

مواد متخلخل جاذب صوت

بخش دوم: مکانیزم‌های جذب صوت و مدل‌سازی

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

در بخش اول این مقاله اهمیت مواد متخلخل در کاهش غیرفعال صدا، انواع مواد متخلخل، کاربردهای متنوع این دسته از مواد، پارامترهای آکوستیکی و غیرآکوستیکی مربوطه و نحوه اندازه‌گیری آنها تشریح شد. در این بخش از مقاله روش‌های آزمایشگاهی مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی مورد استفاده در اندازه‌گیری خواص آکوستیکی ضریب جذب و ضریب افت انتقال صوت ارائه شده است. سپس ضمن ارائه نگاهی فراگیر به مکانیزم‌های جذب صوت در مواد متخلخل، انواع مکانیزم‌های جذب صوت شامل اتلاف‌های ویسکوز، حرارتی و ساختاری، به صورت مبسوط تشریح می‌شود. همچنین مدل‌های متفاوت بیان‌کننده مشخصات آکوستیکی و مکانیکی مواد متخلخل، شامل مدل‌های تجربی، آزمایشگاهی و تحلیلی آورده می‌شود. در پایان به زمینه‌های پژوهشی سال‌های اخیر در موضوعات مواد متخلخل اشاره مختصری شده است.

واژگان کلیدی: ضریب جذب آکوستیکی، ضریب افت انتقال صوت، اتلاف ویسکوز، اتلاف حرارتی، اتلاف ساختاری.

۱. بیان خواص آکوستیکی مهم در مواد جاذب

صوت

۱-۱. ضریب جذب صوت

ضریب جذب^۱، به میزان کارآمدی یک سطح یا ماده در جذب صدا اطلاق می‌شود. ضریب جذب α نسبت انرژی صوتی جذب شده به کل انرژی صوتی تابیده شده به ماده مورد نظر است. این ضریب به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{W_{nr}}{W_{inc}} \quad (1)$$

به‌طوریکه W_{nr} میزان انرژی صوتی است که جذب شده و بازتابیده نمی‌شود و W_{inc} هم معرف میزان توان موج صوتی فرود آمده بر سطح جاذب صوتی است. به‌عنوان مثال اگر جاذبی ۵۵ درصد از انرژی صدای فرود آمده بر سطح جاذب را در فرکانسی جذب نماید، گفته می‌شود ضریب جذب α این ماده در آن فرکانس برابر ۰/۵۵ است. یک جاذب صدای کامل تمام صدای ورودی را جذب نموده و به‌این ترتیب میزان ضریب α آن برابر یک است و بالطبع یک سطح کاملاً منعکس‌کننده نیز دارای ضریب جذب برابر صفر است.

به خصوص ضریب جذب و ضریب افت انتقال صوت با فرکانس تغییر می‌کنند. در مورد میزان ضریب جذب صوت در مواد مختلف در بازه‌های فرکانسی مختلف بحث مفصلی در مراجع [۱، ۲] ارائه شده است.

اندازه‌گیری ضریب جذب صوت براساس استانداردهای بین‌المللی و به کارگیری تجهیزات مشخص برای انواع مواد مختلف امکان‌پذیر است که در ادامه با در نظر گرفتن روش‌های اشاره شده در استانداردهای ISO 10534 – 2 و ASTM E 1050، توضیحاتی ارائه خواهد شد.

۲-۱. اندازه‌گیری ضریب جذب عمودی

اندازه‌گیری ضریب جذب عمودی براساس استانداردهای اشاره شده به دو روش مشخص و به کمک دستگاه امیدانس تیوب امکان‌پذیر است. روش‌ها عبارتند از موج ایستاده^۴ و تابع انتقال^۵ که با عنوان روش دو میکروفون^۶ نیز نامیده می‌شود. امیدانس تیوب^۷ یا لوله‌ی کانت^۸ برای اندازه‌گیری ضریب جذب مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. تیوب معمولاً دارای مقطع دایره‌ای با دیوارهای سخت است.

۱-۲-۱. روش موج ایستاده

روش موج ایستاده، یکی از دو روشی است که از طریق آن می‌توان ضریب جذب ماده را تعیین نمود. نمای طرح‌واره‌ای از مجموعه تجهیزات این روش در شکل ۱ نمایش داده شده است. ساختمان لوله‌ای موج ایستاده از یک بلندگو که در انتهای لوله به صورت جانبی نصب شده و انتهای لوله را در قسمت فرستنده با مواد جاذب پوشانده است تا هیچ‌گونه بازتابی از انتها اتفاق نیفتد. در انتهای دیگر لوله دریچه‌ای وجود دارد که در آنجا نمونه مورد آزمایش را قرار می‌دهند و در پشت آن نیز درپوش سختی می‌گذارند تا بازتاب کامل از طریق داخل لوله اتفاق بیفتد. از تداخل امواج با امواج اصلی، نقاط گره و شکم به وجود می‌آید که با یک میکروفون متحرک جستجو و اندازه‌گیری می‌شود.

براین اساس ضریب جذب صوت بین صفر و یک تعریف می‌شود. به طو کلی سطوحی که دارای ضریب جذب بزرگتر یا مساوی ۰/۵ باشند، سطوح جذب‌کننده و سطوحی که دارای ضریب جذب کوچکتر یا مساوی ۰/۲ باشند، سطوح بازتابنده به شمار می‌آیند.

به منظور راحتی در آنالیزها، ضریب جذب را براساس ترم‌هایی از فاکتور ضریب بازتابش R^2 در حدفاصل جاذب‌ها تعریف نموده، که به طور معمول یک تابعی از زاویه‌ی برخورد موج صوتی، فرکانس، جنس ماده و مشخصات هندسی جاذب صوتی هستند. ضریب جذب صوت به کمک فاکتور ضریب بازتابش به صورت ۲ تعریف می‌شود:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (۲)$$

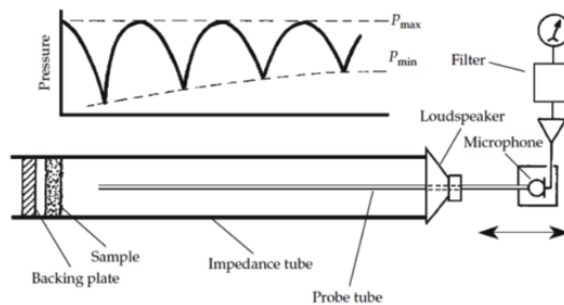
ضریب بازتابش R برابر نسبت میزان انرژی صوتی بازتابیده به کل انرژی فرود آمده بر سطح جاذب صوتی است. ضریب R در بسیاری از منابع برای سطوح مختلف براساس پارامترهای اشاره شده در بالا ارائه شده است. البته این نکته قابل ذکر است که ضریب جذب صوت به زاویه فرود میدان صوت وارد شده بستگی دارد.

در برخی موارد، برای محاسبه ضریب کاهش نوفه^۳ (NRC) هر ماده جاذب، متوسط ضریب جذب آن را در فرکانس‌های مرکزی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز محاسبه می‌گردد که رابطه آن به قرار رابطه ۳ است:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (۳)$$

همان‌طور که عنوان شد، پدیده جذب صوت در جاذب تبدیلی بین انرژی آکوستیکی به حرارت ناشی از اثراتی مانند ویسکوزیته و رسانش حرارتی است. این اثرات با تغییرات سرعت سیال و دما در میدان صوت افزایش می‌یابد. در یک محیط مشخص به دور از مرزها، تغییرات مشخصه‌ها براساس طول موج است و تغییرات به‌طور نسبی براساس فرکانس تغییر می‌کنند. در نتیجه بسیاری از خواص ماده متخلخل

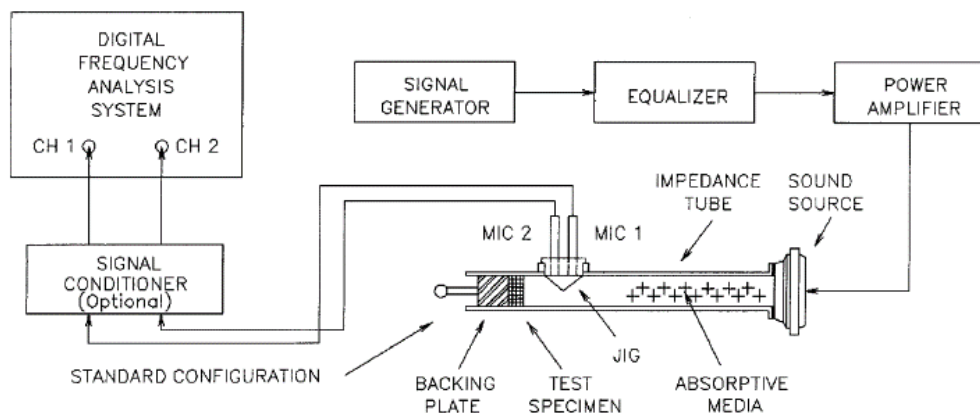
می‌شود. امیدانس می‌تواند به‌طور مستقیم براساس تابعی از فرکانس از طریق اندازه‌گیری با نوفه سفید محاسبه شود. در این روش نیز نمونه در انتهای لوله کانت قرار گرفته و در انتهای دیگر از طریق یک منبع صوتی نوفه سفید تولید می‌شود. سیگنال‌های حاصل شده از دو میکروفون در لوله، که به فاصله‌ی d از هم قرار دارند، ورودی‌های دو کانال پردازشگر هستند. براساس روابط ارائه شده در استانداردهای بین‌المللی ISO 10534-21 [۴] و استاندارد ASTM E1050-10 [۵] می‌توان در بازه فرکانسی که لوله کانت اجازه می‌دهد، مقدار ضریب جذب عمودی نمونه مورد نظر را محاسبه نمود. نمای طرح‌واره‌ای از مجموعه تجهیزات مورد نیاز در روش تابع انتقال در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱. روش موج ایستاده لوله به‌منظور اندازه‌گیری ضریب جذب عمودی مواد در فرود عمودی [۳].

۱-۲-۲. روش تابع انتقال

در حال حاضر به کمک تجهیزات الکترونیکی و با به‌کار بردن یک پردازشگر دو کاناله، روش مشهور به روش دو میکروفونه یا تابع انتقال ارائه شده و در اکثر تجهیزات به روز به‌کار برده



شکل ۲. شکل طرح‌واره دستگاه امیدانس تیوب و تجهیزات مربوطه در روش تابع انتقال [۵].

