



## بررسی خواص صوتی قطعات با ساختار متخلخل درجه‌بندی شده چاپ شده با روش ساخت رشته ذوبی

رضا نویدپور<sup>۱</sup>، طاهر ازدست<sup>۲\*</sup>، رزگار حسن‌زاده<sup>۳</sup>، میلاد مرادیان<sup>۴</sup>، پیمان میهن‌خواه<sup>۵</sup>

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۴- فارغ‌التحصیل دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۵- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: t.azdast@urmia.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲ تیر ۱۴۰۳  
پذیرش: ۳۱ تیر ۱۴۰۳

### کلیدواژگان:

خواص صوتی  
چاپگر سه بعدی  
تخلخل  
ساختار متخلخل  
کاهش نویز

خواص آکوستیک متاثر از هندسه ماده جاذب صوت بوده و می‌توان با طراحی مناسب جاذب و کنترل دقیق ابعاد منافذ آن عملکرد صوتی ماده جاذب صوت را بهبود بخشید. در تحقیق حاضر بررسی خواص جذب صوتی قطعات چاپ شده با چاپگر سه بعدی نوع ساخت رشته ذوبی با ساختار متخلخل درجه‌بندی شده در دستورکار قرار گرفت و نمونه‌های استوانه‌ای در دو قطر ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر و با چگالی‌های پرشدن ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد به عنوان قطعات متخلخل یکنواخت و نمونه‌هایی با ساختار متخلخل درجه‌بندی شده با چگالی‌های پرشدن ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد به صورت یکپارچه چاپ شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قطعات با ساختار متخلخل درجه‌بندی شده نسبت به نمونه‌ها با اندازه منافذ یکنواخت، جذب صوت بالاتری دارد. همچنین در فرکانس‌های بالا، نمونه‌ها با چگالی پر شدن پایین‌تر (تخلخل بیشتر) و در فرکانس پایین، نمونه‌های با چگالی پر شدن بالاتر (تخلخل کمتر) ضریب جذب صوتی بالاتری دارند. به طور کلی نتایج نشان داد که با انتخاب صحیح درصد تخلخل و اندازه منافذ و ترکیب درست آن‌ها در ساختار درجه‌بندی شده و همچنین جهت قرارگیری مناسب آن‌ها نسبت به منابع صوتی، می‌توان به درصدهای بالای جذب صوت و ضریب کاهش نویز توسط آن‌ها دست یافت.

## Acoustic characterization of functionally graded porous structures parts fabricated via fused filament fabrication

Reza Navidpour<sup>1</sup>, Taher Azdast<sup>2\*</sup>, Rezgar Hasanzadeh<sup>3</sup>, Milad Moradian<sup>4</sup>, Peyman Mihankhah<sup>5</sup>

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

4- PhD Graduate, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

5- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

\* Corresponding Author's Email: t.azdast@urmia.ac.ir

### Article Information

### Original Research Paper

Received: 22 June 2024

Accepted: 21 July 2024

### Keywords:

Acoustic Properties  
FFF 3D Printing  
Porosity  
Porous Structure  
Noise Reduction

### Abstract

Acoustic properties of sound-absorbing materials are influenced by their geometry, and sound performance can be enhanced through proper absorber design and precise control of pore dimensions. This study examines the sound absorption properties of parts printed using a fused filament fabrication (FFF) 3D printer with a functionally graded porous structure. Cylindrical samples with diameters of 100 mm and 30 mm, a thickness of 30 mm, and uniform infill densities of 70%, 80%, and 90%, as well as samples with functionally graded porous structures with infill densities of 70%, 80%, and 90%, were printed. The test results demonstrated that samples with functionally graded porous structures exhibited higher sound absorption than those with uniform pore sizes. Additionally, at high frequencies, samples with lower infill density (higher porosity) showed greater sound absorption, while at low frequencies, samples with higher infill density (lower porosity) had a higher sound absorption coefficient. Overall, the findings suggest that selecting the appropriate porosity percentage, pore size, and their optimal combination in the graded porous structure, along with proper placement relative to sound sources, can achieve high levels of sound absorption and noise reduction.

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Navidpour R, Azdast T, Hasanzadeh R, Moradian M, Mihankhah P. Acoustic characterization of functionally graded porous structures parts fabricated via fused filament fabrication. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Sep 22;11(7):27-34. doi: 10.22034/ijme.2024.464240.1975 [In Persian]

