

خواص آکوستیکی و کاربرد نانوالیاف در مواد جاذب صوت

عطیه قاجاریه	سیما حبیبی	اعظم طالبیان*
دانشجوی دکتری	دانشیار	استادیار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، تهران، ایران	گروه نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، تهران، ایران	گروه نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، تهران، ایران
a.ghajarieh@iau.ac.ir	sima.habibi@iau.ac.ir	atalebian@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۹

چکیده

در سال‌های اخیر، آلودگی صوتی به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی شناخته شده و اثرات مخرب بیولوژیکی و روانی آن بر انسان و سایر موجودات زنده به اثبات رسیده است. استفاده از مواد جاذب صوت به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد کاهش نوفه، جایگاه ویژه‌ای در حوزه مهندسی آکوستیک دارد. در میان این مواد، نانوالیاف نساجی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر قطر بسیار کم، سطح ویژه بالا و تخلخل زیاد، قادرند به‌طور مؤثر خواص آکوستیکی مواد را بدون افزایش وزن و ضخامت بهبود بخشند. این مقاله ضمن بررسی مکانیزم جذب صوت توسط نانوالیاف، به مرور پیشرفت‌های اخیر در طراحی و بهینه‌سازی ساختارهای نانولیفی و بررسی کاربردهای نوین آن در کاهش آلودگی صوتی می‌پردازد. نتایج مرور مطالعات نشان می‌دهد که طراحی این ساختارها با کنترل پارامترهایی نظیر نوع پلیمر، هندسه الیاف، میزان تخلخل، ضخامت لایه و نحوه ترکیب با نانوذرات، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی عملکرد جذب صوت در بازه‌های فرکانسی مختلف ایفا می‌کند. این یافته‌ها چشم‌اندازی برای طراحی جاذب‌های صوتی پیشرفته فراهم می‌سازد که با عملکرد هدفمند در بازه‌های فرکانسی مختلف، قابلیت به‌کارگیری در محیط‌های شهری و صنعتی را دارند.

واژگان کلیدی: آلودگی صوتی، نانوالیاف، جاذب صوت، خواص آکوستیکی، محیط زیست

۱. مقدمه

اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، قرارگیری طولانی‌مدت در معرض سطوح بالای نوفه می‌تواند منجر به مشکلاتی چون افت موقت یا دائم شنوایی، وزوز گوش^۱، اختلال خواب، کاهش تمرکز، استرس روانی، بیماری‌های قلبی-عروقی، اختلالات غدد

با رشد سریع شهرنشینی، صنعتی‌شدن و گسترش حمل‌ونقل، آلودگی صوتی به یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است که اثرات نامطلوبی بر سلامت جسمی و روانی انسان دارد. بر

منافذ، کانال‌ها و حفرات داخلی هستند که اجازه می‌دهند امواج صوتی وارد ساختار شوند. اصطکاک میان مولکول‌های هوا و دیواره منافذ، همراه با اثرات ویسکوزی و حرارتی، سبب تبدیل انرژی صوتی به گرما و در نتیجه منجر به تضعیف صدا می‌شود. این مواد در فرکانس‌های بالا، جذب صدا خوبی داشته اما در محدوده فرکانس‌های پایین و متوسط بازده کمتری دارند [۶ و ۵ و ۲]. در مقابل، مواد جاذب رزونانسی بر پایه پدیده تشدید در یک فرکانس طبیعی مشخص عمل کرده و در جذب امواج صوتی با فرکانس پایین بسیار مؤثر هستند، با این حال، به دلیل محدودیت در پهنای باند جذب، به منظور ارتقاء کارایی، معمولاً همراه با سایر جاذب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوالیاف در طراحی جاذب‌های صوتی به دلیل ویژگی‌هایی چون قطر بسیار کم الیاف، سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد، جرم کم و مقاومت ویژه بالای جریان هوا^۴، مورد توجه فزاینده قرار گرفته است [۱۰-۱۸]. غشاهای نانولیفی می‌توانند ضریب جذب صوت (SAC)^۵ را افزایش دهند، در حالی که ضخامت و وزن جاذب کاهش می‌یابد. این غشاها به‌ویژه در فرکانس‌های پایین به واسطه رزونانس و ارتعاش، بخش قابل توجهی از انرژی صوتی را از طریق اصطکاک داخلی و پراکندگی^۶ الیاف به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند [۱۱]. علاوه بر این، ترکیب لایه‌های نانولیفی با مواد جاذب متداول می‌تواند پهنای باند جذب را افزایش داده و عملکرد بهتری در محدوده وسیع‌تری از فرکانس‌ها ارائه دهد [۱۳ و ۱۲]. بر این اساس، در این مقاله علمی ترویجی، ابتدا به بررسی مکانیزم‌ها و دسته‌بندی مواد جاذب صوت پرداخته می‌شود و سپس

درون‌ریز و حتی مشکلات گوارشی شود [۱ و ۲]. منابع ایجاد نوفه بسیار متنوع بوده و شامل وسایل نقلیه، ماشین‌آلات صنعتی، فعالیت‌های ساختمانی، کنسرت‌ها و تجهیزات خانگی است. با پیشرفت فناوری و تمرکز جمعیت در مناطق شهری، میزان و شدت این آلودگی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. نمونه‌ای از منابع رایج تولید صدا و سطوح دسی بل آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است [۳].

جدول ۱. منابع رایج تولید صدا [۳]

نوع منبع	سطح صدا (دسی بل)
تنفس عادی	۱۰
فضای آرام اتاق	۲۰
نجوا	۳۰
مکالمه عادی	۶۰
ترافیک شهری (داخل خودرو)	۸۰-۸۵
کارخانه‌ها	۹۰
کنسرت موسیقی	۱۱۰
بلند شدن هواپیما	۱۴۰

برای کاهش آلودگی صوتی، دو راهکار اساسی مورد استفاده قرار می‌گیرد: حذف یا کاهش شدت منبع صدا و استفاده از مواد جاذب صوتی برای تضعیف امواج صوتی [۴]. در میان روش‌های مختلف، به‌کارگیری مواد جاذب صدا یک راهکار کارآمد و پرکاربرد محسوب می‌شود. این مواد بر اساس مکانیزم‌های جذب به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مواد جاذب متخلخل^۲ و مواد جاذب رزونانسی^۳ [۵]. مواد جاذب متخلخل دارای

ویژگی‌ها و پیشرفت‌های اخیر در استفاده از نانوالیاف به‌عنوان جاذب صوتی بررسی خواهد شد.