۱-۳-۱. ضریب افت انتقال^۹

هنگامی که یک موج صوتی به یک سطح برخورد می‌کند، بخشی از انرژی آکوستیکی بازتابیده شده و بخشی از آن وارد جسم می‌شود. میزان ضریب انتقال توان صوتی a_t به‌صورت نسبت توان آکوستیکی منتقل شده از جسم مورد نظر به توان آکوستیکی برخوردی به جسم تعریف می‌شود. به‌طوری‌که داریم:

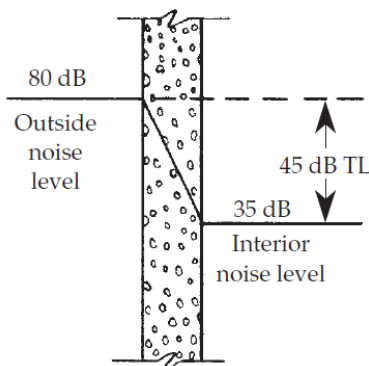
$$a_t = \frac{W_{tr}}{W_{in}} \quad (۴)$$

از بین دو روش ارائه شده در بالا، در سال‌های اخیر روش دوم برای به‌دست آوردن ضریب جذب عمودی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته، چرا که پروسه زمانی برای به‌دست آوردن ضریب جذب در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز با مدت زمان کمی قابل انجام است. در مورد روش دوم استانداردهای بین‌المللی ISO 10534-21 [۴] و استاندارد ASTM E1050-10 [۵] به بررسی تفصیلی روش مذکور پرداخته‌اند.

از طرف دیگر ضریب افت انتقال، می‌تواند به صورت یک اختلافی بین سطح فشار صوتی 10 (SPL) در سمت منبع صوتی به سطح فشار صوت سمت دریافت کننده تعریف شود:

$$TL = SPL_{source\ side} - SPL_{receiver\ side} \quad (7)$$

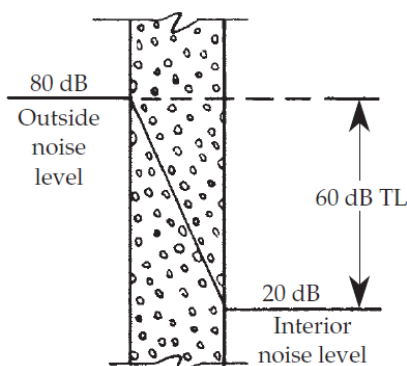
به طور مثال، همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، اگر دیواری دارای ضریب افت انتقال صوت ۴۵ دسی‌بل باشد، دیوار مانع سطح نوفه خارجی به شدت ۸۰ دسی‌بل را کاهش داده و به اندازه ۳۵ دسی‌بل می‌رساند. همچنین یک دیوار با ۶۰ دسی‌بل افت انتقال، همان میزان نوفه را به ۲۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد. در واقع هرچه میزان TL بیشتر باشد، کاهش بیشتری توسط ماده رخ خواهد داد.



در این رابطه W_{tr} بیانگر توان آکوستیکی انتقالی بوده و W_{in} بیانگر توان آکوستیکی وارد شده به نمونه مورد نظر است. از طرفی برای بیان نمودن انرژی آکوستیکی انتقالی یک ماده به ماده دیگر، استفاده از ضریب افت انتقال (TL) است. ضریب افت انتقال عبارت است از میزان کاهش تراز صدای منتقل شده به واسطه عبور از یک ماده و ضریب افت انتقال براساس ضریب انتقال توان صوتی بر واحد دسی‌بل به صورت رابطه ۶ قابل بیان است:

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{in}}{W_{tr}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{a_t} \right) \quad (6)$$

$$\Rightarrow a_t = 10^{-0.1TL}$$



شکل ۳. نمایی از تغییرات سطح فشار صوت که منجر به افت انتقال صوت می‌شود [۳].

میزان ضریب افت انتقال صوت را در گستره فرکانسی وسیعی افزایش داد [۶، ۷].

۱-۴. اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت

در این بخش می‌خواهیم روش‌های اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت را برای نمونه‌های مختلف بیان نماییم. ابتدا نمونه مورد نظر را بین دو محیط ایزوله از نظر آکوستیکی و مکانیکی قرار می‌دهند.

مواد متخلخل مانند فایبرهای شیشه و فومها جزء بهترین جاذب‌های صوتی و عایق‌های حرارتی محسوب می‌شوند. استفاده از این دسته مواد به عنوان کاهش دهنده انتقال صوت زمانی مفید است که از ضخامت بالایی از این مواد استفاده شود. ضریب افت انتقال در این دسته از مواد به طور مستقیم وابسته به ضخامت ماده مورد نظر است [۳]. در ضمن با توجه به تحقیقات به عمل آمده، با به کار بردن ترکیبات کامپوزیتی و چند لایه، به خصوص به کاربردن فاصله هوایی می‌توان

سطح جذب معادل در محیط دوم است. همچنین τ بیانگر ضریب انتقال توان صوتی^{۱۱} است.

البته روش آزمایشگاهی محاسبه میزان ضریب افت انتقال صوت براساس استاندارد ASTM E 2611-09 [۹] است. براساس این استاندارد، با به کار بردن لوله‌های امپدانس در قطرهای ۳ و ۱۰ سانتی‌متر بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز تحت پوشش قرار گرفته و با نصب نمونه در بین لوله‌ها و قرار دادن چهار میکروفون در موقعیت‌های مشخص شده، اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت انجام می‌پذیرد.

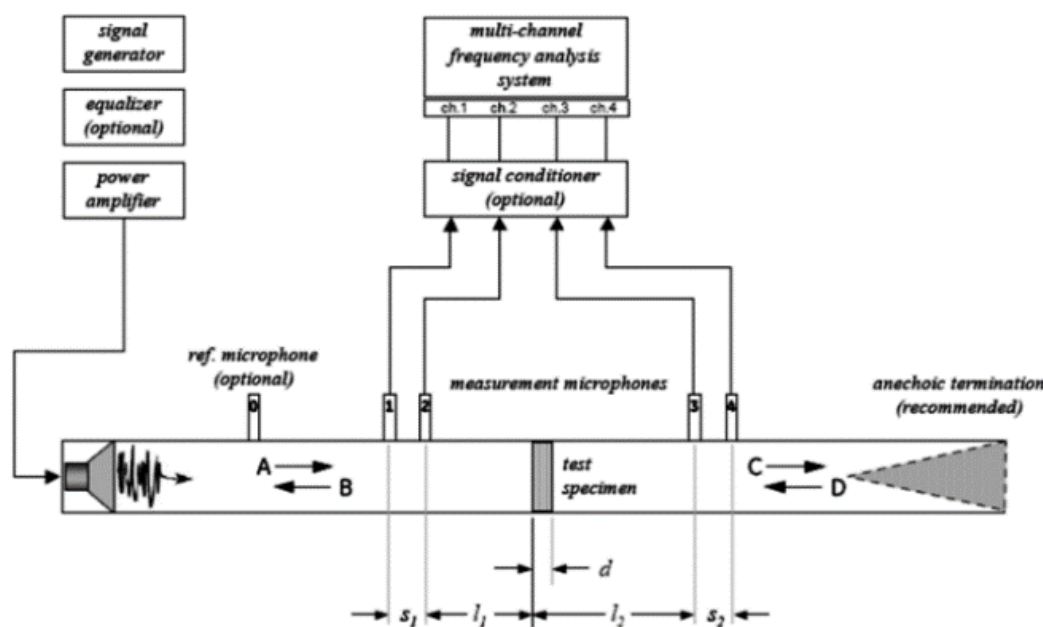
شکل طرح‌واره‌ای از دستگاه اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت در شکل ۴ نمایش داده شده است.

به کمک یک منبع نوفه در یک پهنای فرکانسی مشخص در محیط اول صدا را تولید نموده و فشار صوتی میانگین (یا سطح فشار صوتی) را در هر دو محیط توسط میکروفون‌ها در موقعیت‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شود. به‌طور کلی میزان افت انتقال صوت بین دو محیط براساس رابطه ۸ ارائه می‌شود [۲، ۸]:

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (۸)$$

$$= L_{p2} - L_{p1} + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_2} \right)$$

که L_{p2} بیانگر میانگین سطح فشار صوتی در محیط دوم و L_{p1} بیانگر میانگین فشار صوتی در محیط اول است. S بیانگر مساحت سطح مقطع مابین دو محیط بوده و A_2 بیانگر



شکل ۴. نمایی از مجموعه اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت [۹]

انجام داده می‌شود. براساس اطلاعات به دست آمده و روابط ارائه شده در استاندارد، ضریب افت انتقال برحسب تغییرات فرکانس ارائه خواهد شد. البته این نکته قابل ذکر است که در روش فوق براساس استاندارد بین‌المللی حداقل بایستی این پروسه سه بار تکرار شده تا خطا به حداقل مقدار خود برسد. قابل ذکر است که دستگاه امپدانس تیوب مستقر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی امیرکبیر قادر به

براساس استاندارد، ابتدا نمونه را داخل لوله امپدانس، درحالتی که هیچ‌گونه منفذی در سطح نمونه با دیواره وجود نداشته باشد، قرار داده می‌شود. با تولید نوفه سفید در لوله اول، سیگنال‌ها توسط چهار میکروفون نمونه‌برداری می‌شود و به دستگاه پردازش داده‌ها انتقال داده می‌شود. سپس به منظور مینیمم کردن نوفه سیستم و تجهیزات، یک‌بار دیگر نمونه‌برداری را درحالتی که انتهای لوله‌ی امپدانس باز است،

داده شده با مواد آکوستیکی مانند شکل ۶ برخورد نماید. در مورد انرژی موجود در آن چه اتفاقی می‌افتد؟ به‌عنوان یک موج صوتی که از طریق هوا منتشر می‌شود، برای اولین بار یک مقدار اتلاف حرارت E را خواهد داشت که تنها در فرکانس‌های صوتی بالا ناشی از جذب صوت قابل ملاحظه است. هنگامی که یک موج صدا با یک دیوار برخورد می‌کند، یک جزء منعکس شده A از سطح مواد آکوستیکی به هوا منعکس می‌شود.

این نکته جالب توجه است که برخی از صداها نفوذ کرده در مواد آکوستیکی توسط لایه‌ها تغییر مسیر داده و جهت حرکت صدا به سمت دیگری شکسته می‌شود، زیرا مواد آکوستیکی متراکم‌تر از هوا هستند. گرمای هدر رفته F توسط مقاومت اصطکاکی مواد آکوستیکی به‌وجود آمده که توسط ارتعاش ذرات هوا درون منافذ جسم متخلخل آکوستیکی ایجاد می‌شود.

