

پیش‌بینی خصوصیات آکوستیک منسوج بی‌بافت با استفاده از مدل جانسون-چمپکس-آلارد و روش پرتونگاری مقطعی رایانه‌ای

پرهام سلطانی

چکیده

در این مطالعه منسوج بی‌بافت با استفاده از روش سوزن‌زنی تولید شد و جذب صوت آن با استفاده از روش لوله امیدانس دومیکروفون اندازه‌گیری شد. سپس تصاویر سه‌بعدی میکرو ساختار داخلی نمونه با استفاده از روش غیر مخرب میکرو پرتونگاری مقطعی رایانه‌ای (μCT) تهیه شد. با استفاده از روش پردازش تصویر، میکرو ساختار داخلی نمونه مورد تحلیل قرار گرفت و طول مشخصه ویسکوز و حرارتی محاسبه شد. در ادامه با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و با حل معادلات ناویر-استوکس در میکرو ساختار منسوج، مقاومت در برابر جریان سازه بی‌بافت محاسبه شد. ضریب پیچ‌وخم نیز با شبیه‌سازی نفوذ سیال و حل معادله فیک محاسبه شد. در نهایت با استفاده از مدل جانسون-چمپکس-آلارد (JCA) ضریب جذب صوت در فرکانس‌های مختلف پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و تطابق بسیار خوبی مابین نتایج مشاهده شد.

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، رشد سریع صنایع و شهرنشینی به دلیل توسعه اقتصادی باعث به وجود آمدن مشکلات زیست‌محیطی متعدد همچون آلودگی صوتی شده است. امروزه آلودگی صوتی به یک خطر بسیار جدی برای سلامت انسان مبدل شده است.

این امر منجر به افزایش آگاهی عمومی و وضع قوانین سختگیرانه دولتی برای کنترل صدا و کاهش آلودگی صوتی شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های حذف یا کاهش آلودگی صوتی استفاده از جاذب‌های صوتی است.

منسوجات بی‌بافت به دلیل هزینه تولید نسبتاً پایین، قابلیت شکل‌پذیری، ساختار داخلی حجیم و پیچیده و امکان مهندسی میکرو ساختار به‌عنوان یکی از مؤثرترین

جاذب‌های صوتی شناخته می‌شوند. بنابراین امکان پیش‌بینی خصوصیات این مواد گامی ارزشمند در طراحی مهندسی سازه‌های آکوستیک خواهد بود. مدل‌های ارائه‌شده در زمینه پیش‌بینی جذب صوت سازه‌های متخلخل را می‌توان در دو گروه مطالعات شبه تجربی و مطالعات تئوری دسته‌بندی نمود. دلانی و بازلی [۱] در سال ۱۹۷۰ با بررسی جذب صوت مجموعه وسیعی از سازه‌های لیفی متخلخل و استفاده از برازش منحنی یکی از مهم‌ترین و جامع‌ترین مدل‌های شبه تجربی در این زمینه را ارائه دادند.

در این مدل جذب صوت سازه لیفی بی‌بافت تنها تابعی از مقاومت در برابر جریان هوا در نظر گرفته شد. این مدل علیرغم سادگی، دارای دقت مطلوب در فرکانس‌های میانه و بالا می‌باشد و مهم‌ترین ضعف آن دقت کم در فرکانس‌های پایین است. به‌منظور بهبود دقت مدل در فرکانس‌های پایین، برخی از محققین همچون میکی، مخل و گری و پومپولی ضرایب هشتگانه ارائه‌شده توسط دلانی و بازلی را اصلاح نمودند.

مدل‌های تئوری به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی رفتار آکوستیک مواد ارائه شده‌اند. این مدل‌ها امکان بررسی تأثیر میکرو ساختار بر جذب صوت سازه متخلخل را فراهم می‌کنند. مدل جانسون-چمپکس-آلارد JCA یکی از جامع‌ترین مدل‌های تئوری ارائه‌شده در این زمینه است.