۲. مواد جاذب صوت

مواد جاذب صوت را می‌توان به‌طور کلی در سه گروه اصلی دسته‌بندی کرد: جاذب‌های متخلخل، جاذب‌های پنلی^۷، و جاذب‌های رزونانسی. هر یک از این ساختارها در محدوده‌ای خاص از فرکانس عملکرد مؤثری دارند؛ به‌طور معمول، جاذب‌های متخلخل در فرکانس‌های میانه تا بالا، و جاذب‌های پنلی و رزونانسی در ناحیه فرکانس پایین مؤثرتر عمل می‌کنند [۱۳ و ۱۴]. جاذب‌های متخلخل به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فوم‌های سلولی باز^۸ و مواد لیفی متخلخل. در فوم‌های آکوستیکی، ساختار سلول باز امکان نفوذ موج صوتی به درون ماده را فراهم کرده و از طریق مکانیزم‌هایی مانند اصطکاک بین جریان هوا و دیواره سلول‌ها، بخش قابل توجهی از انرژی صوتی را جذب و به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند. در مواد جاذب لیفی، فضاها ریز بین الیاف بلند (پیوسته) یا کوتاه (ناپیوسته) نقش مشابهی ایفا می‌کنند و جذب صوت عمدتاً ناشی از تعامل بین جریان هوا و الیاف است. این مکانیزم‌ها در مطالعات مختلف به اثبات رسیده‌اند [۱۶ و ۱۵ و ۱۲]. در مقابل، جاذب‌های پنلی معمولاً از یک صفحه صلب یا نیمه‌صلب با فضای هوایی پشتی تشکیل شده‌اند که با ارتعاشات خمشی در پاسخ به امواج صوتی، بخشی از انرژی صوت را در محدوده فرکانسی پایین جذب می‌کنند. میزان جذب صوت در این جاذب‌ها به پارامترهایی نظیر جرم سطحی^۹، سختی خمشی و عمق لایه هوایی پشت پنل وابسته است. گرچه این ساختارها در فرکانس پایین مؤثرند، اما معمولاً پهنای باند

محدودی دارند و به تنهایی پاسخگوی کاربردهای گسترده نیستند [۱۳]. جاذب‌های رزونانسی نیز شامل ساختارهایی هستند که در یک فرکانس طبیعی خاص دچار تشدید شده و انرژی صوتی را از طریق اتلاف ویسکوالاستیک^{۱۰} یا اصطکاک داخلی تضعیف می‌کنند. این جاذب‌ها نیز عملکرد مطلوبی در فرکانس پایین دارند اما پهنای باند محدودی را پوشش می‌دهند [۸]. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوالیاف الکتروریسی شده به‌عنوان اجزای مکمل جاذب‌های متخلخل رایج، مورد توجه گسترده قرار گرفته است. نانوالیاف با قطر بسیار کم، تخلخل زیاد، سطح ویژه بالا و جرم پایین، محیطی مناسب برای برهم‌کنش قوی‌تر با موج صوتی فراهم می‌کنند. در ساختارهای ترکیبی، اضافه کردن یک لایه نازک نانولیفی به فوم یا پارچه متخلخل، بدون افزایش محسوس در ضخامت یا وزن، باعث افزایش ضریب جذب صوت به‌ویژه در فرکانس‌های پایین و گسترش پهنای باند جذب می‌شود [۱۷]. علاوه بر این، خواص هندسی و دینامیکی نانوالیاف نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد آکوستیکی آن‌ها دارد. به‌عنوان نمونه، کاهش قطر نانوالیاف یا افزایش چگالی سطحی غشاء می‌تواند فرکانس جذب را جابه‌جا کرده و شدت جذب را بهبود دهد. همچنین، امکان نوسان و ارتعاش نانوالیاف در پاسخ به موج صوتی باعث اتلاف انرژی از طریق اصطکاک داخلی، میرایی ارتعاش و پراکندگی می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده است تا رفتار آکوستیکی نانوالیاف با الیاف معمولی تفاوت معناداری داشته باشد [۱۸]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با استفاده از ساختارهای چندلایه شامل نانوالیاف و مواد متخلخل مانند فوم‌ها یا ژل‌های پلیمری، می‌توان به بهبود قابل توجهی در ضریب جذب

صوت در طیف وسیعی از فرکانس‌ها دست یافت. این ساختارها حتی در ضخامت‌های کم، توانایی جذب مؤثر صدا به‌ویژه در فرکانس‌های پایین تا میانی را نشان داده‌اند، به‌گونه‌ای که در برخی موارد ضریب جذب بالاتر از ۰/۷ نیز گزارش شده است [۸ و ۱۷ و ۱۸]. در نهایت، استفاده از نانوالیاف در طراحی جاذب‌های

صوتی، امکان توسعه ساختارهایی سبک، نازک و با کارایی بالا را فراهم کرده است که برای کاربردهای صنعتی، ساختمانی و حمل‌ونقل بسیار مطلوب هستند [۱]. جدول ۲ مقایسه سه گروه اصلی مواد جاذب صوت را به همراه کارایی و محدودیت‌های هر گروه نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه سه گروه اصلی مواد جاذب صوت

نوع ماده	مکانیزم اصلی جذب	محدوده فرکانسی مؤثر	مزایا	محدودیت‌ها	نمونه بهبود یافته با نانوالیاف
جاذب‌های متخلخل	اصطکاک و اتلاف ویسکوزی	متوسط تا بالا (≤ 1000 هرتز)	سبکی، ساخت آسان، عملکرد مناسب در فرکانس بالا	بازده کم در فرکانس پایین	فوم + لایه نانوالیافی
جاذب‌های پنبلی	ارتعاشات خمشی پنبل	پایین (۱۰۰-۵۰۰ هرتز)	عملکرد خوب در فرکانس پایین	پهنای باند محدود	پنبل صلب با پوشش نانوالیاف
جاذب‌های رزونانسی	تشدید در فرکانس طبیعی	پایین (≥ 500 هرتز)	جذب قوی در فرکانس خاص	پاسخ فرکانسی محدود	رزوناتور هلمهولتز با لایه نانوالیافی

۳. مکانیزم و عوامل مؤثر در جذب صوت

مکانیزم جذب صوت در مواد متخلخل عمدتاً در چارچوب دو فرآیند کلی شامل اتلاف ارتعاشی و جذب آکوستیکی بررسی می‌شود که در آن انرژی مکانیکی امواج صوتی به حرارت و اتلاف ناشی از پراکندگی تبدیل می‌گردد [۱۹]. زمانی که موج صوتی وارد ساختار پیچیده و پرمنفذ ماده می‌شود، ذرات هوای موجود در حفرات به نوسان درمی‌آیند. این نوسانات باعث ایجاد اصطکاک ویسکوزی بین مولکول‌های هوا و دیواره‌های منافذ می‌شود که بخشی از انرژی موج را به گرما تبدیل می‌کند و موجب کاهش شدت صوت

می‌گردد [۲۰، ۲۱]. علاوه بر این، اختلاف دما میان هوای درون حفرات و شبکه جامد ماده، فرآیند انتقال حرارت را فعال کرده و باعث اتلاف بیشتر انرژی صوتی می‌شود [۲۰]. ارتعاشات موضعی الیاف و پراکندگی انرژی در مقیاس میکروسکوپی نیز سهم قابل توجهی در جذب صوت دارند [۲۲].

ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی ماده، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر میزان جذب صوت دارند. مقاومت جریان هوا یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر رفتار آکوستیکی مواد متخلخل است. این ویژگی نشان می‌دهد که یک ماده تا چه اندازه در برابر عبور جریان هوا مقاومت می‌کند. زمانی که امواج صوتی از میان

ساختارهای لیفی عبور می‌کنند، وجود مسیره‌های پیچیده و اصطکاک بین هوا و الیاف، موجب کاهش دامنه موج و تبدیل بخشی از انرژی صوتی به گرما می‌شود. هرچند این فرآیند موجب جذب صوت می‌شود، اما در صورتی که مقاومت جریان هوا بیش از حد بالا باشد، امواج صوتی به‌سختی وارد ماده شده و به‌جای جذب، بازتاب می‌یابند. به همین دلیل، دستیابی به یک مقدار بهینه از این پارامتر بسیار حائز اهمیت است. عملکرد آکوستیکی مواد نه‌تنها به مقاومت جریان هوا، بلکه به ویژگی‌هایی مانند ضخامت و فرکانس موج نیز وابسته است. همچنین، میان مقاومت جریان هوا و نفوذپذیری هوا رابطه‌ای معکوس وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش یکی، دیگری کاهش می‌یابد [۲۳]. عامل مؤثر بعدی در جذب صوت، تخلخل ماده است. تخلخل به نسبت حجم منافذ داخلی به کل حجم ماده اشاره دارد. هر چه تخلخل ماده جاذب صوت بیشتر باشد، تورتوسیتی^{۱۱} (پیچیدگی مسیره‌های داخلی) افزایش می‌یابد و در نتیجه اصطکاک داخلی و مقاومت ویسکوزی پس از ورود موج صوتی به منافذ نیز بیشتر می‌شود. بازه تخلخل مواد با عملکرد مطلوب در جذب صوت معمولاً بین ۷۰٪ تا ۹۰٪ است [۲۴]. این ویژگی ارتباط نزدیکی با ساختار حجمی ماده دارد؛ به دلیل اینکه وجود فضای خالی (منافذ/حفره‌ها) بستر مؤثری برای اتلاف انرژی صوتی فراهم می‌کند. اگرچه ساختار منافذ مواد متخلخل متفاوت است، اما روند برخورد موج صوت با این منافذ مشابه است. هنگام ورود موج صوت به منافذ، مولکول‌های هوا درون آن‌ها مرتعش می‌شوند و انرژی صوتی به دلیل اتلاف حرارتی و ویسکوزی در دیواره‌های داخلی تبدیل به گرما می‌گردد. در صورتی که تخلخل در بازه مناسبی قرار داشته باشد و منافذ باز

و کانال‌های پیوسته موجود باشند، جذب صوت به‌طور مؤثرتری انجام خواهد شد؛ زیرا واکنش بیشتری بین موج صوت و دیواره‌ی منافذ اتفاق می‌افتد و انرژی صوتی بیشتری به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود؛ با این حال، تخلخل بیش از حد در صورت همراهی با مقاومت جریان بسیار پایین، می‌تواند جذب را کاهش دهد [۲۵]. اندازه و توزیع منافذ نقش مهمی در این فرآیند ایفا می‌کند؛ در مواد متخلخل با میزان مشخصی از فضای خالی (تخلخل)، کاهش اندازه منافذ باعث افزایش تعداد آن‌ها در ساختار شده و شبکه‌ای پیچیده‌تر و پراکنشگرتر را به وجود می‌آورد. این پیچیدگی، مسیر امواج صوتی را طولانی‌تر کرده و تعداد برخورد و بازتاب امواج درون منافذ را افزایش می‌دهد. همچنین، سطح تماس بین هوای داخل ماده و دیواره‌های منافذ بیشتر شده و این امر منجر به افزایش اتلاف انرژی از طریق اصطکاک و انتقال حرارت می‌شود که در نهایت جذب صوت را بهبود می‌بخشد. با این حال، اگر اندازه منافذ بسیار کوچک باشد، ورود امواج صوتی به داخل ماده دشوار شده و بیشتر انرژی صوتی بازتاب می‌شود که باعث کاهش جذب صوت می‌گردد. بنابراین، اندازه منافذ باید در حد مناسبی باشد تا بهترین عملکرد جذب صوت حاصل شود [۲۶ و ۲۷]. ضخامت ماده نیز پارامتر کلیدی دیگری است. در فرکانس‌های پایین (بین ۲۰۰۰-۱۰۰ هرتز)، ضخامت بیشتر باعث افزایش جذب صدا و کاهش بازتاب انرژی می‌شود. در مطالعات داخلی نیز اثر ضخامت و تعداد لایه‌ها بر عملکرد آکوستیکی ساختارهای نساجی مورد بررسی قرار گرفته است. داودآبادی و همکاران [۲۸] نشان دادند که افزایش ضخامت و تعداد لایه‌ها در پارچه‌های دو جداره حلقوی

تاری موجب بهبود ضریب جذب صوت در فرکانس‌های پایین (۱۰۰-۱۰۰۰ هرتز) شده است. با این حال، در فرکانس‌های بالا (بالتر از ۲۰۰۰ هرتز)، تأثیر ضخامت بر جذب صدا ناچیز است. افزایش ضخامت در این محدوده فرکانسی ممکن است منجر به بازتاب بیشتر امواج صوتی شود و کارایی جذب را کاهش دهد. زیرا امواج با طول موج بلندتر زمان و فضای بیشتری برای نفوذ و اتلاف انرژی نیاز دارند [۲۹]. در بررسی ویژگی‌های آکوستیکی مواد، چگالی ماده به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در جذب صوت شناخته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش چگالی، جذب صدا در فرکانس‌های میانه و بالا افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش اصطکاک داخلی و تبدیل انرژی صوتی به حرارت در ساختار متخلخل ماده است. افزایش تعداد الیاف در واحد سطح، مسیرهای پیچیده‌تری برای امواج صوتی ایجاد کرده و در نتیجه، اتلاف انرژی بیشتری رخ می‌دهد که منجر به بهبود جذب صوت می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد چگالی می‌تواند منجر به کاهش جذب صدا شود. این امر به دلیل کاهش تخلخل و کاهش فضای موجود برای جذب امواج صوتی است. بنابراین، برای دستیابی به بهترین عملکرد جذب صوت، باید چگالی ماده در محدوده‌ای بهینه قرار گیرد. بنابراین، ترکیب مناسب چگالی با سایر ویژگی‌های ساختاری مانند تخلخل و مقاومت جریان هوا می‌تواند منجر به بهبود عملکرد جذب صوت در مواد مختلف شود [۳۰]. یکی دیگر از پارامترهای مهم که نقش تعیین‌کننده‌ای در جذب صوت مواد متخلخل دارد، ترتوسیتی است. ترتوسیتی کمیتی بدون بعد است که میزان پیچیدگی و انحراف مسیر جریان هوا در ساختار داخلی مواد متخلخل را

نشان می‌دهد. این کمیت تأثیر مستقیمی بر مقاومت جریان هوا داشته و در نتیجه بر جذب صوت ماده مؤثر است. با افزایش ترتوسیتی، مسیر عبور هوا پیچیده‌تر و طولانی‌تر شده که باعث افزایش اصطکاک و اتلاف انرژی می‌شود و در نهایت جذب صوت را بهبود می‌بخشد. با این وجود، افزایش بیش از حد ترتوسیتی می‌تواند موجب افزایش چگالی سطحی ماده شود که مانع نفوذ امواج صوتی به داخل آن خواهد شد [۳۱]. علاوه بر این، شرایط نصب نیز بر عملکرد نهایی جاذب تأثیر می‌گذارد. قرار دادن یک ماده متخلخل با فاصله‌ای مشخص از یک سطح صلب، که موجب ایجاد یک شکاف هوایی^{۱۲} در پشت آن می‌شود، می‌تواند نقطه بیشینه ضریب جذب صوت را از محدوده فرکانسی بالا به محدوده پایین منتقل کند و در برخی الیاف طبیعی باعث افزایش ضریب کاهش نوفه^{۱۳} شود [۳۲]. وجود این حفره هوایی، جاذب را به‌صورت یک غشای وابسته به فرکانس با جرم مشخص درآورده و هوای داخل آن نقش یک فنر مکانیکی را ایفا می‌کند. در عین حال، بخشی از امواج صوتی که پس از عبور از ماده آکوستیکی جذب یا به گرما تبدیل نشده‌اند، وارد این لایه هوایی شده و در آنجا با مقاومت بیشتری مواجه می‌شوند. این فرآیند، که به پدیده‌ی تشدید هلمهولتز^{۱۴} معروف است، موجب تحریک برخی فرکانس‌ها و افزایش دامنه نوسان آن‌ها شده و در نهایت با اتلاف انرژی از طریق اصطکاک با ذرات هوا، بخش بیشتری از انرژی صوتی به گرما تبدیل می‌گردد. این ویژگی، انعطاف‌پذیری بیشتری را در طراحی و به‌کارگیری مواد جاذب صوت فراهم می‌کند [۳۳]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب نانوالیاف با مواد متخلخل، با افزایش سطح تماس، ایجاد مسیرهای پیچیده‌تر و بهره‌گیری از