همان‌طور که موج صوتی با سطح بلوک‌های بتنی برخورد می‌کند، دو پدیده رخ می‌دهد: یک جزء B منعکس شده و درصدی از موج نیز وارد بلوک بتن متراکم‌تر از ماده متخلخل می‌شود. بیشتر گرمای تلف شده G در بلوک‌های بتن از دست می‌رود. از طرفی درصدی از موج در مرز هوا-بتن نیز منعکس شده (موج C) و درصدی از آن از بتن عبور می‌کند (موج D) که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

در ضمن در هر یک از محیط‌ها به‌واسطه وجود اصطکاک درصدی از انرژی آکوستیکی به‌صورت حرارت تلف شده از بین می‌رود.

در نهایت موج صدای S در طول مسیر حرکت خود از طریق برخورد با موانع و بازتاب هر موج و عبور از طریق هوا یا ماده آکوستیکی، از میزان انرژی اولیه آن کاسته می‌شود. در ضمن پدیده شکست، امواج را منحرف نموده اما لزوماً گرمایی را ساطع نمی‌کند و گرما به واسطه اصطکاک و با عوامل میرایی در ماده ایجاد می‌شوند.

اندازه‌گیری ضریب افت انتقال صوت مواد مختلف در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز نیز است که براساس استاندارد اشاره شده در فوق عمل می‌کند. در ضمن نمایی از دستگاه امپدانس تیوب با قابلیت اندازه‌گیری ضریب جذب و ضریب افت انتقال صوت در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز در شکل ۵ نمایش داده شده است.

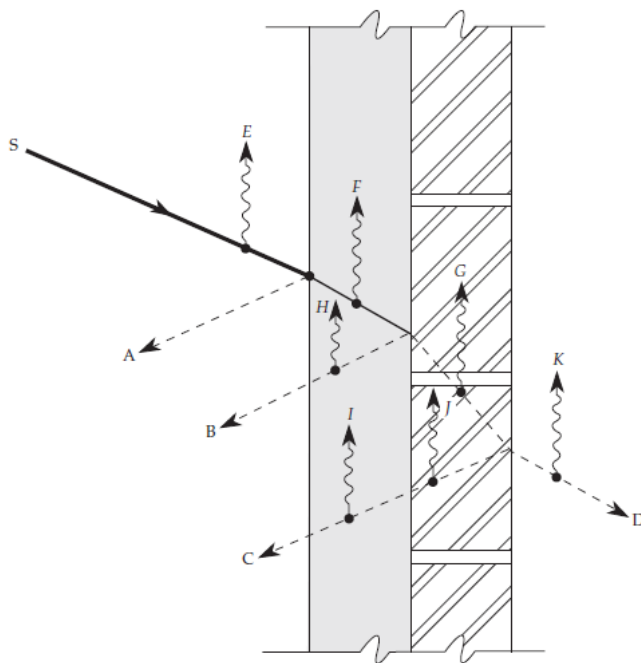


شکل ۵. نمایی از دستگاه امپدانس تیوب مستقر در آزمایشگاه "اندازه‌گیری خواص آکوستیکی مواد" در دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- شرح مختصری از فیزیک جذب صدا در مواد متخلخل جاذب صوت

۲-۱. مقدمه

در حالت کلی یک موج صوتی که به سطحی برخورد می‌کند، سه وضعیت برای آن رخ می‌دهد. بخشی از موج تابیده شده از سطح بازتابیده می‌شود و بقیه آن وارد سطح می‌شود. در مورد درصدی از انرژی آکوستیکی که وارد سطح شده است، درصدی از موج جذب سطح شده و باقیمانده موج صوتی از ماده مورد نظر عبور می‌کند. برای اینکه یک ماده بتواند جاذب صوتی خوبی باشد، بایستی میزان درصد انرژی آکوستیکی جذب شده توسط آن ماده بالا باشد. بدین منظور بررسی مکانیزم جذب درون مواد متخلخل به خودی خود قابل ملاحظه و حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال، یک موج صدای S در هوا حرکت نموده تا با یک دیوار بلوک بتنی پوشش



شکل ۶. موج صدا برخوردی با ماده آکوستیک بر روی دیوار بتنی [۳].

۲-۲. انواع اتلاف انرژی آکوستیکی

در یک دسته‌بندی کلی جذب در مواد متخلخل را براساس دو مکانیزم اتلاف ارتعاشاتی^{۱۲} و جذب آکوستیکی تقسیم‌بندی می‌نمایند. اتلاف ارتعاشاتی زمانی که انرژی آکوستیکی که به صورت مستقیم از تماس بین دو جامد انتقال می‌یابد، رخ می‌دهد. جذب آکوستیکی نیز زمانی که انرژی آکوستیکی از محیط هوا به جامد و بالعکس عبور می‌کند و ناشی از عکس‌العمل دو محیط است، رخ می‌دهد. مورفولوژی یا شکل‌بندی مواد متخلخل یک نکته کلیدی در چگونگی برهم‌کنش بین ماده متخلخل و هوا است. البته این نکته قابل ذکر است که اگر ماده‌ای دارای جذب آکوستیکی بالایی باشد، لزوماً اتلاف ارتعاشاتی بالایی را دارا نیست.

براساس دسته‌بندی دیگری جذب صدا در مواد متخلخل به صورت عوامل اتلافی شامل اثر ویسکوزیته، اثر هدایت حرارتی و میرایی سازه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود. به منظور درک هرچه بیشتر عوامل اشاره شده، شرح مختصری از نحوه حرکت مولکول‌های هوا و اثر موج صوتی بر آنها در ادامه

اشاره شده و سپس به شرح هر یک از موارد فوق خواهیم پرداخت.

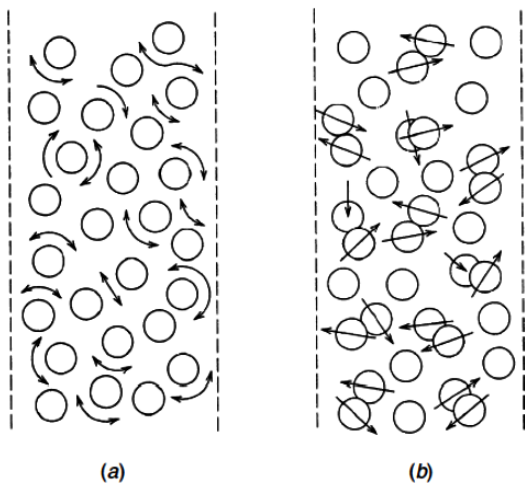
با توجه به نکات اشاره شده، پدیده اتلاف انرژی آکوستیکی در مواد غیرمتخلخل تنها از طریق میرایی سازه‌ای امکان‌پذیر بوده و پارامترهایی مانند اتلاف حرارتی و ویسکوز که وابسته به ساختار ماده متخلخل هستند، دیگر قابل استفاده نیستند. شاید به واسطه همین موضوع باشد که مواد غیرمتخلخل بیشتر به عنوان مواد با خاصیت ممانعت آکوستیکی خوب محسوب می‌شوند تا اینکه مواد با خاصیت جذب آکوستیکی بالا باشند.

۲-۳. پدیده‌شناسی انتقال موج صوتی از طریق

مولکول‌های هوا

همان‌گونه که می‌دانیم صدا از جمله امواج مکانیکی بوده که از طریق مولکول‌های هوا و در اثر برخورد این مولکول‌ها با یکدیگر و در اثر اختلاف فشار ایجاد شده حول فشار هوا انتقال داده می‌شوند. یک موج فشاری محدوده‌ای از تغییرات فشار حول فشار محیط است. برای یک موج خالص، این

بازتابش شده و باقیمانده آن به محیط جدید انتقال داده می‌شود. موج انتقال داده شده به محیط جدید به دو جزء تقسیم شده و برخی از آن جذب محیط شده و باقیمانده آن از محیط انتقال داده می‌شود. براساس مطالب عنوان شده در منابع آکوستیکی، میزان انرژی انتقال داده شده به محیط دیگر وابسته به کمیت ρc بوده که مقاومت مشخصه آن محیط نامیده می‌شود. پارامتر ρ بیانگر چگالی محیط و پارامتر c بیانگر سرعت صوت در آن محیط است. این پارامتر بخش حقیقی امپدانس مشخصه محیط Z ، است. هر چه اختلاف مقاومت مشخصه دو محیط بیشتر باشد، مقدار انرژی بیشتری بازتابش شده و درصد ناچیزی از آن به درون محیط انتقال داده می‌شود. شکل ۷ دو مکانیزم اتلافی ویسکوز و حرارتی مولکول‌های هوا را ناشی از برخورد موج صوتی نمایش می‌دهد.



شکل ۷. مکانیزم اتلافی مولکول‌های هوا ناشی از برخورد موج صوتی (a) اتلاف ویسکوز (b) اصطکاک مکانیکی ایجاد شده بین مولکول‌های هوا (اتلاف حرارتی) [۱۰]

همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، انرژی آکوستیکی در مولکول‌های هوا از طریق دو مکانیزم قابل تبدیل به حرارت هستند. تنش‌های ویسکوزی از طریق برخورد برشی سیال با یکدیگر ایجاد شده که سبب تبدیل شدن انرژی جنبشی به حرارت می‌شوند. این حرارت می‌تواند از طریق

امواج فشاری براساس فرکانس و شدت فشار قابل بیان هستند. موج‌های فشاری با سرعت صوت توسط مولکول‌های هوا انتقال داده می‌شوند که این سرعت وابسته به فرکانس و طول موج آن بوده و براساس رابطه $c = \lambda f$ بیان می‌شود. به طوری که c بیانگر سرعت صوت در هوا بوده و λ بیانگر طول موج در واحد متر و f بیانگر فرکانس در واحد هرتز است.

سرعت صوت در هوا در شرایط استاندارد برابر با 331.5 m/s است. در این شرایط یک موج آکوستیکی با فرکانس 1 kHz دارای طول موجی برابر با 0.3315 m است. از مقایسه طول موج آکوستیکی اشاره شده با طول مشخصی که مولکول‌های هوا به صورت آزادانه می‌توانند حرکت کنند تا با مولکول‌های دیگر برخورد نمایند که این مقدار برابر با $0.066 \mu\text{m}$ است، می‌توان دریافت که مولکول‌های هوا فاصله فوق‌العاده ناچیزی را طی می‌کنند تا به مولکول‌های دیگر برخورد نمایند. این برخوردها نه تنها محدودیت‌هایی در حرکت مولکول‌های هوا ایجاد می‌کند، بلکه انرژی را انتقال داده و موج‌های فشاری در هوا تا مسافت‌های زیادی بدون جابه‌جایی خیلی زیاد مولکول‌ها انتقال داده می‌شوند. بنابراین امواج صدا در راستایی مشابه با راستای برخورد بین مولکول‌های هوا انتقال داده شده که به این امواج، امواج طولی گفته می‌شود.

