

## مواد متخلخل جاذب صوت

### بخش اول: کاربردها و پارامترها

ابوالفضل حسنی بافرانی  
استادیار  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه تفرش  
Baferani@tafreshu.ac.ir

عبدالرضا اوحدی همدانی\*  
استاد  
دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
a\_r\_ohadi@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴

#### چکیده

مواد متخلخل جاذب صوت دارای کاربردهای گسترده‌ای در طراحی‌های مختلف آکوستیکی هستند. در این مقاله، ابتدا ضمن معرفی انواع مواد متخلخل آکوستیکی، به کاربردهای متنوع این نوع مواد در صنایع مختلف پرداخته می‌شود. از آنجایی که لازم است طراح با پارامترهای بیانگر مشخصات آکوستیکی و مکانیکی مواد متخلخل آشنایی لازم را داشته باشد، در ادامه پارامترهای اصلی این مواد نظیر چگالی حجمی، مدول الاستیسیته، مقاومت جریانی، تخلخل، طول مشخصه ویسکوز و ... معرفی شده‌اند. سپس روش‌های مختلف اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای این نوع مواد براساس استانداردهای بین‌المللی تشریح شده و در انتهای مقاله، به روش‌های معکوس مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری مواد اشاره می‌شود. در بخش دوم این مقاله مکانیزم‌های جذب صوت در مواد متخلخل، نحوه مدل‌سازی تجربی و تئوری این نوع مواد، روش‌های اندازه‌گیری ضریب جذب آکوستیکی و پژوهش‌های حال و آینده تشریح می‌گردند.

واژگان کلیدی: مواد متخلخل، جاذب صوت، ضریب جذب صوت، تخلخل، آکوستیک.

#### ۱. مقدمه

مکانی و زمانی خاص، بر فعالیت‌های مختلف موجودات زنده به ویژه انسان‌ها تأثیر گذاشته و ممکن است با ایجاد عوارض متعدد جسمی و روحی، آرامش و راحتی آن را سلب کنند. آلودگی صوتی نوعی عامل تنش‌زای بیولوژیک است، که نه تنها بر سیستم شنوایی، بلکه بر کل بدن انسان تأثیر نامطلوب می‌گذارد، به طوری که باعث تحریک سیستم اعصاب مرکزی انسان شده و اختلالات هورمونی و عدم سلامت آن را به همراه خواهد داشت. از طرفی آلودگی صوتی یک عامل ایجاد

پیشرفت‌های مختلف بشر در عصر حاضر و صنعتی شدن خدمات و امکانات در دسترس انسان، در کنار مزایای فراوانی که به‌منظور راحتی انسان‌ها و افزایش کیفیت زندگی بشر به همراه داشته، طبیعتاً زیان‌های مختلفی نیز برای آن به دنبال داشته است. از جمله این مضرات می‌توان به آلودگی صوتی ایجاد شده توسط این قبیل تجهیزات اشاره نمود. آلودگی صوتی به امواج ناخواسته‌ای اطلاق می‌شود که تحت شرایط

خستگی بوده و ظرفیت کار انسان را چه در مشاغل فکری و چه در شغل‌های بدنی و ساده کاهش می‌دهد. آلودگی صوتی روی وضع روانی و روحی شخص اثر گذاشته و سبب اشکال در تطابق یافتن انسان با محیط کار و حتی روابط اجتماعی و زندگی شخصی آن می‌شود که نتیجه آن، کاهش بازده کاری خواهد بود. مضرات اشاره شده ناشی از پدیده آلودگی صوتی، محققین را به سمت انجام تحقیقات لازم در زمینه طراحی سیستم‌های جاذب صوتی و کنترل آلودگی صوتی هدایت نموده است. به‌طور کلی برای کاهش نوفه<sup>۱</sup> و صدای نامطلوب، روش‌های مختلفی وجود دارد که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این روش‌ها را به سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود:

- کاهش صدای منبع تولیدکننده صوت مانند کاهش صدای موتور وسیله نقلیه، کاهش صدای تایر و کاهش صدای فن خنک‌کننده از طریق بهبود طراحی پره‌های فن

- بهبود مسیر انتقال یا توزیع صدا

- حفاظت گوش شنونده صدا از طریق به‌کارگیری گوشی‌های محافظ

براساس مواردی که در بالا عنوان شد، طبیعتاً در پروسه طراحی می‌توان با در نظر گرفتن نکات لازم کمترین میزان نوفه تولیدی را مدنظر داشت، چراکه پس از اینکه طراحی صورت گرفت، کاهش صدای منبع صوت کار دشواری خواهد بود. از طرفی مورد سوم، که منوط به استفاده از گوشی‌های محافظ برای کاهش صدا است، معمولاً مورد علاقه افراد نیست چراکه استفاده از آنها ملال‌آور و خسته‌کننده‌اند. براساس این دسته‌بندی بیشتر فعالیت‌ها به‌منظور کاهش آلودگی صدا، منوط به بهبود مسیر انتقال صوت به کمک روش‌های مختلف مانند جذب صدای منعکس شونده از دیوارها و ... است. حال به‌منظور بهبود عملکرد سیستم در مسیر انتقال یا توزیع صدا روش‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- کاهش غیرفعال صدا<sup>۲</sup>
- کنترل فعال صدا<sup>۳</sup> (ANC)
- روش‌های ترکیبی فعال و غیرفعال<sup>۴</sup>

هر یک از روش‌های فوق دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و در نتیجه با محدودیت‌هایی در مورد استفاده از آنها روبه‌رو هستیم. روش‌های فعال از روش‌های غیرفعال متفاوتند، چراکه در روش‌های فعال نیازمند انرژی خارجی در فرایند کاهش صدا هستیم. همچنین از آنجایی که اساس روش‌های کنترل فعال صدا بازسازی صدای اصلی در دامنه مشابه و فاز مخالف است، این روش‌ها نیازمند پردازش و کنترل سیگنال‌های صوتی هستند و لذا این روش‌ها به دلیل محدودیت سرعت پردازشگرها، در فرکانس‌های بالا دارای محدودیت عملکردی هستند و کاربرد آنها در محدوده فرکانسی پایین و متوسط (کمتر از ۲۰۰۰ هرتز) است. در مقابل، در روش کنترل غیرفعال صدا، از مواد جاذب صوت مانند فوم‌ها، مانع‌ها و میراکننده‌ها استفاده می‌شود.

با توجه به ساختارهای خاص این دسته از مواد، در اثر برخورد امواج صوتی با آنها، جاذب صوتی کسری از انرژی صوتی را جذب نموده و به گرما تبدیل می‌کند، یعنی به نوعی شدت صوت موج خارج شده از ماده جاذب صوتی، کمتر از شدت صوت موج وارد شده به ماده جاذب صوتی است و بنابراین میزان شدت نوفه به کمک این دسته از مواد کاهش می‌یابد. میزان جذب آکوستیکی ماده متخلخل وابسته به فرکانس موج‌های صوتی است. به‌صورت مفصل در بخش دوم مقاله به مکانیزم‌های جذب صوت در مواد متخلخل اشاره خواهد شد.

البته اشاره به این نکته ضروری است که مواد متخلخل به‌عنوان اصلی‌ترین مواد جاذب و مانع صوت به‌طور معمول برای صدا با فرکانس‌های بالا درجه تأثیرگذاری بیشتری را داراست و در مورد امواج صوتی با فرکانس‌های پایین راندمان کمتری دارند. برای اینکه بتوانیم صوت با فرکانس‌های پایین

را نیز بیشتر تحت تأثیر قرار دهیم، نیازمند افزایش ضخامت مواد متخلخل هستیم که خود عامل منفی محسوب شده و طبیعتاً مشکلاتی همچون افزایش هزینه و فضای مورد نیاز را به همراه خواهد داشت. البته افزایش ضخامت نیز تا حدی جوابگو بوده و از یک ضخامت به بالاتر دیگر تأثیری در فرایند جذب نخواهد داشت. از جمله دیگر محیط‌های غیرفعال جذب صوت می‌توان به جاذب‌های هلمهولتز<sup>۵</sup>، جاذب‌های صفحه‌ای<sup>۶</sup> و جاذب‌های ورق پانچی<sup>۷</sup> اشاره نمود [۱] که در این مقاله بررسی مواد متخلخل جذب صوت مورد نظر است.

از جمله دیگر روش‌های مورد استفاده در کنترل صوت، روش کنترل فعال صوت است. در این روش، عملگرهایی وجود دارد که با اعمال ضد نوفه<sup>۸</sup> یا موج تخریب‌کننده در محیط، باعث حذف نوفه منبع اولیه می‌شوند. برای اینکه بتوانیم نوفه را کاهش دهیم، بایستی دامنه و فاز ضد نوفه تا حد بسیار زیادی منطبق با دامنه و نوفه منبع اولیه باشد. چراکه عدم موفقیت در انجام این امر سبب تولید نوفه ثانویه‌ای در محیط شده و نوفه قبلی را تشدید می‌کند. به‌طور کلی محدودیت‌های زیادی برای فناوری سیستم‌های کنترل فعال نوفه موجود است که از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به محلی بودن کنترل نوفه، هزینه بر بودن تجهیزات مورد نظر و محدودیت در استفاده از این سیستم‌ها در کاربردهای عمومی می‌توان اشاره نمود.

با توجه به نکات اشاره شده در مورد هر یک از روش‌های کنترل صوت ملاحظه می‌شود که مواد جاذب صوت به‌واسطه خاصیت کنترل غیرفعال و بدون صرف هیچ‌گونه انرژی می‌توانند درصد بالایی از امواج آکوستیکی را جذب نمایند. این دسته از مواد در طراحی‌های مختلف صنعتی، معماری و ... استفاده شده و مورد اهمیت هستند. کاربرد زیاد این دسته از مواد باعث شده در این مقاله شرح کاملی از خصوصیات مختلف آنها ارائه شده تا با در نظر گرفتن مشخصات مختلف بتوان استفاده مناسب‌تری از آنها را داشت.