رزونانس‌های موضعی، می‌تواند پهنای باند جذب را گسترش داده و کارایی را در فرکانس‌های پایین افزایش دهد [۳۴].

۴. مواد جاذب صوت نانولیفی

نانوالیاف به دلیل نسبت بالای سطح به حجم و ساختار سه‌بعدی [۳۵]، امکان تعامل گسترده‌تری با امواج صوتی دارند. این ویژگی موجب افزایش افت انرژی صوت از طریق مکانیزم‌های اصطکاکی و اتلاف ویسکوزی می‌شود [۳۶]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از المان‌های پیزوالکتریک در ساختارهای کامپوزیتی چندلایه می‌تواند افت انتقال صوت را بهبود بخشد [۳۷]؛ در مقایسه، نانوالیاف با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیکی مانند تخلخل بالا و سطح ویژه، عملکرد مشابهی را بدون نیاز به تحریک الکتریکی ارائه می‌دهند. در سال‌های اخیر، این ویژگی‌ها موجب توجه فزاینده به استفاده از نانوالیاف در طراحی جاذب‌های صوتی نوین شده است [۸ و ۱۸].

۴-۱. نانوالیاف پلیمری^{۱۵}

نانوالیاف پلیمری به دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و قابلیت مهندسی‌سازی ساختار [۴۰-۳۸]، از جایگاه مهمی در توسعه مواد جاذب صوت برخوردارند. در مطالعه‌ای که رفتار صوتی-مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با لیاف پلی‌پروپیلن و شیشه بررسی شده، مشخص گردید که نوع لیاف، نحوه آرایش آن‌ها و محل قرارگیری‌شان در ساختار کامپوزیت تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای صوتی مانند دامنه، فرکانس و انرژی صوتی دارد. به‌ویژه، ترکیب لایه‌ای از پلی‌پروپیلن در مرکز و شیشه در سطح خارجی موجب بهبود عملکرد صوتی در شرایط کششی شد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مهندسی ساختار لیاف در مقیاس میکرو می‌تواند نقش کلیدی در کنترل رفتار

آکوستیکی ایفا کند [۴۱]. در همین راستا، نانوالیاف پلیمری به دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و قابلیت تنظیم دقیق ساختار، امکان بهینه‌سازی عملکرد آکوستیکی را در محدوده فرکانسی وسیع‌تری فراهم می‌کنند؛ این ویژگی‌ها حتی بدون نیاز به افزایش ضخامت یا ترکیب پیچیده لایه‌ها نیز مؤثر واقع می‌شوند. به‌عنوان نمونه در مطالعه‌ای، کاراجا و همکاران [۴۲] با بررسی نانوالیاف ترموپلاستیک پلی یورتان^{۱۶}، کامپوزیت ترموپلاستیک پلی یورتان/پلی استایرن^{۱۷} (TPU/PS) و میکروفیبرهای TPU/PS تولیدشده دریافتند که حذف پلی‌استایرن از ساختار، موجب تغییرات مورفولوژیکی از جمله افزایش قطر لیاف و کشسانی شده و این تغییرات بهبود جذب صوت در فرکانس‌های پایین (حدود ۶۰۰-۸۰۰ هرتز) را به همراه داشته است. نکته قابل توجه در این مطالعه، تأکید بر نقش فرآیند تولید در کنترل مورفولوژی و عملکرد صوتی است که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بالای مهندسی مورفولوژی برای بهبود عملکرد جذب صوت در فرکانس‌های پایین است؛ با این حال، تغییرات ساختاری پس از تولید، مانند افزایش قطر لیاف، ممکن است در برخی کاربردها نیازمند بهینه‌سازی بیشتر باشد.

یافته‌های مشابهی توسط لیو و همکاران [۴۳] در مورد نانوالیاف پلی وینیل الکل^{۱۸} (PVA) / پلی اتیلن اکساید^{۱۹} (PEO) گزارش شد؛ به طوری که افزایش بی‌نظمی سطح و ساختار داخلی، موجب انتقال پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر و بهبود عملکرد در کل باند فرکانسی گردید. با این وجود، فقدان تحلیل عددی و ساختاری دقیق، همچنان فرصت‌هایی برای درک مکانیزم جذب در مطالعات آینده باقی گذاشته است. مطالعات هوانگ و همکاران [۴۴] روی نانوالیاف پلی اکریلونیتریل^{۲۰} (PAN) با درصد جرمی متفاوت نشان داد

که افزایش تخلخل ساختار و بهینه‌سازی ضخامت لایه، امکان جابه‌جایی فرکانس تشدید به محدوده پایین‌تر را فراهم می‌کند. نکته برجسته این مطالعه، استفاده هم‌زمان از شبیه‌سازی کامسول^{۲۱} و آزمون تجربی برای اعتبارسنجی نتایج است که سطح اطمینان علمی را افزایش داده و آن را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد، این رویکرد ترکیبی، الگویی مناسب برای طراحی مواد جاذب صوت با قابلیت پیش‌بینی عملکرد در شرایط واقعی ارائه می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده توسط حاجی‌زاده و همکاران [۴۵] با بررسی تأثیر فاصله هوایی پشتی، نشان داد که افزایش این فاصله می‌تواند عملکرد جذب صوت را در فرکانس‌های پایین بهبود بخشد. این مطالعه با بررسی نقش فاصله هوایی پشتی، اهمیت طراحی ساختارهای چندلایه و تنظیمات نصب را در بهینه‌سازی عملکرد جذب صوت برجسته می‌سازد؛ هرچند وابستگی نتایج به شرایط نصب، ضرورت ارزیابی عملکرد در محیط‌های کاربردی متنوع را یادآور می‌شود. در مجموع، نتایج این مطالعات تأکید می‌کند که انتخاب نوع پلیمر و کنترل دقیق پارامترهای فرآیندی نظیر نسبت اختلاط، روش ریسندگی و تنظیم ساختار حفرات می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به کارایی بالا در جذب صوت ایفا کند.