با توجه به شرحی که در مورد انتقال امواج صوتی توسط مولکول‌های هوا شرح داده شد، عوامل هدر رفتن انرژی صوتی و جذب آن قابل فهم‌تر است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در مورد مولکول‌های هوا دو عامل ویسکوزیته و اصطکاک بین مولکول‌ها از جمله عواملی هستند که سبب افت توان صوتی می‌شوند. به‌طور کلی یک موج صوتی مجموعه‌ای از موج‌های مستقل با فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف است که به کمک بسط فوریه قابل بیان هستند. حال زمانی که این موج صوتی با سطح عمود راستای انتشار محیط دیگری برخورد می‌کند، جزئی از آن در حدفاصل دو محیط

۲-۵. اتلاف حرارتی

هنگامی که یک موج فشاری منتشر می‌شود نواحی فشرده شده دمای بیشتری را نسبت به نواحی منبسط دارند. به دلیل اختلاف دمای ایجاد شده، هدایت حرارتی صورت می‌گیرد که سبب اتلاف انرژی می‌گردد. به‌طور کلی در منافذ بزرگ‌تر و در فرکانس‌های پایین انتقال حرارت بخش مهمی از اتلاف انرژی را خواهد داشت. در راستای عبور یک موج صوتی، هوا درون منافذ ماده متخلخل به‌صورت متناوبی فشرده و غیرفشرده شده، که همراه با تغییرات دمایی است.

در صورتی که بخش جامد به‌صورت نسبی دارای انتقال حرارت بالایی باشد، سپس نسبت سطح به حجم بالا بیانگر این است که در طول هر نیم سیکل از ارتعاش یک تبادل حرارتی رخ داده و فشرده‌گی‌ها اساساً به‌صورت هم‌دما است. از طرفی در فرکانس‌های بالا پروسه فشرده‌گی به‌صورت آدیاباتیک یا بی‌دررو است. در ناحیه فرکانسی بین فشرده‌گی هم‌دما و آدیاباتیک، نتیجه پروسه تبادل حرارت بیشترین میزان اتلاف انرژی آکوستیکی را دارا است [۱۰].

۲-۶. اتلاف ساختاری

از سوی دیگر بخشی از میرایی ناشی از سازه بوده که در اثر برخورد امواج آکوستیکی با ساختار جامد ارتعاشاتی در راستای منافذ نامنظم در ماده جامد ایجاد می‌شود که نتیجه آن کاهش مومنوم در راستای انتشار موج است. این مکانیزم مخصوصاً در فرکانس‌های بالا قابل ملاحظه است. این سه مکانیزم سبب گردیده که توان این مواد در جذب صوت به خصوص در فرکانس‌های بالا قابل توجه باشد.

سیال به ساختار جامد انتقال داده شود. مکانیزم دوم ناشی از اصطکاک بین مولکول‌های هوا در حدفاصل لایه مرزی آکوستیکی در مجاورت دیواره جامد الاستیک، سبب تولید حرارتی شده که قابل انتقال از جامد به سیال هستند که در شکل ۷b دیده می‌شود. ضربات امواج آکوستیکی به ساختار جامد در اثر ارتعاش ساختار جامد نیز می‌تواند عامل اتلاف انرژی باشد. برای مواد متخلخل سرعت جریان آکوستیکی درون ماده پایین بوده و جریان به صورت آرام باقی می‌ماند. نیروهای ایجاد شده در لایه آکوستیکی ناشی از اصطکاک بین دو سطح نیز متناسب با سرعت ذرات است. در سرعت‌های خیلی بالا که معمولاً درون رزوناتورها اتفاق می‌افتد، جدایی جریان رخ داده و جریان توبولانت ایجاد می‌شود و نیروهای اصطکاک متناسب با مجذور سرعت هستند.

۲-۴. اتلاف ویسکوز

هنگامی که لایه سیال در مجاورت سطح سازه حرکت می‌کند، ویسکوزیته نیروی عکس‌العملی را بین این دو لایه به‌وجود می‌آورد که این نیرو در جهت خلاف جابه‌جایی بوده و سعی در میرا کردن موج ایجاد شده دارد. یکی از فاکتورهای مهم در محاسبه اتلاف‌های اصطکاکی، اندازه منافذ ماده متخلخل نسبت به ضخامت لایه مرزی ویسکوز است. در فرکانس‌های پایین ضخامت لایه مرزی ویسکوز در مقایسه با پهنای منافذ قابل توجه بوده که در نتیجه اتلاف ویسکوز بالا است. به‌عبارتی هرچه سلول‌ها ریزتر شوند، ضخامت لایه مرزی ویسکوز در مقایسه با قطر منافذ مؤثرتر شده و در نتیجه اتلاف ویسکوز در فرکانس‌های پایین را افزایش می‌دهد. در فرکانس‌های بالا ضخامت لایه مرزی ویسکوز در مقایسه با اندازه سلول‌ها ناچیز بوده و اتلاف ویسکوز خیلی کم است.

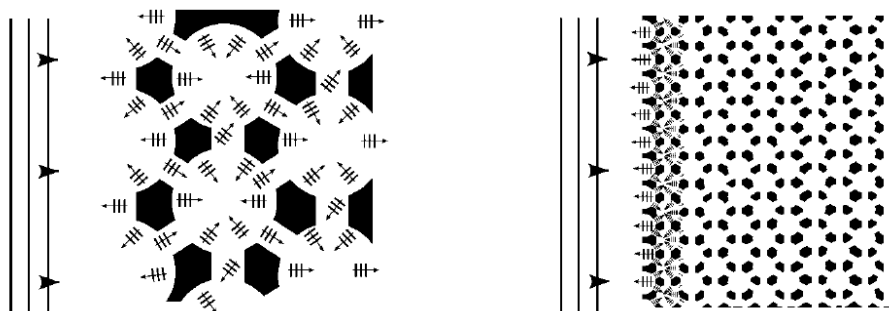
۷-۲. اتلاف انرژی آکوستیکی در مواد متخلخل

براساس اتلاف‌های عنوان شده در بخش قبلی، بررسی عوامل اتلاف انرژی در مواد متخلخل از جمله مباحثی است که مورد توجه قرار خواهد گرفت. با در نظر گرفتن نحوه عملکرد مواد متخلخل در ازای ورود موج صوتی، ملاحظه می‌شود که برای داشتن میزان جذب صوت بالا، بایستی شرایطی برقرار شود تا حداکثر موج صوتی وارد ماده متخلخل شده، سپس قبل از خروج از ماده بیشترین شکست و پراکندگی در آن رخ دهد تا حداکثر میزان اتلاف را در ماده متخلخل داشته باشد. ابتدا مکانیزم اتلاف در مواد متخلخل بررسی شده و سپس عوامل مؤثر در تقویت این مکانیزم‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

به‌طور کلی زمانی که یک موج صوتی به ماده متخلخل برخورد می‌کند، مولکول‌های هوا در سطح ماده و متناسباً ماده متخلخل تحریک شده و شروع به ارتعاش می‌کنند و در این پروسه مقداری انرژی از دست می‌دهد. این عوامل سبب تبدیل شدن انرژی از آکوستیکی به گرمایی می‌شود که ناشی از اتلاف‌های ویسکوز و حرارتی مولکول‌های هوا در دیواره‌ها و درون فضاهای خالی ماده متخلخل و همچنین ناشی از ارتعاشات بدنه الاستیک ماده متخلخل است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در مورد اتلاف‌های ویسکوز و حرارتی مولکول‌های هوا در فرکانس‌های پایین (ناحیه فرکانسی زیر ۱۰۰۰ هرتز) این تغییرات به‌صورت ایزوترمال بوده و در فرکانس‌های بالا (ناحیه فرکانسی بالای ۱۰۰۰ هرتز) به‌صورت آدیاباتیک یا بی‌دررو رخ می‌دهد.

زمانی که انرژی آکوستیکی به یک سطح برخورد می‌کند، در صورتی که ماده جامد غیرمتخلخل باشد، بخش عمده‌ای از انرژی آکوستیکی برخوردی به داخل محیط بازتابیده می‌شود و از بین می‌رود. حال در صورت متخلخل بودن ماده جامد بخش قابل توجهی از موج فشاری، قبل از برخورد با سطح جامد، به درون ماده متخلخل انتقال داده می‌شود. طبیعتاً پس از ورود امواج فشاری درون ماده متخلخل، بازتابش‌هایی در اثر برخورد موج آکوستیکی با سطح جامد رخ خواهد داد که البته شانس برخورد دوباره این امواج با سطح ماده متخلخل، قبل از بازگشت مجدد به محیط، زیاد است. درصد بالایی از بازتابش‌های داخلی دوباره به سطح ماده متخلخل برخورد نموده که اتلاف‌های اصطکاکی سبب جذب مؤثر انرژی صوتی می‌شود. این پراکندگی امواج آکوستیکی در افزایش کارایی مواد جاذب آکوستیکی بسیار مؤثر است.

به‌منظور دستیابی به برهم‌کنش‌های بالا، موج فشاری می‌بایست به اندازه کافی درون ماده متخلخل نفوذ کند به‌طوری که امکان بازگشت موج درون محیط به‌راحتی فراهم نشود. بالطبع هرچه اندازه سلول‌ها کاهش یابد، انرژی کمتری به ساختار جامد انتقال داده شده و درصد بیشتری از آن از طریق سطح بازتابیده می‌شود که این پدیده کاربرد مواد متخلخل را به عنوان جاذب آکوستیکی کاهش می‌دهد. شکل ۸ نمایی از برهم‌کنش‌های عنوان شده در این بخش در ماده متخلخل و اثر کاهش اندازه سلول‌ها در کاهش انرژی جذب شده درون ماده متخلخل را نمایش می‌دهد.



شکل ۸. نمایی از اثر کاهش اندازه سلول‌ها در کاهش انرژی جذب شده درون ماده متخلخل [۱۰]

براساس مطالب عنوان شده ملاحظه می شود که عدد نودسن پارامتری است که می توان عملکرد سیال در برخورد امواج آکوستیکی را مورد ارزیابی قرار داد که براساس اعداد ارائه شده برای برخی از مواد متخلخل ملاحظه می شود که جریان ویسکوز، جریان غالب درون این مواد بوده و نفوذ امواج آکوستیکی درون این مواد رخ خواهد داد. در مورد فاز جامد در مواد متخلخل که وابسته مشخصات مکانیکی این دسته از مواد است در ادامه مورد توجه قرار خواهد گرفت.

مواد زمانی صلب فرض می شوند که جابه جایی فاز جامد آنها در مقایسه با جابه جایی فاز سیال فوق العاده ناچیز باشد. این امر زمانی امکان پذیر است که چگالی یا سفتی فاز جامد فوق العاده بالا باشد و نیازمند کسر بالایی از انرژی به منظور حرکت فاز جامد باشد. همچنین زمانی که برهم کنش فاز جامد و سیال ناچیز باشد، انرژی ناچیزی بین آنها جابه جا می شود. در مواد متخلخل ساختار جامد به صورت متخلخل و الاستیک فرض شده و سیال به صورت ویسکوز در نظر گرفته می شود. درون مواد متخلخل ساختار جامد انرژی آکوستیکی را انتقال داده و ماده متخلخل قابلیت تحمل موج برشی و دو موج فشاری [۱۱] را دارا است.

