

بهینه‌سازی رفتار جذب صوت در فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر از طریق طراحی و کنترل ریزساختار سلولیلیلا حیدری^{۱*}، حسن خاکی‌جوان^۲، امیر عادلین^۲

۱. مدرس و مدیر دپارتمان مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو
 ۲. دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو

چکیده

اثر ساختار سلولی در فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر بر رفتار جذب صدا برای بهبود محیط صوتی داخل وسایل نقلیه مورد بررسی قرار گرفته است. دو نوع کاتالیزور ژل‌زایی و آب برای تولید ساختار حفره و منفذ مشخص در فوم‌ها استفاده می‌شوند. کاتالیزوری که فعالیت بالایی در واکنش یورتان دارد، در مقایسه با کاتالیزور با فعالیت پایین، تعداد بیشتری حفره و منفذ کوچک در فوم‌ها ایجاد می‌کند. تعداد زیاد حفره‌های کوچک همچنین می‌تواند در محتوای بالای آب به دلیل محدودیت حفره‌های همسایه ناشی از ماتریس یورتان فعال تشکیل شده به دست آید. چگالی فوم با افزایش محتوای آب و کاتالیزور کاهش می‌یابد. کارایی جذب صدا معمولاً در چگالی پایین فوم کم است، اما نتایج نشان می‌دهند که حتی در چگالی کاهش یافته فوم، کارایی جذب صدا به دلیل تعداد زیاد سلول‌های کوچک به‌خوبی پراکنده شده در فوم‌ها بهبود یافته است.

مطالعات مدل‌سازی نشان می‌دهند که پارامترهای غیرآکوستیکی به‌طور نزدیکی به ساختارهای میکروسولار فوم‌های پلی‌یورتان وابسته هستند و بنابراین کارایی جذب صدا در این فوم‌ها می‌تواند از طریق تغییر ساختار سلولی فوم‌های PU بهبود یابد. در تحقیقات اخیر، هم‌آمیزی انواع نانو و میکروذرات در فوم‌های پلی‌یورتان برای کاهش آلودگی صوتی گزارش شده است. با این حال، مواد کامپوزیتی که با ذرات ترکیب شده‌اند ممکن است از نظر صرفه‌جویی در مصرف سوخت خودرو ناکارآمد باشند. علاوه بر این، به دلیل ساختار میکروسکوپی پیچیده رسانه‌های متخلخل با سلول باز، طراحی مهندسی چنین موادی (مانند پلی‌اول، ایزوسیانات، کاتالیزور و غیره) برای دستیابی به عملکرد آکوستیکی بهینه یک مسئله چالش‌برانگیز و همچنان باز در این زمینه است. بنابراین، طراحی یک ماده فومی با ساختار سلولی بهینه برای بهبود قابلیت جذب صدا بدون افزایش چگالی ماده برای دستیابی به بازده بالای سوخت خودرو اهمیت زیادی دارد.

کلمات کلیدی: فوم‌های پلی‌یورتان، کاتالیزورها، ساختار سلولی، جذب صدا، محیط صوتی خودرو، بهینه‌سازی چگالی

۱- مقدمه

آلودگی صوتی یکی از بدترین مشکلات زیست‌محیطی است و به دلیل توسعه سریع صنایع و حمل‌ونقل مدرن همچنان در حال بدتر شدن است. به ویژه، خودرو منبع مهمی از آلودگی صوتی جدی است که شامل نویز ساختاری (صدای ناشی از موتور یا تماس با جاده) و نویز هوابرد (صدای ناشی از انفجار موتور، نویز جاده یا باد ایجاد شده در سرعت‌های بالا) می‌شود. یکی از راهکارهای کلیدی برای کاهش آلودگی صوتی، بهبود بازدهی جذب صدا از طریق افزایش ظرفیت میرایی و بهینه‌سازی ساختار منغذی مواد است. فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با حجم بالای منافذ باز به دلیل میرایی مؤثر صدا، چگالی کم، سهولت تولید و قابلیت تغییر شکل و سبک به عنوان یک ماده مؤثر در جذب صدا در حوزه حمل‌ونقل بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در این مطالعه، ساختار سلولی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر را بررسی می‌کنیم تا حفره‌های باز با تعریف خوب و منافذ متصل به هم با استفاده از دو نوع کاتالیزور ژل‌کننده و آب تولید کنیم. هدف از مطالعه حاضر، توسعه فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با بهبود توانایی جذب صوت بدون افزایش چگالی ماده است. اندازه‌گیری‌های مورفولوژیکی برای حفره‌ها و منافذ متصل به هم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم‌افزار تحلیل تصویر انجام شد و بازدهی جذب صوت نیز با استفاده از روش لوله امیدانس بررسی شد تا رابطه بین مورفولوژی سلولی و عملکرد جذب صوتی درک شود.

مهم‌ترین ویژگی فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر داشتن حفره‌هایی با منافذ باز به هم متصل است و ساختار سلولی آن می‌تواند نقش مهمی در کنترل نه تنها خواص مکانیکی بلکه خواص صوتی ایفا کند. ساختار سلولی در سنتز فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر به طور همزمان تحت تأثیر دو واکنش شیمیایی اصلی قرار دارد: ژله‌ای شدن برای تولید گروه‌های اورتان بین ایزوسیانات‌ها و پلی‌ال‌ها و دمیدن برای تولید گروه‌های اوره بین ایزوسیانات‌ها و آمین‌های واسطه از اسیدهای کاربامیک ناپایدار با حضور آب. این واکنش‌ها به طور مستقیم تحت تأثیر مواد اولیه مختلف مورد استفاده در فرمولاسیون فوم قرار می‌گیرند. معمولاً، این مواد شامل پلی‌ال‌ها، ایزوسیانات‌ها، توسعه‌دهنده‌های زنجیر، سورفاکتانت‌های سیلیکونی، عوامل دمنده و کاتالیزورها هستند.

علاوه بر این، ساختار سلولی می‌تواند با کنترل نرخ‌های نسبی تشکیل گروه‌های اورتان و اوره تنظیم شود، و بنابراین نرخ‌های نسبی می‌توانند به طور قابل توجهی بر افزایش مدول و آزادسازی گاز CO_2 در طی شکل‌گیری مورفولوژی نهایی فوم تأثیر بگذارند.

انرژی صوتی نفوذ کرده می‌تواند از طریق تعامل ویسکو-اینرسی^۱ بین چارچوب و سیال اشباع و تعامل حرارتی تضعیف شود. جانسون و همکاران [۱۲] چگالی دینامیک برای تعامل ویسکو-اینرسی را پیشنهاد دادند، که از چهار پارامتر غیرآکوستیکی استفاده می‌کند: تخلخل باز (Φ)، مقاومت جریان ایستا (δ)، پیچیدگی مسیر (α^{∞}) و طول حرارتی ویسکوزی (Λ). همچنین، شامپو و آلارد [۱۳] مدول حجمی دینامیک را برای تعامل حرارتی پیشنهاد کردند، که طول ویژگی حرارتی (Λ^v) را به عنوان پارامتر غیرآکوستیکی معرفی می‌کند. آلارد مدل بیوت-جانسون-شامپو-آلارد^۲ را با ترکیب نظریه بیوت و مدل جانسون-شامپو-آلارد^۳ توسعه داد [۱۴]. فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با ساختار سلولی باز از مواد جذب صدا معمولی هستند و مطالعات مختلفی برای تعیین پارامترهای غیرآکوستیک فوم انجام شده است تا رفتار آکوستیکی آن درک شود. کینو و همکاران [۱۴] اختلاف در ضریب جذب فوم‌های PU بین پیش‌بینی‌های مدل با پارامترهای غیرآکوستیک و اندازه‌گیری‌های تجربی با سیستم لوله امیدانس را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که مدل JCA بازنگری شده قبلی [۱۵] با نظریه بیوت با مقدار تجربی همخوانی خوبی داشت. دوترس و همکاران [۱۶] مدل نیمه‌تجربی ساده‌شده با دو پارامتر را پیشنهاد دادند که خواص ریزساختاری فوم‌های PU را به پارامترهای غیرآکوستیک در مدل کلاسیک JCA مرتبط می‌کند.

مطالعات مدل‌سازی نشان می‌دهند که پارامترهای غیرآکوستیکی به‌طور نزدیکی به ساختارهای میکروسولار فوم‌های پلی‌یورتان وابسته هستند و بنابراین کارایی جذب صدا در این فوم‌ها می‌تواند از طریق تغییر ساختار سلولی فوم‌های PU بهبود یابد. در

^۱ Visco-inertial interaction

^۲ Biot-Johnson-Champoux-Allard (BJCA)

^۳ Johnson-Champoux-Allard (JCA)

تحقیقات اخیر، هم آمیزی انواع نانو و میکروذرات در فوم‌های پلی‌یورتان برای کاهش آلودگی صوتی گزارش شده است. با این حال، مواد کامپوزیتی که با ذرات ترکیب شده‌اند ممکن است از نظر صرفه‌جویی در مصرف سوخت خودرو ناکارآمد باشند. علاوه بر این، به دلیل ساختار میکروسکوپی پیچیده رسانه‌های متخلخل با سلول باز، طراحی مهندسی چنین موادی (مانند پلی‌اول، ایزوسیانات، کاتالیزور و غیره) برای دستیابی به عملکرد آکوستیکی بهینه یک مسئله چالش‌برانگیز و همچنان باز در این زمینه است [۱۷، ۱۸]. بنابراین، طراحی یک ماده فومی با ساختار سلولی بهینه برای بهبود قابلیت جذب صدا بدون افزایش چگالی ماده برای دستیابی به بازده بالای سوخت خودرو اهمیت زیادی دارد.