در این مدل که مبتنی بر مدل جانسون و همکاران است، جذب صوت علاوه بر مقاومت در برابر جریان هوا، تابعی از طول مشخصه حرارتی و ویسکوز و ضریب پیچ‌وخم است. علیرغم دقت بسیار بالای این مدل، محاسبه دقیق عوامل فوق به راحتی و با دقت بالا امکان‌پذیر نیست و مستلزم انجام آزمایش‌های تجربی متعدد و زمانبر است. در سال‌های اخیر روش تصویربرداری غیر تخریبی پرتونگاری مقطعی رایانه‌ای (μCT) که نوع خاصی از سی‌تی‌اسکن است،

کاربردهای بسیار فراوانی در بررسی میکرو ساختار مواد یافته است. این روش امکان





با رزولوشن ۱ / ۲ میکرومتر انجام گرفت.

۳. ارائه مدل

ابتدا تصاویر سه بعدی در محیط نرم افزار آویزو و با استفاده از المان های شش وجهی مش زنی شدند. به منظور اعمال شرایط مرزی شرط عدم لغزش در سطوح ایلیاف اعمال شد.

در چهار وجه تصویر که موازی با جهت جریان هوا می باشند با اضافه نمودن یک صفحه به ضخامت یک و کسل از جنس فاز جامد، سامانه کاملاً ایزوله گردید. در سطوح تصویر که بر جهت جریان عمود می باشند، شرایط مرزی به گونه ای اعمال شد که یک ناحیه پایا تحت فشار شبه استاتیک ایجاد گردد.

به این منظور در سطح خروجی، فشار استاندارد اتمسفر اعمال گردید. در راستای عبور جریان اختلاف فشار ثابت ۵۰ پاسکال در دو سمت نمونه اعمال شد. برای سیال شرایط تراکم ناپذیر، نیوتونی و جریان آرام و پایا در نظر گرفته شد. در چنین شرایطی معادلات استوکس (روابط ۱ و ۲) برقرار می باشد:

$$\nabla p = \mu \Delta \vec{u}$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

در این رابطه μ بردار سرعت، μ گرانیوی دینامیک سیال و p فشار سیال می باشند. با حل روابط فوق سرعت سیال محاسبه گردید و سپس با استفاده از رابطه ۳ مقاومت در برابر جریان هوا محاسبه شد:

$$\sigma = \frac{\Delta p}{v T}$$

در این رابطه مقاومت Σ در برابر جریان هوا، Δp افت فشار، v سرعت سیال و p ضخامت منسوج است.

شکل ۱ تصویر شبیه سازی عبور جریان در منسوج بی بافت را نشان می دهد. به منظور محاسبه ضریب پیچ و خم، با شبیه سازی نفوذ سیال و حل معادله فیک رابطه ۴ مقدار ضریب پیچ و خم محاسبه شد:

$$J = - \frac{\epsilon}{t^2} D \nabla c$$



شکل ۲- شبیه سازی نفوذ سیال



شکل ۱- شبیه سازی عبور سیال

در این رابطه J شار نفوذ، ϵ تخلخل سازه، t ضریب پیچ و خم، D ضریب نفوذ و c گرادیان غلظت است.

به این منظور گرادیان غلظت بین صفحه ورود و خروج اعمال گردید و در این دو صفحه از شرایط مرزی Dirichlet استفاده شد. در سایر وجوه تصویر شرایط تقارن اعمال شد. شکل ۲ شبیه سازی نفوذ سیال در ساختار را نشان می دهد.

به دست آوردن ساختار سه بعدی مواد با دقت ۵ / ۰ رزولوشن را فراهم می نماید. در این مطالعه با استفاده از این روش، میکرو ساختار منسوج بی بافت به دست آمده و سپس با استفاده از روش عددی حجم محدود مقاومت در برابر جریان هوا در منسوجات به دست می آید.