۳. بررسی پارامترهای کنترل میزان جذب در مواد متخلخل

به منظور کنترل میزان جذب درون مواد متخلخل، عوامل مختلف ساختاری مانند ریزترکردن منافذ، افزایش چگالی ماده، افزایش ضخامت ماده و ... پیشنهاد شده است. با تغییرات ساختاری می توان فرکانس های پایین تر را نیز تحت تأثیر قرار داده و جذب صوت در این فرکانس ها را افزایش داد. البته بایستی در نظر داشت که هر یک از این عوامل با محدودیت روبه رو است. به عنوان مثال در مورد ضخامت ماده متخلخل معمولاً محدودیت وجود دارد، به طوری که یکی از چالش های پیش رو در طراحی جاذب های صوتی مینیمم کردن ضخامت است و بایستی تغییرات به نحوی لحاظ شود

اشاره به این نکته ضروری است که همه مواد متخلخل با درصد تخلخل بالا لزوماً مواد جاذب آکوستیکی خوبی نیستند. اگر طول آزاد متوسط جابه جایی مولکول های هوا در مرتبه فاصله میانگین بین دیواره های سلول ها باشد، امواج فشاری نمی توانند به صورت مؤثری درون ماده متخلخل نفوذ کنند. در این حالت اگر ماده دارای ساختار سلول باز باشد، شبیه به ساختار سلول بسته عمل می نماید. مواد با درصد تخلخل فوق العاده بالا اما با قطرهای حدود ۲ تا ۲۰ نانومتر، شبیه به طول آزاد میانگین هوا^{۱۳} خواهد بود.

چگونگی رفتار سیال درون ماده متخلخل به صورت مستقیم وابسته به اندازه سلول های آن است و بدین واسطه می توان پارامترهایی را به منظور تشخیص میزان نفوذپذیری امواج فشاری درون ماده متخلخل تعریف نمود. عدد نودسن^{۱۴}، K_n ، پارامتری است که به کمک آن می توان نحوه عملکرد سیال درون ماده متخلخل را تشخیص داد. عوامل غالب در توزیع جریان سیال درون ماده متخلخل براساس عدد نودسن به صورت زیر دسته بندی می شود [۱۰]:

اگر $1 \ll K_n$ باشد جریان ویسکوز غالب است.

اگر $1 \approx K_n$ باشد، هر دو جریان ویسکوز و مولکولی دارای اهمیت هستند.

اگر $1 \gg K_n$ باشد، جریان مولکولی غالب است.

حال زمانی که جریان ویسکوز جریان غالب است، امواج فشاری قادر به نفوذ درون ماده متخلخل بوده و بازتابش های داخلی درون ماده سبب افزایش جذب امواج آکوستیکی می شود. همچنین در صورتی که جریان مولکولی جریان غالب باشد، امواج فشاری به راحتی نمی توانند درون ماده متخلخل نفوذ کنند و درصد زیادی از امواج برخوردی بازتابش می شود. این عدد برای مواد متخلخل مختلف قابل محاسبه بوده که به طور مثال برای فوم های پلیمری برابر با $K_n = 7 \times 10^{-5}$ بوده و برای فوم فلزی برابر با $K_n = 4 \times 10^{-4}$ است.

مشخصات آکوستیکی فوم‌ها محاسبه می‌شود، حجم سلول‌های بسته می‌بایست در حجم کلی محاسبه نشوند، چراکه اجازه ورود هوا به داخل منافذ داده نمی‌شود.

در مجموع برای داشتن یک جاذب آکوستیکی با کارایی بالا می‌بایست قابلیت انتقال انرژی را در حد بالایی داشته باشد و یک محدوده قابل قبولی از تخلخل را دارا بوده تا امواج صدا بتوانند به راحتی تا عمق مناسبی از ساختار جامد را نفوذ کنند و برهم‌کنش‌های اشاره شده به راحتی سبب اتلاف بالای صوت شود. اگر منافذ ماده متخلخل خیلی درشت باشد، امواج آکوستیکی به راحتی از بین منافذ عبور نموده و کمترین میزان برهم‌کنش بین سیال و جامد رخ خواهد داد. از طرفی اگر منافذ ماده متخلخل فوق‌العاده ریز باشد، درصد بالایی از انرژی از ناحیه مجاور سطح بدون نفوذ درون ماده، دوباره به محیط باز خواهد گشت که طبیعتاً برهم‌کنش‌های لازم بین سیال و جامد صورت نگرفته و جذب امواج آکوستیکی رخ نخواهد داد. از طرفی مواد متخلخل نیازمند یک ضخامت حداقلی در حدود یک دهم طول موج به منظور داشتن جذب مؤثر و ضخامتی در حدود یک چهارم طول موج به منظور جذب حداکثری صدا است. بالطبع جذب بالا در فرکانس‌های پایین به صورت معمول در ضخامت‌های بالا حاصل می‌شود. همان‌گونه که در بیان مشخصات آکوستیکی مواد متخلخل عنوان شد، مقاومت جریانی ماده متخلخل از جمله عوامل مؤثر بر خواص آکوستیکی این دسته از مواد است. مقادیر اسمی مقاومت جریانی برای مواد متخلخل فایبری از 4×10^3 تا $4 \times 10^4 \text{ rayls/s}$ برای چگالی‌های بین 16 تا 160 kg/m^3 تغییر می‌کند. درحالت کلی اگر مقاومت جریانی یک ماده فوق‌العاده بالا باشد، بسیاری از امواج برخوردی با ماده متخلخل بازتابیده شده و نمی‌توانند وارد ماده متخلخل شوند. از طرفی اگر مقدار مقاومت جریانی فوق‌العاده پایین باشد، در نتیجه مواد اتلاف ویسکوز فوق‌العاده پایینی را به واسطه عبور جریان صوت دارا بوده که طبیعتاً جذب پایینی را دارا خواهد بود.

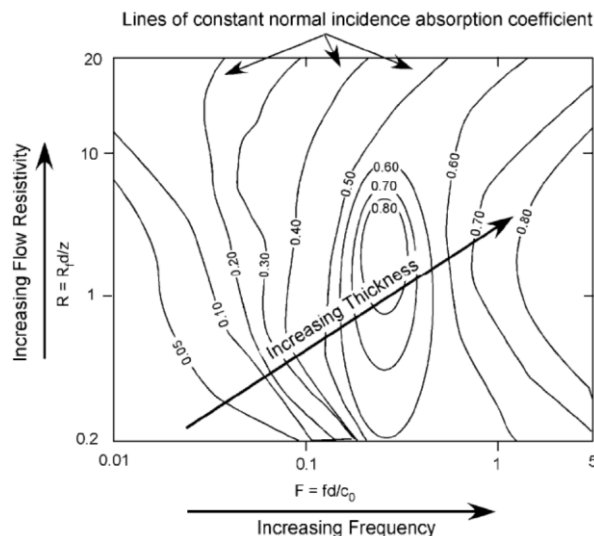
که با ضخامت کمتر جذب بیشتری را در فرکانس‌های پایین حاصل شود. مواد با چگالی پایین‌تر درصد کمی از انرژی آکوستیکی را بازتابش می‌کنند، همچنین مواد با سرعت‌های صوت کمتر نیز بدین صورت عمل می‌کنند. از طرفی یک جامد با چگالی خیلی بیشتر نسبت به محیط گاز برخلاف سرعت صوت بالایی ماده جامد، قابلیت ممانعت از ورود موج صوتی از هوا به ماده جامد را می‌تواند به صورت چشمگیری کاهش دهد [۱۰].

قابلیت آکوستیکی مواد متخلخل براساس تعادلی بین پارامترهایی مانند چگالی ماده، سرعت صوت درون ماده و میزان تخلخل آن قابل کنترل است. سرعت صوت درون ماده متخلخل وابسته به ضریب الاستیسیته آن و مورفولوژی یا شکل‌بندی ماده متخلخل است. مکانیزم‌های اتلافی انرژی در ساختار جامد و اتلاف‌های ویسکوز و اصطکاکی بین مولکول‌های هوا در منافذ و اتصال‌های جامد، انرژی آکوستیکی را به حرارت تبدیل خواهد نمود. هر یک از مشخصه‌های ساختار جامد که انتقال انرژی از هوا به ساختار جامد را تسهیل نموده و یا اتلاف انرژی درون ساختار جامد را افزایش دهد، کارایی ماده متخلخل به عنوان جاذب آکوستیکی را افزایش می‌دهد. افزایش چگالی ماده متخلخل می‌بایست متعادل با کاهش در سرعت صوت بوده یا افزایش تخلخل نیز اثر مشابهی را خواهد داشت. جذب مؤثر صدا از طریق هوا وابسته به میزان باز بودن سلول‌ها است، به طوری که مولکول‌های هوا به راحتی بتوانند به سطح جامد برخورد نمایند.

فوم‌ها نمونه‌ای از مواد متخلخل‌اند که به عنوان جاذب آکوستیکی به صورت گسترده به کار برده می‌شوند. فوم‌ها دارای ساختار جامدی بوده که توسط منافذ هوا در سراسر حجم آن پر شده است. میزان تخلخل فوم‌های سلول باز به صورت معمول در حدود $0/95$ تا $0/98$ است. از طرفی چگالی فوم‌ها وابسته به میزان تخلخل، چگالی اسکلت‌بندی ساختار جامد و چگالی گاز درون منافذ است. زمانی که

اگرچه جذب رابطه متناسبی با ضخامت را دارا است، در حالت کلی برای یک مقدار مقاومت جریانی مشخص، σ ، ضخامت بهینه به صورت تقریبی براساس رابطه $t = \frac{100}{\sqrt{\sigma}}$ ارائه شده است. از طرف دیگر مقادیر بهینه پارامترهای ضخامت و مقاومت جریانی برای کاربردهای خاص را می-توان با در نظر گرفتن نمودارهای ارائه شده در مرجع [۱] به دست آورد.

به منظور نمایش اهمیت این پارامتر شکل ۹ نمایش داده شده که بیانگر تغییرات ضریب جذب ماده همراه با تغییرات ضخامت و فرکانس است. همان گونه که در شکل ۹ ملاحظه می شود، افزایش در مقاومت جریانی، افزایش جذب را به همراه داشته و از طرفی افزایش ضخامت ماده نیز سبب تغییر نمودار به سمت بالا و راست می شود.