با توجه به اهمیت مواد متخلخل جاذب صوت در زمینه کنترل غیرفعال صدا، بررسی کلی مشخصات و مدل‌سازی و روش‌های متفاوت اندازه‌گیری خواص این دسته از مواد و بررسی کاربردهای صنعتی این دسته از مواد در مقاله حاضر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲. انواع مواد متخلخل جاذب صوت

به آن دسته از موادی که منافذ یا حفره‌هایی را در ساختارشان دارا هستند، مواد متخلخل اطلاق می‌شود. مواد الاستیک متخلخل به دو فاز تقسیم می‌شوند: یک فاز جامد که به شالوده یا استخوان‌بندی معروف است و فاز سیال که در حالت معمول هوا است. معمولاً هر دو ماتریس جامد و شبکه منافذ به‌طور پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. این مواد با توجه به ساختار ویژه آنها و وجود تخلخل ساختاری، که طبیعتاً برهم‌کنش دو فاز جامد و سیال را به همراه دارد، در بسیاری از موضوعات مهندسی دارای کاربردهای مختلفی بوده و بررسی رفتاری این دسته از مواد مورد توجه ویژه است.

مواد متخلخل به‌صورت کلی به سه دسته مواد فایبری، مواد سلولی و مواد دانه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد فایبری می‌تواند در فرم‌های حصیری، تخته‌ای یا المان‌های ساخته شده از فایبرهای سنگ، شیشه یا مواد معدنی دیگر باشد که شامل نمدها یا پارچه‌های نمدی نیز می‌شود. در کاربرد مواد فایبری در خفه‌کننده‌ها نیازمند برخی از فرم‌های پوشش‌های محافظت شده هستیم. بیشتر پوشش‌های معمول شامل فلزات سوراخ‌دار با لایه‌ای از پشم شیشه در پشت آن است [۲].

مواد سلولی شامل فوم‌های پلیمری با درجه‌های متفاوت سختی و انعطاف‌پذیری متنوع است. همان‌گونه که در بخش کاربردها بدان اشاره خواهد شد، این دسته از مواد با توجه به ساختار ویژه آنها و گستردگی تغییرات مشخصات به‌صورت فراوان در شرایط مختلف و به‌عنوان جاذب‌های آکوستیکی معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی برای کاربردهای



شکل ۱-۲. فوم پلیمری



شکل ۱-۳. نمد



شکل ۱-۴. پشم سنگ

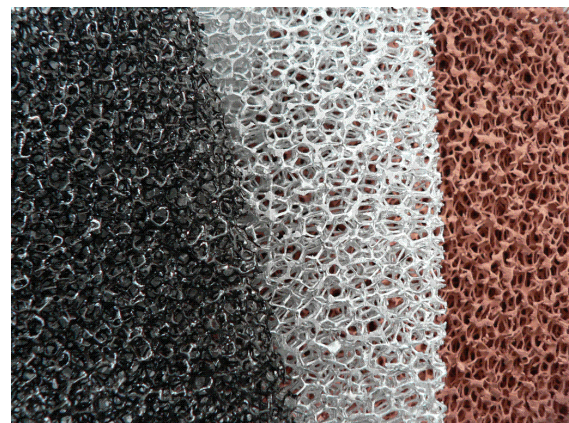


شکل ۱-۵. پشم شیشه

خاص نظامی و صنعتی مواد متخلخل فلزی مانند فوم‌های آلومینیومی به‌عنوان جاذب‌های صوتی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

مواد دانه‌ای جایگزین‌های مناسبی برای جاذب‌های فایبری و سلولی در بسیاری از کاربردهای داخل و خارج محیطی هستند. مواد جاذب‌های صوتی دانه‌ای ترکیبی از مقاومت مکانیکی خوب و هزینه‌های ساخت کم را دارند. امکان دارد مواد دانه‌ای که به‌صورت تلفیقی یا غیرتلفیقی در سراسر ماده به‌صورت ذراتی توزیع شوند که بستر آنها می‌تواند پانل‌های چوبی، سیمان‌های متخلخل و ... باشد [۳]. در حالت کلی دانه‌های به‌کاربرده شده در مواد دانه‌ای شامل شن، ماسه و یا خاک است.

از ویژگی‌های مشترک مواد متخلخل جاذب صوت این است که منافذ بایستی به‌صورت پیوسته بوده و ابعاد منافذ بایستی زیر ۱ میلی‌متر باشد، که این میزان بسیار کمتر از طول موج صداهای مورد نظر در کنترل نوفه است. در حالت کلی نمونه‌های متفاوتی از مواد متخلخل شامل فوم‌های پلیمری، فوم‌های فلزی، پشم سنگ، پشم شیشه، نمد، فرش، سطوح فلزی با ساختار متخلخل، چرم‌های متخلخل و سطوح باز یافتی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱-۱. فوم فلزی

### ۳. کاربردهای مواد متخلخل در محیط پیرامون و

#### صنایع مختلف

مواد متخلخل اشاره شده در بخش قبلی به صورت گسترده در محیط زندگی اطراف ما کاربرد دارند. علاوه بر کاربردهای متداولی که از این مواد در نظر داریم، در این مقاله کاربرد خاص آکوستیکی این دسته از مواد مورد توجه است که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

استفاده از پوشش‌های متخلخل در سطوح خارجی ساختمان به منظور ایجاد مانع آکوستیکی از جمله کاربردهای فراوان این دسته از مواد در معماری ساختمان است. این پوشش‌ها علاوه بر قابلیت‌های مختلف آکوستیکی، به صورت معمول زیبایی معماری مورد پسندی را نیز به همراه دارند. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، از پانل‌های چوبی جاذب متخلخل در پوشش بیرونی ساختمانی در دانشگاه ایالتی مورگان در بالتیمور استفاده شده است. البته این نوع پوشش‌ها در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای در صنایع ساختمان ایران موقعیت خود را تثبیت نموده و علاوه بر زیبایی دارای کاربردهای فراوان آکوستیکی نیز هستند.

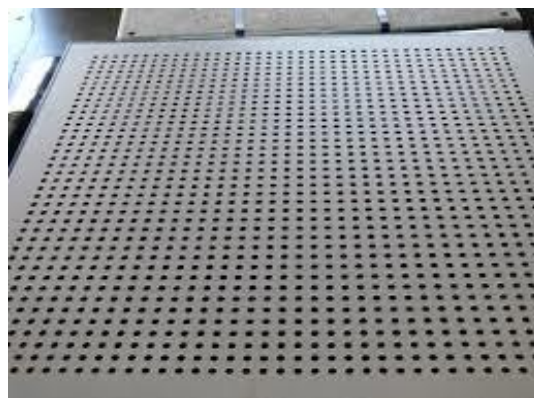


شکل ۲. استفاده از پانل‌های چوبی جاذب متخلخل در سطوح

خارجی ساختمان دانشگاه ایالتی مورگان در بالتیمور [۲].



شکل ۱-۶. فرش



شکل ۱-۷. سطح فلزی متخلخل



شکل ۱-۸. چرم متخلخل

به منظور شناخت هر چه بیشتر این دسته از مواد، حصول خواص آکوستیکی و غیرآکوستیکی مواد متخلخل بسیار حائز اهمیت است. در ادامه ابتدا به برخی از کاربردهای این دسته از مواد پرداخته شده و سپس معرفی و نحوه به دست آوردن مشخصات مکانیکی و غیرآکوستیکی این دسته از مواد آورده شده است.

از جمله موارد پر کاربرد دیگر مواد متخلخل استفاده از این مواد به عنوان جاذب و مانع صوتی در محل های پر سر و صدا مانند کنار اتوبان ها و فرودگاه ها به منظور کنترل آلودگی صدای تولید شده توسط اتومبیل ها و هواپیماها است. طبیعتاً ساکنین در اطراف بزرگراه ها از جمله افرادی هستند که به صورت محسوسی از ترافیک ایجاد شده ناشی از تردد

وسایل نقلیه در سراسر شبانه روز آسیب می بینند. به منظور محافظت از این دسته از افراد معمولاً مجموعه ای از مواد متخلخل را به صورت جاذب و مانع صوت مانند موارد نمایش داده شده در شکل ۳ استفاده نموده و براساس اصول مشخص آکوستیکی طراحی لازم را انجام می دهند.



شکل ۳. نمایی از کاربرد مواد متخلخل در اطراف بزرگراه ها به منظور جاذب و مانع صوت [۳].

در استودیوهای صوتی و محیط های تخصصی صدا، ایجاد اتاق بدون پژواک<sup>۹</sup> از جمله ملزومات کاری است. این دسته از اتاق ها در محیط های مختلف صنعتی به منظور ایجاد شرایط مناسب جهت تست آکوستیکی محصولات صنعتی مطابق استانداردهای بین المللی، در محیط های دانشگاهی جهت

تست های مختلف صوتی و انجام پژوهش های علمی و در محیط های تخصصی-تجاری صوت مانند استودیوهای صدا و سیما و استودیوهای مربوط به ضبط صوت جهت ایجاد شرایط بدون پژواک داخلی و ایزوله نسبت به صدای خارجی کاربرد دارند. شکل ۴ نمایی از یک اتاق بدون پژواک در

دانشگاه سالفورد<sup>۱۰</sup> انگلستان را نمایش می‌دهد. این اتاق‌ها براساس شکل خاصی از فوم‌ها به صورت گوه‌ای با زاویه مشخص و ترکیبی از پشم شیشه و پشم سنگ با ضخامت‌های معلوم ساخته می‌شوند.



شکل ۴. نمایی از اتاق بدون پژواک به کار رفته در دانشگاه سالفورد انگلستان [۲].

طراحی آکوستیکی سالن‌های سینما و تئاتر و مخصوصاً سالن‌های اجرای کنسرت موسیقی، از طریق به‌کارگیری مواد متخلخل متنوع نظیر فوم‌ها قابل حصول است. شکل ۵ نمایی از کاربرد مواد متخلخل در طراحی آکوستیکی تالار سلطنتی انگلستان را نمایش می‌دهد.



شکل ۵. کاربرد مواد متخلخل در طراحی آکوستیکی تالار جشن‌های سلطنتی انگلستان [۲].