در این مطالعه، ساختار سلولی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر را بررسی کردیم تا حفره‌های باز با تعریف خوب و منافذ متصل به هم با استفاده از دو نوع کاتالیزور ژل‌کننده و آب تولید کنیم. هدف از مطالعه حاضر، توسعه فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با بهبود توانایی جذب صوت بدون افزایش چگالی ماده است. اندازه‌گیری‌های مورفولوژیکی برای حفره‌ها و منافذ متصل به هم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم‌افزار تحلیل تصویر انجام شد و بازدهی جذب صوت نیز با استفاده از روش لوله امیدانس بررسی شد تا رابطه بین مورفولوژی سلولی و عملکرد جذب صوتی درک شود.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- پلی‌اتر پلی‌آل مبتنی بر گلیسرول (Y-۳۵۵۳-تأمین شده توسط SKC، مقدار OH: ۳۵ میلی‌گرم/KOH گرم، وزن مولی: 5830 gmol^{-1} براساس GPC) که یک پلی‌آل بلوک کوپلیمر سه‌کارکرده از اکسید پروپیلن و اکسید اتیلن است.

۲-۱-۲- دی‌ایزوسیانات (Kumho Mitsui Chemicals, CG-۳۷۰۱S)، محتوا NCO: ۳۷/۵٪ (وزنی) شامل واحدهای متیل دی‌فنل و تولوئن و آب دی‌یونیزه شده (مقاومت $> 18 \text{ M}\Omega$) برای سنتز فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر استفاده شدند.

۲-۱-۳- آب دی‌یونیزه به عنوان عامل دمنده برای تولید گاز CO_2 و گروه‌های عاملی آمینی از طریق اسیدهای کاربامیک میانی استفاده شد (DABCO ۳۳LV، DABCO، ۳۳٪ تری‌اتیلن دی‌آمین و ۶۷٪ دی‌پروپیلن گلیکول).

۲-۱-۴- دی‌بوتیل استن دی‌لاورات (۹۵٪) (Sigma Aldrich, DBTDL) به عنوان کاتالیزور برای واکنش ژل‌شدن به کار گرفته شدند.

۲-۱-۵- همچنین، ۱۱ BL (۷۰٪ بیس ۲-دی‌متیل‌آمینواتیل اتر که با ۳۰٪ دی‌پروپیلن گلیکول، محصول Air Product رقیق شده بود) برای واکنش پف‌دهی استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

فوم پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر از طریق فرآیند پلیمریزاسیون یک‌مرحله‌ای سنتز شد. جزئیات فرمولاسیون در جدول ۱ نشان داده شده است. شاخص ایزوسیانات در سیستم آزمایشی ما روی ۱/۰۵ تنظیم شد. مواد به جز ایزوسیانات در یک لیوان کاغذی ۴۰۰ میلی‌لیتری وزن‌کشی شده و به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه با استفاده از میکسر مکانیکی مجهز به پره چهارگوش ۲ اینچی پیش‌مخلوط شدند. سپس ایزوسیانات پیش‌وزن‌کشیده به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱۰ ثانیه با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط بیشتری انجام شد. پلی‌آل قبل از استفاده در فر خلا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و گاززدایی شد. تمام مراحل مخلوط کردن و واکنش‌ها در دمای اتاق انجام شد.

جدول ۱- فرمولاسیون‌های فوم‌های پلی‌یورتان

formulations			
Catalyst effect		Water effect	
Material (g)		Material (g)	
Polyol	۱۰۰	Polyol	۱۰۰
DABCO ۳۳ LV or DBTDL	۰.۱, ۰.۲, ۰.۳, ۰.۴	DBTDL	۰.۴
BL ۱۱	۰.۸	BL ۱۱	۰.۸
Water	۱.۵	Water	۱.۰, ۱.۵, ۲.۰, ۲.۵

۲-۳-۳- مشخصه‌ها

۲-۳-۱- ویژگی‌های مورفولوژی و اندازه

برای به دست آوردن مورفولوژی سلول‌ها (حفره‌ها و مجاری متصل کننده) از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴، مدل SNE-۳۰۰۰M، (شرکت SEC در ولتاژ ۳۰ کیلوولت) استفاده شد. فوم‌های پلی‌یورتان با یک چاقوی تیز در جهات عمود بر رشد فوم بریده شدند. تصاویر SEM برای تحلیل ویژگی‌های سلول‌ها (تعداد حفره‌ها، اندازه حفره‌ها و مجاری) استفاده شدند و نرم‌افزار Image Pro Plus برای محاسبه قطر متوسط حفره‌ها و مجاری متصل کننده به کار رفت. مقادیر متوسط حفره‌ها و مجاری از حدود ۱۰۰ اندازه‌گیری در سطحی به مساحت تقریباً ۲۰ میلی‌متر مربع به دست آمد.

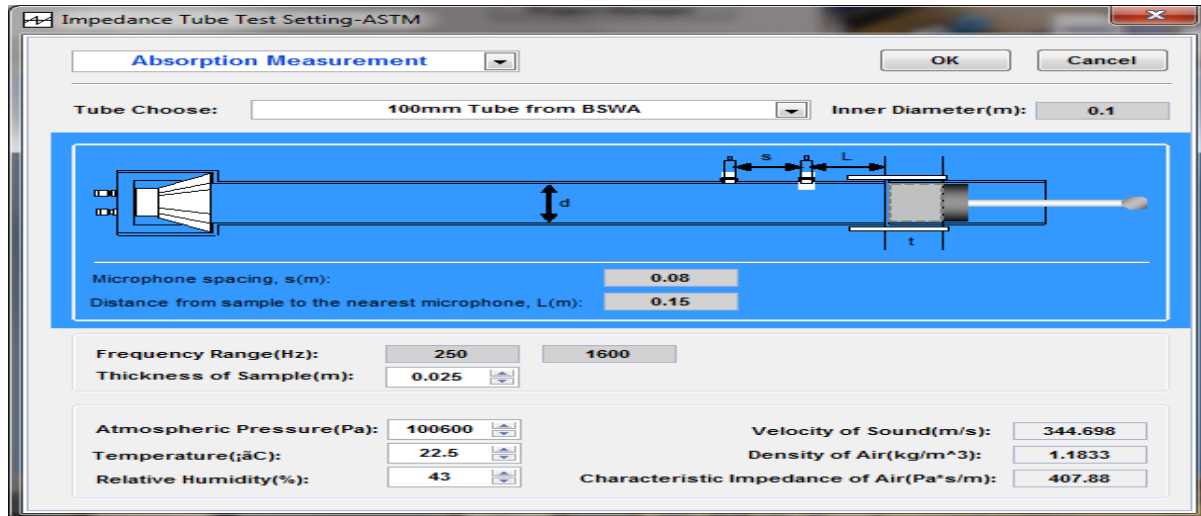
۲-۳-۲- ویژگی آکوستیکی

ضریب جذب صوت با استفاده از دستگاه لوله امیدانس (BSWA SW۴۲۲)، شرکت فناوری (BSWA) مطابق با استاندارد اندازه‌گیری (ASTM ۱۰۵۰)، ۱۹۹۸ و براساس روش تابع انتقال اندازه‌گیری شد. ضریب جذب به‌عنوان نسبت انرژی صوتی جذب‌شده توسط نمونه (Incident-Ireflected) به انرژی صوتی برخوردی (Incident) به‌عنوان تابعی از فرکانس تعریف می‌شود. برای هر نمونه شش اندازه‌گیری در بازه فرکانسی ۵۰ هرتز تا ۲۵۰۰ هرتز با دو میکروفون ۴/۱ اینچی انجام شد. نمونه‌های استوانه‌ای با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و قطرهای ۳۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر برای بازه‌های فرکانسی ۵۰ هرتز- ۴۵۰ هرتز و ۱۶۰۰ هرتز- ۲۵۰ هرتز، ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ استفاده شدند. ضریب جذب صوت برای بازه فرکانسی تک (۵۰-۶۰۰۰ هرتز) با استفاده از نرم‌افزار (VA-LAB)، شرکت فناوری BSWA به دست آمد.

۲-۳-۳- خلاصه‌ای از روش آزمایش

این روش از آزمایش مانند روش آزمایش E۱۰۵۰ است که در آن هم از یک لوله، یک منبع صوت که به انتهای آن متصل است و یک نمونه که در آن جایگذاری و استفاده می‌شود. در جذب صوت، ۲ میکروفون در دو جایگاه بعد و قبل از نمونه قرار گرفته‌اند. بنابراین دیافراگم‌ها باید هم سطح یا سطح داخلی لوله باشند. موج‌های صوتی اولیه با استفاده از یک پهنه باند از سیگنال که توسط یک منبع نویز تولید شده تأمین می‌شود. پس از ورود به نرم افزار و انجام کالیبره اولیه میکروفون‌ها و ورود به منوی تنظیمات اولیه (شکل ۱) محدوده فرکانسی و دما و فشار هوای محل انجام آزمون ثبت می‌گردد.