۲-۴. نانوالیاف تقویت‌شده با نانوذرات^{۲۲}

به‌کارگیری نانوذرات به‌عنوان فاز تقویتی در ساختار نانوالیاف، رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد جذب صوت محسوب می‌شود، زیرا این ذرات می‌توانند پارامترهای کلیدی همچون مورفولوژی، تخلخل، مقاومت جریان هوا و ضریب افت انرژی را تغییر دهند [۴۶]. حاجی‌زاده و همکاران [۴۵] با افزودن نانوکلی، نانوالیاف PAN و پلی‌وینیلیدین فلوراید^{۲۳} (PVDF) به

فوم پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر نشان دادند که ترکیب نانوکلی در ضخامت‌های کم، و نانوالیاف PAN و PVDF در ضخامت‌های بیشتر، اثر مثبت‌تری بر افزایش ضریب جذب در محدوده فرکانس‌های میانی و بالا دارد. این ترکیبات توانستند ضریب جذب را در فرکانس‌های میانی بیش از دو برابر و در فرکانس‌های بالا حدود ۳۰٪ افزایش دهند. این مطالعه با ترکیب چند نوع نانوذره و نانوالیاف، مزیت چندعاملی در بهبود جذب صوت ارائه می‌دهد. وابستگی عملکرد به ضخامت نمونه‌ها نشان می‌دهد که طراحی بهینه برای کاربردهای صنعتی نیازمند بررسی دقیق‌تر پارامترهای ساختاری است، که خود می‌تواند زمینه‌ای برای توسعه راهکارهای قابل تنظیم باشد.

در پژوهشی دیگر، لیو و همکاران [۴۶] با افزودن اکسید گرافن به نانوالیاف PVA/PEO دریافتند که حضور نانوذره باعث ایجاد ساختار شبکه‌ای و کاهش زبری سطح و دانسیته غشای نانوالیاف می‌شود، که این امر منجر به تغییر ناحیه عملکرد به دو باند فرکانسی مجزا (۵۰۰-۱۰۰۰ هرتز و ۳۱۵۰-۶۳۰۰ هرتز) گردید. نمونه‌های حاوی اکسید گرافن در بازه ۱۰۰۰-۳۱۵۰ هرتز عملکرد بهتری داشتند، در حالی که نمونه‌های بدون آن در بازه‌های پایین‌تر مؤثرتر بودند. در مقایسه با مطالعه قبلی، استفاده از اکسید گرافن در ساختار نانوالیاف منجر به ایجاد پاسخ فرکانسی دوگانه شد که نشان‌دهنده قابلیت تنظیم‌پذیری عملکرد صوتی است. کاهش نسبی عملکرد در برخی بازه‌های فرکانسی پایین‌تر، نه به‌عنوان ضعف، بلکه به‌عنوان نشانه‌ای از حساسیت ساختار به نوع نانوذره و شرایط ساخت قابل بررسی است. همچنین، قماش و همکاران [۴۷] با دوپ کردن پلی‌وینیل پیرولیدون^{۲۴} با غلظت‌های

مختلف اکسید گرافن نشان دادند که این افزودنی باعث افزایش فرکانس تشدید زاویه‌ای و ضریب اتلاف می‌شود. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین بهبود در ضریب جذب (حدود ۴۰٪) در فرکانس ۱۵۰۰ هرتز حاصل شد، هرچند تأثیر قابل توجهی بر سایر باندهای فرکانسی مشاهده نشد. برخلاف دو مطالعه پیشین، تمرکز این تحقیق بر بهبود عملکرد در یک فرکانس خاص است که منجر به دستیابی به ضریب جذب قابل توجه در نقطه تشدید شده است. اگرچه گسترش اثر به سایر باندهای فرکانسی مشاهده نشده، اما این یافته می‌تواند برای طراحی جاذب‌های صوتی هدفمند در کاربردهای خاص بسیار ارزشمند باشد.

این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نوع نانوذره و طراحی ساختار نانوالیاف باید بر اساس نیاز فرکانسی خاص هر کاربرد انجام گیرد، نه صرفاً بر مبنای افزایش ضریب جذب کلی. جمع‌بندی این مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب نوع نانوذره، میزان بارگذاری و نحوه پراکنش آن در ساختار نانوالیاف، به همراه کنترل ضخامت و تخلخل، می‌تواند به طور هدفمند پهنای باند جذب صوت را تغییر داده و کارایی مواد را در فرکانس‌های خاص بهینه‌سازی کند.

۳-۴. نانوالیاف زیست‌پایه^{۲۵} و پایدار

با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز به کاهش وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر، توسعه نانوالیاف زیست‌پایه برای جذب صوت به یک رویکرد مهم در سال‌های اخیر تبدیل شده است [۴۸]. شن و همکاران [۴۹] با استفاده از نانوالیاف سلولز و فوم ملانین، ساختار حفره‌ای سلسله‌مراتبی^{۲۶} متشکل از ماکروحفرات و مزوحفرات ایجاد کردند که به دلیل افزایش بازتاب‌های

چندگانه و ارتعاشات میکروسکوپی امواج صوتی، عملکرد جذب صوت را به طور چشمگیری بهبود داد. این ساختار در فرکانس ۵۰۰ هرتز، ضریب جذب را نسبت به فوم ملانین خالص حدود ۱۰۷٪ افزایش داد و ضریب کاهش نوفه آن نیز تا ۸۰٪ بهبود یافت. در این مطالعه، تمرکز بر بهبود جذب صوت در فرکانس‌های پایین بوده و استفاده از روش انجماد-ذوب چرخه‌ای منجر به ساختار متخلخل مؤثر شده است. با این حال، چگالی نسبتاً بالاتر نشان می‌دهد که بهینه‌سازی وزن و ضخامت می‌تواند مسیر پژوهش‌های آینده باشد.

در پژوهشی دیگر، دینش و همکاران [۵۰] فوم‌های نانوالیاف سلولزی^{۲۷} را با استفاده از اسید سیتریک به عنوان عامل اتصال‌دهنده سبز^{۲۸} تهیه کردند. این فرآیند علاوه بر بهبود خواص مکانیکی تا بیش از ۲۰۰٪، باعث ایجاد تخلخل بسیار بالا (بیشتر از ۹۸٪) و چگالی کم ($24/02 \text{ mg/cm}^3$) شد. فوم‌های تهیه‌شده پس از آب‌گریزی، ضریب جذب صوت بالاتر از مقادیر استاندارد موردنیاز را ارائه دادند و برای کاربردهای سبک‌وزن و دوست‌دار محیط‌زیست مناسب ارزیابی شدند. ویژگی متمایز این پژوهش، دستیابی به تخلخل بسیار بالا و چگالی فوق‌العاده پایین است که ساختار حاصل را برای کاربردهای قابل‌حمل و سبک‌وزن مناسب می‌گرداند. با وجود تحقق موفق کاهش وزن و زیست‌سازگاری، بررسی عملکرد در فرکانس‌های پایین همچنان برای تکمیل ارزیابی آکوستیکی ضروری به نظر می‌رسد.

در بررسی دیگر، ما و همکاران [۵۱] با استفاده از ترکیب کلاژن^{۲۹} و لیگنین^{۳۰}، اسفنج‌های نانوالیافی^{۳۱} با ساختار متخلخل سلسله‌مراتبی تولید کردند که علاوه

بر جذب صوت فوق العاده ($SAC > 0.9$) در بازه ۲۰۰۰-۶۳۰۰ هرتز، در فرکانس‌های پایین نیز عملکرد برجسته‌ای ($NRC = 0.64$) داشتند. افزودن لیگنین به‌عنوان عامل اتصال‌دهنده سبب باعث بهبود پایداری حرارتی و افزایش استحکام فشاری تا ۶۰٪ شد. این مطالعه با ارائه عملکرد جذب صوت بالا در بازه وسیع فرکانسی، به‌ویژه در فرکانس‌های پایین، و همچنین بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، رویکردی جامع‌تر نسبت به دو مطالعه دیگر ارائه می‌دهد. اگرچه هر مطالعه چالش‌های خاص خود را دارد، اما مجموع نتایج نشان می‌دهد که نانوالیاف زیست‌پایه با قابلیت تنظیم ساختار حفره‌ای، پتانسیل بالایی برای توسعه جاذب‌های صوتی پایدار، سبک‌وزن و با عملکرد بالا دارند.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از منابع زیست‌پایه نه تنها امکان تولید مواد جاذب صوت با کارایی بالا را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند به توسعه محصولاتی پایدار و کم‌هزینه با قابلیت تولید در مقیاس صنعتی نیز منجر شود.