امروزه با پیشرفت صنایع حمل و نقل جاده‌ای، ریلی و هوایی، ایجاد محیط‌های آرام از نظر صوتی برای سرنشینان از جمله نکات حائز اهمیت برای طراحان در این حوزه است. امروزه ایجاد محیط عایق آکوستیکی و کم پژواک در محل سرنشین‌ها، از طریق به‌کارگیری مواد متخلخل، روشی معمول بوده که بسیار پرکاربرد است. با انتخاب و طراحی مهندسی این دسته از مواد در موقعیت‌های مشخص، مانع از ورود صوت به داخل کابین شده و ضمن جلوگیری از پژواک نامناسب صدا، محیطی آرام را برای سرنشینان وسیله نقلیه فراهم می‌کنند. با توجه به رقابت شدیدی که میان تولیدکنندگان بزرگ صنعت حمل و نقل وجود دارد، برتری در زمینه عایق‌سازی آکوستیکی از جمله مزیت‌های مهم هر یک از این شرکت‌ها محسوب می‌شود. شکل ۶ نمایی از کاربرد این دسته از مواد را در پوشش داخلی هواپیما و خودرو نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، با پوشش کامل سطح داخلی هواپیما به کمک مواد متخلخل جاذب صوت، کنترل صدای داخل کابین هواپیما را انجام داده به طوری که از ورود صداهای ناخواسته و ارتعاشات بدنه و صدای موتورها به داخل هواپیما جلوگیری می‌شود. البته این نکته قابل ذکر است که مسئله وزن در صنایع هوایی امری حیاتی محسوب شده و دغدغه طراحان در این صنعت بر این است که با به‌کاربردن مواد متخلخل با حجم و وزن کمتر بتوانند محیط آرام مورد نظر را ایجاد نمایند. در مورد صنایع خودروسازی نیز با قراردادن مواد متخلخل در سطوح مختلف مانع از عبور صدا به داخل محفظه سرنشین ماشین می‌شوند که بیشتر منابع تولید صدا از طرف موتور یا پنل‌های خودرو بوده که نمایی طرح‌واره از موقعیت‌های معمول به‌کاربردن جاذب‌های آکوستیکی در خودرو در شکل ۶ نمایش داده شده است.

به‌طور کلی، کاربرد این دسته از مواد به‌عنوان جاذب صوتی هم در زندگی روزمره و هم در صنایع مختلف بسیار متنوع و فراوان است که از جمله موارد دیگر می‌توان به استفاده از این مواد در هواسازها، وسایل خانگی نظیر جاروبرقی و یا اتاق‌های نشیمن منازل اشاره نمود.

#### ۴. معرفی پارامترهای اصلی مواد جاذب صوت

مواد متخلخل از یک فاز جامد و یک فاز سیال درهم آمیخته تشکیل شده‌اند. در مواد متخلخل دو فاز متفاوت ماده (فاز جامد و فاز سیال) در انتشار موج سهمیم هستند. به دلیل نوسانی بودن ماهیت موج، انتشار موج با اثرات متقابل اینرسی و ویسکوزیته این دو فاز بر یکدیگر همراه است. به علت وجود این پدیده و ساختار ویژه مواد متخلخل، که آنها را از محیط‌های الاستیک یکنواخت متمایز می‌سازد، تحلیل آکوستیکی این مواد را نمی‌توان تنها بر پایه خواص مواد سازنده دو فاز جامد و سیال آنها انجام داد. توصیف کامل مواد متخلخل توسط سه دسته از خواص صورت می‌گیرد که در ادامه آورده شده‌اند [۵]:

الف) خواص سیال اشباع‌کننده: نظیر چگالی، ویسکوزیته دینامیکی، عدد پراتل<sup>۱۱</sup> و سرعت صوت.

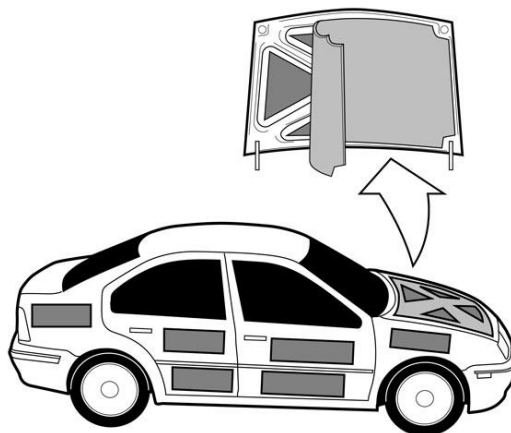
ب) خواص مکانیکی سازه: شامل چگالی بالک، مدول الاستیسته، ضریب افت و ضریب پواسون.

ج) خواص مربوط به مجموعه دو فاز جامد و سیال<sup>۱۲</sup>: شامل تخلخل، تورنوزیته، مقاومت جریانی، طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی.

در ادامه ابتدا خواص مربوط به سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس، خواص مربوط به مجموعه دو فاز بررسی خواهد شد.

#### ۴-۱. چگالی حجمی<sup>۱۳</sup>

چگالی حجمی همان چگالی سازه و معادل نسبت جرم ماده انبساط یافته به حجم آن است.



شکل ۶. نمایی از مواد متخلخل به کار رفته در بدنه هواپیما و

خودرو به‌عنوان عایق و جاذب صوتی [۴].



## ۴-۲. مدول الاستیسیته

مانند مواد الاستیک، مدول الاستیسیته فریم نسبت تنش کششی به کرنش است که با نماد  $E$  نشان داده می‌شود. در حوزه فرکانسی برای در نظر گرفتن میرایی، مدول الاستیسیته مواد متخلخل به کمک کمیتی به نام ضریب افت، که با نماد  $\eta$  نشان داده می‌شود، به صورت مختلط بیان می‌گردد.

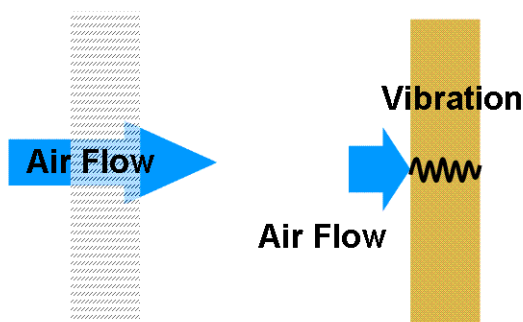
## ۴-۳. تخلخل

نسبت حجمی که فاز سیال به کل حجم ماده متخلخل اشغال می‌کند، کمیتی بدون بعد، بین صفر و یک، که میزان تخلخل ماده را بیان می‌کند و با نام تخلخل،  $\phi$ ، از آن یاد می‌شود. البته نکته مهم این است که تنها حجم هوای محبوس نشده داخل سازه باید در محاسبات مربوط به تخلخل در نظر گرفته شود. این مقدار معمولاً با عنوان تخلخل باز یا تخلخل مرتبط شده شناخته می‌شود. برای مثال حباب‌های بسته داخل فوم‌های پلاستیکی به صورت محبوس شده داخل سازه در نظر گرفته شده و بنابراین حجم آنها به عنوان حجم فاز سیال محسوب نمی‌گردد.

مواد آکوستیکی به دلیل ماهیت دو فازی بودن و کاربرد در زمینه جذب عموماً دارای تخلخل بالایی هستند. در مورد مواد متخلخل مقدار تخلخل در بازه‌های متفاوتی وجود دارد که به طور مثال در مورد فوم‌ها مقدار تخلخل بین  $0.95 < \phi < 0.99$  است. همچنین برای صفحات سوراخ‌دار تخلخل به میزان  $0.50 < \phi$  است و در مورد مواد فایبری سبک مقدار تخلخل در حدود  $0.99$  است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بازه تغییرات تخلخل تقریباً ناچیز بوده اما با تغییرات تخلخل خواص دیگر دستخوش تغییرات زیادی قرار می‌گیرند. به طور مثال با تغییر تخلخل مقدار چگالی ماده متخلخل تغییر نموده و طبیعتاً بسیاری از خواص ماده را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

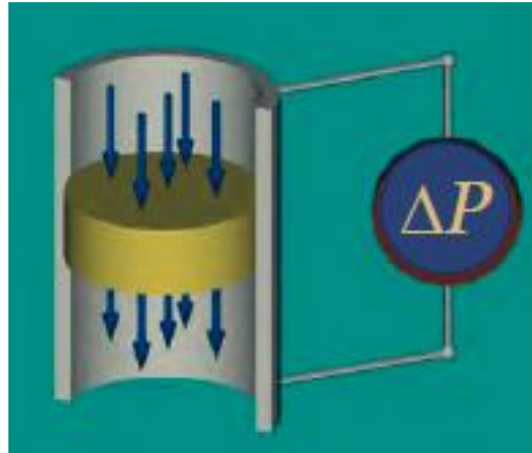
## ۴-۴. مقاومت جریانی

در مواد متخلخل به واسطه دو فازی بودن ماده و پیوستگی منافذ تخلخل، عبور جریان هوا از بین منافذ امکان‌پذیر بوده، در صورتی که در مواقع برخورد جریان هوا با سطح غیرمتخلخل امکانی جهت عبور مولکول‌های هوا میسر نبوده و برخورد آنها سبب ایجاد ارتعاشاتی در سطح جسم غیرمتخلخل خواهد شد. شکل ۷ نمایی طرح‌واره از برخورد جریان هوا با مواد متخلخل و غیرمتخلخل را نمایش می‌دهد. در حالت کلی مقاومت جریانی به مقاومتی اطلاق می‌شود که در مقابل جریان پایای سیال در درون ماده متخلخل وجود دارد. معمولاً مقاومت جریانی با  $\sigma$  نمایش داده می‌شود. به بیانی دیگر مقاومت جریانی تانسوری از مرتبه دو است که اثرات ویسکوزیته را در فرکانس‌های پایین توصیف می‌کند.



شکل ۷. نمایی از برخورد جریان هوا با سطوح متخلخل و غیرمتخلخل [۶].

مطابق شکل ۸ در شرایطی که یک گرادبان فشار ثابت، جریان پایایی را در ماده متخلخل ایجاد کند، مقاومت جریانی از تقسیم اختلاف فشار در واحد طول بر سرعت جریان سیال به دست می‌آید. مقاومت جریانی در واقع مقاومتی است که در مقابل جریان سیال در درون ماده متخلخل وجود دارد.



شکل ۸. نمایی از مفهوم مقاومت جریان [۷].

مقاومت جریان دارای محدوده تغییرات وسیعی بین  $10^3$  تا  $10^6 \left(\frac{N}{ms^4}\right)$  است و به مقدار تخلخل و توزیته ماده متخلخل وابسته است. هرچه سلول‌های ماده متخلخل کوچک‌تر بوده و همچنین ماده متخلخل بسته‌تر باشد، جریان سیال برای عبور با موانع بیشتری روبه‌رو بوده و بنابراین مقدار مقاومت جریانی افزایش پیدا می‌کند. در مواد فایبری که دارای تخلخل بالا و توزیته پایین هستند، با فرض چگالی بالک ثابت، مقاومت جریانی با عکس مجذور شعاع فایبر متناسب است. به عبارت دیگر بین دو ماده فایبری متخلخل با چگالی بالک ثابت، آنکه تعداد فایبرهای بسیار با قطر کم دارد، نسبت به ماده با تعداد فایبرهای کمتر و قطر بیشتر، مقاومت جریانی بیشتری خواهد داشت.

