

جاذب‌های آکوستیکی نوین بر پایه ساختارهای TPMS: کاربرد در پوسته فن‌های محوری و توربین‌های بادی کانالی

مصطفی مظفری^۱، مهران مصدري^{۱،۲}

۱. دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

mstfmozafari@ut.ac.ir

۲. دانشکده علوم و فناوری، سیتی سنت جورج، دانشگاه لندن، بریتانیا.

mehran.masdari@citystgeorges.ac.uk

m.masdari@ut.ac.ir

چکیده

سامانه‌های دوار نظیر فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی به ترتیب نقش مهمی در فرآیندهای خنک‌کاری و تولید انرژی پاک ایفا می‌کنند، اما تولید نویز ناشی از آشفتگی‌های جریان، به‌ویژه گردابه‌های ناشی نوک، یکی از چالش‌های اصلی آن‌ها محسوب می‌شود. از این‌رو، توسعه فناوری‌های مؤثر کاهش نویز به یک ضرورت تبدیل شده است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از پوسته‌های متخلخل می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی شدت نویز را کاهش دهد. در این پژوهش، ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح حداقل سه‌گانه تناوبی (TPMS) به‌منظور ارزیابی عملکرد آیرودینامیکی این سامانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، ضریب جذب صدای ساختارهای مختلف بررسی شد و ساختار ژایرود با تخلخل ۵۰ درصد به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب گردید. سپس این ساختار در دو کاربرد کلیدی شامل پوسته فن جریان محوری و کانال اطراف توربین بادی کانالی به‌کار گرفته شد. برای تحلیل جامع، ترکیبی از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی به‌منظور بررسی هم‌زمان ویژگی‌های آیرودینامیکی و مکانیسم‌های تولید و کاهش نویز استفاده شد. نتایج نشان داد که پوسته مبتنی بر TPMS موجب کاهش قابل‌توجه شدت و ابعاد گردابه‌های ناشی نوک و تعدیل سطح آشفتگی در نزدیکی دیواره محفظه می‌شود. همچنین این طراحی بهینه توانایی مهار نویز فرکانس عبور پره و نویز ناشی از برهم‌کنش آشفتگی را دارد. به‌صورت کمی، کاهش ۶ دسی‌بل (حدود ۱۱٪) در فن جریان محوری و کاهش ۳۶ درصدی انرژی آکوستیک تجمعی مشاهده شد، در حالی‌که در توربین بادی کانالی نیز کاهش ۸ درصدی سطح فشار صدای کلی به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که ساختارهای مبتنی بر TPMS راهکاری مؤثر برای کاهش نویز سامانه‌های دوار هستند.

کلمات کلیدی: جاذب صدا، آیرودینامیک، کاهش نویز، محیط متخلخل.

Novel Acoustic Absorbers Based on TPMS Structures: Implementation in Axial Fan Casings and Ducted Wind Turbines

Mostafa Mozafari^١, Mehran Masdari^{١&٢}

^١. College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.

mstfmozafari١٨@ut.ac.ir

^٢. School of Science & Technology, City St George's, University of London, United Kingdom.

mehran.masdari@citystgeorges.ac.uk

m.masdari@ut.ac.ir

Abstract

Rotating systems such as axial flow fans and wind turbines play a vital role in cooling processes and clean energy generation. However, a major challenge in their operation is the noise produced by flow instabilities, particularly tip-leakage vortices. Consequently, the development of advanced noise-reduction technologies has become an undeniable necessity. Recent studies have demonstrated that incorporating porous casings can significantly mitigate noise levels. In this study, porous structures based on Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) were employed to evaluate their aeroacoustic performance. First, the sound absorption coefficient of these structures was analyzed, and the Gyroid with ٨٠٪ porosity was identified as the optimal design. This structure was then applied to two key case studies: the casing of an axial fan and the duct surrounding a ducted wind turbine. A combined numerical and experimental analysis was conducted to investigate both aerodynamic characteristics and the mechanisms of noise generation and suppression. The results indicate that the TPMS-based casing effectively reduces the strength and size of tip-leakage vortices while attenuating turbulence intensity near the casing wall. Moreover, the optimized design suppresses both blade passing frequency (BPF) noise and turbulence-interaction noise. Quantitatively, the proposed approach achieved a ٦ dB reduction ($\approx ١١٪$) in the axial flow fan and a ٣٦٪ decrease in accumulated acoustic energy. For the ducted wind turbine, the porous structure improved acoustic behavior, leading to an ٨٪ reduction in overall sound pressure level (OASPL). These findings confirm that TPMS-based designs offer a promising and efficient aeroacoustic solution for noise reduction in rotating machinery.

Keywords: sound absorber, aeroacoustics, noise reduction, porous media.