## ۱- مقدمه

آلودگی صوتی صدای بیش از حد ناخواسته‌ای است که از نظر روانی و فیزیولوژیکی موجودات زنده به ویژه انسان را تحت تأثیر قرار داده و باعث بروز مشکلات قلبی، فشارخون، استرس، اختلال خواب و تضعیف سیستم شنوایی می‌شود. بنابراین، به منظور کاهش پیامدهای آلودگی صوتی بر سلامت انسان و همچنین کنترل امواج صوتی در صنایع مختلف، نیاز به ساختارهایی با قابلیت جذب صوت کارآمد بیش از پیش احساس می‌شود [۱، ۲]. در سال‌های اخیر استفاده از فرایند فوم و ایجاد تخلخل در قطعات پلیمری برای تولید قطعات با عملکرد جذب صوت بهتر به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است. وجود تخلخل در زمینه پلیمری و در نتیجه هوای محبوس شده در آن باعث جذب صوت بیشتر قطعه مورد نظر می‌شود. اما یکی از عوامل غیر قابل کنترلی که این روش دارد، عدم کنترل درصد تخلخل و اندازه منافذ می‌باشد [۳-۵]. با استفاده از چاپگرهای سه بعدی علاوه بر اینکه می‌توان کنترل دقیقی روی اندازه منافذ و میزان تخلخل قطعات جاذب صوت داشت، می‌توان قطعات با شکل هندسی پیچیده و با قابلیت تکرار پذیری بالا به منظور استفاده در صنایعی نظیر هوا و فضا و دفاعی را تولید نمود. برای این منظور از انواع چاپگرهای سه بعدی می‌توان استفاده نمود که روش ساخت رشته ذوبی به دلیل دارا بودن مزایایی چون دقت و سرعت بالا، استفاده آسان و ضایعات کم و مقرون به صرف بودن، محبوبیت بیشتری دارد. در روش ساخت رشته ذوبی، یک رشته پیوسته به نام فیلامنت از یک نازل گرم عبور کرده و مواد ذوب شده بر اساس یک الگوی از پیش تعیین شده بر روی یک بستر قرار می‌گیرد و در نهایت داربست با طراحی مورد نظر چاپ می‌شود [۶-۸].

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی قابلیت جذب صدا در انواع مختلف مواد متخلخل با اشکال نوآورانه انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به تحقیق جانستون و همکاران اشاره نمود که رابطه بین پارامترهای چاپ و رفتار جاذب‌های ساخته شده با روش ساخت رشته ذوبی را بررسی نمودند، نتایج نشان داد که می‌توان با تغییر مناسب پارامترهای چاپ، ویژگی‌های صوتی را تنظیم کرد [۹]. واسینا و همکاران [۱۰] بررسی جذب صوت قطعات متخلخل از جنس آکریلونیتریل بوتادین استایرن چاپ شده با روش ساخت رشته ذوبی پرداختند. مشخص شد که ویژگی‌های جذب صدا نمونه‌های آزمایش شده به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عواملی چون نوع ساختار مواد متخلخل (الگوی چاپ نمونه‌ها توسط چاپگر سه بعدی)، فرکانس تحریک و ضخامت نمونه در داخل لوله امپدانس آکوستیک می‌باشد. مونکوا و همکاران [۱۱] نیز عملکرد بازتاب صوت قطعات چاپ شده از جنس پلی لاکتیک اسید با ساختار سلول باز و با چهار نوع ساختار متخلخل مختلف دکارتی، هشت ضلعی، لوزی و ستاره‌ای را بررسی نمودند. مشخص شد که خواص انعکاس صدا در نمونه‌های پلی لاکتیک اسید مورد مطالعه، نه تنها تحت تأثیر نوع ساختار چاپ سه بعدی، بلکه تحت تأثیر تخلخل حجمی و ضخامت نمونه‌ها قرار می‌گیرد. نمونه‌های تولید شده با ساختار ستاره‌ای، انعکاس صدای کمتری را در مقایسه با سایر ساختارهای مورد بررسی از خود نشان دادند. این امر ناشی از اشکال پیچیده‌تر منافذ ساختار ستاره‌ای بود که منجر به مقاومت جریان هوای بالاتر در طول انتشار امواج در این ساختار و متعاقباً تبدیل کارآمدتر انرژی صوتی به گرما می‌شود. با توجه به پتانسیل‌های ذکر شده، چاپگرهای سه بعدی می‌توانند تا حد زیادی ساخت هندسه‌های پیچیده را امکان‌پذیر کرده و تولید ساختارهای صوتی موثر را بهینه کنند.