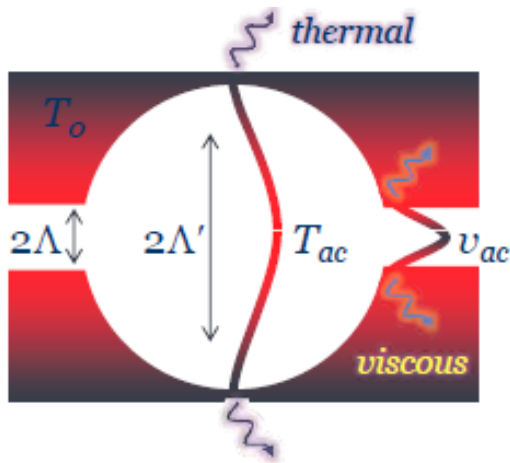
نکته مهمی که باید در نظر گرفته شود این است که مقدار مقاومت جریانی در جهات مختلف متفاوت است. در واقع اگر موج آکوستیکی در جهت عمود بر ماده متخلخل از آن عبور کند و یا در جهت صفحه‌ای از ماده‌ی متخلخل بگذرد، مقدار مقاومت جریانی متفاوت خواهد بود.

#### ۴-۵. طول مشخصه ویسکوز

طول مشخصه ویسکوز پارامتری است که بیانگر تأثیر اتلاف ویسکوز در فرکانس‌های متوسط و بالا است. به عبارتی از یک فرکانس مشخص به بالاتر، نیروهای اینرسی بر نیروهای

ویسکوزیته غلبه نموده و تأثیرات ویسکوزیته تنها در مجاورت دیواره‌های سازه محسوس است. این پدیده به نوعی وابسته به نوع جریان سیال است. زمانی که عدد رینولدز برابر با نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز در یک فرکانس مشخص باشد، نیروهای اینرسی بسیار بزرگتر از نیروهای ویسکوز هستند.

به عبارت دیگر طول مشخصه ویسکوز تانسوری از مرتبه دو است که برای توصیف تغییرات اثر ویسکوزیته در فرکانس‌های متوسط و بالا به کار می‌رود. مطابق شکل ۹ اندازه طول مشخصه ویسکوز برابر با شعاع متوسط سلول‌های کوچکتر است که در آنها اتلافات ویسکوز بر اتلافات حرارتی غلبه دارد. برای نمایش طول مشخصه ویسکوز از نماد  $\Lambda$  استفاده می‌شود.



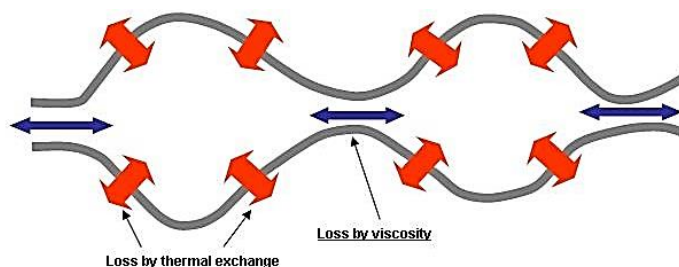
شکل ۹. تعریف طول مشخصه ویسکوز و حرارتی [۸].

#### ۴-۶. طول مشخصه حرارتی

طول مشخصه حرارتی کمیتی اسکالر است که اتلافات ناشی از انتقال حرارت بین دو فاز را در فرکانس‌های بالا توصیف می‌کند. مشابه طول مشخصه ویسکوز یک فرکانسی وجود دارد که بعد از آن فرکانس اثرات حرارتی تنها در مجاورت دیواره‌های سازه اتفاق می‌افتد. مطابق شکل ۹ اندازه طول مشخصه حرارتی برابر با شعاع متوسط سلول‌های بزرگتر است که در آنها اتلافات حرارتی بر اتلافات ویسکوز غلبه دارد. برای نمایش طول مشخصه حرارتی از نماد  $\Lambda'$  استفاده

می‌شود. در حالت کلی برای مواد متخلخل مقدار  $\Delta'$  بین دو تا سه برابر مقدار  $\Delta$  است. در مجموع با توجه به ساختار مواد متخلخل همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، اتلافات حرارتی در سلول‌ها در

نواحی مشخص شده و ناشی از تبادل حرارت سیال و سازه رخ خواهد داد در صورتی که در مورد اتلافات ویسکوز در منافذ بین سلولی رخ خواهد داد.

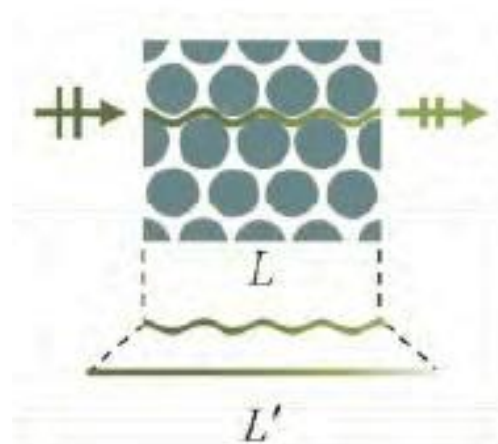


شکل ۱۰. نمای اثر اتلافات ویسکوز و حرارتی در مواد متخلخل [۹].

#### ۷-۴. تور توزیته<sup>۱۴</sup>

پارامتر تور توزیته معیاری از بی‌نظمی مسیرهای انباشته از سیال در داخل ماده متخلخل است. این پارامتر با عنوان‌های ضریب شکل سازه و ضریب سازه نیز نامگذاری شده که با نماد  $\alpha_{\infty}$  نمایش داده می‌شود. مطابق شکل ۱۱ مجذور نسبت طول طی شده توسط سیال برای رسیدن از یک طرف ماده متخلخل به طرف دیگر به طول ماده متخلخل میزان تور توزیته را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر تور توزیته به نوعی بیانگر میزان افزایش ظاهری در چگالی ناشی از وجود ساختار متخلخل است.

پارامتر معرفی شده در بالا معروف به تور توزیته کلاسیک بوده که در آزمایشگاه به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری است. در مراجع علمی دو نوع تور توزیته دیگر با عنوان‌های تور توزیته دینامیکی و تور توزیته استاتیکی تعریف شده که تور توزیته دینامیکی اتلافات ویسکوز در آنها لحاظ شده و این پارامتر توسط مدل‌های مختلفی مانند جانسون و همکاران [۱۰] و مدل ارائه شده توسط پراید و همکاران [۱۱] قابل محاسبه است. از طرفی تور توزیته استاتیکی کمیتی است که در مدل ارائه شده توسط پراید کاربرد دارد و توسط آن بخش حقیقی تور توزیته دینامیکی در فرکانس‌های پایین را با دقت بیشتری مدل می‌کنند. البته به دلیل دشواری محاسبه این کمیت معمولاً از مدل پراید و همکارانش استفاده نمی‌شود. پنج خاصیت مربوط به کوپلینگ دو فاز به غیر از تور توزیته دینامیکی توسط تجهیزات آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری هستند که در بخش‌های بعدی به نحوه اندازه‌گیری آنها پرداخته می‌شود.



شکل ۱۱. نمایی از افزایش مسیر عبوری سیال ناشی از ساختار مواد متخلخل [۸].

#### ۵. روش‌های مختلف اندازه‌گیری پارامترهای ماده متخلخل

پارامترهای مواد متخلخل را می‌توان به دو روش عمده تعیین نمود. روش اول بر پایه تعریف هر پارامتر بوده و با استفاده از

تجهیزات آزمایشگاهی مناسب می‌توان آن پارامتر را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمود. در این روش اندازه‌گیری دقیق پارامترها نیازمند دسترسی به مجموعه کاملی از تجهیزات اندازه‌گیری است و معمولاً این امر محتمل نیست. به همین دلیل در کنار روش مستقیم، روش‌های دیگری نظیر روش معکوس و روش پیش‌بینی براساس میکروساختار توسعه داده شده‌اند. در این بخش به بررسی روش‌های مختلف تعیین خواص مواد متخلخل پرداخته می‌شود.

### ۵-۱- اندازه‌گیری مستقیم پارامترها

برای اندازه‌گیری هر یک از خواص غیرآکوستیکی و مکانیکی

به‌طور مستقیم تاکنون تجهیزات متفاوتی توسعه داده شده است. در این بخش به اختصار روش اندازه‌گیری مستقیم هر یک از این کمیت‌ها توضیح داده می‌شود.

### ۵-۱-۱. تخلخل

برای محاسبه و اندازه‌گیری مستقیم تخلخل روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از متداول‌ترین روش‌هایی که برای اندازه‌گیری تخلخل وجود دارد، روش غوطه‌وری یا شناوری در داخل جیوه است. در جدول ۱ به روش‌های گوناگونی که برای اندازه‌گیری تخلخل به‌کار می‌رود، اشاره‌ای شده است.