Introduction

Noise pollution is among the most pervasive environmental problems in industrial societies, with diverse sources, particularly rotating equipment such as wind turbines and industrial fans that affect environments and human health [١–٣]. Continuous exposure to such noises causes consequences beyond annoyance, including sleep disturbance, reduced performance, mental health issues, and cardiovascular risks [٤–٦]. Conventional porous absorbers (polymeric foams and metal foams), despite effectiveness, suffer limitations in mechanical strength, environmental durability, and broadband performance, restricting their use under

strong flows [9–11]. Triply periodic minimal surface (TPMS) structures, manufacturable via additive methods, offer high surface-to-volume ratios, tunable porosity/permeability, and favorable mechanical properties, making them a promising alternative [12]. Studies report that TPMS can provide broadband absorption and significant frequency reductions, in some cases exceeding 20 dB [13]. In turbomachinery, primary noise sources are tip-leakage flows and associated vortices, which increase both noise level and spectral extent [14,15]. To address a research gap, this study first measures experimental absorption coefficients of TPMS samples and selects an optimal geometry, then evaluates noise-reduction capacity and the interaction mechanisms between the porous structure and turbulent flow through combined numerical–experimental analyses on a fan casing and a turbine duct.

Methodology

To demonstrate the effectiveness of porous structures for noise mitigation, two key applications are investigated: an axial-flow fan and a ducted wind turbine. For the axial fan, a combined approach is adopted, comprising experimental acoustic tests and a purely aerodynamic numerical analysis. The experiments aim to quantify the real acoustic performance of porous casings in an anechoic chamber, while the numerical simulations focus on elucidating the physical noise-reduction mechanisms: such as modifications of tip-leakage vortex structures, reductions in turbulent kinetic energy, and changes in the near-wall flow field, rather than achieving strict quantitative aeroacoustic matching. In contrast, for the ducted wind turbine, practical limitations in prototype fabrication and testing motivate a fully numerical framework that integrates aerodynamic simulations with aeroacoustic post-processing, enabling a continuous assessment of noise sources and the influence of TPMS linings. In both systems, the use of advanced porous architectures is expected to improve aeroacoustic behavior and reduce overall noise levels, demonstrating an efficient, transferable strategy for airflow-noise control. For the axial-fan casing, TPMS-based liners were first designed using MATLAB and subsequently fabricated via additive manufacturing. Performance was evaluated experimentally in an acoustic chamber and numerically using XFlow. The tested fan measured 120×120×20 mm, featured seven blades, operated at 1200 rpm, and had a blade-passing frequency of 140 Hz; the hub radius, tip radius, and tip clearance were 23, 00, and 2 mm, respectively. TPMS casings were printed from PLA, selected for its printability and ability to reproduce complex geometries with high accuracy. Measurements were conducted in a 2×2×2 m anechoic chamber with a 100 Hz cut-off frequency. Sound pressure was recorded at 12 locations distributed on a sphere of 0.8 m radius around the rotor. The setup followed ISIRI 1184 standards; signals were acquired using a PRM1 microphone at 44.1 kHz and 24-bit resolution, processed in MATLAB, and corrected for background noise.

Results

Experimental acoustic tests demonstrate that a gyroid porous casing at 0% porosity outperforms both a solid casing and the uncased condition: average SPL reductions of about 3–4 dB across frequencies and an approximate 36% reduction in accumulated sound energy (ASE) were observed (Fig. 8). OASPL distributions show directional noise reductions and a mean drop of 2 dB (~11%) with the porous casing, although localized higher levels appear due to counterclockwise rotor motion and interactions between separation vortices and succeeding tip vortices (Fig. 9). Results indicate the porous casing alters the near-wall flow, reduces absolute velocities, and weakens tip-leakage vortices, thereby lowering leakage momentum and producing a smoother flow field (Fig. 10). In the ducted-wind-turbine study, leading-edge and inner-surface regions near the hub were identified as dominant noise sources (Fig. 12); implementing gyroid liners over ~10% chord downstream of the leading edge and ~30% of the inner surface produced notable SPL reductions and lowered OASPL from 56.70 dB to 52.16 dB (~8% overall) (Figs. 14–15). The primary noise-mitigation mechanism is vortex fragmentation: TPMS layers break large coherent vortices into many smaller, dissipative structures, increasing viscous loss and suppressing strong tonal sources.

Conclusion

This study evaluated porous TPMS-based architectures for noise reduction in axial fans and ducted wind turbines. TPMS structures, particularly a gyroid at 90% porosity, provided effective sound absorption with minimal aerodynamic penalty. Experimental results for the fan showed an average OASPL reduction of about 6 dB ($\approx 11\%$) and a 36% decrease in accumulated acoustic energy. In the ducted turbine, TPMS lining produced an overall sound-pressure-level reduction of roughly 8%. Numerical analyses indicate the dominant mitigation mechanism is vortex fragmentation and dispersion, increasing viscous dissipation and thereby weakening coherent noise sources.