ضریب پیچ و خم نیز با شبیه سازی نفوذ سیال و حل معادله فیک محاسبه می شود. در نهایت با استفاده از مدل JCA ضریب جذب صوت در فرکانس های مختلف پیش بینی خواهد شد.

۲. تجربیات

۲.۱. تولید منسوج بی بافت

الیاف حلاجی شده پلی استر با ظرافت ۳ دنیر و طول ۷۵ میلیمتر به یک ماشین کار دینگ آزمایشگاهی مجهز به سامانه رندومایزر تغذیه شدند. تار عنکبوتی های تولید شده سپس به یک ماشین کراسلپر آزمایشگاهی تغذیه شده و لایه مرکب تولید شد.

لایه مرکب بلافاصله پس از خروج از ماشین کراسلپر تحت تأثیر عملیات سوزن زنی با ترکم سوزن زنی ۸۰ سوزن بر سانتیمتر مربع قرار گرفت.

ضخامت نمونه با استفاده از استاندارد ASTM D57۳۹-۹۷ برابر با ۳ سانتیمتر اندازه گیری شد. اندازه گیری جذب صوت نمونه ها با استفاده از دستگاه لوله امپدانس دومیکروفونه BSWA مدل SW۴۲۰-۴۷۰ طبق استاندارد

ASTM E۱۰۵۰ در دانشگاه تربیت مدرس اندازه گیری شد. برای فرکانس های ۶۳ تا ۸۰۰ هرتز از لوله امپدانس به قطر ۱۰۰ میلیمتر و برای فرکانس های ۸۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز از لوله امپدانس به قطر ۳۰ میلیمتر استفاده شد. نمونه در داخل لوله امپدانس و بر روی صفحه فلزی قرار گرفت. صوت در فرکانس های مختلف توسط بلندگویی که در یک سمت لوله قرار دارد منتشر شده و توسط آمپلی فایر تقویت می شود.

صوت به نمونه برخورد کرده، قسمتی از آن جذب و قسمت دیگر از سطح نمونه منعکس می شود. میکروفون نزدیک به منبع صوت فشار امواج برخوردی و میکروفون دیگر برهمکنش بین امواج برخوردی و منعکس شده را اندازه گیری میکند. این اطلاعات وارد سیستم داده بردار شده و جذب صوت نمونه برای هر فرکانس تعیین می شود.

۲.۳. پرتونگاری مقطعی رایانه ای

به منظور تصویربرداری سه بعدی از داخل نمونه، از دستگاه μ CT فونیکس در دانشگاه لیدز انگلستان استفاده شد. نمونه بین منبع پرتو ایکس و آشکارساز قرار گرفت و تصویربرداری از صفر تا ۳۶۰ درجه در گام های ۵ / ۰ درجه صورت گرفت. پرتو ایکس با عبور از نمونه با توجه به چگالی جرمی و عدد مؤثر نمونه، تضعیف می شود. شدت پرتو تضعیف شده توسط آشکارساز اندازه گیری شده و سپس نتایج به رایانه ارسال می شود. رایانه علائم رسیده از آشکارساز را تحلیل کرده و تصویر را بازسازی می کند.

این تصویر برای ارزیابی های بعدی به صورت مجموعه ای از تصاویر دوبعدی ذخیره شد. در مرحله بعد پس از انجام مراحل مختلف پردازش تصویر و قرار دادن تصاویر بر روی یکدیگر تصویر سه بعدی منسوج به دست آمد. در این مطالعه تصویربرداری



در روابط فوق $\rho(\omega)$ چگالی دینامیک سیال، $K(\omega)$ مدول حجمی سیال، ρ_0 چگالی هوا، ω فرکانس زاویه‌ای، k نسبت حرارت مخصوص، N_{pr} عدد پراتنل، Z_c امپدانس مشخصه، K_c عدد موج مختلط، Z_s امپدانس سطح، c_0 سرعت صوت، R ضریب انعکاس صوت و a ضریب جذب صوت می باشند و سایر عوامل مشابه قبل تعریف می شوند.

