 (2017) 1222–1228.
- [5] L. N. Shafigullin, S. Yu. Yurasov, G. R. Shayakhmetova, A. N. Shafigullina, E. D. Zharin, Sound-absorbing polyurethane foam for the auto industry, *Russ. Eng. Res.* 37 (2017) 372–374.
- [6] J. H. Park, K. S. Minn, H. R. Lee, S. H. Yang, Ch. B. Yu, S. Y. Pak, Ch. S. Oh, Y. S. Song, Y. J. Kang, J. R. Youn, Cell openness manipulation of low-density polyurethane foam for efficient sound absorption, *J. Sound Vib.* 406 (2017) 224–236.
- [7] 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, *Polym. Test.* 53 (2016) 156–164.
- [8] J. G. Gwon, S. K. Kim, J. H. Kim, Development of cell morphologies in manufacturing flexible polyurethane urea foams as sound absorption materials, *J. Porous Mater.* 23 (2016) 465–473.
- [9] P. Cinelli, I. Anguillesi, A. Lazzeri, Green synthesis of flexible polyurethane foams from liquefied lignin, *Eur. Polym. J.* 49 (2013) 1174–1184.
- [10] Zh. Lana, A. R. Daga, R. White house, S. Mc Carthy, Structure-properties relations in flexible polyurethane foams containing a novel bio-based crosslinker, *Polym.* 55 (2014) 2635–2644.
- [11] D. Simón, A. de Lucas, J. F. Rodríguez, A. M. Borroguero, Glycolysis of high resilience flexible polyurethane foams containing polyurethane dispersion polyol, *Polym. Degrad. Stab.* 133 (2016) 119–130.
- [12] M. Oliviero, L. Verdolotti, M. Stanzione, M. Lavorgna, S. Iannace, M. Tarello, A. Sorrentino, Bio-based flexible polyurethane foams derived from succinic polyol: Mechanical and acoustic performances, *Appl. Polym.* 134, (2017) 45113.
- [13] J. P. Arenas, F. Ugarte, A note on a circular panel sound absorber with an elastic boundary condition, *Appl. Ac.* 114 (2016) 10–17.
- [14] A. A. Mahmoud, E. A. Ader Nasr, A. A. Hamed Maamoun, The influence of polyurethane foam on the insulation characteristics of mortar pastes, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 5 (2017) 49–61.
- [15] Y. Ch. Chuang, T. T. Li, Ch. H. Huang, Ch. L. Huang, Ch.

میزان جدایش میکروفازی را خواهند داشت. همچنین امکان ایجاد اتصالات عرضی و گروه‌های پلی‌یورتانی عمود بر ساختار زنجیره به دلیل وجود گروه هیدروکسیل بر روی شاخه‌های آلکیل در poly-4 و poly-7، از ایجاد جدایش میکروفازی ممانعت می‌کند. علاوه بر این در ساختار poly-4 و poly-5 به دلیل وجود گروه‌های آلکیل (شاخه‌های جانبی) و ممانعت فضایی، جدایش میکروفازی کاهش می‌یابد. به این ترتیب میزان زبری سطح هر فوم قابل توجیه است. رفتار جذب صوت نمونه‌های فوم در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین مساحت زیر سطح نمودار جذب، ماکزیمم مقدار جذب و میانگین جذب صوت در جدول (۳) گزارش شده است. همان‌طور که از جدول (۳) مشخص است، با افزایش زبری سطح، میزان جذب صوت افزایش داشته است.

به‌طور کلی امواج صوتی زمانی که به سطح برخورد می‌کنند، می‌توانند از روی سطح بازتاب شوند، عبور کنند، پخش شوند و یا جذب سطح شوند [۲۱–۲۶]. به این ترتیب می‌توان این رفتار افزایش جذب صوت را به این گونه توجیه کرد که با افزایش زبری سطح دیواره‌ها و پایه‌های فوم در مقیاس نانومتر و میکرونی، میزان انکسار امواج صوتی از سطح افزایش می‌یابد و امکان برخورد امواج با سطوح دیگر و جذب آنها بالا می‌رود. بنابراین با افزایش زبری سطح دیواره‌ی سلولی ناشی از افزایش جدایش میکروفازی، عملکرد جذب صوت فوم‌های پلی‌یورتان بالا می‌شود.