موسسه آکوستیک

۱. مقدمه

آلودگی صوتی به عنوان یکی از گسترده ترین معضلات زیست محیطی در جوامع صنعتی مدرن، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و کیفیت زندگی محسوب می شود [۱]. منابع متنوع نویز، به ویژه صدای ناشی از تجهیزات دوار مانند توربین های بادی [۲] و فن های صنعتی [۳]، روز به روز محیط اطراف را تحت تأثیر قرار می دهند. قرار گرفتن مداوم در معرض این صداها، ناهواسته، پیامدهایی فراتر از آزار شنیداری داشته و طیف وسیعی از اثرات مخرب را به دنبال دارد؛ از آسیب های مستقیم به سیستم شنوایی و اختلال در خواب گرفته تا کاهش بهره وری کاری و تحصیلی و بروز مشکلات جدی جسمی و روانی [۴]. مطالعات علمی، ارتباط مستقیم آلودگی صوتی را با افزایش اضطراب، استرس، اختلالات روانی، تأخیر در رشد شناختی کودکان و بروز عوارض خطرناک فیزیولوژیکی مانند افزایش ضربان قلب، فشار خون بالا و بیماری های قلبی - عروقی اثبات کرده اند [۵، ۶]. بر اساس برخی تحقیقات، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از بسترهای بیمارستانی و مرگومیر ناشی از بیماری های قلبی و سکت، به قرار گرفتن مداوم در معرض نویز مرتبط است. این نگرانی ها سبب شده است نهادهای بین المللی برنامه های گسترده ای را برای تقویت پژوهش های مرتبط با کاهش نویز محیطی، به ویژه نویز ناشی از صنایع هوایی و انرژی، تدوین کنند. در چنین شرایطی، توسعه فناوری های نوین و کارآمد برای کنترل و کاهش نویز، ضرورتی انکارناپذیر برای حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست به شمار می رود [۷]. از سوی دیگر، هرچند تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر ضرورتی اجتنابناپذیر است، اما توربین های بادی چه در خشکی و چه در دریا، به واسطه صدای تولیدی پره ها، اغلب موجب نارضایتی ساکنان محلی می شوند. افزون بر آن، نویز مزارع بادی فراساحلی در مراحل نصب و بهره برداری می تواند تأثیرات منفی بر حیات آبریان، از جمله ماهی ها و پستانداران دریایی

داشته باشد. طی دو دهه گذشته، بسیاری از کشورها و نهادهای منطقه ای برنامه های مشخصی را برای کاهش نویز ناشی از این منابع تدوین کرده اند که نشان دهنده اهمیت و جدیت این موضوع در سطح جهانی است [۸].

به طور سنتی، برای کاهش نویز از مواد متخلخل جاذب صدا مانند فوم های پلیمری و الیاف معدنی استفاده می شود. این مواد انرژی امواج آکوستیکی را از طریق مکانیزم های اتلاف ویسکوز و حرارتی در ساختار متخلخل خود به گرما تبدیل کرده و شدت صدا را کاهش می دهند [۹، ۱۰]. با این حال، چنین موادی محدودیت های قابل توجهی دارند؛ از جمله ضعف در خواص مکانیکی، مقاومت پایین در برابر شرایط محیطی دشوار مانند دما و رطوبت بالا، و همچنین امکان ایجاد آلودگی ثانویه ناشی از ریزش الیاف. این محدودیت ها کاربرد آن ها را در بسیاری از حوزه های مهندسی، به ویژه در شرایط جریان هوای شدید، محدود می سازد [۱۱]. برای غلبه بر این چالش ها، نسل جدیدی از مواد مهندسی شده با عنوان ساختارهای مبتنی بر سطوح کمینه متناوب سه گانه^۱ (TPMS) معرفی شده اند. این ساختارها که با بهره گیری از فناوری ساخت افزودنی تولید می شوند، به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی برتر، سطح ویژه بسیار بالا و تخلخل کاملاً کنترل شده، عملکردی ممتاز در جذب صدا ارائه می دهند. ویژگی هایی همچون هندسه منحصربه فرد، نفوذپذیری قابل تنظیم و استحکام مکانیکی مطلوب سبب شده است TPMS ها جایگزینی ایده آل برای جاذب های سنتی باشند [۱۲]. به عنوان مثال، لین و همکاران [۱۳] نشان دادند پانل های ساندویچی مبتنی بر TPMS می توانند بیش از ۲۰ دسی بل کاهش نویز در گستره وسیعی از فرکانس ها ایجاد کنند. یکی از مزایای مهم این ساختارها قابلیت طراحی و بهینه سازی برای شرایط خاص است؛ به گونه ای که با تغییر پارامترهای هندسی یا استفاده از ترکیب چند نوع TPMS، می توان عملکرد آکوستیکی را در بازه فرکانسی وسیع بهبود

^۱ triply periodic minimal surface (TPMS)

داد یا جذب صدا را برای یک فرکانس هدف خاص به حداکثر رساند.

کاهش نویز در توربوماشین‌ها، از جمله فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی کانالی، از جمله حوزه‌هایی است که توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. افزایش آلودگی صوتی ناشی از این تجهیزات، ضرورت مطالعه مکانیزم‌های تولید صدا و توسعه فناوری‌های نوین برای کنترل جریان و کاهش نویز را آشکار ساخته است. مهم‌ترین مکانیزم‌های تولید نویز در توربوماشین‌ها به پدیده‌های ناپایا در ناحیه لقی بین پره و پوسته مربوط می‌شود. جریان نشتی نوک پره‌ها، با عبور از شکاف میان نوک پره و دیواره محفظه، منجر به تشکیل گردابه‌های نشتی نوک می‌گردد. این گردابه‌ها در اثر اندرکنش با جریان اصلی به شدت ناپایدار شده و آشفته‌گی‌های شدیدی را ایجاد می‌کنند. چنین برهم‌کنش‌هایی علاوه بر افزایش تلفات آیرودینامیکی، به عنوان منبعی قوی برای نویز شعاعی عمل کرده و به‌ویژه در نواحی نزدیک به نوک پره‌های روتور، جایی که گردابه‌های نوک قوی و بی‌نظمی‌های ساختاری برجسته هستند، شدت بیشتری می‌یابند. این پدیده‌ها نه تنها دامنه نویز را افزایش می‌دهند، بلکه طیف فرکانسی آن را نیز گسترده‌تر کرده و به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در کاهش نویز سامانه‌های دوار مطرح می‌شوند [۱۴، ۱۵]. در این زمینه، مواد متخلخل به عنوان ابزاری کارآمد برای کنترل غیرفعال جریان و کاهش نویز به کار گرفته شده‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که پوشش‌ها یا محفظه‌های متخلخل با جذب انرژی آکوستیکی، می‌توانند سطح نویز فن‌های جریان محوری را کاهش دهند. به عنوان نمونه، ژو و مائو [۱۶] با استفاده از فوم فلزی کاهش ۵ دسی‌بل در سطح فشار صدا و افت ۲۰۰ پاسکال در فشار کل را گزارش کردند. لیو و همکاران [۱۴] فوم‌های فلزی متخلخل را برای فن‌های کوچک پیشنهاد کردند که ضمن داشتن وزن سبک‌تر، در کنترل نویز نیز مؤثر هستند. همچنین، زویلانگ و همکاران [۱۷] نشان دادند که