^۴ Scanning Electron Microscope (SEM)



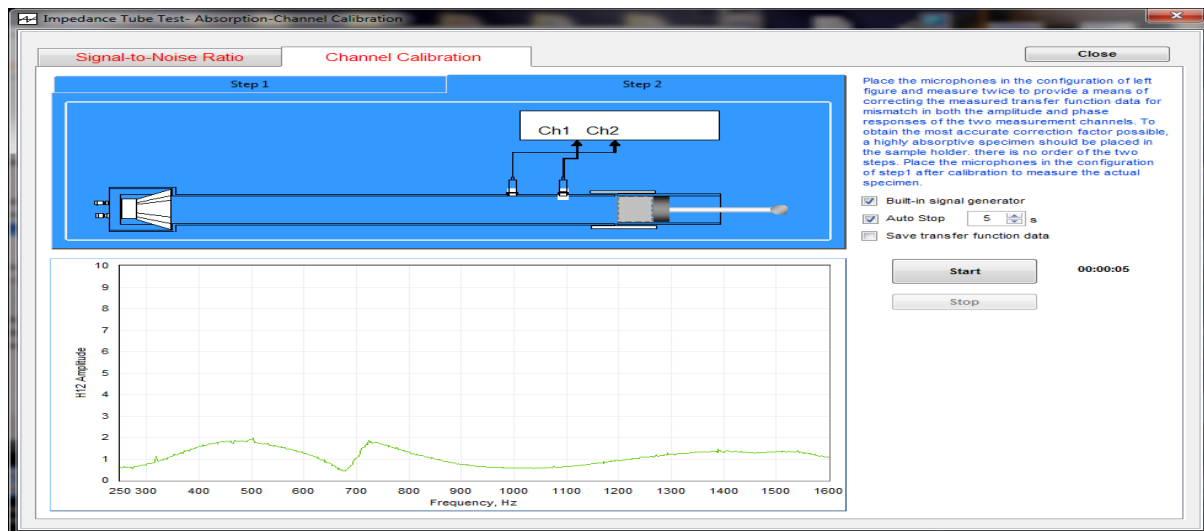
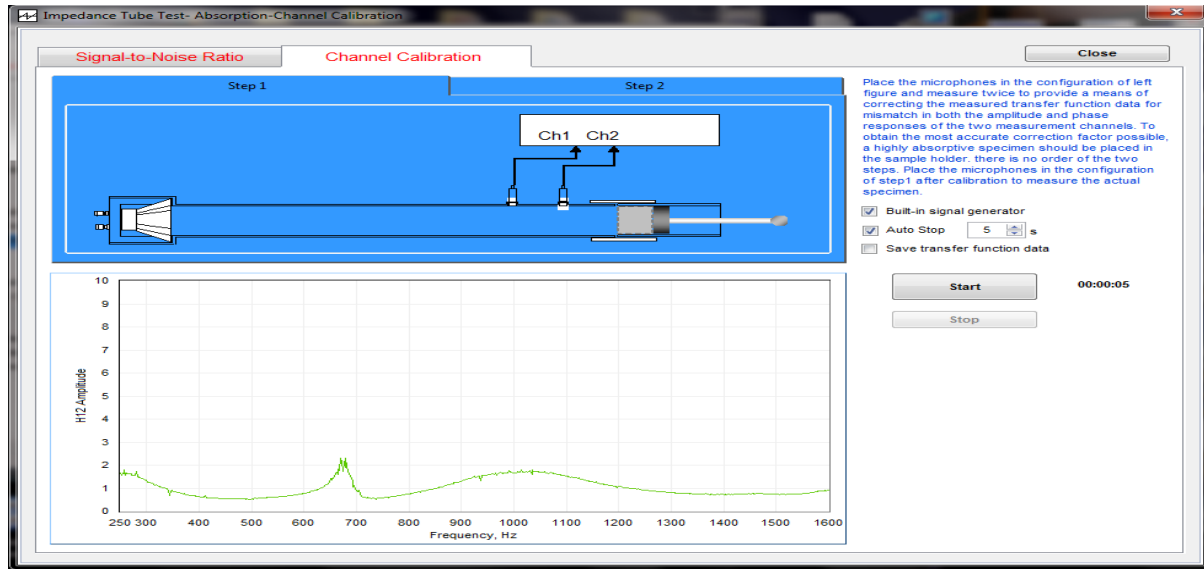
شکل ۱- منوی تنظیمات اولیه

در مرحله بعد وارد منوی تنظیمات سیگنال به نویز محیط می شویم. مطابق استاندارد، سیگنال دستگاه باید ۱۰ برابر نویز محیط باشد. پس از استارت و سبز شدن نشانگر، این مرحله مورد تایید قرار می گیرد (شکل ۲).



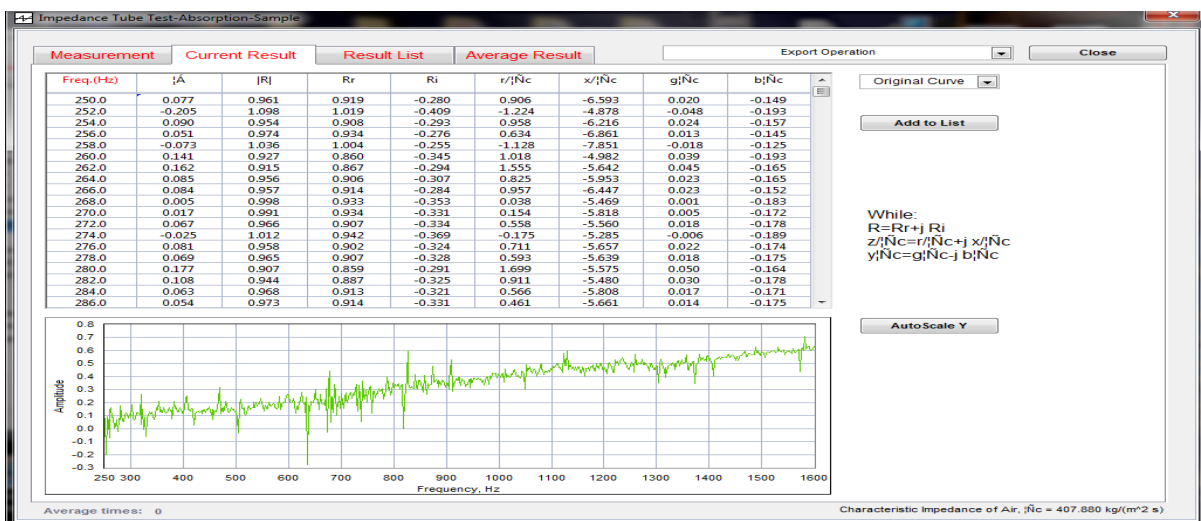
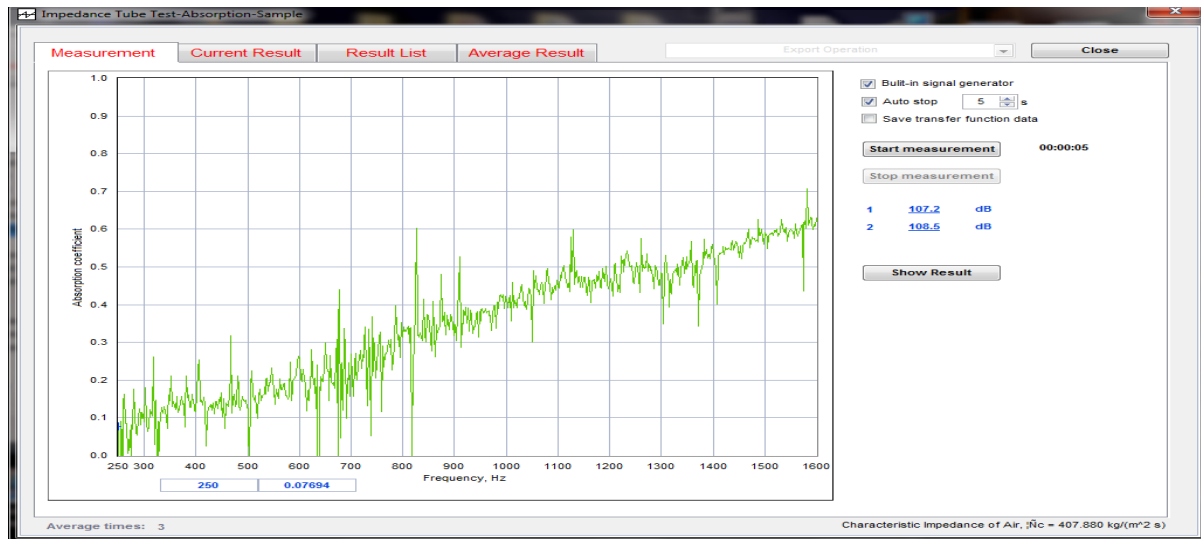
شکل ۲- منوی تنظیمات سیگنال به نویز محیط

در مرحله بعد وارد کالیبراسیون کانالها به وسیله فوم مرجع می شویم مطابق (شکل ۳) در دو مرحله کالیبراسیون صورت می گیرد. در مرحله اول میکروفون ۱ و ۲ در محل اصلی خود قرار می گیرند و در مرحله دوم محل میکروفونها جابجا می شود. اصطلاحاً این مرحله میس متچ نامیده می شود که هدف آن از بین بردن خطای بین میکروفونها در نرم افزار می باشد.



شکل ۳- کالیبراسیون کانال‌ها به وسیله فوم مرجع

در مرحله بعد وارد منوی اندازه‌گیری در نرم‌افزار می‌شویم و ۳ نمونه را به ترتیب داخل تیوب‌ها قرار داده و استارت می‌زنیم. مطابق (شکل ۴) و در مرحله آخر با بازخوانی نتایج میانگین نتایج به دست آمده گزارش می‌شود.



شکل ۴- منوی اندازه‌گیری

۴۶۳ اصطلاحات آکوستیکی استفاده شده در این استاندارد هم معنی و مرکب از اصطلاحات تعریف شده در استاندارد می‌باشند.

۴-۳-۲- سطح صاف

یک بخش اختیاری، عمود بر محور طولی لوله که به عنوان مبدا مدارهای بعدی استفاده می‌شود. معمولاً همان سطح جلوی نمونه (نزدیک به منبع صوت) است ولی وقتی که سطح نمونه ناهموار باشد می‌تواند به عنوان یک سطح صاف مناسب کنار نمونه قرار بگیرد.

۵-۳-۲- بررسی نمادها

$$C = \text{سرعت صوت m/s}$$

$$\rho = \text{دانشسته هوا kg/m}^3$$

$$f = \text{فرکانس HZ}$$

G_۱، G_۲ و الی آخر= توان طیف خودکار سیگنال‌های فشار صوتی بر روی میکروفون‌های ۱ و ۲ به ترتیب

G_۱، G_۲ و الی آخر= توان طیف عرضی سیگنال‌های فشار صوتی میکروفون ۲ نسبت به ۱ و میکروفون ۳ نسبت به ۱ که به طور کلی مقادیر مختلط هستند.

H_۱، H_۲ و الی آخر= اندازه تابع تبدیل فشار صوتی از میکروفون ۲ نسبت به ۱ و میکروفون ۳ نسبت به ۱ و به همین ترتیب. به طور کلی این مقادیر مختلط هستند. توجه داشته باشید که H_۱ کاملاً حقیقی است و برابر همان ۱ می‌باشد.