## ۴ نتیجه گیری

فوم‌های پلی‌یورتان با استفاده از متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات، پلی‌استرهای خطی اشیاع آلیفاتیک سنتز شده از الکل‌های چند عاملی و دی‌اسید مختلف و مواد افزودنی دیگر تهیه شدند (محتوای آب=۵٪ و شاخص ایزوسیانات=۱۱۰٪). رفتار جذب صوت این فوم‌ها و میزان زبری سطح دیواره‌ی سلولی آنها به ترتیب با استفاده از دستگاه تیوپ امپدانس و میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان زبری سطح از ۶۹/۵۸ تا ۱۷۲/۹ نانومتر ناشی از افزایش میزان جدایش میکروفازی، عملکرد جذب صوت فوم‌های جذب صوت تا ۴۳/۰۷٪ به دلیل افزایش انکسارات امواج صوتی افزایش داشته است؛ به طوری که بیشینه ضریب جذب صوت به ۰/۹۸ رسید. به این ترتیب مشخص شد که فوم‌های پلی‌یورتان با میزان زبری سطح در حدود ۱۷۰–۱۸۰ نانومتر می‌تواند به عنوان یک جذب صوت عمل کند.

## تشکر و قدردانی

از پژوهشکده‌ی رنگ و پلیمر دانشگاه صنعتی امیرکبیر بابت راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های صورت گرفته تشکر و قدردانی می‌گردد.



- A. Eceiza, Flexible polyurethane foams based on 100% renewably sourced polyols, *Ind. Crop. Prod.* 62 (2014) 545–551.
- [30] H. Xia, M. Song, Z. Zhang, M. Richardson, Microphase separation, stress relaxation, and creep behavior of polyurethane nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.* 103 (2007) 2992–3002.
- W. Lou, Y. Sh. Chen, J. H. Lin, Protective rigid fiber-reinforced polyurethane foam composite boards: Sound absorption, drop-weight impact and mechanical properties, *Fiber. Polym.* 17 (2016) 2116–2123.
- [16] H. A., B. Abbès, F. Abbès, Y. Li, Y. Q. Guo, Prediction of acoustic properties of polyurethane foams from the macroscopic numerical simulation of foaming process, *Appl. Ac.* 120 (2017) 129–136.
- [17] N. Gama, R. Silva, A. P.O. Carvalhoc Artur Ferreirad, A. Barros-Timmons, Sound absorption properties of polyurethane foams derived from crude glycerol and liquefied coffee grounds polyol, *Polym. Test.* 62 (2017) 13–22.
- [18] G. K. O. D'Amore, M. Caniato, A. Travan, G. Turco, L. Marsich, A. Ferluga, Ch. Schmid, Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder, *J. Clean. Prod.* 165 (2017) 1306–1315.
- [19] G. Sung, J. H. Kim, Influence of filler surface characteristics on morphological, physical, acoustic properties of polyurethane composite foams filled with inorganic fillers, *Compos. Sci. Tech.* 146 (2017) 147–154.
- [20] A. Hasani Baferani, A.A. Katbab, A.R. Ohadi, The role of sonication time upon acoustic wave absorption efficiency, microstructure, and viscoelastic behavior of flexible polyurethane/CNT nanocomposite foam, *Eur. Polym. J.* 90 (2017) 383–391.
- [21] 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, *Compos. Sci. Tech.* 69 (2009) 1564–1569.
- [22] X. H. Yang, S. W. Ren, W. B. Wang, X. Liu, F. X. Xin, T. J. Lu, A simplistic unit cell model for sound absorption of cellular foams with fully/semi-open-cells, *Compos. Sci. Tech.* 118 (2015) 276–283.
- [23] H. Zhou, B. Li, G. Huang, Sound absorption characteristics of polymer microparticles, *Appl. Polym.* 101 (2006) 2675–2679.
- [24] G. Sunga, J. W. Kim, J. H. Kima, Fabrication of polyurethane composite foams with magnesium hydroxide filler for improved sound absorption, *J. Ind. Eng. Chem.* 44 (2016) 99–104.
- [25] J.T. Garrett, R. Xu, J. Cho, J. Runt, Phase separation of diamine chain-extended poly (urethane) copolymers: FT-IR spectroscopy and phase transitions, *Polym.* 44 (2003) 2711–2719.
- [26] L. Ning, W. De-Ning, Y. Sheng-Kang, Crystallinity and hydrogen bonding of hard segments in segmented poly (urethane-urea) copolymers, *Polym.* 37 (1996) 3577–3583.
- [27] A.M. Heintz, D.J. Duffy, C.M. Nelson, Y. Hua, S.L. Hsu, W. Suen, C.W. Paul, A spectroscopic analysis of the phase evolution in polyurethane foams, *Macromol.* 38 (2005) 9192–9199.
- [28] L. Ning, W. De-Ning, Y. Sheng-Kang, Hydrogen-bonding properties of segmented polyether poly (urethane-urea) copolymer, *Macromol.* 30 (1997) 4405–4409.
- [29] L. Ugarte, A. Saralegi, R. Fernandez, L. Martín, M. Corcuera,