استفاده از مجرای میکروسوراخ‌دار می‌تواند کاهش ۱۶ دسی‌بل در شدت صدا ایجاد کند بدون آنکه عملکرد آیرودینامیکی دستگاه تحت تأثیر قرار گیرد. ساتلیف و همکاران نیز کاهش ۴ تا ۵ دسی‌بل را با استفاده از پوشش‌های متخلخل در شرایط مختلف سرعت گزارش کردند [۱۸، ۱۹].

در سال‌های اخیر، ساختارهای TPMS نیز در کاربردهای آکوستیکی بسیار موفق عمل کرده‌اند. برای نمونه، ابوندا و همکاران [۲۰] گزارش دادند که این ساختارها قادر به ایجاد شکاف باند آکوستیکی^۱ وسیع در فرکانس‌های بالای ۶۰۰۰ هرتز هستند. این مشخصه ناشی از پراکندگی چندگانه امواج صدا در سلول‌های تکرارشونده بوده و سبب می‌شود ساختار به عنوان یک فیلتر عمل کند و فرکانس‌های خاصی از نویز را به طور کامل مسدود سازد. موقعیت و پهنای این شکاف باند به نوع شبکه و چگالی نسبی ساختار وابسته است و امکان طراحی هدفمند برای کاهش نویز در بازه‌های مشخص فرکانسی را فراهم می‌سازد. همچنین، بوون و همکاران [۲۱]، با بررسی کاربرد این ساختارها در لبه حمله ایرفویل، کاهش ۲ تا ۳ دسی‌بل در نویز فرکانس‌های پایین را گزارش کردند. با وجود این مزایا، استفاده از ساختارهای TPMS برای کاهش نویز در توربوماشین‌ها هنوز در مراحل ابتدایی پژوهش قرار دارد و نیازمند بررسی‌های جامع‌تری است. با وجود نتایج مثبت باید توجه داشت که مطالعه بوون به طور مشخص بر اجزاء ثابت ایرفویل متمرکز بود و به سامانه‌های دوار (مانند فن‌ها و توربین‌های بادی) و مسائل کاربردی مرتبط با جریان نشتی نوک و ساختارهای گردابه‌ای در این سامانه‌ها نپرداخته است. همچنین، پژوهش‌های پیشین معمولاً از جاذب‌های الیافی و مدل‌سازی عددی با معادلات همگن‌شده محیط متخلخل بهره برده‌اند، این مطالعه به طور صریح از هندسه واقعی ساختار TPMS استفاده کرده و جریان داخل خود محیط متخلخل را شبیه‌سازی و تحلیل می‌کند. این پژوهش نیز در راستای سایر کارهای قبلی نویسندگان است،

^۱ Acoustic Bandgap

نویسندگان در پژوهش قبلی خود [۲۳] یک بررسی محاسباتی-آیروآکوستیکی ساده بر روی یک فن محوری انجام داده‌اند که آن مطالعه به صورت محصور در تحلیل عددی-تجربی بوده و ارزیابی و تحلیل جامع قابلیت جاذب را ارائه نکرده است. این موضوع نشان‌دهنده وجود یک شکاف تحقیقاتی مهم در طراحی، ساخت و ارزیابی یکپارچه این ساختارها در حوزه آیروآکوستیک است. بر همین اساس، پژوهش حاضر این شکاف را پر می‌کند: نخست، با اندازه‌گیری تجربی ضریب جذب صدا نمونه‌های مبتنی بر TPMS و انتخاب ساختار بهینه؛ دوم، با اجرای دو مطالعه کاربردی و متمایز: پوسته فن جریان محوری (آزمون‌های آکوستیک در اتاق بی‌پژواک به همراه تحلیل عددی آیرودینامیک برای تبیین مکانیسم‌ها) و کانال دور توربین بادی داکت‌دار (تحلیل عددی آیرودینامیک و آیروآکوستیک)؛ هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی دقیق ظرفیت کاهش نویز این فناوری نوظهور و دستیابی به درکی عمیق‌تر از اندرکنش‌های پیچیده میان ساختار متخلخل و میدان جریان آشفته است.