در حالت کلی جذب نویز فرکانس متوسط و پایین به دلیل طول موج بیشتر و قدرت نفوذ بالاتر آن‌ها، با استفاده از مواد متخلخل سنتی، دشوار می‌باشد و به منظور پوشش محدوده فرکانسی وسیع‌تر، نیاز به ساختارهایی با قابلیت جذب صوتی کارآمد بیش از پیش احساس می‌شود. مواد متخلخل مانند فوم‌ها و پشم‌ها ضرایب جذب بالایی را در فرکانس‌های بالا دارند، در حالی که در فرکانس‌های پایین عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهند [۱۲] از طرفی نیز، به خاطر ویژگی ذاتی امواج صوتی با فرکانس پایین، نیاز به جاذب‌هایی با ضخامت خیلی زیاد خواهد بود. بنابراین در تحقیق حاضر برای رسیدن به جذب حداکثری با ضخامت کم و در گستره فرکانسی بزرگ‌تر، ساختار متخلخل درجه‌بندی شده طراحی و توسط چاپگر سه بعدی ساخته شده و ضریب جذب صوتی نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه لوله امپدانس ارزیابی شد. همچنین از آنجایی که بیشتر مواد پلاستیکی مانند پلی اتیلن، پلی پروپیلن و پلی وینیل کلراید از منابع فسیلی (غیرقابل تجدید) مشتق می‌شوند، تجزیه آن‌ها در محیط زیست بسیار زمان‌بر بوده و تهدیدی جدی برای محیط زیست و سلامتی انسان محسوب می‌شوند. در نتیجه تحقیقات برای توسعه پلاستیک‌های جدید مشتق شده از منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست متمرکز شده است که پلی لاکتیک اسید یکی از این پلاستیک‌ها می‌باشد. ماده اولیه آن نشاسته بوده و علاوه بر زیست تخریب‌پذیری دارای خواص مطلوب دیگری از جمله استحکام مکانیکی بالا، غیر سمی بودن و پرکاربرد بودن در روش ساخت رشته

ذوبی می باشد. این تحقیق طراحی و ساخت مواد جذب صوتی متخلخل با اندازه منافذ درجه بندی شده از پلی لاکتیک اسید را با روش ساخت رشته ذوبی جهت جذب امواج صوتی در محدوده فرکانسی گسترده فراهم می کند.

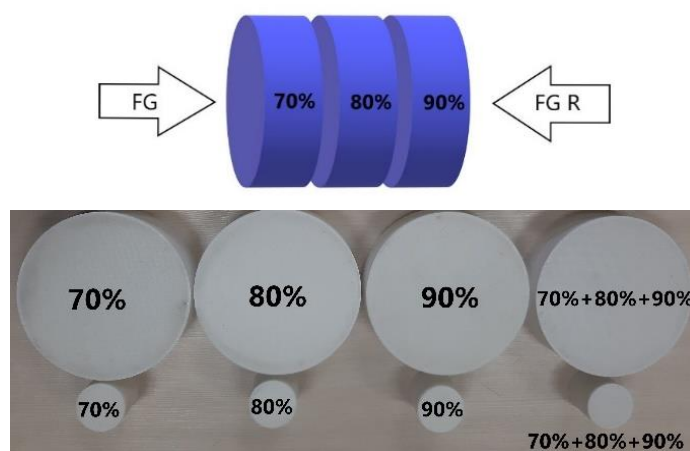
## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا نمونه ها با نرم افزار کتیا مدل سازی و با استفاده از چاپگر سه بعدی مدل Ender-3 V2 شرکت کرلیتی در سه چگالی پر شدن متفاوت (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد) و در دو قطر ۳۰ و ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۱۰۰ میلی متر چاپ شدند (شکل ۱). برای این منظور از فیلامنت پلی لاکتیک اسید شرکت یو سو با قطر ۱،۷۵ میلی متر و محدوده دمایی ۱۹۰ تا ۲۲۵ درجه سانتی گراد برای چاپ نمونه ها استفاده شد. در جدول ۱ مقادیر تنظیمات چاپ نمونه ها ذکر گردیده است.

جدول ۱ پارامترهای چاپ نمونه ها برای چاپگر سه بعدی

پارامتر چاپ	واحد	مقدار تنظیمی
دمای چاپ	درجه سانتی گراد	210
دمای صفحه چاپ	درجه سانتی گراد	60
سرعت چاپ	میلی متر بر ثانیه	30
الگوی چاپ	-	مسطحی
قطر نازل	میلی متر	0.4
ارتفاع لایه	میلی متر	0.2

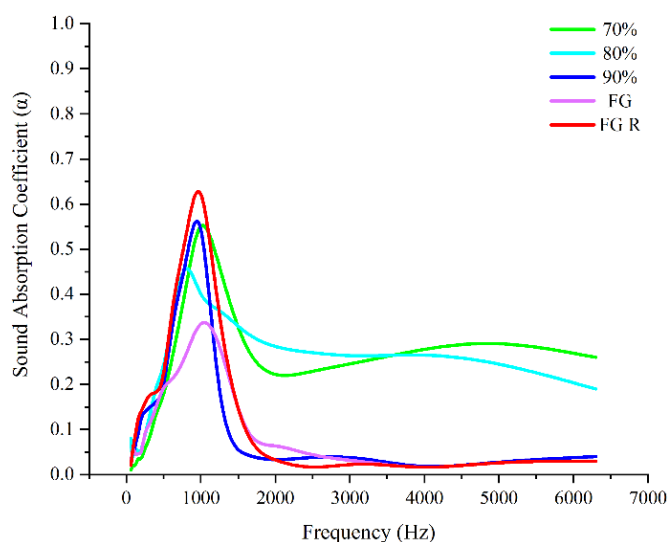
جهت بررسی اثر ساختار سلسله مراتبی اندازه منافذ، نمونه هایی با ساختار درجه بندی شده با ترتیب ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد، در دو قطر ۳۰ و ۱۰۰ میلی متر به صورت یکپارچه چاپ شدند. ضریب جذب صوت نمونه ها با استفاده از دستگاه لوله امپدانس ساخت شرکت BSWA و با استفاده از روش تابع انتقال به طور دقیق اندازه گیری شد. این دستگاه شامل دو لوله بزرگ و کوچک است، که لوله با قطر ۱۰۰ میلی متر برای اندازه گیری در فرکانس های پایین و لوله با قطر ۳۰ میلی متر برای فرکانس های بالا استفاده می شود. همچنین برای بررسی تاثیر جهت برخورد امواج صوتی (ترتیب لایه های با تخلخل متفاوت) بر ضریب جذب صوتی، نمونه های با چگالی ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد که هنگام آزمایش قسمت ۷۰ درصد آن در طرف منبع صوتی قرار گرفت به صورت FG نامگذاری شد. منظور از FGR نیز حالت بر عکس قرارگیری این نمونه ها در دستگاه لوله امپدانس بود، بطوریکه قسمت ۹۰ درصد در آن ها در طرف منبع صوتی قرار داشت.