H_۱، H_۱^۱= اندازه تابع تبدیل کالیبراسیون برای میکروفون‌ها که به ترتیب طبق استاندارد در حالت اولیه و حالت تعویض انجام می‌شود.

H^c= فاکتور مختلط کالیبراسیون که برای میکروفون‌هایی که تحت میس متچ قرار می‌گیرند محاسبه می‌شود.

H_۱^۱، H_۲^۱ و غیره= تابع تبدیل اصلاح شده دو میکروفون به وسیله میس متچ کردن که به طور کلی، یک مقیاس مختلط است.

$$d = \text{ضخامت نمونه به متر}$$

L_۱، L_۲= مقدار فاصله از سطح جلوی نمونه تا مرکز نزدیک‌ترین میکروفون در قبل و بعد نمونه به متر (شکل ۱).

S_۱، S_۲= فاصله مرکز به مرکز جفت میکروفون‌های بعد و قبل نمونه (شکل ۱).

$$R = \text{ضریب بازتاب مختلط صدا}$$

$$\alpha = \text{ضریب جذب امواج عمودی نمونه}$$

$$TL_n = \text{مقدار افت عبوری امواج عمودی}$$

۶-۳-۲- چگالی

نمونه‌های آزمایشی استوانه‌ای (با قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر) از وسط فوم و در جهت‌های عمود بر رشد فوم قطع شدند. نمونه وزن کشی شد و سپس چگالی آن بر اساس حجم نمونه محاسبه گردید.

۳- مورفولوژی سلول‌های باز و ویژگی‌های سلولی

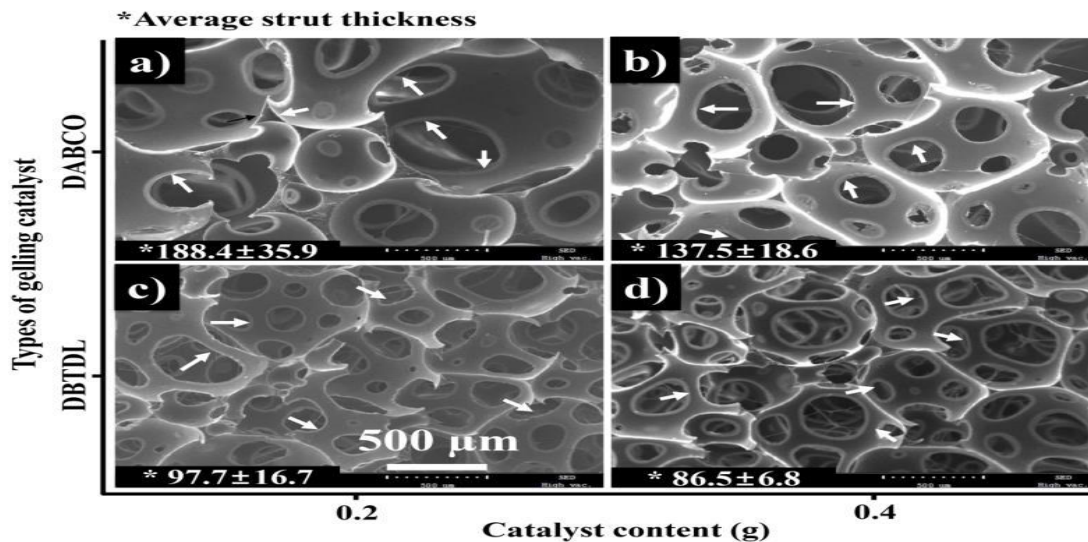
۳-۱- تاثیر کاتالیزور

عملکرد آکوستیکی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های سلولی مانند اندازه‌ها و توزیع اندازه‌ها دارد، زیرا امواج صوتی می‌توانند با سلول‌های متخلخل تعامل داشته باشند.

بنابراین، تحلیل مورفولوژیکی سلول‌ها اولین دغدغه برای درک ظرفیت جذب صدا فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر است. دو نوع کاتالیزور ژله‌دهنده DABCO و DBTDL با فعالیت‌های مختلف در تشکیل گروه‌های اورتان و اوره برای بررسی ساختارهای متنوع سلولی فوم‌های پلی‌اورتان استفاده شدند. از بین این دو کاتالیزور، DBTDL فعالیت بسیار بالایی برای واکنش تشکیل اورتان نشان می‌دهد (k = ۱۴۴ L^۲/(gmolh)) اما تشکیل اوره ضعیفی دارد (k = ۴٫۸ L^۲/(gmolh)). در مقابل، DABCO فعالیت کمتری در تشکیل اورتان نشان می‌دهد (k = ۱۰۹ L^۲/(gmolh)) اما فعالیت بالاتری در تشکیل اوره (k = ۱۴٫۵) (k = ۱۴٫۵ L^۲/(gmolh)) نسبت به DBTDL دارد. بنابراین، مورفولوژی سلول‌ها ابتدا با استفاده از این کاتالیزورها بررسی شد [۱۹].

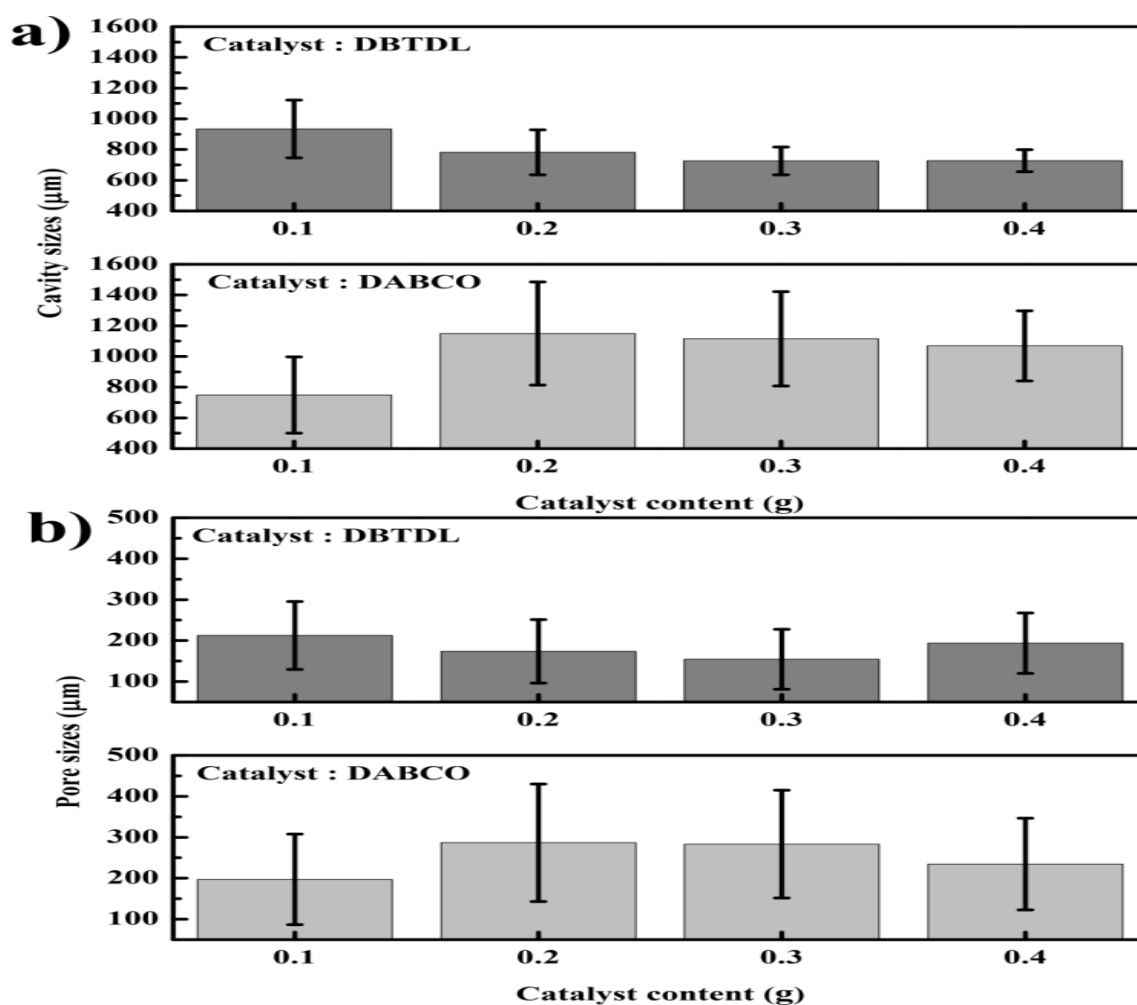
شکل ۵ مورفولوژی فوم‌ها را برای دو نوع کاتالیزور ژله‌دهنده در محتوای آب ۱/۵ گرم نشان می‌دهد و فلش‌های سفید پایه‌هایی را که بین حفره‌های متصل به هم تشکیل شده‌اند، نشان می‌دهند. ضخامت متوسط پایه به‌طور نزدیک با چگالی حجمی فوم‌ها مرتبط

است و بنابراین یک پارامتر مهم برای درک اثر میرایی ماده بر کارایی جذب صدا است. ضخامت متوسط پایه‌ها از پنج نقطه مختلف برای هر نمونه به دست آمده و در پایین تصاویر خلاصه شده است. ساختارهای سلولی حاصل از کاتالیزور DBTDL (شکل ۱ c)، حفره‌های کوچکتری با ضخامت پایه نازک‌تر در مقایسه با نتایج کاتالیزور DABCO (شکل ۱ a, b) نشان می‌دهند. همچنین، ضخامت پایه در محتوای بالای کاتالیزورهای ژل‌دهنده (۰/۴ گرم) نازک‌تر از محتوای کم آن‌ها (۰/۲ گرم) است.