شکل ۹. تغییرات ضریب جذب با تغییرات فرکانس و مقاومت جریانی [۱۰]

در نظر گرفته می شد. این مدل ها علی رغم سادگی دقت مناسبی نداشتند به همین دلیل تلاش هایی در جهت بهبود مدل سازی انجام گرفت. پس از استفاده از این مدل های ابتدایی، کلاً دو دسته از مدل سازی برای این مواد انجام شد که می توان این مدل ها را به دو دسته مدل های تجربی و مدل های بر مبنای میکرو ساختار تقسیم نمود. از سوی دیگر مدل ها بر مبنای میکرو ساختار خود شامل سه مدل بایوت، سازه صلب و سازه انعطاف پذیر هستند. در این بخش این مدل ها به اختصار مورد بررسی قرار داده می شوند.

۴-۱. مدل های تجربی

مبنای استخراج مدل های تجربی اندازه گیری نمونه های فراوان مواد متخلخل و استخراج یک رابطه تجربی برای این

در نهایت با در نظر گرفتن مکانیزم جذب در مواد متخلخل بایستی طراح به نحوی عمل نماید که در ابتدا بیشترین میزان انرژی وارد ماده متخلخل شود و درصد ناچیزی از آن بازتابش نماید. از طرف دیگر از امواج آکوستیکی وارد شده در ماده متخلخل می بایست قبل از خروج از ماده بیشترین شکست و پراکندگی در امواج رخ دهد که سبب افزایش اتلاف در ماده متخلخل شود.

۴. بیان مدل های مختلف مدل سازی مواد متخلخل

در ابتدا برای بررسی انتشار موج در مواد متخلخل از مدل های ابتدایی استفاده می گردید. به عنوان مثال ماده به صورت مجموعه ای از جرم و فنرها در نظر گرفته می شد و یا لایه متخلخل به صورت ماده ای با سوراخ های استوانه ای یکسان

ماده متخلخل را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین اگر شرایط مرزی ماده متخلخل به گونه‌ای باشد که مد صلب داشته باشد، استفاده از این مدل باعث ایجاد خطا می‌گردد.

۳-۴. مدل سازه نرم

هنگامی که سازه ماده متخلخل نرم در نظر گرفته شود، سازه در مقابل تحریک خارجی مقاومت نمی‌کند و تنش در آن به وجود نمی‌آید. تحت این شرایط اگر تنش در معادلات بایوت برابر صفر قرار داده شود رابطه‌ای بین گرادیان فشار و جابه‌جایی فاز جامد حاصل می‌گردد. با حذف جابه‌جایی فاز جامد در دسته دوم معادلات مربوط به سازه نرم حاصل می‌گردد که مجدداً یک معادله هلمهولتز است. مدل سازه نرم در مورد برخی از مواد متخلخل مورد استفاده در صنایع هوا فضا که چگالی پایینی دارند نتایج خوبی را می‌دهد.

با استفاده از دو مدل سازه صلب و سازه نرم، باز می‌توان یک لایه سیال معادل با ماده متخلخل ایجاد نمود که رفتاری مشابه ماده متخلخل داشته باشد. به همین دلیل به مجموعه مدل‌های تجربی، مدل سازه نرم و مدل سازه صلب که قابلیت ایجاد یک لایه سیال معادل با ماده متخلخل را دارند مدل سیال معادل گفته می‌شود.

۴-۴. مدل بایوت ۲۰

در کنار مدل‌های تجربی مدل‌های میکرو ساختاری نیز توسعه داده شدند که این مدل‌ها بر پایه این فرض استوار بودند که علی‌رغم پیچیدگی در توزیع سلول‌ها که ساختار میکروسکوپییک ماده محسوب می‌شوند، در مقایسه ماکروسکوپییک می‌توان ماده متخلخل را همگن فرض نمود. براساس این فرض بایوت در سال ۱۹۵۵ در دو مقاله [۱۱، ۱۳] معادلات انتشار موج را در یک جامد الاستیک متخلخل شامل یک سیال ویسکوز تراکم‌پذیر استخراج نمود. کار بایوت مربوط به حوزه ژئوفیزیک بوده و تأکید او بر روی

مواد بود. در ابتدا دلانی و بیزلی^{۱۵} با اندازه‌گیری عدد موج و امپدانس مشخصه، در محدوده وسیع فرکانسی برای بسیاری از مواد فایبری با تخلخل نزدیک به یک، دو رابطه تجربی را ارائه نمودند [۱۲]. با استفاده از این روابط یک لایه ماده متخلخل فیبری به صورت یک لایه سیال در نظر گرفته می‌شد و به کمک آن رفتار جذبی ماده چند لایه در حالت برخورد موج صفحه‌ای بررسی می‌گردید. پس از آن میکی این مدل را توسعه داده و آن را به سایر مواد متخلخل نیز تعمیم داد. برخی از نرم‌افزارهای المان محدود نظیر آباکوس^{۱۶} از این مدل‌ها برای شبیه سازی رفتار آکوستیکی مواد متخلخل استفاده می‌نمایند.

۲-۴. مدل سازه صلب

با توجه به پیچیدگی معادلات بایوت سعی شده است مدل‌های ساده‌تری برای مواد متخلخل توسعه داده شود. دو مدل مطرح که به عنوان حدهای معادلات بایوت مطرح هستند یکی مدل سازه صلب^{۱۷} و دیگری مدل سازه نرم^{۱۸} است. در این بخش و بخش بعد به توضیح این مدل‌ها پرداخته شده است. هنگامی که سازه ماده متخلخل صلب فرض گردد، سازه هیچ‌گونه جابه‌جایی یا تغییر شکلی نخواهد داشت. اگر ماده متخلخل با ابعاد محدود به دیوار صلب متصل شده باشد، یا سازه ماده خیلی سنگین بوده و یا زمانی که کوپلینگ سازه سیال برای یک سازه الاستیک قابل صرف نظر است، می‌توان مدل سازه صلب را استفاده نمود. اگر فرکانس موج صوتی برخوردی به ماده بیشتر از فرکانس جدایش^{۱۹} باشد اثرات کوپلینگ سازه سیال قابل صرف نظر خواهد بود و موج صوتی منتشر شده در فاز سیال نیروی کافی را به سازه وارد نمی‌کند تا به نوسان درآید. درحالتی که سازه صلب فرض گردد، تنها امواج فشاری در داخل ماده متخلخل منتشر می‌شوند و تحت این شرایط تنها معادله دوم از معادلات بایوت فشاری باقیمانده و به یک معادله هلمهولتز تبدیل می‌گردد. شایان ذکر است این مدل، مدهای صلب

به طوری که $\hat{\sigma}^S$ بیانگر بردار تنش فاز جامد بوده و پارامتر $\tilde{\rho}$ بیانگر چگالی مؤثر بوده و p بیانگر میزان فشار، ω بیانگر فرکانس و پارامتر u^S بیانگر پارامتر جابه‌جایی فاز جامد است. پارامتر $\tilde{\gamma} = h \left(\frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} - \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right)$ را شامل می‌شود. $\tilde{\rho}_{eq}$ شامل چگالی معادل و \tilde{K}_{eq} بیانگر مدول بالک معادل است. ویژگی اساسی این معادلات نسبت به نمایش‌های دیگر معادلات بایوت این است که چهار متغیر به جای شش متغیر دارند.

دازل^{۳۳} و همکاران در سال ۲۰۰۷ نیز نمایش متفاوتی از معادلات انتشار موج در مواد متخلخل را معرفی نمود [۱۶]. دازل و همکارانش با استفاده از جابه‌جایی فاز جامد و با در نظر گرفتن یک مختصات تعمیم یافته جدید که اصطلاحاً جابه‌جایی کلی^{۳۴} نامیده می‌شود و بدون در نظر گرفتن هیچ فرضیه اضافی بر فرضیات بایوت، نمایش جدیدی از معادلات انتشار موج در مواد متخلخل را به دست آوردند. انتخاب متغیرهای تعمیم یافته توسط دازل و همکارانش به گونه‌ای بود که توصیف انرژی کرنشی مربوط به ماده متخلخل را ساده می‌نمود. این نمایش از معادلات، نمایش جابه‌جایی کلی نیز نامیده می‌شود.

بر اساس معادلات بایوت وقتی که یک موج صفحه‌ای با یک لایه متخلخل برخورد می‌کند دو موج شبه فشاری و یک موج شبه برشی در آن انتشار می‌یابد. دو موج شبه فشاری رفتار متفاوتی دارند. این دو، موج کند و موج تند نیز خوانده می‌شوند. دلیل این نام‌گذاری این است که برای موج کند اثرات ویسکوزیته قوی‌تر است بنابراین سرعت انتشار آن نسبت به موج تند کمتر است. علت قوی‌تر بودن اثر ویسکوزیته این است که در موج کند سرعت دو فاز تقریباً عکس یکدیگر و در موج تند نسبت سرعت دو فاز تقریباً یک است.

بر اساس اینکه کدام محیط نقش بیشتری در انتقال موج دارد تقسیم‌بندی دیگری نیز انجام می‌گیرد. بر اساس این

موادی مانند صخره‌های اشباع از آب بود که در آنها فاز جامد و سیال، دانسیته شبیه به یکدیگر داشتند.

بایوت در مقاله اول خود به محدوده فرکانس پایین پرداخت که در آن فرض جریان پویسوله^{۳۱} صادق است و در مقاله دوم محدوده فرکانس‌های بالا را بررسی نمود. بایوت برای استخراج معادلات انتشار موج ابتدا فرض نمود که سیال اشباع‌کننده بدون اصطکاک است، سپس معادلات را برای حالتی که ماده شامل یک سیال میراکننده است، توسعه داد. بایوت در سال ۱۹۶۱ تئوری انتشار موج در مواد متخلخل را به مواد غیرایزوتروپیک تعمیم داد [۱۴]. در دو مقاله ابتدایی، بایوت از جابه‌جایی فاز سیال و جامد به عنوان مختصات تعمیم یافته استفاده کرد، ولی در مقاله سوم که مربوط به مواد غیرایزوتروپیک می‌گردد به جای جابه‌جایی فاز سیال از کمیتی که جریان فاز سیال نسبت به جامد در واحد سطح ماده‌ی متخلخل را نشان می‌دهد استفاده نمود.