شکل ۱ نمونه های چاپ شده با چگالی های متفاوت و نمونه های با ساختار متخلخل درجه بندی شده

## ۳- نتایج و بحث

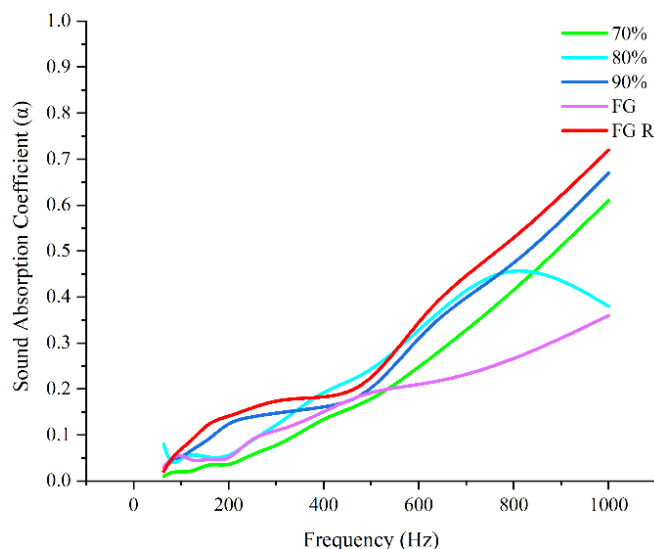
در شکل ۲ ضریب جذب صوتی برای سه نمونه با چگالی‌های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد در بازه فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز ارائه گردیده است. بر اساس نتایج آزمایش، در بین نمونه‌های با چگالی یکنواخت، بیشترین ضریب جذب صوتی برای نمونه ۹۰ درصد، مقدار ۰،۵۷ و در فرکانس ۱۰۰۰ هرتز حاصل گردید. با توجه به نمودار به طور کلی می‌توان استنباط نمود که نمونه‌ها با چگالی پر شدن بالاتر (تخلخل کمتر) در فرکانس‌های پایین و نمونه‌ها با چگالی پر شدن پایین‌تر (تخلخل بیشتر) در فرکانس‌های بالاتر ضریب جذب صوت بیشتری دارند که مطابق با نتایج کار ليو و همکاران [۱۳] می‌باشد. به طور کلی جذب صوت در مواد متخلخل به صورت عوامل اتلافی شامل اثر هدایت حرارتی، اثر ویسکوزیته و میرایی سازه‌ای تقسیم بندی می‌شود. هنگامی که لایه هوا در مجاورت سطح پلیمر حرکت می‌کند، بین این دو لایه به وسیله ویسکوزیته نیروی عکس‌العملی به وجود می‌آید که این نیرو در جهت خلاف جابه‌جایی بوده و سعی در میرا کردن موج ایجاد شده دارد. در فرکانس‌های پایین با افزایش چگالی پر شدن (ریزتر شدن منافذ) ضخامت لایه مرزی ویسکوز در مقایسه با قطر منافذ قابل توجه و موثرتر بوده و در نتیجه به دلیل مقاومت جریان بالا ناشی از منافذ کوچک اتلاف ویسکوز افزایش یافته و باعث افزایش میزان جذب صوت می‌شود. در واقع ضریب جذب صوت به دلیل برهمکنش‌های متفاوت بین امواج صوتی و ساختار مواد در فرکانس‌های پایین و بالا با تخلخل متفاوت است. در فرکانس‌های پایین، امواج صوتی دارای طول موج‌های بلندتری هستند که به عمق مواد نفوذ می‌کنند، جایی که کاهش تخلخل باعث افزایش تلفات ویسکوز و بهبود تطابق امپدانس می‌شود و جذب صدا را افزایش می‌دهد. برعکس، در فرکانس‌های بالا، با طول موج‌های کوتاه‌تر، کاهش تخلخل منجر به تلفات حرارتی بیشتر، افزایش پراکندگی و بازتاب‌های متعدد و افزایش اثرات تشدید می‌شود که همگی به جذب صدا بیشتر کمک می‌کنند. این رفتار بر رابطه پیچیده بین ساختار متخلخل متفاوت و دینامیک امواج صوتی در محدوده‌های فرکانس مختلف تاکید می‌کند. همچنین در شکل ۲ نشان داده شد که نمونه‌های FGR ضریب جذب صوت ۰،۶۵ دارد در حالی که در بین نمونه‌های با چگالی پر شدن یکنواخت بیشترین ضریب جذب صوت برای نمونه‌هایی با چگالی ۹۰ درصد داشت که کمتر از ۰،۶ بود.