۲. ساختارهای TPMS و اصول کار

مواد متخلخل به‌طور کلی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: مواد متخلخل با حفره‌های باز و بسته^۱. در مواد متخلخل با حفره‌های باز، شبکه‌ای از کانال‌های بهم‌پیوسته وجود دارد که امکان نفوذ سیال خارجی به درون ساختار متخلخل را فراهم می‌کند. در مقابل، در مواد با حفره‌های بسته، منافذ کاملاً ایزوله بوده و ارتباطی با سطح خارجی ندارند؛ به همین دلیل هیچ سیالی قادر به ورود به این نوع ساختار نیست. در این پژوهش، از مواد متخلخل با حفره‌های باز استفاده شده است، چراکه این نوع ساختارها علاوه بر قابلیت کنترل خواص فیزیکی و شیمیایی، بستر مناسبی برای فرآیندهای انتقال سیال نیز فراهم می‌آورند [۲۳، ۲۲]. با الهام از معماری‌های متخلخل موجود در طبیعت از جمله ساختار مخملی جغد انبار و صخره‌ها، تلاش‌های گسترده‌ای برای

طراحی و تولید ساختارهای مصنوعی انجام شده است [۲۴]. در این میان، ساختارهای TPMS طی سال‌های اخیر به‌عنوان یک راهکار نوین مطرح شده‌اند. این ساختارها دارای شبکه‌ای از منافذ بهم‌پیوسته و ویژگی‌های هندسی هستند که به صورت ریاضی قابل تنظیم می‌باشند. ساختارهای TPMS در واقع نوعی سلول‌های متناوب با حفره‌های منظم‌اند که به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و آکوستیکی برتر، گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی سازه‌های متراکم و حجیم به شمار می‌آیند [۲۲، ۲۳].

۱.۲. خواص آکوستیکی و سازوکارهای کاهش نویز

در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از پژوهشگران به بررسی خواص آکوستیکی ساختارهای سلولی بر پایه سطوح کمینه متناوب سه‌گانه جلب شده است. این سطوح پیوسته که به صورت ریاضی تعریف می‌شوند، در سه جهت متعامد تکرار می‌شوند و ویژگی‌هایی مانند انحنای میانگین صفر و حداقل مساحت سطح را دارند. ساختارهای سلولی مبتنی بر این سطوح نه تنها از نظر مکانیکی بسیار کارآمد هستند — با ویژگی‌هایی همچون سختی و استحکام بالا، جذب انرژی بهینه، رسانایی مناسب و نفوذپذیری بالا — بلکه از دیدگاه آکوستیکی نیز توانایی چشمگیری در کاهش ارتعاشات، جذب صدا و کنترل نویز دارند. همین ویژگی‌های چندمنظوره سبب شده است که این ساختارها در حوزه‌های گوناگون مورد توجه قرار گیرند. یکی از ویژگی‌های مهم این ساختارها، قابلیت تنظیم پاسخ آکوستیکی آن‌ها با تغییر پارامترهای هندسی است؛ به گونه‌ای که می‌توان بازه فرکانسی و پهنای باند جذب را متناسب با نیاز طراحی کنترل نمود. این مزیت باعث برتری چشمگیر آن‌ها نسبت به جاذب‌های آکوستیکی سنتی می‌شود. ساختارهای TPMS به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل کنترل‌شده و سطوح پیوسته و صاف، به‌عنوان نسل تازه‌ای از مواد برای کنترل نویز مطرح هستند. فناوری‌های نوین ساخت، به‌ویژه چاپ سه‌بعدی، امکان تولید

^۱ the open and closed-pore porous materials

دقیق این ساختارهای پیچیده را فراهم کرده و بررسی‌ها نشان می‌دهد که خواص آکوستیکی این ساختارها به شدت به هندسه، نوع شبکه، میزان تخلخل و ضخامت بستگی دارد. به‌ویژه در بازه فرکانسی میانی و بالا، این ساختارها توانایی جذب بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند [۲۲، ۲۳].

کاهش نویز در این ساختارهای متخلخل پیچیده از طریق چندین مکانیسم فیزیکی هم‌زمان رخ می‌دهد. مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: اتلاف لزجی^۱، زمانی که امواج صدا در کانال‌های باریک و به‌هم‌پیوسته حرکت می‌کنند و اصطکاک بین مولکول‌های هوا و دیواره‌ها انرژی آکوستیکی را به گرما تبدیل می‌کند. اتلاف حرارتی^۲، که در اثر فشردگی و انبساط متناوب هوا و تبادل گرما با دیواره‌ها رخ داده و بخشی از انرژی آکوستیکی را مستهلک می‌سازد. و در نهایت پراکندگی و بازتاب چندگانه^۳، که بر اثر هندسه پیچیده ساختار رخ می‌دهد و مسیر حرکت موج را طولانی‌تر کرده و فرصت بیشتری برای عملکرد سازوکارهای اتلاف ایجاد می‌کند [۲۵، ۲۶]. ترکیب این پدیده‌هاست که ساختارهای مبتنی بر سطوح کمینه متناوب را به گزینه‌ای کارآمد برای جذب صدا و کاهش نویز تبدیل کرده است.