جدول ۱. روش‌های اندازه‌گیری تخلخل در مواد متخلخل

روش اندازه‌گیری	حجم اندازه‌گیری شده
شناوری در جیوه: جیوه، مایعی است که تر نمی‌کند و به‌طور عادی و بدون اعمال فشار به داخل ماده متخلخل نفوذ نمی‌کند. با استفاده از این روش اندازه‌گیری، با دقت بالایی می‌توان حجم کل ماده متخلخل را به‌دست آورد.	حجم کلی ماده متخلخل
اندازه‌گیری مستقیم نمونه‌های با طول‌های متفاوت: این روش بیشتر برای نمونه‌هایی به‌کار می‌رود که دارای شکل‌های منظم هستند.	
پر کردن حفره‌ها با مایع ترکننده تحت شرایط خلاء که به‌طور کامل حفره‌ها را اشباع کرده است: از اختلاف وزن بین حالت خشک و حالت اشباع، حجم فاز سیال محاسبه می‌گردد.	حجم فاز سیال ماده متخلخل
تراکم‌پذیری گاز ایده‌آل	حجم فاز جامد ماده متخلخل
شناوری در داخل مایعی ترکننده که به‌طور کامل حفره‌ها را اشباع کرده است: از اختلاف وزن بین حالت خشک و حالت غوطه‌وری، حجم فاز جامد محاسبه می‌گردد.	
محاسبه چگالی جامد: با تجزیه و تحلیل مقداری اجزای معدنی تشکیل‌دهنده	

از طرفی پرکاربردترین روش اندازه‌گیری تخلخل یک ماده متخلخل، روش ارائه شده در قسمت سوم جدول ۱ است که

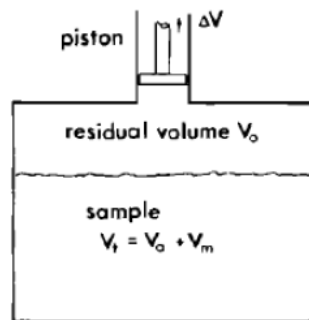
شامل اندازه‌گیری حجم هوای موجود در ماده متخلخل است که بر پایه روش استاتیکی برانک<sup>۱۵</sup> و توسط دستگاه کامپوکس<sup>۱۶</sup> شکل ۱۲ انجام می‌شود.



شکل ۱۲. نمایی از دستگاه اندازه گیری تخلخل [۱۲].

می‌شود. با مقایسه مقدار این تغییر فشار در دو حالت با نمونه و بدون نمونه (با معلوم بودن حجم محفظه)، حجم اشغال شده توسط فاز جامد و در نتیجه مقدار تخلخل نمونه قابل محاسبه خواهد بود. تنها چیزی که در این اندازه‌گیری فرض می‌شود، تراکم ناپذیری فاز جامد ماده متخلخل است. البته میزان تخلخل در صورت معلوم بودن چگالی ماده فاز جامد، توسط چگالی بالک ماده متخلخل نیز قابل محاسبه می‌باشد.

در این طرح یک محفظه و یک پیستون با قطر معلوم و یک فشار سنج الکترونیک به کار رفته است و حجم فازهای جامد و سیال ماده متخلخل براساس قانون گازهای ایده‌آل در دمای ثابت (قانون بویل<sup>۱۷</sup>) قابل اندازه‌گیری می‌باشد. نمایی طرح‌واره از مجموعه شرح داده شده در شکل ۱۳ ارائه شده است. با ثابت نگه داشتن دمای محفظه حاوی نمونه، میزان تغییر فشار هوا در اثر اعمال تغییر حجم معلوم اندازه‌گیری



$$V_0 + V_t = - \frac{P_0 + \Delta P}{\Delta P} \Delta V$$

شکل ۱۳. نمایی از دستگاه اندازه گیری تخلخل

سرعت جریان هوای عبوری از نمونه است. مقاومت جریانی براساس استانداردهای بین‌المللی *ISO* و *ASTM C522* و *9053* قابل محاسبه است. برای اندازه‌گیری این کمیت ابتدا یک نمونه استوانه‌ای از ماده‌ی متخلخل مورد بررسی تهیه

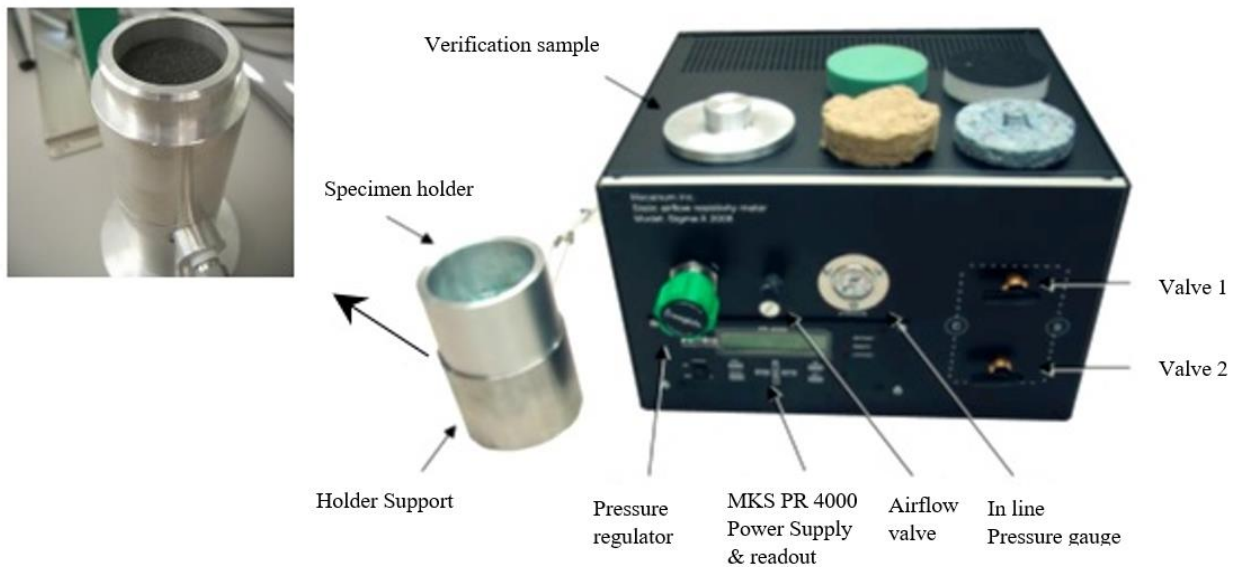
## ۲-۱-۵. مقاومت جریانی

براساس مفهوم بیان شده برای مقاومت جریانی جسم متخلخل، به‌منظور یافتن پارامتر مقاومت جریانی نیاز به اندازه‌گیری اختلاف فشار دوسر نمونه، میزان ارتفاع نمونه و

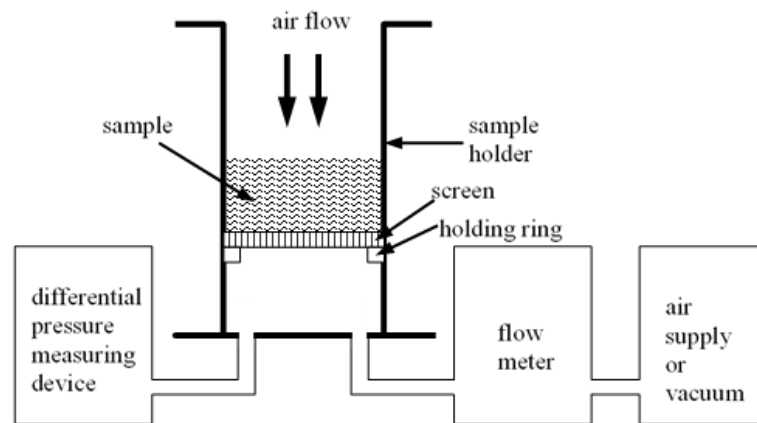
می‌گردد، سپس با استفاده از دستگاهی که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، یک جریان پایا در نمونه ایجاد گردیده و با استفاده از اندازه‌گیری افت فشار به وجود آمده مقاومت جریانی را اندازه‌گیری می‌نمایند.

از آنجا که مقاومت جریانی تابعی غیرخطی از سرعت جریان است، یا این تست‌ها در سرعت‌های پایین و محدوده خطی انجام می‌گردد و یا مقاومت جریانی محاسبه شده برای رسیدن به ناحیه خطی برون‌یابی می‌شود تا در وضعیت‌های

آکوستیکی - که سرعت ذرات در حد چند  $mm/s$  است - قابل به‌کارگیری باشند. سرعت پایین سیال و جریان پایدار هوا در نمونه، اثرات جریان مغشوش و اثرات غیرخطی در حفره‌ها را از بین می‌برد و نسبت اختلاف فشار به سرعت را در ناحیه خطی نگه می‌دارد. به‌منظور درک بهتر نحوه عملکرد دستگاه اندازه‌گیری مقاومت جریانی نمایی طرح‌واره از ساختار تشکیل‌دهنده این دستگاه در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت جریانی [۱۲].

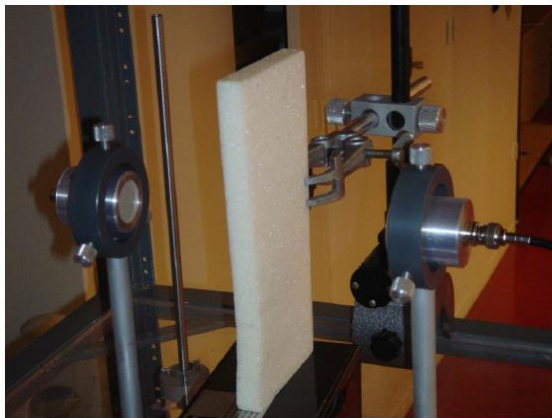


شکل ۱۵. نمایی طرح‌واره از روش اندازه‌گیری مقاومت جریانی [۱۳].

### ۳-۱-۵. تور توزیته

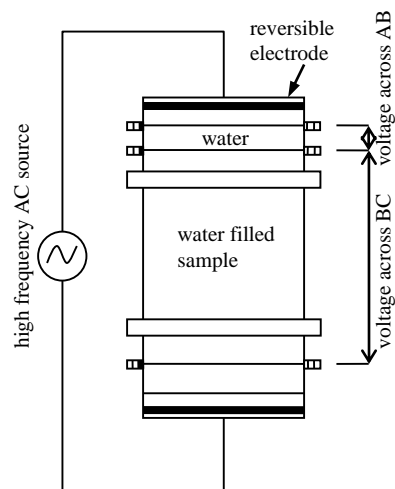
روش ابتدایی اندازه‌گیری تور توزیته مواد متخلخل بر مبنای رسانایی الکتریکی بود که مطابق شکل ۱۶ طی آن مقاومت در مقابل عبور جریان متناوب فرکانس بالا از یک نمونه اشباع از سیال رسانا اندازه‌گیری شده و با استفاده از میزان افزایش این مقاومت نسبت به مقاومت سیال و همچنین در نظر گرفتن تخلخل، ضریب سازه ماده محاسبه می‌گردید.

بالا در ماده متخلخل می‌توان مجذور ضریب شکست را به صورت تئوری به دست آورد و با استفاده از رابطه به دست آمده اگر مجذور ضریب شکست برای سه فرکانس فرا صوت در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز برحسب عکس جذر فرکانس ترسیم گردد و یک خط بر نتایج به دست آمده منطبق شود، طول از مبدا خط میزان تور توزیته کلاسیک را نشان می‌دهد. نمای طرح‌واره از دستگاه فوق در شکل ۱۷ ارائه شده است.