شکل ۲ مقایسه ضریب جذب صوت نمونه‌ها با چگالی یکنواخت ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد با نمونه‌ها با ساختار درجه‌بندی شده در محدوده فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز

در شکل ۳ مقایسه ضریب جذب صوت نمونه‌ها با ساختار متخلخل یکنواخت و همچنین درجه‌بندی شده در فرکانس‌های ۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز با همدیگر به تصویر کشیده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌های FGR دارای ضریب جذب صوت بالاتری نسبت به نمونه‌های با چگالی‌های پر شدن ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد می‌باشند. سازه‌های درجه‌بندی شده چاپ سه بعدی به دلیل امپدانس صوتی مناسب، خواص عایق صوتی برتری را در مقایسه با نمونه‌هایی با ساختار تخلخل یکنواخت نشان می‌دهند. سازه‌های درجه‌بندی شده از تنوع استراتژیک در تخلخل و ترکیب مواد استفاده می‌کنند که امکان تغییر تدریجی امپدانس صوتی در سراسر ساختار را فراهم

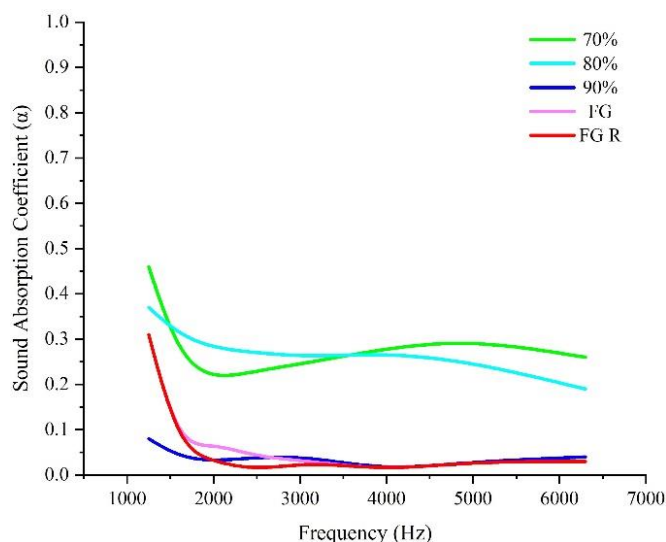
می‌کند. این گرادیان با به حداقل رساندن بازتاب صدا و عدم تطابق امپدانس، جذب امواج صوتی را در فرکانس‌های مختلف افزایش می‌دهد. در مقابل، ساختارهای با تخلخل یکنواخت ممکن است سطح متناسبی از سفارشی‌سازی را ارائه نکنند، که منجر به عملکرد آکوستیکی ضعیف‌تری می‌شود، زیرا ممکن است محدوده فرکانسی وسیعی را پوشش ندهند.



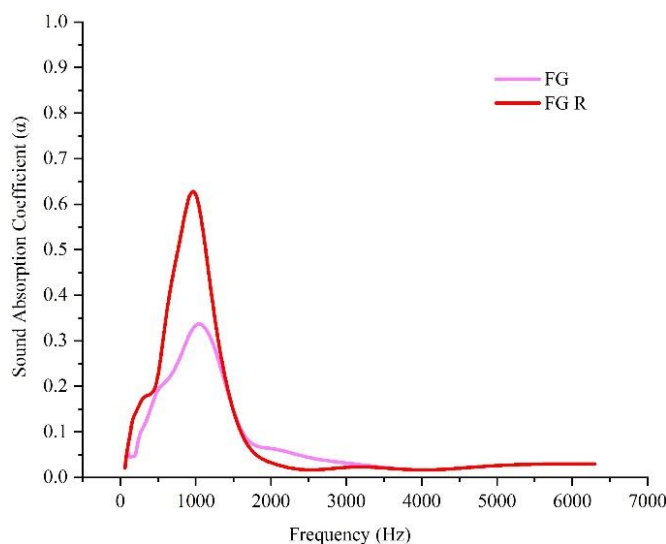
شکل ۳ مقایسه ضریب جذب صوت نمونه‌ها با چگالی یکنواخت ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد با نمونه‌ها با ساختار درجه‌بندی شده در محدوده فرکانسی ۶۳ تا ۱۰۰۰ هرتز