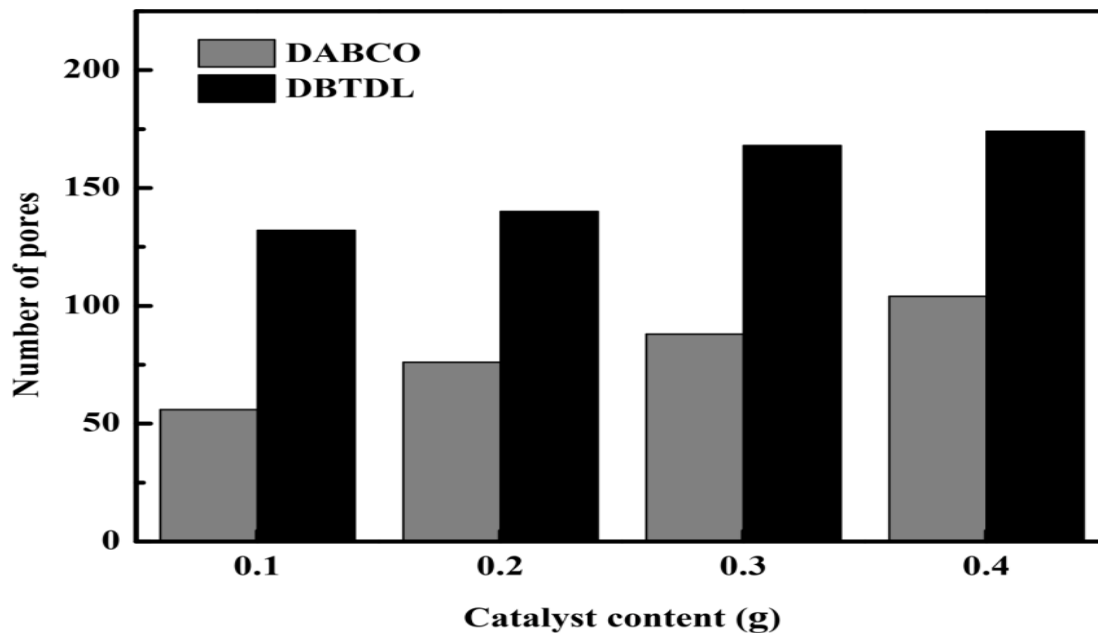
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با استفاده از دو نوع کاتالیزور ژل‌دهنده در مقادیر ۰/۲ گرم و ۰/۴ گرم کاتالیزور [۲۷]

شکل ۶ اندازه‌های متوسط حفره و منفذ و توزیع آنها را با تغییر نوع و میزان کاتالیزور نشان می‌دهد. اندازه‌های متوسط با افزایش میزان کاتالیزور برای هر نوع کاتالیزور تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهند، اما تفاوت‌های واضحی در اندازه و توزیع سلول‌ها بین انواع کاتالیزور وجود دارد. با کاتالیزور DBTDL اندازه‌های حفره و منفذ کوچکتر و یکنواخت‌تری به دست آمد در مقایسه با کاتالیزور DABCO، که احتمالاً به دلیل واکنش ژل‌زایی قوی با استفاده از کاتالیزور DBTDL است. برعکس، واکنش نسبتاً سریع پف‌کنندگی با کاتالیزور DABCO می‌تواند منجر به هم‌جوشی نامنظم بین حفره‌های نزدیک شود و در نتیجه اندازه‌های بزرگ‌تر حفره و منفذ با عدم قطعیت بالاتر اندازه ایجاد کند.



شکل ۶- اندازه حفره‌ها (a) و اندازه حفره‌ها (b) برای دو کاتالیزور مختلف به عنوان تابعی از محتوای کاتالیزور، در محتوای آب ۱/۵ گرم [۲۷]

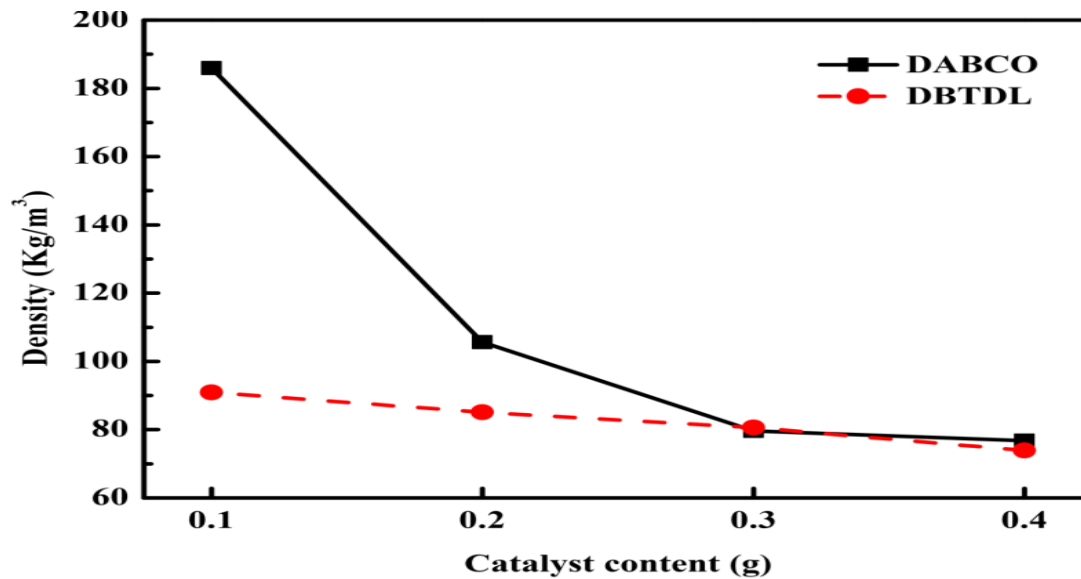
اتصال متقابل و همچنین ویژگی اندازه سلول برای کارایی جذب صدا مهم است زیرا نفوذ موج صوتی در چارچوب متخلخل کنترل می‌شود و بنابراین انرژی صوتی از کوپلینگ‌های ویسکو-حرارتی تلف می‌شود [۱۶]. حفره‌های متصل به هم با ارتباط دادن حفره‌ها تشکیل می‌شوند و بنابراین تعداد حفره‌ها می‌تواند به عنوان راهنمایی برای اتصال متقابل ساختار شبکه حفره‌ها استفاده شود. شکل ۷ تعداد حفره‌های فوم‌ها را به عنوان تابعی از محتوای کاتالیزور نشان می‌دهد و با افزایش محتوای کاتالیزور، افزایش می‌یابد. در مقایسه‌ی کاتالیزورها از نظر تعداد حفره‌ها، استفاده از کاتالیزور DBTDL حفره‌های بیشتری نسبت به حالت DABCO تولید می‌کند به دلیل واکنش ژل‌سازی قوی، همان‌طور که در شکل ۶ توضیح داده شده است. به دلیل تعداد بالای حفره‌ها، بهبود هم‌پیوستگی می‌تواند در افزایش عملکرد جذب نوبز مواد فومی مفید باشد.



شکل ۷- تعداد حفره‌های فوم‌های پلی‌یورتان برای دو نوع کاتالیزور در محتوای آب ۱/۵ گرم به‌عنوان تابعی از محتوای کاتالیزور [۲۷]

افزایش تعداد حفره‌ها در محتوای بالای کاتالیزور باعث کاهش ضخامت پایه‌ها شد همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، و همچنین منجر به کاهش چگالی فوم‌های پلی‌یورتان شد.

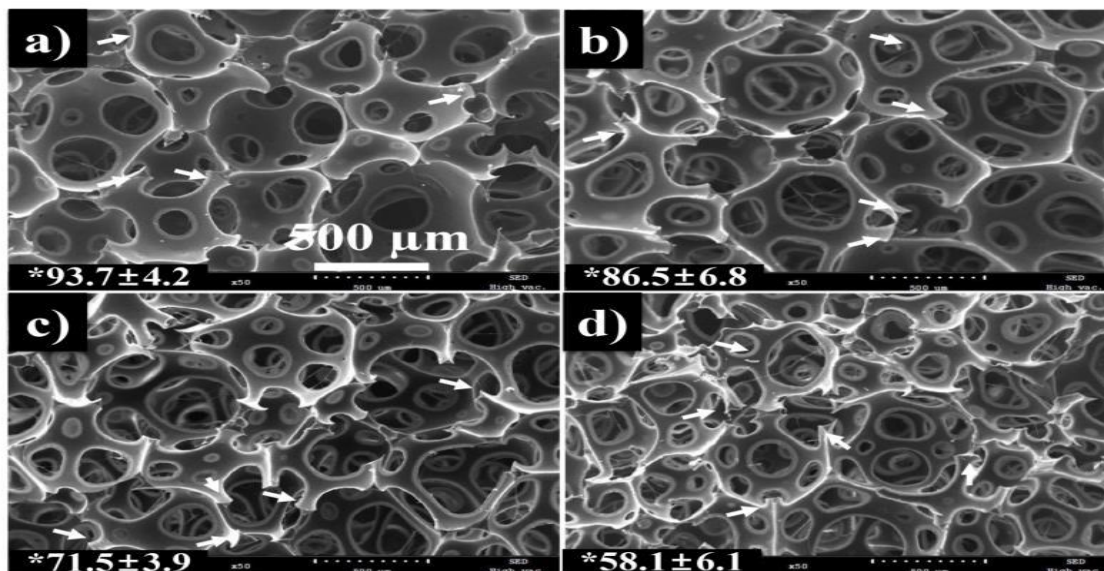
شکل ۸ نتایج چگالی را به‌عنوان تابعی از محتوای کاتالیزور برای دو کاتالیزور مختلف در محتوای آب ۱/۵ گرم نشان می‌دهد. چگالی فوم‌های کاتالیز شده با DABCO به‌طور قابل توجهی با افزایش محتوای کاتالیزور کاهش یافت، اما در فوم‌های کاتالیز شده با DBTDL تنها تغییر کمی نشان داد. این به این دلیل است که ضخامت متوسط پایه‌های فوم‌ها با کاتالیزور DBTDL نازک‌تر از حالت DABCO است، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است. بنابراین، استفاده از کاتالیزور قوی ژل‌کننده DBTDL در فرایند فوم‌دهی می‌تواند چگالی حجمی فوم را حتی در محتوای پایین کاتالیزور (۰/۱ گرم) به‌طور مؤثر کاهش دهد.