۴-۴. ساختارهای هیبریدی^{۳۲} و چندلایه با نانوالیاف

ترکیب نانوالیاف با بسترهای الیافی یا ساختارهای متخلخل دیگر، یک راهکار مؤثر برای گسترش پهنای باند جذب صوت و بهینه‌سازی عملکرد در فرکانس‌های مختلف است. کوچعلی و همکاران [۵۲] با پوشش نمدهای پشمی و جوت بر لایه‌ای از نانوالیاف PAN، توانستند ضریب جذب صوت را در فرکانس‌های میانی (حدود ۱۰۰۰ هرتز) تا چهار برابر افزایش دهند. کاهش نفوذپذیری هوا که ناشی از پوشش نانوالیاف بود، به‌عنوان عامل کلیدی در بهبود عملکرد صوتی این

ساختارها شناسایی شد. این بررسی نشان داد که پوشش نانوالیاف می‌تواند بدون افزایش ضخامت، عملکرد صوتی ساختارهای سنتی را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد. هرچند تمرکز اصلی بر فرکانس‌های میانی بوده، اما این رویکرد می‌تواند پایه‌ای برای توسعه ساختارهایی با عملکرد گسترده‌تر در فرکانس‌های پایین نیز باشد. در مطالعه‌ای دیگر، شائو و همکاران [۵۳] با استفاده از یک غشای نانوالیاف میکروسوراخ‌دار^{۳۳} و ترکیب آن با نمد سوزنی نفاخته^{۳۴}، ساختار کامپوزیتی با دو مکانیزم جذب متفاوت ایجاد کردند. این ترکیب باعث گسترش بازه جذب مؤثر، به‌ویژه در محدوده فرکانس پایین، و دستیابی به ضرایب جذب متوسط ۰/۷۰ در فرکانس پایین، ۰/۹۱ در فرکانس میانی و ۰/۸۲ در کل باند فرکانسی شد. ترکیب دو مکانیزم جذب در این ساختار کامپوزیتی، منجر به عملکرد متوازن در کل باند فرکانسی شده است. این طراحی نوآورانه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای توسعه جاذب‌های صوتی چندلایه با قابلیت تنظیم عملکرد در کاربردهای متنوع مطرح شود.

همچنین، شینگ و همکاران [۵۴] با ترکیب نانوالیاف پلی لاکتیک اسید^{۳۵} (PLA) متخلخل و نمد سوزنی PLA، کامپوزیت‌هایی با ساختار چندمقیاسی حفره‌ای تولید کردند که تغییر در زمان فیلتراسیون خلأ، ضمن کنترل ضخامت لایه، باعث جابه‌جایی پیک جذب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر شد. بهترین عملکرد در فرکانس‌های میانی، برای نمونه‌هایی با محتوای جامد نانوالیاف ۰/۷ تا ۱/۰ درصد وزنی، با ضرایب جذب ۰/۳۰ تا ۰/۳۵ در ۱۰۰۰ هرتز به دست آمد. در این پژوهش، کنترل فرآیند ساخت و محتوای نانوالیاف نقش کلیدی در تنظیم موقعیت پیک جذب ایفا کرده است. اگرچه

ضرایب جذب در فرکانس‌های میانی نسبت به برخی مطالعات دیگر کمتر بوده، اما انعطاف‌پذیری در طراحی و قابلیت تنظیم دقیق، مزیت مهمی برای کاربردهای هدفمند به‌شمار می‌رود.

این مطالعات نشان می‌دهند که طراحی ساختارهای هیبریدی با ترکیب لایه‌های نانوالیافی و مواد متخلخل درشت‌ساختار^۶، با تنظیم دقیق پارامترهایی همچون آرایش لایه‌ها، ضخامت و ویژگی‌های مورفولوژیک، می‌تواند منجر به ایجاد جاذب‌های صوتی با بازده بالا و قابلیت تنظیم عملکرد در بازه‌های فرکانسی مختلف شود.

۵. نتیجه‌گیری

مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که نانوالیاف، به دلیل سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل و قابلیت مهندسی‌پذیری، گزینه‌ای بسیار کارآمد برای بهبود عملکرد جذب صوت هستند. تحقیقات در حوزه نانوالیاف پلیمری نشان داده است که انتخاب نوع پلیمر و کنترل دقیق پارامترهای فرآیند، می‌تواند مکان و شدت پیک‌های جذب را در باندهای فرکانسی مختلف

۶. منابع

- [۱] قاجاریه، عطیه، اعظم طالبیان، و سیما حبیبی. «مروری بر کاربرد نانو الیاف در عایق‌های صوتی» دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی نساجی ایران، یزد، ۱۴۰۰.
- [2] Zhu, Shubing, Deshan Cheng, and Xiaoning Tang. "Recent advances on the fabrication and application of sound absorption coating-based textile composites." *Textile Research Journal* 94, no. 17-18 (2024): 2044-2062.
- [3] Arain, Muhammad Fahad. "Nanomaterials for enhanced acoustic properties." In *Nanotechnology to Monitor, Remedy, and Prevent Pollution*, pp. 77-83. Elsevier, 2024.
- [4] Thilagavathi, G. N. K. S., S. Neela Krishnan, N. Muthukumar, and Santhana Krishnan. "Investigations on sound absorption properties of luffa fibrous mats." *Journal of Natural Fibers* 15, no. 3 (2018): 445-451.

تغییر دهد. افزودن نانوذرات به ساختار نانوالیاف نیز به‌عنوان یک رویکرد تقویتی، امکان بهینه‌سازی پهنای باند جذب و عملکرد هدفمند در فرکانس‌های خاص را فراهم کرده است. در حوزه مواد زیست‌پایه، استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند سلولز، کلاژن و پلی لاکتیک اسید علاوه بر فراهم کردن ویژگی‌های مطلوب آکوستیکی، به توسعه محصولات پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست کمک می‌کند. این مواد، به‌ویژه زمانی که به‌صورت ساختارهای سلسله‌مراتبی طراحی شوند، می‌توانند با نمونه‌های مصنوعی رقابت کنند. همچنین، طراحی ساختارهای هیبریدی و چندلایه با ترکیب نانوالیاف و بسترهای متخلخل، از مؤثرترین روش‌ها برای دستیابی به جاذب‌های صوتی پهن‌بند با عملکرد بالا محسوب می‌شود. در مجموع، آینده توسعه مواد جاذب صوت بر پایه نانوالیاف، به سمت استفاده از رویکردهای چندمنظوره حرکت می‌کند؛ رویکردهایی که با بهره‌گیری هم‌زمان از خواص ذاتی نانوالیاف، افزودنی‌های نانوذره‌ای، منابع زیست‌پایه و طراحی‌های هیبریدی، امکان دستیابی به عملکرد بهینه، پایداری محیطی و صرفه اقتصادی را فراهم می‌سازند.