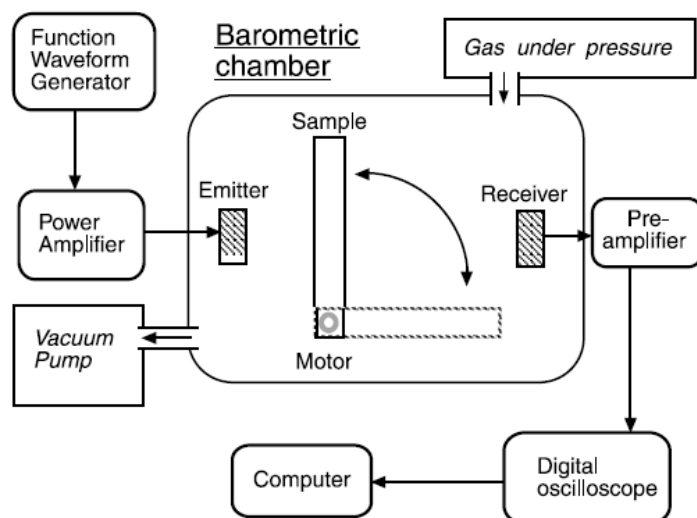
شکل ۱۷. نمای از دستگاه اندازه‌گیری تور توزیته [۱۲].

روشی دیگر برای اندازه‌گیری تور توزیته با استفاده از امواج فرا صوت وجود دارد. این روش نیز از ارتباط خطی موجود بین مجذور اندیس شکست و معکوس جذر فشار استاتیکی استفاده می‌نماید. اگر مجذور اندیس شکست در یک فرکانس بالا در حداقل سه فشار استاتیکی متفاوت بین صفر تا هفت بار محاسبه شود و سپس یک خط بر مجذور اندیس بازتاب برحسب عکس جذر فشار منطبق گردد، مشابه روش قبلی طول از مبدا خط نشان‌دهنده تور توزیته کلاسیک است [۱۸]. در شکل ۱۸ نمای طرح‌واره از تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری تور توزیته به روش فوق ارائه شده است.



شکل ۱۶. روش اندازه‌گیری ضریب سازه مواد متخلخل با استفاده از جریان متناوب فرکانس بالا [۱۴].

بزرگترین مشکل این روش تخریب نمونه مورد استفاده بوده و همین موضوع سبب گردیده محققین به دنبال یافتن روش‌های جدیدی باشند. اندازه‌گیری تور توزیته با استفاده از امواج فرا صوت روش دیگری [۱۵-۱۷] بود که توسعه پیدا کرد. این روش بر خلاف روش قبل به نمونه صدمه وارد نمی‌کرد. اساس این روش اندازه‌گیری قسمت حقیقی ضریب شکست ناشی از برخورد یک موج فرا صوت نرمال با سطح ماده است. با استفاده از تقریب سرعت صوت در فرکانس‌های



شکل ۱۸. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری تورنوزیته به روش اختلاف فشار [۱۸].

مشخصه به دست می‌آید که با حل هم‌زمان این معادلات طول‌های مشخصه به دست می‌آید. برای اینکه بتوان آزمایش مورد نظر را در داخل هلیوم نیز انجام داد، با توجه به اینکه هلیوم سبک‌تر از هوا است، یک محفظه بر روی دستگاه قرار داده می‌شود [۱۹].

در کنار روش آلتراسونیک توضیح داده شده در بالا یک روش دیگر نیز برای اندازه‌گیری طول مشخصه حرارتی وجود دارد. این روش که BET<sup>M</sup> نامیده می‌شود در صنایع رنگ و پلیمر پر کاربرد بوده و براساس استاندارد D3663-78 انجام می‌پذیرد. کاربرد اصلی این روش اندازه‌گیری سطح تماس بین فاز سیال و فاز جامد است و با توجه به تعریف طول مشخصه حرارتی می‌توان برای اندازه‌گیری طول مشخصه حرارتی نیز از آن استفاده نمود. بر طبق این روش ماده متخلخل را در مجاورت حجم مشخصی از یک گاز با فشار کم، که معمولاً نیتروژن است، قرار می‌دهند. با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات فشار یا حجم گاز می‌توان مقدار متوسط مول‌های گازی که بر سطح ماده متخلخل می‌نشینند، را محاسبه نموده و با استفاده از روابط علم شیمی میزان سطح تماس گاز با سطح ماده را محاسبه نموده و به کمک آن طول مشخصه حرارتی را با استفاده از تعریف آن استخراج نمود.

در کنار روش‌های اشاره شده در بالا که بیشترین کاربرد را برای اندازه‌گیری تورنوزیته دارند، روش‌های دیگری نیز توسعه داده شده‌اند که به دلیل پیچیدگی زیاد مورد توجه زیادی قرار نگرفته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از تغییرات ضریب پراکنش ذرات مغناطیسی اشاره نمود.

#### ۴-۱-۵. طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی

برای اندازه‌گیری مستقیم طول‌های مشخصه پرکاربردترین روش استفاده از امواج آلتراسونیک است. اگر مجذور ضریب شکست برای سه فرکانس فرا صوت در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز برحسب عکس جذر فرکانس ترسیم گردد و یک خط بر نتایج به دست آمده منطبق شود، شیب خط به دست آمده کمیتی را مشخص می‌کند که تابعی غیرخطی از طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی است. همان‌گونه که مشهود است یک معادله تنها برای به دست آوردن دو مجهول کفایت نمی‌کند. برای غلبه بر این مشکل آزمایش را مجدد برای حالتی که ماده با گاز هلیوم اشباع شده باشد تکرار می‌نمایند. در این حالت یک معادله متفاوت برای طول



دانشگاه شبروک<sup>۲۰</sup> در کانادا در شکل ۲۰ آورده شده است. شایان ذکر است روش اندازه‌گیری این خواص در مواد متخلخل براساس استاندارد *ISO 18437-5* انجام می‌گیرد.



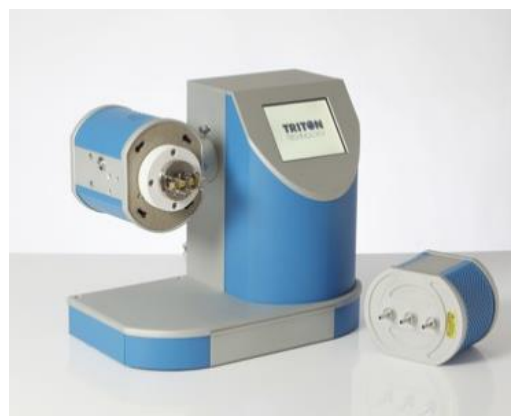
شکل ۲۰. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی [۱۲].

به‌طور قطع لرزاننده‌ها دارای محدودیت فرکانسی بوده و نمی‌توانند فرکانس‌های خیلی بالا را پوشش دهند و با توجه به اینکه محدوده فرکانسی امواج صوتی از ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز است، نیاز به دانستن خواص مکانیکی مواد در فرکانس‌های بالا ضروری است. برای غلبه بر این مشکل تعدادی مدل توسعه داده شده که با داشتن اطلاعات در فرکانس‌های پایین می‌توان خواص فرکانس‌های بالا را به خوبی پیش‌بینی نمایند. البته یک محدودیت دیگر نیز در استفاده از روش توضیح داده شده در فرکانس‌های بالا وجود دارد که با توجه به اینکه نیروی فشاری به ماده متخلخل اعمال می‌گردد، با بالا رفتن فرکانس اثرات برهم‌کنش سازه سیال به شدت بالا رفته و دیگر قابل صرف‌نظر نیست. برای غلبه بر این مشکلات اخیراً تمرکز بر روی استفاده از لرزاننده برشی به جای لرزاننده فشاری قرار گرفته است. در حالت اعمال نیروی برشی اثرات برهم‌کنش سازه سیال به شدت کاهش یافته و همچنین لرزاننده‌های برشی امکان ایجاد فرکانس‌های بالا را دارا هستند.

در کنار روش‌های توضیح داده شده، روش‌های متعدد دیگری نیز برای اندازه‌گیری طول‌های مشخصه توسعه داده شده است که به دلایل متعدد از جمله سختی اجرای روش، عدم دقت کافی و یا زیاد بودن منابع محتمل ایجاد خطا این روش‌ها مورد توجه زیاد قرار نگرفته و به‌طور عمده تعیین طول‌های مشخصه براساس روش آلتراسونیک و یا *BET* انجام می‌گیرد.

### ۵-۱-۵. خواص مکانیکی سازه

همان‌گونه که بیان شد سه کمیت مدول یانگ، ضریب پواسون و میرایی سازه‌ای به‌عنوان خواص مکانیکی سازه محسوب می‌شوند. اندازه‌گیری این خواص در فوم‌ها با استفاده از تحریک فشاری بوده، بدین صورت که یک نمونه استوانه‌ای استاندارد از فوم تهیه نموده و با استفاده از لرزاننده مناسب فوم را تحریک کرده و با اندازه‌گیری نیروی سطح فوم خواص مورد نظر را استخراج می‌نمایند. این دستگاه با عنوان دستگاه آنالیز دینامیکی حرارتی<sup>۱۹</sup> موجود بوده که نمایی از این دستگاه در شکل ۱۹ ارائه شده است.



شکل ۱۹. نمایی از دستگاه DMTA مورد استفاده در اندازه‌گیری خواص الاستیک فوم‌ها.