شکل ۸- تغییرات چگالی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر برای دو کاتالیزور مختلف با محتوای آب ۱/۵ گرم [۲۷]

۳-۲- تأثیر آب

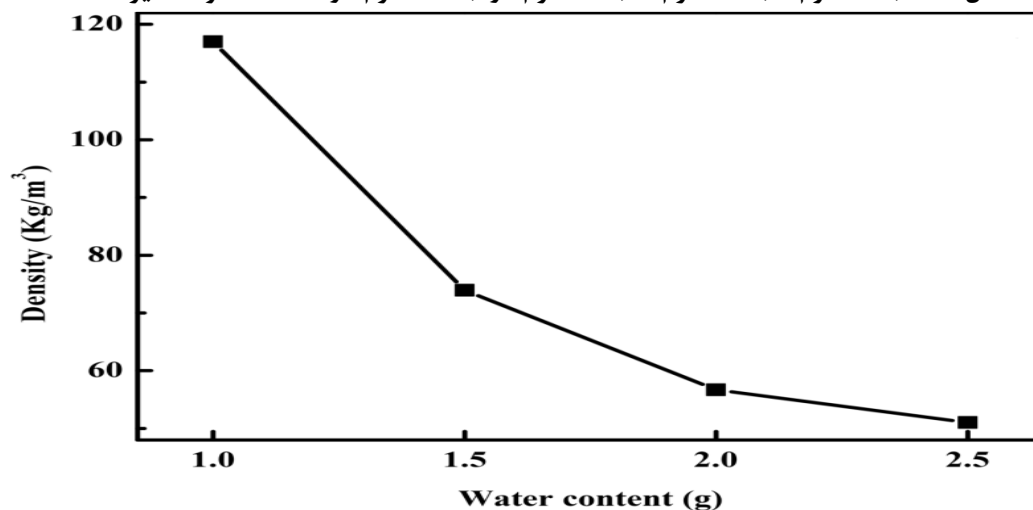
ریخت‌شناسی سلولی و ضخامت متوسط پایه‌های فوم‌های کاتالیز شده با DBTDL با افزایش محتوای آب در شکل ۹ نشان داده شده است. همه تصاویر ساختارهای حفره‌ای خوب توسعه یافته را نشان می‌دهند، صرف‌نظر از میزان آب، به دلیل اثر ژله‌ای قوی کاتالیزور DBTDL، و ضخامت متوسط پایه‌ها با افزایش محتوای آب کاهش می‌یابد. کاهش ضخامت متوسط پایه‌ها همچنین می‌تواند منجر به کاهش چگالی فوم‌ها شود. شکل ۱۰ چگالی حجمی فوم‌ها (نمایش داده شده در شکل ۹) را به عنوان تابعی از محتوای آب نشان می‌دهد. نتیجه چگالی نیز روند مشابه ضخامت متوسط پایه‌ها را نشان می‌دهد و این موضوع در مورد استفاده از افزایش محتوای کاتالیزور نیز ثابت شده است.



* Average strut thickness

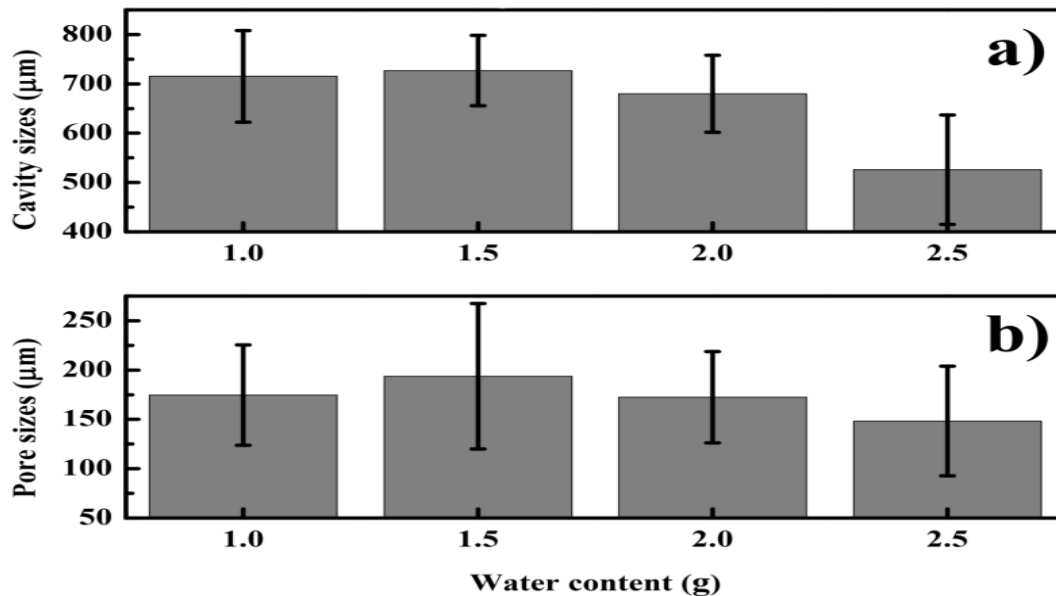
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فوم‌های کاتالیز شده با DBTDL با مقادیر مختلف آب

اعمال شده (a) ۱/۰ گرم، (b) ۱/۵ گرم، (c) ۲/۰ گرم و (d) ۲/۵ گرم، و ضخامت متوسط تیرکها [۲۷]



شکل ۱۰- تغییرات چگالی فوم‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر با محتوای ۰/۴ گرم DBTDL [۲۷]

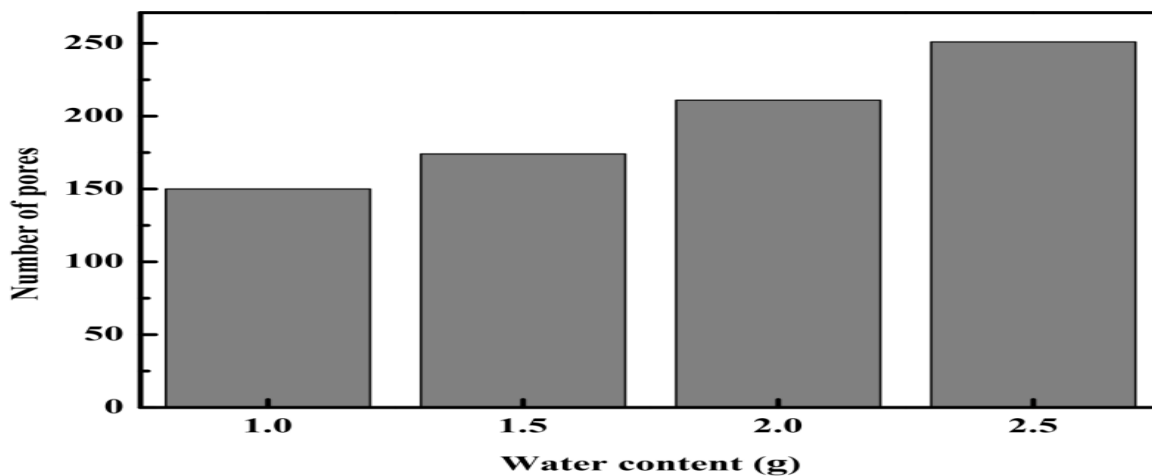
شکل ۱۱ اندازه متوسط حفره‌ها و روزنه‌ها را به‌عنوان تابعی از محتوای آب در ۰/۴ گرم DBTDL نشان می‌دهد. اندازه متوسط حفره‌ها و روزنه‌ها که با ۱/۰ گرم آب به‌دست آمده، تقریباً تا ۲/۰ گرم آب ثابت باقی می‌ماند و در ۲/۵ گرم آب کاهش می‌یابد. استفاده زیاد از آب می‌تواند واکنش‌های سریع تولید گاز را به دلیل افزایش احتمال برخورد مولکول‌های آب بین کاتالیزورها و ایزوسیانات‌ها ایجاد کند. بنابراین انتظار می‌رود اندازه حفره‌ها و روزنه‌ها در محتوای بالای آب افزایش یابد. با این حال، اندازه متوسط حفره‌ها و روزنه‌ها تقریباً تا ۲/۰ گرم آب ثابت باقی مانده و حتی در ۲/۵ گرم آب کاهش یافته است، و این را می‌توان با نتایج مربوط به تعداد روزنه‌ها به‌خوبی توضیح داد.



شکل ۱۱- اندازه‌های متوسط (a) حفره‌ها و (b) منافذ فوم‌ها در ۰/۴ گرم محتوای DBTDL به عنوان تابعی از میزان آب [۲۷]

شکل ۱۲ تعداد حفره‌های فوم‌های کاتالیز شده توسط DBTDL را به عنوان تابعی از مقدار آب نشان می‌دهد. تعداد حفره‌ها با افزایش محتوای آب افزایش می‌یابد و همچنین نشان می‌دهد که آب بیشتر می‌تواند حفره‌های بیشتری بدون هم‌جوشی در فوم‌ها تحت شرایط ژل‌زدایی قوی ایجاد کند.