۲.۲. اصول و طراحی جاذب

در این بخش، ابتدا اصول و سپس طراحی جاذب بر اساس ساختارهای TPMS بیان می‌شود. این ساختارها را می‌توان به‌صورت یک ایزوسطح در نظر گرفت که در هر سه جهت اصلی فضا به شکل تناوبی تکرار می‌شوند. این سطوح به‌عنوان سطوح حداقلی شناخته می‌شوند و با استفاده از معادلات جبری قابل تعریف هستند. معادلات مربوطه را می‌توان به‌گونه‌ای $f(x, y, z) = C$ ساده‌سازی کرد که C در آن یک ثابت مشخص وجود دارد. همچنین با تغییر پارامترهای تابع،

امکان کنترل آسان بر محدوده‌ی توزیع و تناوب این سطوح فراهم می‌شود [۳]. از میان ساختارهای اصلی TPMS می‌توان به پریمی‌تیو^۴ (P)، دایموند^۵ (D) و ژایروید^۶ (G) اشاره کرد که معادلات ریاضی و هندسه سلول واحد آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق با جدول ۱، در ساختارهای TPMS دو پارامتر اساسی ω و C وجود دارد که پارامتر C به‌عنوان isovalue شناخته می‌شود و ω پارامتر مؤثر هندسی است و اندازه‌ی سلول واحد را تنظیم می‌کند. ω اگر در هر سه جهت یکسان باشد، ساختار TPMS به‌صورت یکنواخت است؛ بنابراین، برای تولید سلول اعوجاج‌شده^۷ می‌توان مقدار پارامتر ω را دست‌کاری نمود. از طرفی، C تأثیرات زیادی در مشخصه‌های یک ناحیه‌ی متخلخل دارد. مقدار C مورد استفاده در معادلات برای تولید ساختارهای TPMS به‌شدت به اندازه روزنه^۸ و تخلخل^۹ ساختار تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، انتخاب C مناسب برای ایجاد یک ساختارهای TPMS کارآمد با ویژگی‌های موردنظر بسیار مهم است. مطابق جدول ۲ روابطی برای عبارت‌های کسر حجمی و اندازه‌ی روزنه بر اساس پارامتر C با استفاده از اجراهای عددی استخراج گردیده است. تخلخل نسبت حجم متخلخل به حجم کل را بیان و همچنین، کسر حجمی جامد ساختار را مشخص می‌کند. اگر مقدار $C=0$ باشد، حجم ناحیه متخلخل و جامد یکسان است. اندازه‌ی روزنه به‌عنوان قطر بزرگ‌ترین کره‌ای که می‌تواند در فضای خالی سلول واحد قرار گیرد، تعریف می‌شود. برای محاسبه قطر بزرگ‌ترین کره، ابتدا گره‌هایی در اطراف فضای خالی سلول واحد قرار می‌گیرد، سپس توسط این گره‌ها، مکان مرکزهای بزرگ‌ترین کره‌ها تعیین می‌گردد. قطر بزرگ‌ترین کره به‌عنوان حداقل فاصله بین گره فضای خالی و سطح سلول تعریف نمود. از طرفی، اندازه‌ی روزنه وابستگی خطی به اندازه‌ی سلول واحد ساختار

^۶ Gyroid (G)

^۷ Distorted Cell

^۸ Hole Size

^۹ Porosity

^۱ Viscous Dissipation

^۲ Thermal Conduction

^۳ Multiple scattering & tortuosity

^۴ Primitive (P)

^۵ Diamond (D)

دارد، بنابراین با تغییر سلول واحد ساختار، اندازه‌ی روزنه‌ها تغییر می‌کند. در ادامه، به ترتیب روابط تخلخل و اندازه‌ی روزنه (جدول ۲) برای این حالت شبکه‌ای این ساختارها به صورت رابطه‌ی خطی مرتبه اول (معادله (۱)) و معادله درجه سه (معادله (۲)) تخمین زده شده، که منحنی داده‌های واقعی و برازش آنها در شکل ۱ ارائه شده است. شایان ذکر که استخراج روابط و منحنی‌های نام‌برده حاصل کار پژوهشگران می‌باشد.

$$P_{net} = \frac{\kappa - C}{2\kappa} \quad (1)$$

$$HoleSize_{net} = a + bC + cC^2 + dC^3 \quad (2)$$

که مقدار κ برای ساختارهای P، G و D به ترتیب برابر با ۳، ۱/۵ و ۱/۴۲ است. مطابق با نتایج، پرواضح است که پارامتر C تأثیر حیاتی روی کمیت‌های تخلخل و اندازه روزنه دارد؛ بنابراین، این امکان وجود ندارد که بتوان در یک تخلخل ثابت، اندازه‌های مختلف روزنه را بررسی نمود. از آنجایی که اندازه‌ی سلول، مقیاسی از اندازه‌ی سلول واحد ساختار است، احتمال می‌رود که با تغییر اندازه‌ی سلول واحد، بتوان اندازه‌ی مختلف روزنه را در تخلخل ثابت بررسی نمود.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به تغییرات تخلخل در ساختارهای ژایروید و دایموند تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهند و برازش خطی مرتبه اول برای آنها دقت قابل قبولی دارد. با این حال، در ساختار پرمی‌تیو در محدوده‌های بالاتر از ۷۵٪ و پایین‌تر از ۲۵٪ اختلافاتی ظاهر می‌شود که به همین دلیل این بازه‌ها از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند. از سوی دیگر، منحنی‌های مربوط به اندازه روزنه‌ها نشان می‌دهند که استفاده از یک چندجمله‌ای مرتبه سوم توصیف مناسب‌تری از تغییرات اندازه روزنه‌ها ارائه می‌دهد. پس از بررسی روابط میان تخلخل، اندازه روزنه‌ها و پارامتر C، برای طراحی جاذب‌های آکوستیکی مبتنی بر ساختارهای TPMS، یک کد MATLAB در مختصات دکارتی و استوانه‌ای توسعه داده شد. این کد قابلیت تولید هندسه‌های متنوع موردنیاز در پژوهش را فراهم کرده و امکان