- [5] Li, Xiuhong, Yujie Peng, Youqi He, Chupeng Zhang, Daode Zhang, and Yong Liu. "Research progress on sound absorption of electrospun fibrous composite materials." *Nanomaterials* 12, no. 7 (2022): 1123.
- [6] Shao, Xiaofei, and Xiong Yan. "Sound absorption properties of nanofiber membrane-based multi-layer composites." *Applied Acoustics* 200 (2022): 109029.
- [7] Chang, Longfei, Ajuan Jiang, Manting Rao, Fuyin Ma, Haibo Huang, Zicai Zhu, Yu Zhang, Yucheng Wu, Bo Li, and Ying Hu. "Progress of low-frequency sound absorption research utilizing intelligent materials and acoustic metamaterials." *RSC advances* 11, no. 60 (2021): 37784-37800.
- [8] Puguan, John Marc C., David Brylle A. Agbayani, Ariel Jan V. Sadural, and Hern Kim. "Enhanced low frequency sound absorption of bilayer nanocomposite acoustic absorber laminated with microperforated nanofiber felt." *ACS Applied Polymer Materials* 5, no. 11 (2023): 8880-8889.
- [9] Shao, Xiaofei, and Xiong Yan. "Simulation, Measurement, and Optimization of Sound Absorption in Nanofiber Membrane Composite with a Nonwoven Material." *Polymers* 17, no. 7 (2025): 874.
- [10] Kalinova, Klara. "A nanofibrous acoustic system based on the cavity/membrane resonance principle." *Textile Research Journal* 88, no. 6 (2018): 644-653.
- [11] Zhang, Chunchun, Huiqin Li, Jixian Gong, Jiahao Chen, Zheng Li, Qiujin Li, Meilin Cheng, Xin Li, and Jianfei Zhang. "The review of fiber-based sound-absorbing structures." *Textile Research Journal* 93, no. 1-2 (2023): 434-449.
- [12] Ulrich, Tomáš, and Jorge P. Arenas. "Sound absorption of sustainable polymer nanofibrous thin membranes bonded to a bulk porous material." *Sustainability* 12, no. 6 (2020): 2361.
- [13] Tang, Xiaoning, and Xiong Yan. "Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 101 (2017): 360-380.
- [14] Cao, Leitao, Qiuxia Fu, Yang Si, Bin Ding, and Jianyong Yu. "Porous materials for sound absorption." *Composites Communications* 10 (2018): 25-35.
- [15] Zhu, Xiaodong, Birm-June Kim, Qingwen Wang, and Qinglin Wu. "Recent Advances in the Sound Insulation Properties of Bio-based Materials." *BioResources* 9, no. 1 (2014).
- [16] Bhat, Gajanan, and Magdi El Messiry. "Effect of microfiber layers on acoustical absorptive properties of nonwoven fabrics." *Journal of Industrial Textiles* 50, no. 3 (2020): 312-332.
- [17] Kalinova, Klara. "The application of nanofibrous resonant membranes for room acoustics." *Nanomaterials* 13, no. 6 (2023): 1115.
- [18] Kucukali-Ozturk, Merve, Elif Ozden-Yenigun, Banu Nergis, and Cevza Candan. "Nanofiber-enhanced lightweight composite textiles for acoustic applications." *Journal of Industrial Textiles* 46, no. 7 (2017): 1498-1510.
- [۱۹] اوحدی همدانی، عبدالرضا، و ابوالفضل حسنی بافرانی. ۱۴۰۰. «مواد متخلخل جاذب صوت بخش دوم: مکانیزم‌های جذب صوت و مدل‌سازی.» *مجله علمی صوت و ارتعاش*، پیاپی ۲۰ (پاییز و زمستان): ۳-۲۳.
- [20] Allard, Jean, and Nouredine Atalla. *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*. John Wiley & Sons, 2009.
- [21] Cox, Trevor, and Peter d'Antonio. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. CRC press, 2016.

- [22] Neuwerk, Karsten, Michael Haupt, and Götz T. Gresser. "Sound absorption by textile resonators." *Vibroengineering Procedia* 31 (2020): 103-108.
- [23] Hassan, Tufail, Hafsa Jamshaid, Rajesh Mishra, Muhammad Qamar Khan, Michal Petru, Martin Tichy, and Miroslav Muller. "Factors affecting acoustic properties of natural-fiber-based materials and composites: a review." *Textiles* 1, no. 1 (2021): 55-85.
- [24] Feng, Zhiting, and Yuanjun Liu. "The latest research status of porous sound-absorbing materials." *Journal of Polymer Engineering* 45, no. 3 (2025): 207-225.
- [25] Soltani, Parham, and Mohammad Zerrebini. "The analysis of acoustical characteristics and sound absorption coefficient of woven fabrics." *Textile Research Journal* 82, no. 9 (2012): 875-882.
- [26] Huiping, Tang, Wang Jianzhong, Ao Qingbo, and Zhi Hao. "Effect of pore structure on performance of porous metal fiber materials." *Rare Metal Materials and Engineering* 44, no. 8 (2015): 1821-1826.
- [27] Xie, Suchao, Da Wang, Zhejun Feng, and Shichen Yang. "Sound absorption performance of microperforated honeycomb metasurface panels with a combination of multiple orifice diameters." *Applied Acoustics* 158 (2020): 107046.
- [۲۸] داودآبادی، محمد؛ اصغریان جدی، علی اصغر؛ جمشیدی اوانکی، مصطفی. ۱۳۹۹. «جذب صوت پارچه‌های دو جداره حلقوی تار بر اساس ضخامت»، مجله علمی صوت و ارتعاش، ۹(۱۷)، ۱۸-۲۶.
- [29] Amares, S., E. Sujatmika, T. W. Hong, R. Durairaj, and H. S. H. B. Hamid. "A review: characteristics of noise absorption material." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 908, no. 1, p. 012005. IOP Publishing, 2017.
- [30] Ravandi, Mohammad Reza Ghotbi, Hossein Mardi, Ali Akbar Alinaghi Langari, Mostafa Mohammadian, and Narges Khanjani. "A review on the acoustical properties of natural and synthetic noise absorbents." *Open Access Library Journal* 2, no. 8 (2015): 1-11.
- [31] Dunne, R., D. Desai, and R. Sadiku. "A review of the factors that influence sound absorption and the available empirical models for fibrous materials." *Acoustics Australia* 45, no. 2 (2017): 453-469.
- [32] Muhammad, M., N. Sa'at, Hasril Naim, Mahdi Che Isa, Nik Hassanuddin Nik Yussof, and Mohd Subhi Din Yati. "The effect of air gap thickness on sound absorption coefficient of polyurethane foam." *Def ST Tech Bull* 5, no. 2 (2012): 176-187.
- [33] Koizumi, Tsujiuchi, N. Tsujiuchi, and A. Adachi. "The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers." *WIT Transactions on The Built Environment* 59 (2002): 157-166.
- [34] Shao, Xiaofei, and Xiong Yan. "Simulation, Measurement, and Optimization of Sound Absorption in Nanofiber Membrane Composite with a Nonwoven Material." *Polymers* 17, no. 7 (2025): 874.
- [۳۵] طالبیان، اعظم؛ حبیبی، سیما؛ قاجاریه، عطیه؛ علی اکبری، شیوا. ۱۴۰۳. «بررسی حذف نیکل و آهن از پساب توسط نانوالیاف پلی‌آکریلونیتریل/ترموپلاستیک پلی‌یورتان»، فصلنامه علوم و فناوری نساجی و پوشاک، ۱۳(۴)، ۱-۱۱.
- [36] Gao, Bing, Liuyang Zuo, and Baoqi Zuo. "Sound absorption properties of spiral vane electrospun PVA/nano particle nanofiber membrane and non-woven composite material." *Fibers and Polymers* 17, no. 7 (2016): 1090-1096.