در شکل ۴ ضریب جذب صوت نمونه‌ها با چگالی پر شدن ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد با نمونه‌های دارای ساختار متخلخل درجه‌بندی شده در محدوده فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز مقایسه شد. کاهش ضریب جذب صدا با ساختار متخلخل درجه‌بندی شده در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز را می‌توان به عدم تطابق بین مقیاس مشخصه ساختار متخلخل درجه‌بندی شده و طول موج صوتی با فرکانس بالا نسبت داد. در آکوستیک، کارایی جذب صدا تحت تأثیر نسبت اندازه مشخصه ماده جاذب به طول موج صدای فرودی است. در فرکانس‌های بالاتر، جایی که طول موج‌ها کوتاه‌تر هستند، ویژگی‌های مشخصه ساختار متخلخل درجه‌بندی شده ممکن است به طور مؤثری با امواج صوتی تعامل نداشته باشند. به عبارتی دیگر مقیاس ساختار ممکن است نسبت به طول موج نسبتاً بزرگتر باشد، که منجر به جذب کمتر و به طور بالقوه ایجاد انعکاس می‌شود. علاوه بر این، خواص مواد و توزیع تخلخل بهینه شده برای فرکانس‌های پایین‌تر ممکن است برای جذب صدا در محدوده فرکانس‌های بالاتر موثر نباشد. بنابراین، عدم تطابق در مقیاس و خواص بهینه می‌تواند به کاهش ضریب جذب صدا برای سازه‌های متخلخل درجه‌بندی شده در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز کمک کند. در نمونه‌های با چگالی پر شدن ۷۰ و ۸۰ درصد، با توجه به طول موج کوتاه‌تر امواج با فرکانس بالا، کاهش چگالی پر شدن نفوذ امواج صوتی را به درون ساختار نمونه تسهیل می‌کند و هوای داخل حفره‌ها به راحتی می‌تواند حرکت کند، که این باعث افزایش اصطکاک ویسکوز شده و در نهایت، باعث تضعیف انرژی امواج صوتی و جذب بیشتر صدا (در فرکانس‌های بالاتر) می‌شود.

شکل ۵ اثر تفاوت جهت برخورد امواج صوتی بر روی جذب صوتی نمونه‌ها با ساختار درجه‌بندی شده را نشان می‌دهد. جهت قرارگیری نمونه‌ها با ساختار درجه‌بندی شده نسبت به منبع صوت، ضریب جذب صوتی متفاوتی را ارائه می‌دهد. بیشترین ضریب جذب صوت بین نمونه‌های درجه‌بندی شده برای نمونه FGR حاصل شد. این نشان می‌دهد که دامنه فرکانسی متناسب برای جذب صوت نمونه‌های FG و FGR در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ هرتز می‌باشد. مشابه مطالعه چوآ و همکاران [۱۴] قرار گرفتن لایه با اندازه منافذ بزرگتر در پشت لایه با اندازه منافذ کوچک‌تر، اثرات رزونانس ماندنی را ایجاد می‌کند که تمایل به افزایش ضریب جذب صدا در فرکانس‌های پایین‌تر دارد. همچنین با قرار گرفتن منافذ بزرگتر (۷۰ درصد) در نزدیکی منبع صدا، نمونه FG در فرکانس‌های پایین جذب بسیار کمتری دارد. به عبارت دیگر، عملکرد جذب صدا در فرکانس‌های پایین‌تر معمولاً زمانی افزایش می‌یابد که بزرگترین اندازه منافذ در دورترین فاصله از منبع صدا قرار گیرد [۱۴]. بنابراین با در نظر گرفتن جهت قرارگیری مناسب ساختارهای FG می‌توان عملکرد جذب صدا را در یک محدوده فرکانسی خاص بهبود بخشید.



شکل ۴ مقایسه ضریب جذب صوت نمونه‌ها با چگالی پر شدن ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد با نمونه‌ها با ساختار درجه بندی شده در محدوده فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۶۳۰۰ هرتز

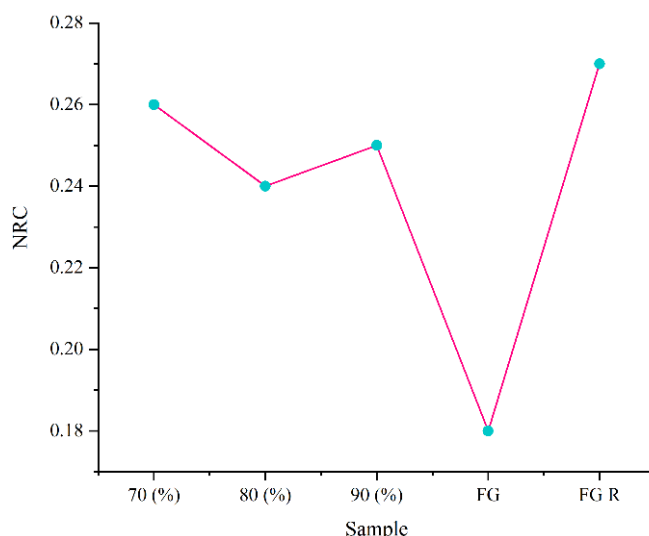


شکل ۵ تاثیر جهت برخورد امواج بر جذب صوتی نمونه‌ها با ساختار متخلخل درجه بندی شده در محدوده فرکانسی ۶۳ تا ۶۳۰۰ هرتز