در ادامه فرایند توسعه معادلات نفوذ موج در مواد متخلخل، آتالا^{۳۳} و همکاران در سال ۱۹۹۸ با استفاده مستقیم از معادلات بایوت و حذف جابه‌جایی فاز سیال نمایش جدیدی از معادلات نفوذ موج در مواد متخلخل ارائه نمودند [۱۵]. برخلاف نمایش اصلی معادلات بایوت در سال ۱۹۵۵ و نمایش ثانویه معادلات در سال ۱۹۶۱ که در آن از شش متغیر استفاده می‌شد، در نمایش آتالا معادلات نفوذ موج در مواد متخلخل بر حسب چهار متغیر بیان می‌گردید. در نمایش آتالا که امروزه نمایش فشاری نامیده می‌شود چهار متغیر مورد استفاده، جابه‌جایی ماکروسکوپی فاز جامد و فشار فاز سیال بودند. نمایش این معادلات در رابطه ۹ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \hat{\sigma}^S &= -\omega^2 [\tilde{\rho}] u^S - [\tilde{\gamma}] \nabla p \\ &- \nabla \cdot \left([\tilde{\rho}_{eq}]^{-1} \nabla p \right) \\ &= -\omega^2 \nabla \cdot ([\tilde{\gamma}] u^S) \\ &+ \frac{\omega^2}{\tilde{K}_{eq}} p \end{aligned} \quad (9)$$

تقسیم‌بندی امواج به دو دسته منتقله توسط هوا و منتقله توسط سازه تقسیم می‌شوند. در امواج منتقله توسط هوا سهم بیشتر موج توسط هوا و در امواج منتقله توسط سازه سهم بیشتر موج توسط سازه منتقل می‌گردد. با در نظر گرفتن این

تقسیم‌بندی امواج به دو دسته منتقله توسط هوا و منتقله توسط سازه تقسیم می‌شوند. در امواج منتقله توسط هوا سهم بیشتر موج توسط هوا و در امواج منتقله توسط سازه سهم بیشتر موج توسط سازه منتقل می‌گردد. با در نظر گرفتن این

جدول ۱. مقایسه مزایا و محدودیت‌های مدل‌های مختلف

مدل	مزایا	محدودیت‌ها
تجربی	✓ ساده ✓ نیاز به محاسبات کم	✓ محدود به مواد خاص ✓ غیر قابل تعمیم به مواد دیگر
سازه نرم	✓ معادلات ساده ✓ راحتی حصول پاسخ	✓ از دست رفتن برخی داده‌ها به دلیل فرض نرم بودن
سازه صلب	✓ معادلات ساده ✓ راحتی حصول پاسخ	✓ محدود به مواد با خاصیت ساختاری ضعیف ✓ از دست رفتن برخی داده‌ها به دلیل فرض صلب
بایوت	✓ دقت بالا ✓ قابل تعمیم برای کاربردهای مختلف ✓ جامع	✓ محاسبات پیچیده ✓ اندازه‌گیری پارامترهای اولیه دشوار

۴-۵-۱. تورتوزیته دینامیکی

همان‌گونه که در بخش‌های اول مقاله حاضر توضیح داده شد، تورتوزیته کلاسیک در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است ولی تورتوزیته دینامیکی که در معادلات بایوت مورد استفاده است به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. بنابراین برای محاسبه تورتوزیته دینامیکی مدل‌هایی ارائه شده است که مدل جانسون و همکاران پرکاربردترین مدل است. براساس مدل جانسون^{۲۵} تورتوزیته دینامیکی به‌صورت رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$\tilde{\alpha}^i(\omega) = \frac{\phi \sigma^i}{j \rho_f \omega} \left\{ 1 - b + b \left[1 + \frac{4j \alpha_{\infty}^i \eta \rho_f \omega}{(\sigma^i \Lambda^i \phi)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + \alpha_{\infty}, i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

نتایج تجربی دارد. در فرکانس‌های پایین نیز بخش موهومی تورتوزیته دینامیکی تطابق کاملی با نتایج تجربی دارد. پراید^{۲۶} و همکاران برای آنکه در فرکانس‌های پایین تطابق بخش حقیقی را بهبود ببخشند، مدل جانسون را اصلاح نموده و به‌جای مقدار واحد، مقدار جدیدی برای کمیت b بر حسب

۴-۵. محاسبه تورتوزیته دینامیکی و مدول بالک

فاز سیال

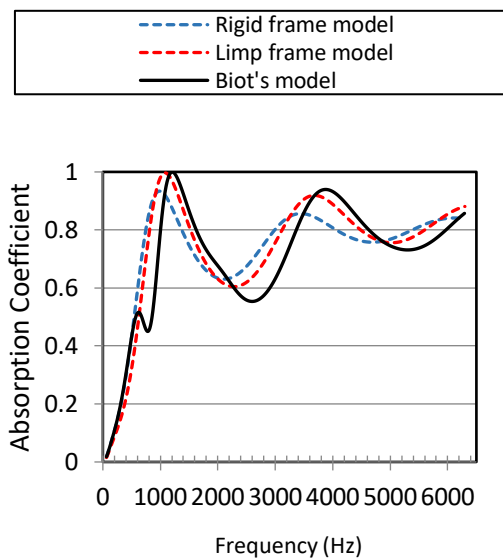
در کنار توسعه معادلات انتشار موج در مواد متخلخل کارهای دیگری نیز انجام گرفت که معنی فیزیکی پارامترهای آکوستیکی مورد استفاده در معادلات بایوت را روشن‌تر و توصیف آنها برحسب کمیت‌های قابل اندازه‌گیری را ممکن می‌ساخت. مدل‌های مختلفی تا کنون در این حوزه توسعه داده شده است که این بخش به اختصار به بررسی این مدل‌ها می‌پردازد.

در رابطه ۱۰ پارامتر ϕ بیانگر تخلخل، پارامتر σ بیانگر مقاومت جریانی و ρ_f نشان‌دهنده چگالی بخش سیال است. α_{∞} نیز نشان‌دهنده تورتوزیته استاتیکی و $\tilde{\alpha}^i(\omega)$ بیانگر تورتوزیته دینامیکی است. تورتوزیته دینامیکی به‌دست آمده از مدل جانسون در فرکانس‌های خیلی زیاد تطابق کامل با

برای محاسبه مدول بالک اصلاح شده فاز سیال نیز که در عمل میرایی ناشی از انتقال حرارت را نشان می‌دهد، مدل‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از مدل‌هایی که بسیار کاربرد دارد مدل چمپوکس-آلارد [۱۷] است. براساس این مدل، مدول بالک اصلاح شده فاز سیال به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌گردد.

$$\tilde{K}_f = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \frac{1}{1 + \frac{\eta \phi}{j\omega Pr \rho_f q_0'} \sqrt{1 + \left(\frac{2q_0'}{\phi \Delta T}\right)^2 \frac{j\omega Pr \rho_f}{\eta}}}} \quad (11)$$

نتایج به وضوح دیده می‌شود. به‌طور کلی مدل بایوت، یکی از کامل‌ترین مدل‌های ارائه شده برای مواد متخلخل تا کنون است که مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمایش در آن ملاحظه می‌شود. البته با توجه به نوع ماده متخلخل به کار برده شده و دقت مورد نیاز جهت کاربردهای متفاوت، انتخاب دیگر مدل‌های ساده‌تر نیز به‌واسطه محاسبات کمتر پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های متفاوت شبیه‌سازی مواد متخلخل برای یک نمونه فوم با ضخامت ۳ سانتی‌متر.

تورتوزیته استاتیکی پیشنهاد دادند. با توجه به اینکه اندازه‌گیری تورتوزیته استاتیکی در آزمایشگاه خیلی دشوار است، همچنان استفاده از مدل جانسون به مدل پراید ترجیح دارد.

۴-۵-۲. مدول بالک سیال

در رابطه ۱۱ بیانگر مدول بالک اصلاح شده فاز سیال بوده و γ بیانگر نسبت حرارت ویژه سیال، P_0 بیانگر فشار تعادلی سیال بوده و ϕ بیانگر تخلخل و Pr بیانگر عدد پرانتل، پارامتر ρ_f بیانگر میزان چگالی فاز سیال بوده و ΔT بیانگر طول مشخصه حرارتی، پارامتر η بیانگر ویسکوزیته سیال است. مدل دیگری که استفاده می‌گردد مدل لافراگ^{۲۷} و همکاران است. آنها با توجه به اینکه انتخاب یک مقدار تقریبی برای نفوذ حرارتی استاتیکی می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی فرکانسی بگذارد که قسمت موهومی مدول بالک سیال بیشینه می‌گردد، پیشنهاد کردند این متغیر به صورت آزمایشگاهی تعیین گردد. با توجه به سختی آزمایشگاهی اندازه‌گیری این متغیر اکثراً مدل چمپوکس آلارد^{۲۸} استفاده می‌شود. در ضمن ارائه کاملی از کلیه مدل‌های موجود در مواد متخلخل در مراجع [۱۸، ۱۹] ارائه شده است.

نمونه‌ای از نتایج حاصل شده از مدل‌های متفاوت برای یک نمونه فوم با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ به صورت شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پیک اول موجود در مدل بایوت توسط دو مدل دیگر که مربوط به مدل‌های سازه نرم و سازه صلب است، پیش‌بینی نشده است. علاوه بر این در سایر فرکانس‌ها نیز اختلاف فرکانسی بین

جدول ۲. مشخصات مکانیکی و غیر آکوستیکی یک نمونه فوم به کار برده شده در شکل ۱۰

خواص	
تخلخل ϕ	۰.۹۴۵
مقاومت جریانی σ (Nm^{-4}S)	۲۱۹۹۰
تورتوزیته α_{∞}	۳.۲۵
طول مشخصه ویسکوز Λ (μm)	۴۵
طول مشخصه حرارتی Λ' (μm)	۳۶۷
چگالی سازه ρ_1 (Kgm^{-3})	۳۲.۸
مدول یانگ (kPa)	۲۰.۸
ضریب پواسون ν	۰.۳۴
ضریب افت η	۰.۲

۵. پژوهش‌های حال و آینده

بر اساس مباحث کلی عنوان شده و کاربرد وسیع این دسته از مواد، اهدافی که فرا روی پژوهشگران در این حوزه، و طبیعتاً رفع محدودیت‌ها در استفاده از این مواد است. از جمله محدودیت‌های کاربردی این دسته از مواد، وزن و حجم بالای این مواد برای پوشش دادن جذب در حوزه فرکانس‌های پایین است. در این راستا افزودن ریز ساختارها در فرایند تولید و بررسی اثر آن به منظور افزایش میزان جذب در حوزه فرکانس‌های پایین یکی از موضوعات اصلی در پژوهش بر روی این دسته مواد محسوب می‌شود.

با توجه به پیشرفت‌هایی که طی سالیان اخیر در حوزه نانو فناوری در دنیا صورت گرفته، سعی شده با استفاده از قابلیت‌های این حوزه، اصلاحات سازنده چه در فرایند تولید و چه در استحکام‌دهی بین زنجیره‌های پلیمری انجام شده و برخی نواقص مانند ضعف مواد متخلخل در جذب صوت در فرکانس‌های پایین بهبود یابد. در این راستا برخی پژوهش‌های جدید به کمک نانولوله‌های کربنی و نانوسیلیکا انجام شده [۲۰-۲۴] که در این مقالات سعی شده با افزودن برخی مواد نانو ساختار در فرایند تولید، سبب تغییر در مشخصه‌های ساختاری ماده متخلخل شده و بهبود در

خواص آکوستیکی به خصوص در ناحیه فرکانسی زیر ۱۰۰۰ هرتز را نتیجه دهند.