- [۳۷] آذریون، حسین، الهامی، محمد رضا. ۱۴۰۱. «افت انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هوشمند پیزوالکتریک تحت امواج صوتی»، *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۱۱(۲۱), ۷۲-۴۶.
- [۳۸] کوشینا، کوشا؛ حبیبی، سیما؛ طالبیان، اعظم. ۱۳۹۷. «بررسی ریزساختار نانوالیاف ژلاتین الکترورسی شده»، *فصلنامه علوم و فناوری نساجی و پوشاک*, ۷(۱), ۱-۶.
- [39] Koosha, Kooshina, Habibi, Sima, Talebian, Aazam. 2017. "Microstructural Study of Nylon-6/Gelatin Composite Nanofibers", *Russian Journal of Applied Chemistry*, 90(10), 1640–1647
- [40] Habibi, Sima, Ghajarieh, Atieh, Ahmadi, Shervin. 2024. "A Review on Potential Applications of PLA Nanofibers", *Russian Journal of Applied Chemistry*, 97, 803–818.
- [۴۱] تقی زاده، جهان، بابازاده تبلی، رضا، تلخایی، عباس. ۱۳۹۶. «مقایسه رفتار صوتی- مکانیکی ماده مرکب پایه اپوکسی تقویت شده با لیاف شیشه و پلی پروپیلن»، *مجله علمی صوت و ارتعاش*, ۶(۱۱), ۷۷-۹۳.
- [42] Karaca, Neslihan, İlkay Özsev Yüksek, Nuray Ucar, Ayşen Önen, and Cafer Kirbaş. "Sound absorption and thermal insulation properties of composite thermoplastic polyurethane/polystyrene (TPU/PS) nanofiber web and TPU nanofiber web and PS-extracted TPU/PS microfiber web." *Journal of Industrial Textiles* 51, no. 5_suppl (2022): 7963S-7982S.
- [43] Liu, Huan, and Baoqi Zuo. "Structure and sound absorption properties of spiral vane electrospun PVA/PEO nanofiber membranes." *Applied Sciences* 8, no. 2 (2018): 296.
- [44] Huang, Chenyan, Yalong Liu, Shu Yang, Hongming Xiang, Ying Jin, Saihong Cao, and Kaikai Chen. "Fabrication and acoustic absorption properties of electrospun polyacrylonitrile nanofiber membranes." *Physica Scripta* 100, no. 2 (2025): 025902.
- [45] Hajizadeh, Roohalah, Ali Khavanin, Mohammad Barmar, Ahmad Jonidi Jafari, and Somayeh Farhang Dehghan. "Improving the sound absorption properties of flexible polyurethane (PU) foam using nanofibers and nanoparticles." *Sound Vib* 53, no. 5 (2019): 207-222.
- [46] Liu, Huan, and Baoqi Zuo. "Sound absorption property of PVA/PEO/GO nanofiber membrane and non-woven composite material." *Journal of Industrial Textiles* 50, no. 4 (2020): 512-525.
- [47] Qamoshi, Khadijeh, and Reza Rasuli. "Subwavelength structure for sound absorption from graphene oxide-doped polyvinylpyrrolidone nanofibers." *Applied Physics A* 122, no. 9 (2016): 788.
- [48] Zhou, Jing, Xianglong Li, Zhao Zhang, Teng Hou, Jingying Xu, Yaru Wang, Hao Ye, and Bin Yang. "Bio-based and bio-degradable nanofiber materials: A sustainable platform for energy, environmental, and biomedical applications." *Chemical Engineering Journal* 491 (2024): 152105.
- [49] Shen, Lu, Haoruo Zhang, Yanzhou Lei, Yang Chen, Mei Liang, and Huawei Zou. "Hierarchical pore structure based on cellulose nanofiber/melamine composite foam with enhanced sound absorption performance." *Carbohydrate Polymers* 255 (2021): 117405.
- [50] Dinesh, Hanbin Wang, and Jaehwan Kim. "Citric Acid-Crosslinked Highly Porous Cellulose Nanofiber Foam Prepared by an Environment-Friendly and Simple Process." *Global Challenges* 6, no. 11 (2022): 2200090.
- [51] Ma, Yan, Mu He, Jiakuan Wang, Fuying Ma, Hongbo Yu, Yaxian Zhou, and Shangxian Xie. "Collagen Nanofiber-Lignin Composite Sponges with Adjustable Hierarchical Pore Structure for Efficient Low-Frequency Sound Absorption." *Advanced Science* 12, no. 10 (2025): 2412583.

- [52] Kucukali Ozturk, Merve, Fatma Banu Nergis, and Cevza Candan. "Design of electrospun polyacrylonitrile nanofiber-coated nonwoven structure for sound absorption." *Polymers for Advanced Technologies* 29, no. 4 (2018): 1255-1260.
- [53] Shao, Xiaofei, and Xiong Yan. "Simulation, Measurement, and Optimization of Sound Absorption in Nanofiber Membrane Composite with a Nonwoven Material." *Polymers* 17, no. 7 (2025): 874.
- [54] Xing, Jian, Zhen Liu, Ying Shen, and Chunhong Zhu. "Design of Environmentally Friendly Sound-Absorbing Composites with Multi-scale Pore Size Based on Porous Poly(lactic acid) Nanofibers." *Fibers and Polymers* (2025): 1-10.

پی نوشت

-
- ¹ Tinnitus
² Porous absorbers
³ Resonant absorbers
⁴ Airflow resistivity
⁵ Sound absorption coefficient (SAC)
⁶ Scattering
⁷ Panel absorbers
⁸ Open-cell foam
⁹ Surface mass
¹⁰ Viscoelastic Loss
¹¹ Tortuosity
¹² Air gap
¹³ Noise Reduction Coefficient (NRC)
¹⁴ Helmholtz Resonance
¹⁵ Polymeric nanofibers
¹⁶ Thermoplastic Polyurethan (TPU)
¹⁷ Polystyrene (PS)
¹⁸ Polyvinyl Alcohol (PVA)
¹⁹ Polyethylene Oxide (PEO)
²⁰ Polyacrylonitrile (PAN)
²¹ COMSOL
²² Nanoparticle-reinforced nanofibers
²³ Polyvinylidene Fluoride (PVDF)
²⁴ Polyvinylpyrrolidone (PVP)
²⁵ Bio-based nanofibers
²⁶ Hierarchical structures
²⁷ Cellulose Nanofiber Foams
²⁸ Green crosslinking agent
²⁹ Collagen
³⁰ Lignin
³¹ Nanofiber sponges
³² Hybrid structure
³³ Microporous nanofibers (MPNM)
³⁴ Nonwoven Felt Fabric (NFF)
³⁵ Poly(lactic acid) (PLA)
³⁶ Macrostructure