بر اساس استاندارد ISO 11654، عملکرد جذب صدا با استفاده از ضریب کاهش نویز<sup>۱</sup> طبقه بندی می‌شود. ضریب جذب صدا که به عنوان میانگین در فرکانس‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز تعیین می‌شود، امکان ارزیابی جامع را فراهم کرده و مقایسه بین مواد مختلف را تسهیل می‌کند. با بررسی نتایج شکل ۶، مشهود است که در بین نمونه‌هایی با منافذ یکنواخت، نمونه‌هایی با منافذ بزرگتر (۷۰ درصد) ضریب جذب صوت بالاتری نسبت به نمونه‌هایی با منافذ کوچکتر نشان می‌دهند. این در واقع به افزایش نفوذ امواج با فرکانس بالا، به ویژه در محدوده فرکانسی بررسی شده مربوط می‌شود. در حالی که نمونه‌های ۸۰ و ۹۰ درصد کاهش ضریب جذب صدا را نشان می‌دهند که با کاهش اندازه منافذ نمونه‌ها ارتباط مستقیم دارد. ساختار FG که با سوراخ‌های بزرگتر رو به منبع صدا مشخص می‌شود، عملکرد ضعیف جذب صدا را در محدوده فرکانس مورد نظر نشان می‌دهد. این با ماهیت امواج صوتی مطابقت دارد، و مشابه کارهای تجربی صورت گرفته، قرار گرفتن سوراخ‌های بزرگتر به سمت منبع صدا باعث عملکرد پایین‌تر می‌شود. ضریب کاهش نویز که نشان دهنده میانگین جذب در فرکانس‌های مختلف است، نشان می‌دهد که نمونه FGR بالاترین ضریب جذب را دارد. این با مطالعات قبلی که بر اثر بخشی ورود موج صوتی بر جاذب تأکید داشتند، همسو است. چیدمان منافذ کوچکتر به سمت منبع صوت، با

<sup>۱</sup> Noise Reduction Coefficient (NRC)

ایجاد یک اثر رزونانسی در هوای داخل منافذ بزرگتر که در پشت منافذ کوچکتر قرار گرفته، ضریب جذب صدا را در نمونه تقویت می‌کند. در نتیجه، آنالیز دقیق تأثیر اندازه منافذ بر جذب صدا نشان می‌دهد که عملکرد آکوستیکی بهینه از طریق آرایش متناسب منافذ با اعمال تأثیرات رزونانس به دست می‌آید.



شکل ۶ شاخص ضریب کاهش نویز نمونه‌های آزمایشی با چگالی یکنواخت و ساختار متخلخل درجه بندی شده

#### ۴- نتیجه‌گیری

افزایش کیفیت صدا و کنترل آلودگی صوتی یکی از دغدغه‌های اصلی محققین در سال‌های اخیر است. از طرفی نیز اقدامات سازگار با محیط زیست مستلزم استفاده از مواد قابل بازیافت و تجزیه‌پذیر در کنترل آلودگی صوتی و بهبود کیفیت صدا است. آلودگی صوتی، مشکلات بالقوه‌ای را برای انسان ایجاد می‌کند و کنترل آن به دلیل عملکرد آکوستیکی ناکافی به ویژه در فرکانس‌های پایین‌تر، توسط جاذب‌های متخلخل سنتی دشوار است. یکی از روندهای مهم توسعه ساختارهای متخلخل، استفاده از ساختار متخلخل درجه بندی شده است که پتانسیل قابل توجهی را برای افزایش هرچه بیشتر جذب صوت ارائه می‌دهد. با استفاده از چاپگرهای سه بعدی طراحی این ساختارها برای تطبیق هندسه‌های پیچیده با قابلیت جذب حداکثری امواج صوتی در محدوده فرکانسی گسترده امکان پذیر است. برای این منظور در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد جذب صوتی قطعات چاپی با روش ساخت رشته ذوبی با ساختار متخلخل درجه بندی شده و مقایسه آن‌ها با ساختار متخلخل با اندازه منافذ یکنواخت پرداخته شده است. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- در فرکانس‌های پایین نمونه‌های با چگالی پر شدن بالاتر (تخلخل کمتر) و در فرکانس‌های بالاتر نمونه‌ها با چگالی پر شدن پایین‌تر (تخلخل بیشتر) ضریب جذب صوت بیشتری دارند. زیرا با افزایش مقدار چگالی پر شدن (ریزتر شدن منافذ)، ضخامت لایه مرزی ویسکوز در مقایسه با قطر منافذ قابل توجه و موثرتر بوده و در نتیجه اتلاف ویسکوز در فرکانس‌های پایین را افزایش می‌دهد و به دلیل مقاومت جریان بالا ناشی از اندازه منافذ کوچک باعث افزایش میزان جذب صوتی می‌شود.
- به دلیل کوتاه‌تر بودن طول امواج فرکانس بالا، کاهش چگالی پر شدن (افزایش اندازه منافذ) با سهولت ورود امواج صوتی به درون ساختار جاذب باعث افزایش ضریب جذب صوت می‌شود.
- در نمونه‌های با ساختار متخلخل درجه بندی شده، تفاوت جهت برخورد امواج صوتی می‌تواند باعث بهبود میزان جذب صوت و تغییر محدوده فرکانسی شود و در صورت قرارگیری قسمت با منافذ کوچک‌تر در جهت منبع صوت نسبت به حالت عکس، ضریب جذب صوتی بیشتری حاصل می‌گردد. به طوری که پیک ضریب جذب صوتی به سمت فرکانس‌های پایین تغییر می‌کند.