همچنین بررسی تأثیر عوامل اصلی تشکیل دهنده ساختار فوم‌ها و انتخاب بهینه‌ترین ترکیبات به منظور داشتن ترکیبی بهینه از جمله اهداف پژوهشی در حوزه مواد متخلخل است. به نحوی که طی پژوهش صورت گرفته توسط حسنی بافرانی و همکارانش [۲۵] ملاحظه شد که با تغییر مقدار بسیار کم پارامتر سیلیکون سورفکتنت^{۲۹} خواص آکوستیکی نمونه فوم پلی‌یورتان تولید شده تا حدود ۳۰ درصد به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر پیدا می‌کند. البته در مقاله حاضر به روابط استوکیومتری حاکم بر تولید فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر به صورت مشخص اشاره شده است.

استفاده از فوم‌ها و مواد متخلخل به عنوان بلندگو و عوامل ایجاد صوت در کنترل فعال صوت از جمله حوزه‌های فعال جهت توسعه علوم مربوط به مواد متخلخل است. انتخاب ترکیب کامپوزیتی از انواع مواد متخلخل در کاربردهای مختلف طراحی آکوستیکی و ارائه ترکیبی مناسب جهت حصول جذب بالا مورد توجه است.

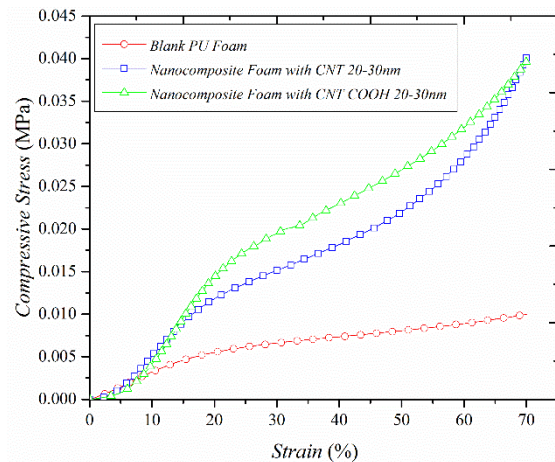
اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی در فرایند تولید فوم‌های پلی‌یورتان یکی از موضوعات تحقیقی طی چند سال گذشته است. به منظور درک بهتر اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی

در مورد شکل ۱۲ بهبود حدود ۳۵ درصدی خاصیت جذب آکوستیکی در مورد نمونه نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه فوم معمولی قابل ملاحظه است. در مجموع با اضافه نمودن مقدار ناچیزی نانولوله کربنی تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار مختلف نمونه فوم مورد استفاده حاصل شده که به خودی خود قابل ملاحظه و کاربردی است.

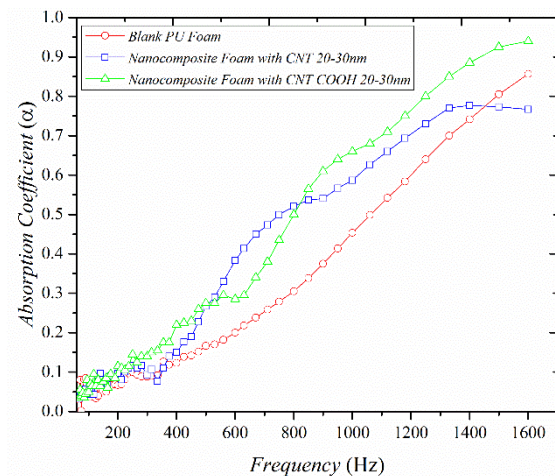
۶. جمع‌بندی

در مقاله حاضر، در ابتدا مکانیزم جذب صوت در مواد متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن سه دسته میرایی ویسکوز، حرارتی و میرایی ساختاری، به چگونگی عملکرد هر یک از میرایی‌ها و ناحیه فرکانسی متأثر از هر میرایی پرداخته شد. با در نظر گرفتن پارامترهای مشخص مواد متخلخل ارائه شده در بخش مقاله حاضر، تأثیر برخی از پارامترها بر تغییرات جذب آکوستیکی فوم‌ها پرداخته شد. به منظور برآورد خواص آکوستیکی استفاده از معادلات بایوت و همچنین معادلات سیال معادل مرسوم است. هر یک از معادلات اشاره شده و فرضیات حاکم بر معادلات به همراه نمایش های مختلف آنها ارائه شد. سپس با توجه به اهمیت محاسبه تورتوزیته دینامیکی و مدول بالک سیال، معادلات تجربی استفاده شده برای محاسبه هر یک از پارامترها ارائه شد. در نهایت به منظور محاسبه آزمایشگاهی خواص آکوستیک جذب و ضریب افت انتقال صوت، دستگاه مورد استفاده، به همراه روش اندازه‌گیری براساس استانداردهای بین‌المللی ارائه شده است. در نهایت آینده مواد متخلخل و زمینه تحقیقاتی پیش رو در این مواد به صورت اجمالی توضیح داده شده است.

در تغییر خواص مکانیکی و آکوستیکی شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. بهبود خواص مکانیکی در شکل ۱۱ با نانوکامپوزیت شدن فوم قابل ملاحظه و محسوس است.



شکل ۱۱. نمایش تغییرات تنش فشاری بر حسب کرنش برای سه نمونه فوم معمولی و دو نمونه فوم نانوکامپوزیتی [۲۶]



شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضریب جذب در حوزه فرکانسی پایین برای سه نمونه فوم معمولی و فوم نانوکامپوزیتی [۲۶]

۷. مأخذ

- [1] Ver, Istvan L., and Leo L. Beranek, "Noise and vibration control engineering: principles and applications", John Wiley & Sons, 2006.
- [2] Fahy, Frank J., *Foundations of engineering acoustics*, Elsevier, 2000.
- [3] Everest, F.A. and K.C. Pohlmann, "*Master Handbook of Acoustics*", 5th ed., New York: McGraw-Hill, 2009

- [4] Standard, I. S. O., "Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, Part 1: Transfer-function method. ISO 10534-2", *International Standardization Organization*, 1998, pp.11-15.
- [5] ASTM-E1050-10, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System", 2010.
- [6] Fahy, Frank J., and Paolo Gardonio. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Elsevier, 2007.
- [7] Raichel, Daniel R., "The science and applications of acoustics", Springer Science & Business Media, 2006.
- [8] Möser, M., "Engineering acoustics: an introduction to noise control", Second ed., Berlin: Springer, 2009.
- [9] ASTM-E-2611-09, "Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method", 2009.
- [10] Kuczmarski, Maria A., and James C. Johnston, "Acoustic absorption in porous materials", 2011.
- [11] Biot, Maurice A., "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, Vol.28, no.2, pp.179-191.
- [12] Delany, M. E., and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied acoustics*, 1970, Vol.3, no.2, pp.105-116.
- [13] Biot, Maurice A., "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, Vol.28, no.2, pp.179-191.
- [14] Biot, Maurice A., "Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, Vol.34, no.9A, pp.1254-1264.
- [15] Atalla, Noureddine, Raymond Panneton, and Patricia Debergue, "A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, Vol.104, no.3, pp.1444-1452.
- [16] Dazel, Olivier, Bruno Brouard, Claude Depollier, and Stéphane Griffiths, "An alternative Biot's displacement formulation for porous materials", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, Vol.121, no.6, pp.3509-3516.
- [17] Champoux, Yvan, and Jean-F. Allard, "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media", *Journal of applied physics*, 1991, Vol.70, no.4, pp.1975-1979.
- [18] Allard, Jean, and Noureddine Atalla, "Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials", 2e. John Wiley & Sons, 2009.
- [19] Attenborough, Keith, "Acoustical characteristics of porous materials", *Physics reports*, 1982, Vol.82, no.3, pp.179-227.
- [20] Baferani, A. Hasani, A. A. Katbab, and A. R. Ohadi, "The role of sonication time upon acoustic wave absorption efficiency, microstructure, and viscoelastic behavior of flexible polyurethane/CNT nanocomposite foam", *European Polymer Journal*, 2017, Vol.90, pp.383-391.
- [21] Bandarian, Maryam, Akbar Shojaei, and Ali Morad Rashidi, "Thermal, mechanical and acoustic damping properties of flexible open-cell polyurethane/multi-walled carbon nanotube foams: effect of surface functionality of nanotubes", *Polymer International*, 2011, Vol.60, no.3, pp.475-482.
- [22] Asadi Khanouki, Mostafa, and Abdolreza Ohadi, "Improved acoustic damping in polyurethane foams by the inclusion of silicon dioxide nanoparticles", *Advances in Polymer Technology*, 2018, Vol.37, no.8, pp.2799-2810.

- [23] Basirjafari, Sedigheh, Rasoul Malekfar, and Siamak Esmailzadeh Khadem, "Low loading of carbon nanotubes to enhance acoustical properties of poly (ether) urethane foams", *Journal of Applied Physics*, 2012, Vol.112, no.10, pp.104312.
- [24] Bahrambeygi, Hossein, Niloufar Sabetzadeh, Amir Rabbi, Komeil Nasouri, Ahmad Mousavi Shoushtari, and Mohammad Reza Babaei, "Nanofibers (PU and PAN) and nanoparticles (Nanoclay and MWNTs) simultaneous effects on polyurethane foam sound absorption", *Journal of Polymer Research*, 2013, Vol.20, no.2, pp.1-10.
- [25] 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.

[۲۶] بافرانی، ا.ح.، "مطالعه تجربی و مدل سازی رفتار آکوستیکی فوم های پلی یورتان نانوکامپوزیتی دارای نانولوله های کربنی"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۵.

پی نوشت:

1. Absorption Coefficient
2. Reflection Coefficient
3. Noise Reduction Coefficient
4. Standing Wave Method
5. Transfer Function Method
6. Two Microphone Method
7. Impedance Tube
8. Kant's Tube
9. Transmission Loss Coefficient
10. Sound Pressure Level
11. Sound Power Transmission Coefficient
12. Vibration Damping
13. Mean Free Path of Air
14. Knudsen Number
15. Delany and Bazely
16. ABAQUS
17. Rigid frame model
18. Limp frame model
19. Decoupling frequency
20. Biot's Model
21. Poiseuille Flow
22. Atalla
23. Dazel
24. Total displacement
25. Johnson
26. Pride
27. Lafrage
28. Champoux-Allard
29. Silicon Surfactant