۴. نتایج

شکل ۳ نتایج جذب صوت حاصل از مدل و نتایج آزمایشگاهی را در فرکانسهای مختلف نشان می دهد.

نتایج بیانگر تطابق بسیار خوب مابین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل است. همچنین مشاهده می شود، در فرکانسهای پایین جذب صوت ناچیز است و با افزایش فرکانس تا ۲۵۰۰ هرتز جذب افزایش می یابد.

با افزایش بیشتر فرکانس جذب صوت تا حدود ۸۴٪ کاهش یافته و مجدداً افزایش می یابد. این امر به دلیل پدیده تطابق صوت برخوردی و انعکاسی است که باعث افزایش فشار صوت و در نتیجه کاهش جذب می شود. این نتایج بیانگر این است که مکانیزم جذب در منسوج مورد مطالعه از نوع جذب ویسکوزیته است.

۵. نتیجه گیری

این مطالعه به ارائه مدلی جدید به منظور پیش بینی جذب صوت منسوجات بی بافت پرداخت. تصویر سه بعدی منسوج با استفاده از روش میکرو پرتونگاری مقطعی رایانه‌ای به دست آمد. با شبیه سازی عبور جریان سیال در ساختار سه بعدی، مقدار مقاومت در برابر جریان محاسبه شد. با شبیه سازی نفوذ سیال مقدار ضریب پیچ و خم محاسبه شد. همچنین طول مشخصه حرارتی و ویسکوز با استفاده از روش پردازش تصویر محاسبه گردید. در نهایت ضریب جذب صوت در فرکانسهای مختلف با استفاده از مدل جانسون چمپکس آلارد پیش بینی شد. نتایج با نتایج حاصل از اندازه گیری به روش آزمایشگاهی مقایسه شد و تطابق بسیار خوبی مابین نتایج به دست آمد.

پی نوشت

۱- دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی اصفهان

$$\rho(\omega) = t\rho_0 \left[1 + \frac{\sigma\varepsilon}{j\omega\rho_0 t} \left(1 + \frac{4it^2\mu\omega\rho_0}{(\sigma\Lambda\varepsilon)^2} \right)^{1/2} \right]$$

$$K(\omega) = k\rho_0 \left(k - (k-1) \left[1 + \frac{\sigma'\varepsilon}{i\omega\rho_0 t N_{pr}} \left(1 + \frac{4it^2\mu}{\sigma'} \right) \right] \right)$$

$$\sigma' = \frac{8\mu t}{\Lambda^2 \varepsilon}$$

$$Z_c = \sqrt{\rho(\omega) \cdot K(\omega)}$$

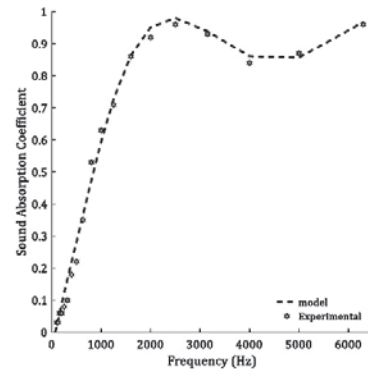
$$K_c = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}}$$

$$Z_s = -iZ_c \cot(K_c \cdot T)$$

$$R = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0}$$

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

طول مشخصه ویسکوز Λ و طول مشخصه حرارتی Λ' با استفاده از پردازش تصویر سه بعدی در محیط نرم افزار آویزو محاسبه شد. شرح کامل نحوه محاسبه در مطالعه اخیر نویسنده بیان شده است. پس از محاسبه عوامل فوق، ضریب جذب در فرکانسهای مختلف با استفاده از مدل JCA محاسبه شد:



شکل ۳- ضریب جذب صوت آزمایشگاهی و پیش بینی شده در فرکانسهای مختلف