هنچنین قابل ذکر است در برخی از مراکز پژوهشی دستگاه‌هایی با هدف اندازه‌گیری خواص مکانیکی با مکانیزمی مشابه به دستگاه *DMTA* ارائه شده است. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی به‌کار برده شده توسط

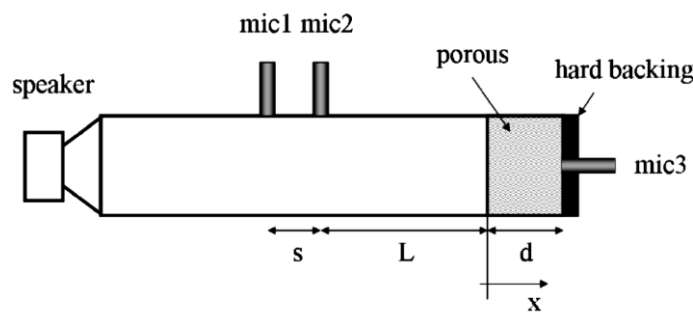
## ۲-۵. روش‌های معکوس اندازه‌گیری خواص

با توجه به اینکه تهیه همه تجهیزات اندازه‌گیری مستقیم خواص، نیاز به هزینه بالایی دارد و انجام این موضوع برای همه پژوهشگران در این زمینه مقدور نیست، لذا روش‌های معکوس نیز در کنار روش‌های مستقیم در طول زمان توسعه داده شده‌اند. اساس این روش‌ها استفاده از نتایج به‌دست آمده از امپدانس تیوب بوده و به‌طور کلی شامل دو روش معکوس مستقیم و روش معکوس تکراری هستند.

در روش معکوس مستقیم<sup>۲۱</sup> در ابتدا با استفاده از مدل سازه صلب بین خواص غیرآکوستیکی و خواص آکوستیکی روابطی تحلیلی را برقرار می‌نمایند و سپس با استفاده از آنها به محاسبه خواص غیرآکوستیکی می‌پردازد. این روش به دلیل

استفاده از مدل سازه صلب قادر نیست خواص الاستیک سازه را محاسبه نماید و به همین دلیل دارای محدودیت است. اعمال این روش نیازمند دانستن چگالی معادل و مدول بالک معادل ماده متخلخل در یک محدوده فرکانسی است.

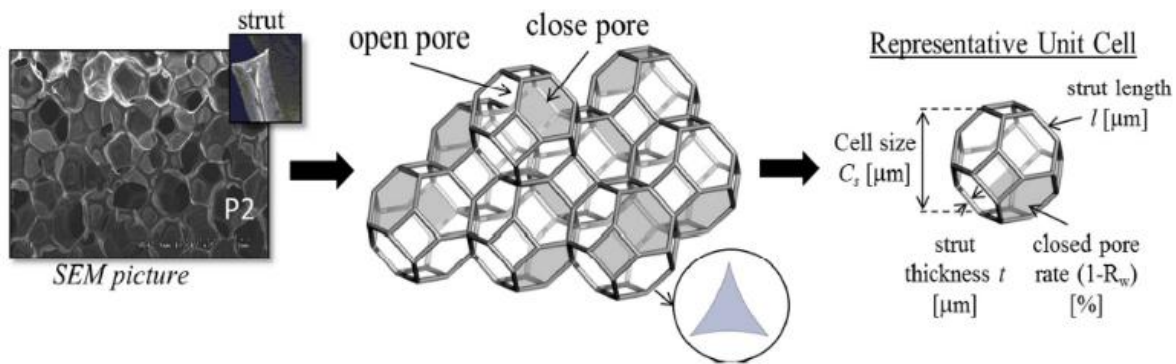
به‌دست آوردن مستقیم چگالی معادل و مدول بالک معادل توسط امپدانس تیوب‌های دو میکروفون در یک بازه فرکانسی کاری دشوار و سخت بوده و به همین دلیل امپدانس تیوب‌های سه میکروفون، که امکان اندازه‌گیری مستقیم چگالی معادل و مدول بالک را دارند، توسعه داده شدند. دستگاه‌های سه میکروفون دارای یک میکروفون اضافی در دیواره صلب انتهای لوله هستند. نمایی از روش سه میکروفون در شکل ۲۱ ارائه شده است.



شکل ۲۱. نمایی از روش سه میکروفون در روش معکوس اندازه‌گیری خواص [۲۰]

روش دیگری نیز وجود دارد که براساس ویژگی‌های میکروساختار خواص ماده مشخص می‌شود. این روش تاکنون تنها برای فوم‌های پلی‌یورتان توسعه داده شده است. در این روش در واقع با استفاده از عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی (SEM) خواص مربوط به برهم‌کنش دو فاز استخراج می‌گردد. برای اینکه از روش نیمه‌تجربی برای به‌دست آوردن خواص استفاده شود، نیاز است تا توضیحاتی در مورد ساختار میکروسکوپی فوم‌ها ارائه گردد. در شکل ۲۲ می‌توان تصویری را که از فوم‌ها به‌وسیله SEM گرفته شده است، مشاهده نمود.

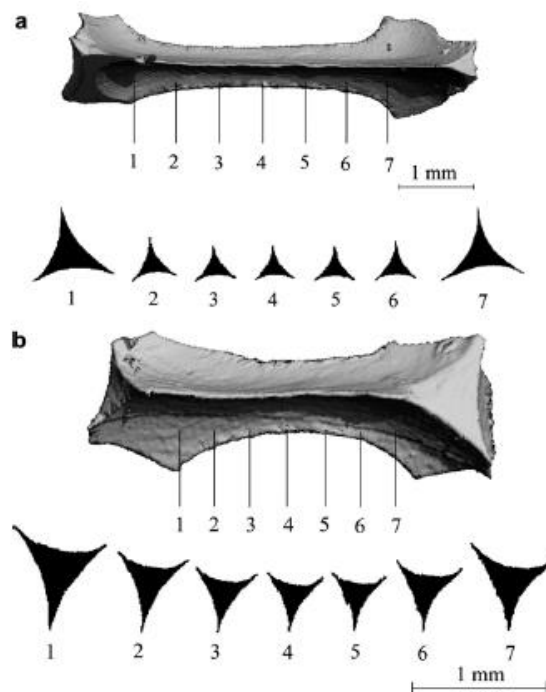
روش دیگری که برای تعیین خواص می‌توان استفاده نمود به روش معکوس غیرمستقیم<sup>۲۲</sup> معروف است. این روش از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌نماید و خواص غیرآکوستیکی را آنقدر تغییر می‌دهد تا خواص آکوستیکی به‌دست آمده از مدل بر خواص آکوستیکی اندازه‌گیری شده توسط امپدانس تیوب منطبق گردد. نرم‌افزارهایی نظیر *Foam-X* برای اعمال این روش توسعه داده شده‌اند. در این روش همچنین این قابلیت وجود دارد که تعدادی از خواص را که به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده‌اند به‌عنوان ورودی به روش داده و تنها خواص مجهول را استخراج نمود.



شکل ۲۲. تصویری از ساختار میکروسکوپی فوم که توسط روش SEM به دست آمده است. [۲۱، ۲۲]

کاملاً باز باشند و غشایی روی آنها را نپوشانده باشد، فوم کاملاً مشبک<sup>۲۶</sup> نامیده می‌شود؛ اما در صورتی که غشایی بر روی بعضی سلول‌ها وجود داشته باشد، فوم مورد نظر نیمه‌مشبک<sup>۲۷</sup> نامیده می‌شود. همچنین یکی دیگر از پارامترهای هندسی مهم، شکل سطح مقطع پایه است. براساس نتایج به دست آمده از SEM می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که سطح مقطع مطابق شکل ۲۳ اغلب به صورت مثلث مقعر است.

در این روش چند فرض مهم در نظر گرفته می‌شود. اولین فرض مهم این است که مطابق شکل ۲۲ تمامی سلول‌ها به صورت تتراکادکاهدرال<sup>۲۳</sup> در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این در روش شناسایی به کمک میکروساختار فرض می‌گردد که فوم‌های پلی‌یورتان از سلول‌های ایزوتروپ تشکیل شده‌اند. اولین پارامتر مهم در ارتباط با یک سلول، اندازه سلول است که در شکل بالا با  $C_s$  نمایش داده شده است. پارامترهای مهم دیگر، اندازه پایه<sup>۲۴</sup> و ضخامت پایه<sup>۲۵</sup> است که به ترتیب با  $l$  و  $t$  نمایش داده شده‌اند. اگر تمامی سلول‌ها



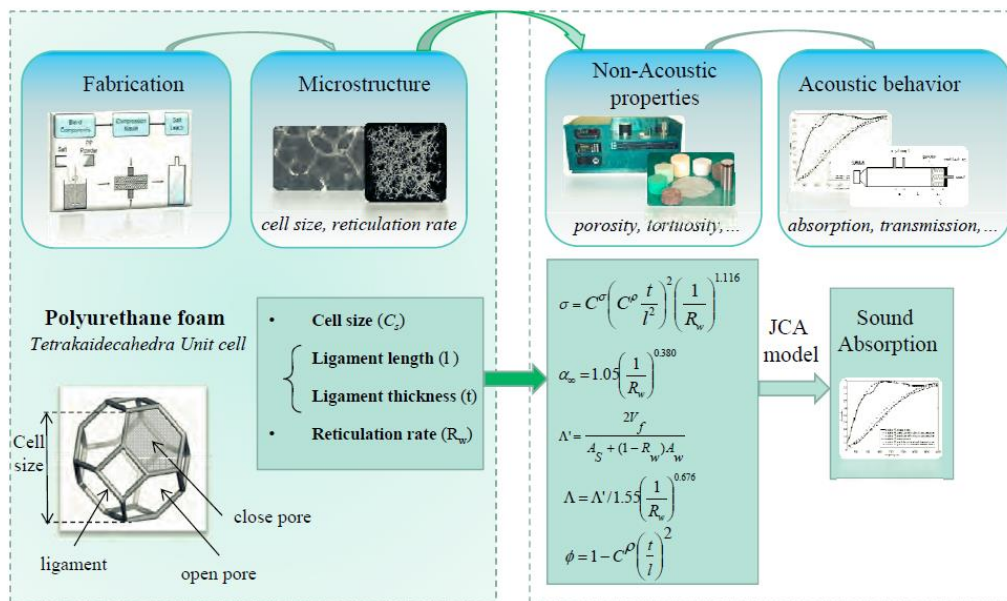
شکل ۲۳. شکل سطح مقطع پایه فوم پلی‌یورتان [۲۱، ۲۲].

خواص به کمک روش میکروساختار در شکل ۲۴ آورده شده است. به منظور آشنایی هر چه بیشتر حصول مشخصات مختلف براساس داده‌های تصاویر SEM اطلاعات جدول ۲ براساس اطلاعات مرجع [۲۳] ارائه شده که با آن آشنا شوید.