## References

- [1] King YJ, Teo KK. Application of 3D printed structured materials as the sound absorption panels. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2020 Mar 1 (Vol. 463, No. 1, p. 012032). IOP Publishing. doi: [10.1088/1755-1315/463/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012032)
- [2] Seddeq HS. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. Australian journal of basic and applied sciences. 2009;3(4):4610-7.
- [3] Hasanzadeh R, Mihankhah P, Azdast T, Bodaghi M, Moradi M. Process-property relationship in polylactic acid composites reinforced by iron microparticles and 3D printed by fused filament fabrication. Polymer Engineering & Science. 2024 Jan;64(1):399-411. doi: [10.1002/pen.26556](https://doi.org/10.1002/pen.26556)
- [4] Rasouli A, Azdast T, Mohammadzadeh H, Mihankhah P, Hasanzadeh R. Introducing a novel combined method of fused filament fabrication (FFF)/batch foaming to improve the properties of biodegradable polylactic acid. Modares Mechanical Engineering. 2021 Dec 10;22(1):15-22. [In Persian]
- [5] Feizlou N, Azdast T, Hasanzadeh R, Rostami M, Ashrafi N. Investigation of the effect of die diameter on the structural properties of extruded polyethylene foams. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Sep 23;10(7):10-6. doi: [10.22034/IJME.2024.433989.1907](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.433989.1907) [In Persian]
- [6] Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jan 21;10(11):16-23. doi: [10.22034/IJME.2024.429126.1885](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.429126.1885) [In Persian]
- [7] Hasanzadeh R, Azdast T, Mihankhah P. Effect of Printer Process Parameters of Fused Filament Fabrication on the Tensile Strength and Density of Polylactic Acid/Nanoclay Nanocomposites. Iranian Journal of Polymer Science and Technology. 2023 Dec 22;36(5):539-49. doi: [10.22063/JIPST.2024.3495.2266](https://doi.org/10.22063/JIPST.2024.3495.2266) [In Persian]
- [8] Mihankhah P, Azdast T, Mohammadzadeh H, Hasanzadeh R, Aghaiee S. Fused filament fabrication of biodegradable polylactic acid reinforced by nanoclay as a potential biomedical material. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2023 Mar;36(3):961-83. doi: [10.1177/08927057211044185](https://doi.org/10.1177/08927057211044185)
- [9] Johnston W, Sharma B. Additive manufacturing of fibrous sound absorbers. Additive Manufacturing. 2021 May 1;41:101984. doi: [10.1016/j.addma.2021.101984](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101984)
- [10] Vasina M, Monkova K, Monka PP, Kozak D, Tkac J. Study of the sound absorption properties of 3D-printed open-porous ABS material structures. Polymers. 2020 May 6;12(5):1062. doi: [10.3390/polym12051062](https://doi.org/10.3390/polym12051062)
- [11] Monkova K, Vasina M, Monka PP, Vanca J, Kozak D. Effect of 3D-printed PLA structure on sound reflection properties. Polymers. 2022 Jan 20;14(3):413. doi: [10.3390/polym14030413](https://doi.org/10.3390/polym14030413)
- [12] Farooqi ZU, Ahmad I, Ditta A, Ilic P, Amin M, Naveed AB, Gulzar A. Types, sources, socioeconomic impacts, and control strategies of environmental noise: A review. Environmental Science and Pollution Research. 2022 Nov;29(54):81087-111. doi: [10.1007/s11356-022-23328-7](https://doi.org/10.1007/s11356-022-23328-7)
- [13] Liu X, Yan X, Zhang H. Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. Textile Research Journal. 2016 May;86(7):755-64. doi: [10.1177/0040517515599742](https://doi.org/10.1177/0040517515599742)
- [14] Chua JW, Li X, Li T, Chua BW, Yu X, Zhai W. Customisable sound absorption properties of functionally graded metallic foams. Journal of Materials Science & Technology. 2022 May 10;108:196-207. doi: [10.1016/j.jmst.2021.07.056](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.07.056)