ایجاد جاذب‌های مختلف با درصد‌های تخلخل، ابعاد سلول واحد، و انواع ساختارهای متخلخل متفاوت را مهیا می‌سازد. در پایان این بخش، شکل ۲ نمونه‌هایی از جاذب‌های آکوستیکی متخلخل مبتنی بر TPMS را که توسط این کد تولید شده‌اند نمایش می‌دهد. این نمونه‌ها بیانگر تنوع در پیکربندی‌ها و درصد‌های تخلخل مورد استفاده هستند.

۳.۲. اندازه‌گیری ضریب جذب صدا و بررسی

اثر پارامترهای طراحی روی آن

در این بخش، تحلیلی روشن و ساده از جذب صدا در ساختارهای TPMS ارائه می‌شود. ضریب جذب صدا (α) میزان انرژی آکوستیکی ورودی را که به جای بازتاب، توسط یک ماده جذب می‌شود توصیف می‌کند؛ به طوری که مقدار ۰ نشان‌دهنده بازتاب کامل و مقدار ۱ بیانگر جذب کامل است. عملکرد ساختارهای TPMS عمدتاً تحت تأثیر دو عامل اصلی قرار دارد: نوع ساختار و میزان تخلخل. تفاوت در نوع ساختار باعث تغییراتی در سطح ویژه، نحوه‌ی اتصال حفره‌ها و پیچیدگی مسیر عبور صدا می‌شود. تخلخل هم مقاومت آکوستیکی و هم مکانیزم اتلاف انرژی آکوستیکی در بستر متخلخل را کنترل می‌کند. بعد از تولید نمونه‌ها توسط کد، سپس آنها با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی تولید گردیدند. پس از چاپ، نمونه‌ها در محلول استات‌اتیل قرار داده شدند تا سطح آنها صاف و یکنواخت شود. سامانه آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب جذب، مطابق شکل ۳، شامل یک لوله امپدانس با قطر ۲۹ میلی‌متر، بلندگو، تقویت‌کننده توان، میکروفون‌ها و تحلیل‌گر سیگنال است. اندازه‌گیری‌ها بر اساس روش تابع انتقال دوکاناله و طبق استاندارد ISO ۱۰۵۳۴-۲ انجام شدند. آزمون‌ها در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و قطر ۲۹ میلی‌متر صورت گرفتند.

بر اساس تحلیل دقیق داده‌ها، پیکربندی‌های بهینه برای کاربردهای مختلف شناسایی شدند؛ به گونه‌ای که تنها حداکثر ضریب جذب در نظر گرفته نشد، بلکه گستره فرکانسی عملکرد نیز لحاظ گردید، چراکه هر کاربرد به ویژگی‌های

آکوستیکی متفاوتی نیاز دارد. تأثیر نوع ساختار TPMS در شکل ۴ و تأثیر تخلخل در شکل ۵ ارائه شده است. در میان تمام حالت‌ها، ساختار ژایرود با تخلخل ۵۰٪ بهترین عملکرد کلی را نشان داد. این پیکربندی توانست جذب پهن‌بند را با میانگین ضریب ۰/۷۶۱ و مقادیر اوج تا ۰/۹۳۸ در نزدیکی ۴۰۰۰ هرتز به دست آورد. این عملکرد برتر به سطح ویژه بالا و اتصال کامل منافذ ژایرود نسبت داده می‌شود که باعث افزایش اتلاف لزج‌تی و حرارتی می‌گردد. تخلخل ۵۰٪ ضمن ایجاد تطابق امپدانسی مؤثر با هوا، سطح کافی برای اتلاف انرژی فراهم می‌سازد و این ویژگی موجب بیشینه شدن جذب در گستره وسیعی از فرکانس‌ها می‌شود. در نهایت، بر اساس این نتایج، ساختار TPMS از نوع ژایرود با درصد تخلخل ۵۰ به عنوان طراحی بهینه‌شده جاذب برای کاربردهای مورد در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نشانده

Table ۱. Mathematical formulation and microscopic detail for various types of TPMS structures.

جدول ۱. فرمول‌بندی ریاضی و جزئیات میکروسکوپی برای انواع مختلف ساختارهای TPMS.