## ۶. جمع بندی

در این مقاله ابتدا ضمن تعریف مواد متخلخل، اهمیت این دسته از مواد در کاهش صدای غیرفعال تشریح شد. سپس با معرفی انواع مواد متخلخل جاذب صوت، کاربردهای گسترده این مواد در محیط پیرامون و همچنین در صنایع مختلف بیان شد. در ادامه پارامترهای اصلی بیان کننده خواص آکوستیکی، غیر آکوستیکی و مکانیکی این دسته از مواد معرفی شد. سپس با در نظر گرفتن استانداردهای مختلف، نحوه حصول و یا اندازه‌گیری پارامترهای اصلی ماده متخلخل تشریح گردید. در بخش دوم این مقاله، ابتدا به معرفی مکانیزم‌های حاکم بر جذب صوت بر مواد متخلخل پرداخته خواهد شد. سپس روش‌های متفاوت اندازه‌گیری خواص آکوستیکی مانند ضریب جذب و ضریب افت انتقال صوت و تجهیزات مورد نیاز آن ارائه خواهد شد و نحوه مدل‌سازی تئوری و تجربی این دسته از مواد تشریح می‌گردد.

برای یافتن خواص براساس روش میکرو ساختار باید با استفاده از مقیاس موجود در تصاویر به‌دست آمده از SEM، برای یک نمونه فوم، مقادیر اندازه سلول، طول پایه و ضخامت پایه اندازه‌گیری شوند. با توجه به اینکه این مقادیر برای تمامی سلول‌های یک فوم یکسان نیستند، باید سلول‌های متعددی از یک فوم انتخاب شده و میانگین مقادیر بالا، به‌عنوان مقداری که در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب شود. سپس با استفاده از روابطی که میان ریز ساختار و یا در واقع ساختار درونی ماده با خواص و ویژگی‌های فوم پلی‌یورتان نظیر تخلخل، مقاومت جریانی، طول مشخصه ویسکوز و طول مشخصه حرارتی وجود دارد، خواص و ویژگی‌های ماده متخلخل را استخراج می‌نمایند. تحقیقات نشان می‌دهد که اندازه پایه، ضخامت پایه و میانگین اندازه حفره به‌صورت خطی با اندازه سلول و نرخ مشبک بودن تغییر می‌کند. در نتیجه می‌توان با داشتن دو پارامتر اندازه سلول و نرخ و میزان مشبک بودن، سه پارامتر ذکر شده در بالا را به‌دست آورد. نشان داده شده است که استفاده از اندازه سلول و نرخ مشبک بودن برای یافتن اندازه پایه، ضخامت پایه و میانگین اندازه حفره میزان عدم قطعیت در آزمایش را کاهش می‌دهد. نمای کلی از فرایند استخراج



شکل ۲۴. طرح کلی تعیین خواص ماده متخلخل براساس میکروساختار [۸].

جدول ۲. مقایسه فوم های مختلف با درصد سیلیکون متفاوت محاسبه شده به روش SEM [۲۳]

		فوم اول با 0.5Pbw سیلیکون	فوم دوم با 1Pbw سیلیکون	فوم سوم با 1.5Pbw سیلیکون	فوم چهارم با 2.5Pbw سیلیکون
$\phi$ (%)	حد بالا	۹۲/۵۲	۹۲/۴	۹۲/۳۴	۹۲/۹۶
	روش SEM	۸۹/۲۱	۸۵/۴۳	۸۵/۴۳	۸۵/۳۲
	حد پائین	۸۴/۱۶	۸۱/۴	۷۴/۶	۸۲/۴۵
$\sigma(Nm^{-4}s)$	حد بالا	۱۰۴۰۳/۷۴	۱۰۲۵۸	۲۶۴۴۹	۱۵۶۵۶
	روش SEM	۳۶۹۶	۴۴۳۰	۴۴۳۳	۷۲۹۸/۵
	حد پائین	۱۴۴۰/۹۹۹	۱۷۱۶	۱۶۸۷	۲۰۷۴/۹۳
$\alpha_{\infty}$	حد بالا	۱/۲۸	۱/۱۷۷۷	۱/۲۱۷	۱/۲۵۲۸
	روش SEM	۱/۱۸۳۵	۱/۱۲۶۳	۱/۱۲۶۳	۱/۲۰۲۵
	حد پائین	۱/۱۰۷	۱/۱۱۴۳	۱/۱۲۸	۱/۱۵۸۸
$\Lambda(\mu m)$	حد بالا	۳۰۳/۱۳۹	۲۷۳/۹۸۳	۲۶۹/۰۶	۲۵۵/۸۷
	روش SEM	۱۷۵/۳	۱۷۷/۵۲	۱۷۷/۵۲	۱۲۸/۳۴
	حد پائین	۱۰۲/۶۲۸	۱۱۳/۸۵	۷۱/۵۷۸	۸۶/۸۲
$\Lambda'(\mu m)$	حد بالا	۵۱۶/۳۱	۴۰۲/۷	۴۷۳/۶۶۸	۴۱۷/۲۴۹
	روش SEM	۳۳۶/۱	۳۱۱/۷۰	۳۱۱/۶۹	۲۵۳/۱۹
	حد پائین	۲۲۶/۲۷۶	۲۱۶/۴۳۴	۱۴۴/۲۶۶	۱۸۴/۲۲۸

## ۷. مآخذ

- [1] Sagartzazu, X., L. Hervella-Nieto, and J. M. Pagalday, "Review in sound absorbing materials", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2008, Vol.15, no.3, pp.311-342.
- [2] Cox, Trevor, and Peter d'Antonio, "Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application", Crc Press, 2016.
- [3] Noise barrier, *Wikipedia, the free encyclopedia*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_barrier](https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_barrier).
- [4] Aircraft Insulation Films, n.d. About DUNMORE Aerospace, (Accessed Aug 15 2020) <https://www.dunmore.com/products/aircraft-insulation.html>.
- [5] Allard, Jean, and Noureddine Atalla, "Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e", John Wiley & Sons, 2009.
- [6] Mass acoustics, *Cosa È La Flow Resistivity (Resistenza Al Flusso)*, <https://www.masacoustics.it/cosa-e-la-flow-resistivity-resistenza-al-flusso/>
- [7] Flow resistivity measurement, n.d. (Accessed Aug 15 2020),

<https://www.noe.co.jp/en/business/acoustic-measurement/amc-ms/airresys.html>.

- [8] Atalla, N. and R. Panneton, "Noise Control Materials: Characterization and Modeling", *Asme Ncad Workshop*, 2012. <https://files.asme.org/Divisions/NCAD/33112.pdf>
- [9] Tortosity measurement, n.d. (Accessed Aug 15 2020), <https://www.noe.co.jp/en/business/acoustic-measurement/amc-ms/torvith.html>.
- [10] Johnson, David Linton, Joel Koplik, and Roger Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *Journal of fluid mechanics*, 1987, Vol.176, pp.379-402.
- [11] Pride, Steven R., Frank Dale Morgan, and Anthony F. Gangi, "Drag forces of porous-medium acoustics", *Physical review*, 1993, Vol.B 47, no.9, 4964.
- [12] Products of Mecanum company, n.d. (Accessed Aug 15 2020), <https://www.mecanum.com/produits>
- [13] Qunli, Wu. "Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open-cell foam." *Applied acoustics* 25, no. 3 (1988): 141-148.
- [14] Dauchez, Nicolas, Olivier Doutres, Jean-Michel Génevaux, Guy Lemarquand, and Sylvain Mezil, "Mesure des propriétés mécaniques des matériaux poreux à l'aide d'un transducteur électrodynamique sans fer." 2010.
- [15] Allard, Jean F., Bernard Castagnede, Michel Henry, and Walter Lauriks, "Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air", *Review of scientific instruments*, 1994, Vol.65, no.3, pp.754-755.
- [16] Brown, Niven, Bernard Castagnede, Walter Lauriks, and Manuel Melon, "Experimental study of the dispersion of ultrasonic waves in porous materials", *COMPTES RENDUS-ACADEMIE DES SCIENCES PARIS SERIE 2 MECANIQUE PHYSIQUE CHIMIE ASTRONOMIE FASCICULE*, 1994, Vol.B 319, p.393.
- [17] Brown, Niven, Manuel Melon, Valérie Montebault, Bernard Castagnède, Walter Lauriks, and Philippe Leclaire, "Evaluation of the viscous characteristic length of air-saturated porous materials from the ultrasonic dispersion curve", *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série Iib, Mécanique*, 1996, Vol.322, no.2, pp.122-127.
- [18] Moussatov, Alexei, Christophe Ayrault, and Bernard Castagnède, "Porous material characterization—ultrasonic method for estimation of tortuosity and characteristic length using a barometric chamber", *Ultrasonics*, 2001, Vol.39, no.3, pp.195-202.
- [19] Leclaire, Ph, Luc Kelders, Walter Lauriks, Manuel Melon, Niven Brown, and Bernard Castagnede, "Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air", *Journal of applied physics*, 1996, Vol.80, no.4, pp.2009-2012.
- [20] Doutres, Olivier, Yacoubou Salissou, Nouredine Atalla, and Raymond Panneton, "Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube", *Applied acoustics*, 2010, Vol.71, no.6, pp.506-509.
- [21] Doutres, Olivier, and Nouredine Atalla, "A semi-empirical model to predict the acoustic behaviour of fully and partially reticulated polyurethane foams based on microstructure properties", In *Acoustics 2012*, 2012.
- [22] Doutres, Olivier, Nouredine Atalla, and Kevin Dong, "A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams", *Journal of Applied Physics*, 2013, Vol.113, no.5, pp.054901.
- [23] Baferani, A. Hasani, R. Keshavarz, M. Asadi, and A. R. Ohadi, "Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams", *Advances in Polymer Technology*, 2018, Vol.37, no.1, pp.71-83.

1. Noise
2. Passive Noise Reduction
3. Active Noise Control (ANC)
4. Hybrid Active and Passive Noise Control
5. Helmholtz Resonators
6. Panel Resonators
7. Punched Plate Resonators
8. Anti-Noise
9. Anechoic Chamber
10. Salford University
11. Prandtl number

۱۲ . به طور معمول این مجموعه از خواص در منابع خواص غیرآکوستیکی نامیده می شوند.

13. Bulk Density
14. Tortuosity
15. Branch static method
16. Compoux device
17. Boyle's Law
18. Brunauer, Emmett, and Teller method
19. Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)
20. Sherbrooke University
21. Indirect method
22. Inverse method
23. Tetrakaidecahedra
24. Strut Length
25. Strut Thickness
26. Fully Reticulated
27. Partially Reticulated