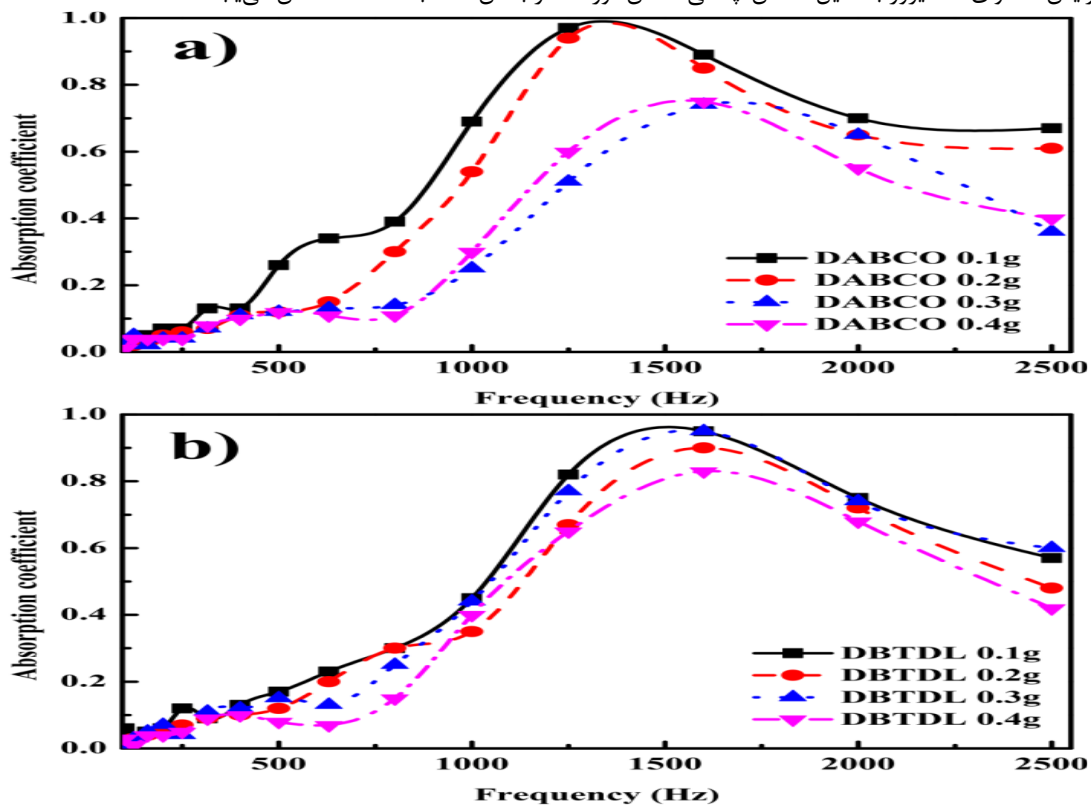
این مطلب همچنین دلالت بر آن دارد که مقاومت زیادی در برابر رشد حفره‌ها از طرف حفره‌های مجاور وجود دارد که ناشی از استحکام بالای ماتریس رزین پلی‌اورتان است. بنابراین، اندازه حفره‌ها و تعداد آن‌ها در محتوای آب بالا به طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در اندازه‌های کوچک‌تر و تعداد بیشتری به خوبی توزیع می‌شوند.



شکل ۱۲- تعداد حفره‌های فوم‌های پلی‌اورتان با تغییر محتوای آب در ۰/۴ گرم کاتالیزور DBTDL [۲۷]

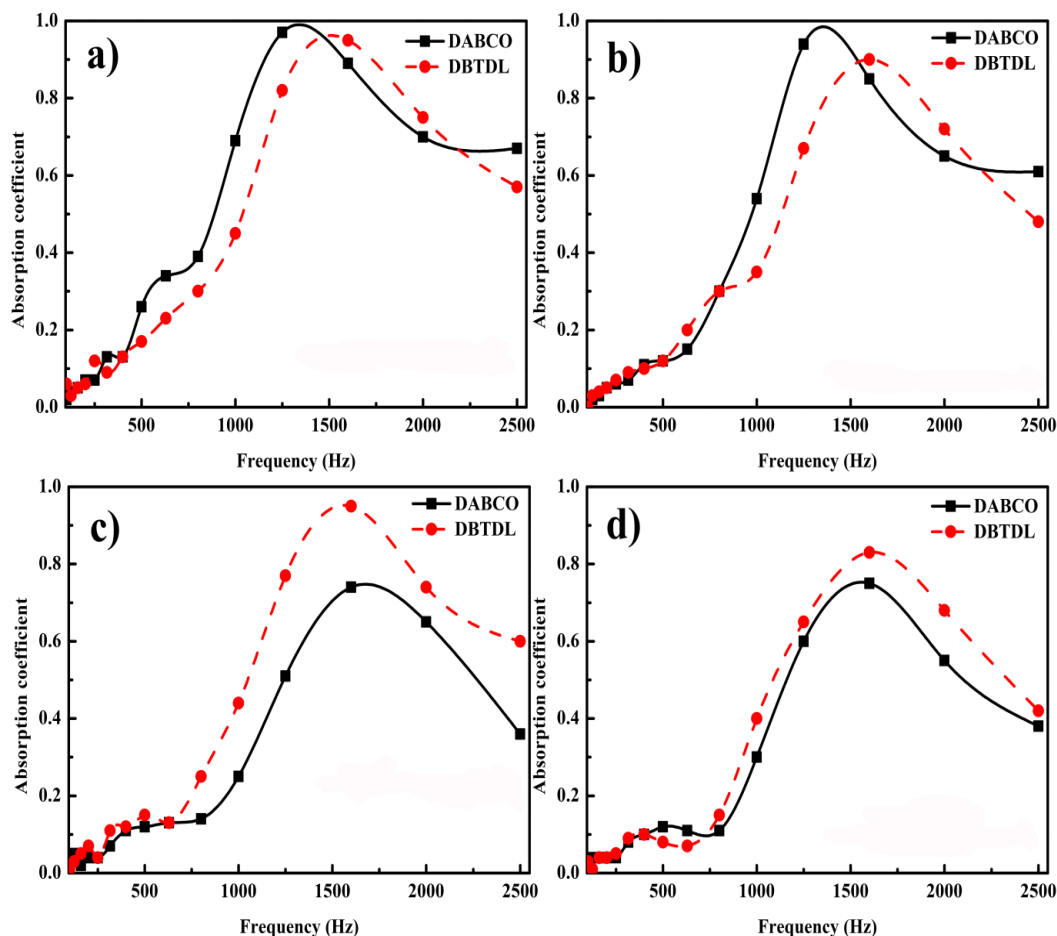
۳-۳- عملکرد جذب صدا

پاسخ‌های صوتی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر در غلظت‌های مختلف کاتالیزورهای DABCO و DBTDL در شکل ۱۳ به‌عنوان تابعی از فرکانس نشان داده شده است. به‌طور کلی، امواج صوتی باعث ارتعاش دیواره‌های سلول و هوای داخل حفره‌ها می‌شوند و انرژی صوتی از طریق میرایی ارتعاش دیواره‌های حفره و هوا هدر می‌رود [۲۱،۲۰]. علاوه بر این، عملکرد جذب صدا می‌تواند از طریق میرایی صوتی بهبود یابد که با افزایش سختی دیواره‌های سلول افزایش می‌یابد [۲۳،۲۲]. برعکس، ضخامت کم پایه‌ها می‌تواند اثر میرایی روی عملکرد جذب صدا را کاهش دهد. بنابراین، در شکل ۱۳، ضریب جذب صدا با افزایش محتوای کاتالیزور به دلیل کاهش چگالی، همان‌طور که در بخش ۱-۳ بحث شد، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- پاسخ‌های جذب صوتی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر با اعمال (a) کاتالیزور DABCO و (b) کاتالیزور DBTDL به میزان ۱/۵ گرم آب [۲۷]

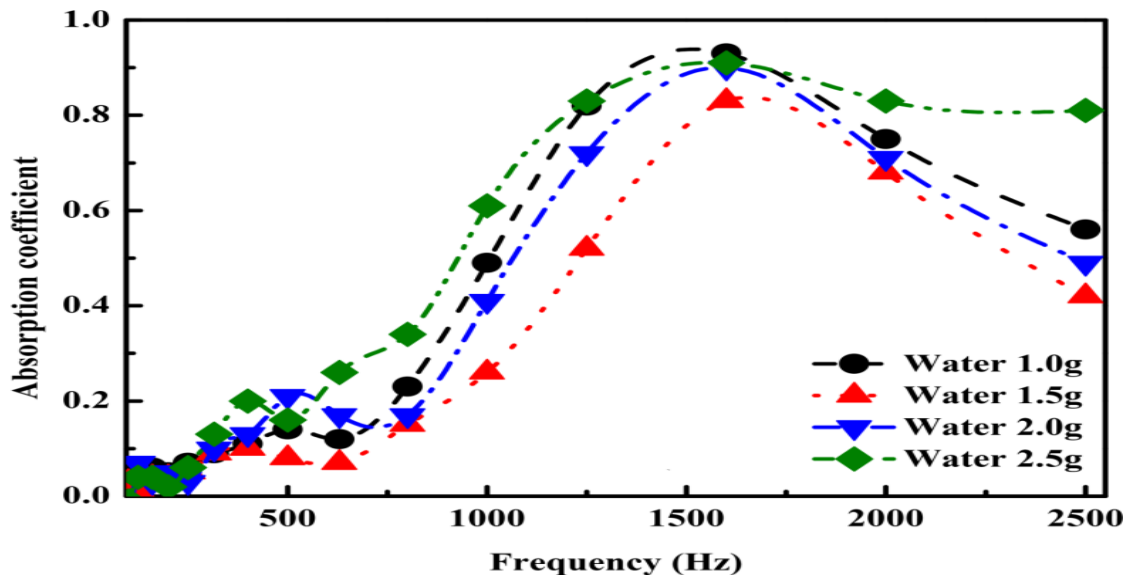
در شکل ۱۴، مقایسه ضریب جذب صوت بین کاتالیزورهای DABCO و DBTDL در چهار مقدار مختلف کاتالیزور دوباره رسم شده است. در موارد DABCO و DBTDL، رفتار جذب صوت مشابهی در مقادیر ۰/۱ گرم و ۰/۲ گرم کاتالیزور مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴- مقایسه ضریب جذب فوم‌های منعطف به عنوان انواع کاتالیزور ژل‌ساز در هر مقدار کاتالیزور: (a) ۰/۱ گرم، (b) ۰/۲ گرم، (c) ۰/۳ گرم، و (d) ۰/۴ گرم [۲۷]

با این حال در محتوای کاتالیزور ۰/۱ گرم و ۰/۲ گرم، اختلافات چگالی بزرگی وجود دارد (در شکل ۸)، شباهت رفتار جذب می‌تواند به ساختارهای سلولی کوچک و خوب پراکنده شده در فوم‌های کاتالیز شده با DBTDL نسبت داده شود. علاوه بر این، فوم‌های کاتالیز شده با DBTDL همچنین ضریب جذب صوت بالاتری نسبت به فوم‌های کاتالیز شده با DABCO در محتوای کاتالیزور ۰/۳ گرم و ۰/۴ گرم نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش ۱-۳ توضیح داده شد، مورفولوژی فوم‌های انعطاف‌پذیر با کاتالیزور DBTDL تنها حفره‌ها و منافذ یکسان و کوچک دارند بلکه تعداد بالایی حفره نسبت به فوم‌های کاتالیز شده با DABCO مشاهده می‌شود. کاهش اندازه حفره در ساختار منفذ باز معمولاً به افزایش مقاومت جریان هوا و عملکرد جذب صوت منجر می‌شود. علاوه بر این، افزایش اتصال متقابل در محیط متخلخل ممکن است مسیرهای انتقال نامنظم برای امواج صوتی فراهم کند. شکل ۱۵ ضریب جذب را در مقادیر مختلف آب به صورت تابعی از فرکانس نشان می‌دهد. ضریب جذب با افزایش محتوی آب تا ۱/۵ گرم کاهش می‌یابد، اما در مقادیر آب بالاتر از ۱/۵ گرم دوباره افزایش می‌یابد. تغییرات قابل توجه در ویژگی‌های مورفولوژیکی پس از آن نقطه از میزان آب شامل کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش تعداد حفره‌ها است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). افزایش فرکانس برخورد امواج صوتی با هوا و دیواره‌های جامد به دلیل افزایش تعداد حفره‌ها و منفذها،

کارایی جذب صدا را بهبود می بخشد حتی اگر چگالی فوم در مقادیر بالای آب کاهش یابد. بنابراین، افزایش ضریب جذب در میزان بالای آب عمدتاً به تعداد بالای حفره‌ها و منفذهای کوچک که به خوبی توزیع شده‌اند، مربوط است [۲۴-۲۶].



شکل ۱۵- پاسخ‌های جذب صوتی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر با مقادیر مختلف آب در حضور ۰/۴ گرم کاتالیزور DBTDL [۲۷]

۴- نتیجه‌گیری

برای ایجاد ارتباط بین ساختار سلولی و خاصیت جذب صوتی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر، حفره‌ها و منافذ موجود در فوم‌ها با استفاده از دو نوع کاتالیزور ژل‌دهنده DBTDL و DABCO و آب کنترل شدند. فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر که با کاتالیزور DBTDL تولید می‌شوند، که در ژل‌دهی فعال‌تر از DABCO است، دارای تعداد بیشتری حفره‌ها و منافذ کوچک هستند. افزایش تعداد سلول‌ها منجر به کاهش ضخامت متوسط دیواره‌ها می‌شود و بنابراین فوم‌های کاتالیزوری DBTDL دارای چگالی کمتری نسبت به فوم‌های کاتالیزوری DABCO هستند.

تحت تأثیر اثر ژل‌دهی قوی، افزایش محتوای آب منجر به تعداد زیادی حفره در فوم می‌شود، به دلیل مقاومت اضافی در برابر رشد حفره ناشی از حفره‌های مجاور و همچنین استحکام ماتریس از طریق پلیمریزاسیون. خاصیت جذب صوتی فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر به ساختار سلولی آن‌ها وابسته است. کاهش چگالی باعث کاهش جذب صوتی به دلیل کاهش اثر میرایی مواد می‌شود. با این حال، تعداد بالای سلول‌های کوچک می‌تواند نقص فوم با چگالی پایین را با ایجاد مسیرهای انتقال نامنظم برای امواج صوتی جبران کند. بنابراین، برای بهبود مصرف سوخت در وسایل نقلیه، ایجاد تعداد زیادی حفره کوچک در فوم‌های پلی‌اورتان انعطاف‌پذیر یک رویکرد مناسب برای افزایش کارایی جذب صوت بدون افزایش چگالی فوم‌ها است.

۱۵- منابع

[۱] Wang Y, Zhang C, Ren L, Ichchou M, Galland M-A, Bareille O. Influences of rice hull in polyurethane foam on its sound absorption characteristics. Polym. Compos. ۲۰۱۳; ۳۴:۱۸۴۷-۵۵.

[۲] Sung CH, Lee KS, Lee KS, Oh SM, Kim JH, Kim MS, et al. Sound damping of a polyurethane foam nanocomposite. Macromol. Res. ۲۰۰۷; ۱۵:۴۴۳-۸.

- [۳] Zwinselman JJ, Bachmann WD. Polyurethane foams for sound and vibration dampening in automotive applications. *Polym. Mater. Sci. Eng.* ۱۹۸۹; ۶۰:۸۲۷.
- [۴] Zhang CH, Hu Z, Gao G, Zhao S, Huang YD. Damping behavior and acoustic performance of polyurethane/lead zirconate titanate ceramic composites. *Mater. Des.* ۲۰۱۳; ۴۶:۵۰۳-۱۰.
- [۵] Lee DK, Chen L, Sendijarevic A, Sendijarevic V, Frisch KC, Klempner D. Effect of morphology on sound attenuation of flexible polymeric foams. *Journal of cellular plastics.* ۱۹۹۱; ۲۷:۱۳۵-۴۲.
- [۶] Imai Y, Asano T. Studies of acoustical absorption of flexible polyurethane foam. *J. Appl. Polym. Sci.* ۱۹۸۲; ۲۷:۱۸۳-۹۵.
- [۷] Defonseka C. Practical guide to flexible polyurethane foams. ۱st ed. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology Ltd.; ۲۰۱۳.
- [۸] Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* ۱۹۵۶; ۲۸:۱۶۸-۷۸.
- [۹] Biot MA. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. High-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* ۱۹۵۶; ۲۸:۱۷۹-۹۱.
- [۱۰] Alvarez-Lainez M, Rodriguez-Perez MA, de Saja JA. Acoustic absorption coefficient of open-cell polyolefin-based foams. *Mater. Lett.* ۲۰۱۴; ۱۲۱:۲۶-۳۰.
- [۱۱] Chevillotte F, Perrot C, Panneton R. Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams. *J. Acoust. Soc. Am.* ۲۰۱۰; ۱۲۸:۱۷۶۶-۷۶.
- [۱۲] Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* ۱۹۸۷; ۱۷۶:۳۷۹-۴۰۲.
- [۱۳] Champoux Y, Allard JF. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J. Appl. Phys.* ۱۹۹۱; ۷۰:۱۹۷۵-۹.
- [۱۴] Kino N, Nakano G, Suzuki Y. Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams. *Appl. Acoustics.* ۲۰۱۲; ۷۳:۹۵-۱۰۸.
- [۱۵] Kino N, Ueno T. Improvements to the Johnson-Allard model for rigid-frame fibrous materials. *Appl. Acoust.* ۲۰۰۷; ۶۸:۱۴۶۸-۸۴.
- [۱۶] Doutres O, Atalla N, Dong K. A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams. *J Appl Phys.* ۲۰۱۳; ۱۱۳:۰۵۴۹۰۱.
- [۱۷] Mosanenzadeh SG, Doutres O, Naguib HE, Park CB, Atalla N. A semi-empirical model relating micro structure to acoustic properties of bimodal porous material. *J. Appl. Phys.* ۲۰۱۵; ۱۱۷:۰۳۴۳۰۵.
- [۱۸] Osorio-Hernandez JO, Suarez MA, Goodall R, Lara-Rodriguez GA, Alfonso I, Figueroa IA. Manufacturing of open-cell Mg foams by replication process and mechanical properties. *Mater. Des.* ۲۰۱۴; ۶۴:۱۳۶-۴۱.
- [۱۹] Delebecq E, Pascault J-P, Boutevin B, Ganachaud F. On the versatility of urethane/urea bonds: reversibility, blocked isocyanate, and non-isocyanate polyurethane. *Chem. Rev.* ۲۰۱۳; ۱۱۳:۸۰-۱۱۸.
- [۲۰] Gayathri R, Vasanthakumari R, Padmanabhan C. Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers. *Int. J. Sci. Eng. Res.* ۲۰۱۳; ۴:۳۰۱-۸.
- [۲۱] Lee J, Kim G-H, Ha C-S. Sound absorption properties of polyurethane/nano-silica nanocomposite foams. *J. Appl. Polym. Sci.* ۲۰۱۲; ۱۲۳:۲۳۸۴-۹۰.

- [۲۲] Sung CH, Lee KS, Lee KS, Oh SM, Kim JH, Kim MS, et al. Sound damping of a PU foam nanocomposite. Strategic Technologies, ۲۰۰۸ IFOST ۲۰۰۸ Third International Forum on: IEEE; ۲۰۰۸. □. ۱۸۱-۵.
- [۲۳] Park H-M, Mohanty AK, Drzal LT, Lee E, Mielewski DF, Misra M. Effect of sequential mixing and compounding conditions on cellulose acetate/layered silicate nanocomposites. J. Polym. Environ. ۲۰۰۶; ۱۴:۲۷-۳۵.
- [۲۴] Doutres O, Atalla N, Dong K. Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams. J. Appl. Phys. ۲۰۱۱; ۱۱۰:۰۶۴۹۰۱.
- [۲۵] Boeckx L, Brennan M, Verniers K, Vandenbroeck J. A numerical scheme for investigating the influence of the three dimensional geometrical features of porous polymeric foam on its sound absorbing behavior. Acta Acust. united Acust. ۲۰۱۰; ۹۶:۲۳۹-۴۶.
- [۲۶] Perrot C, Chevillotte F, Panneton R. Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials. J. Acoust Soc. Am. ۲۰۰۸; ۱۲۴:۹۴۰-۸.
- [۲۷] Jae Gyoung Gwon, Seok Kyeong Kim, Jung Hyeun Kim, Sound absorption behavior of flexible polyurethane foams with distinct cellular structures, (۲۰۱۵), doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.matdes.۲۰۱۵,۱