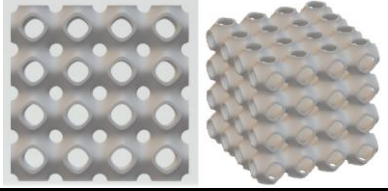
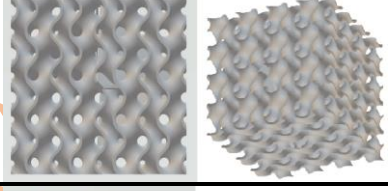
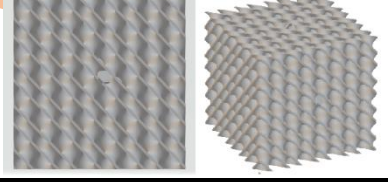
TPMS Structure	Mathematical expression	Microscopic detail
Primitive (P)	$f(x, y, z) = \cos(\omega_x x) + \cos(\omega_y y) + \cos(\omega_z z) = C$	
Diamond (D)	$f(x, y, z) = \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) - \sin(\omega_x x) \sin(\omega_y y) \sin(\omega_z z) = C$	
Gyroid (G)	$f(x, y, z) = \sin(\omega_x x) \cos(\omega_y y) + \sin(\omega_z z) \cos(\omega_x x) + \sin(\omega_y y) \cos(\omega_z z) = C$	

Table ۲. Porosity relations and extracted pore size coefficients for different TPMS structures.

جدول ۲. روابط تخلخل و ضرایب استخراج‌شده‌ی اندازه‌ی روزنه برای انواع مختلف ساختارهای TPMS.

Structure	Range of C Variations	Derived Porosity Relation	Extracted Pore Size Coefficients
Primitive	$-3 < C < 3$	$P_{net-P} = \frac{1}{2} - \frac{1}{6}C$	$a = 0.8473$ $b = -0.1631$ $c = -0.0015$ $d = -0.0103$
Diamond	$-1.42 < C < 1.42$	$P_{net-D} = \frac{1}{2} - \frac{35}{100}C$	$a = 0.3982$ $b = -0.1795$ $c = 0.0010$ $d = -0.0448$
Gyroid	$-1.5 < C < 1.5$	$P_{net-G} = \frac{1}{2} - \frac{1}{3}C$	$a = 0.4281$ $b = -0.1598$ $c = -2.37 \times 10^{-4}$ $d = -0.0432$

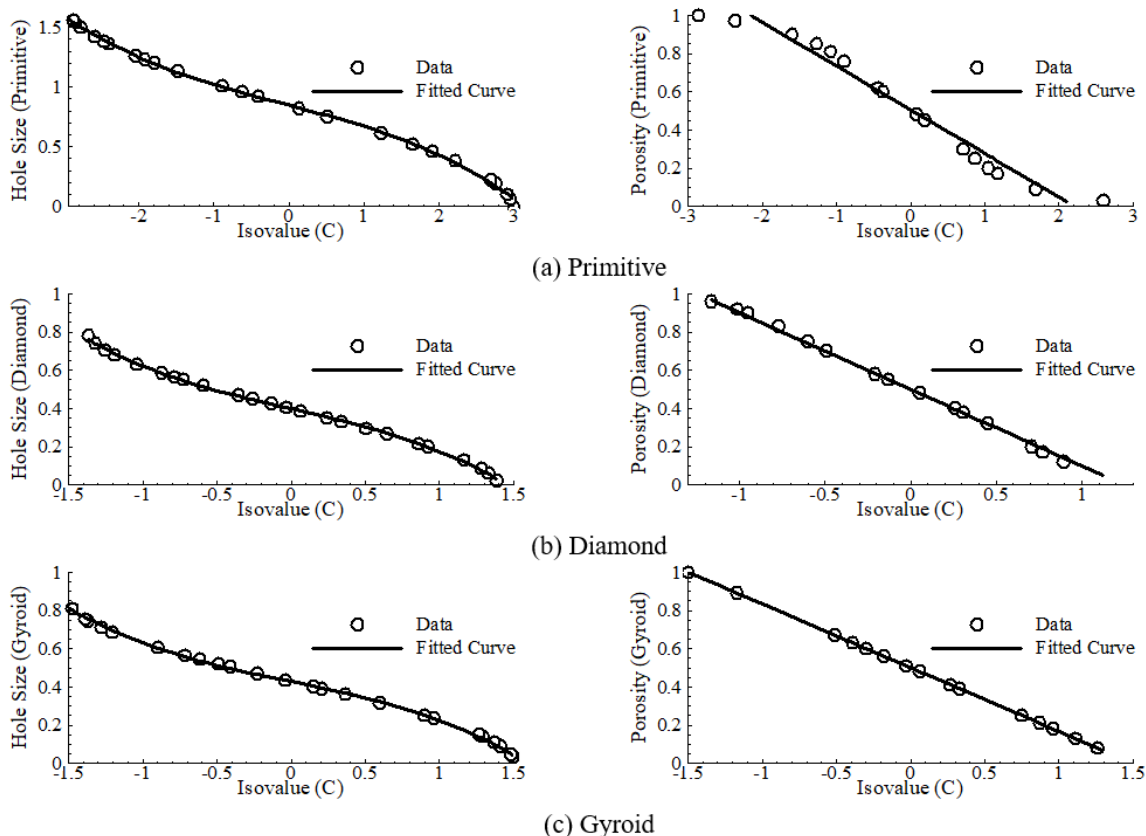


Figure ۱. Porosity and pore size distribution and fitting curves for different types of TPMS structures.

شکل ۱. منحنی‌های توزیع و برازش تخلخل و اندازه‌ی روزه برای انواع مختلف ساختارهای TPMS.

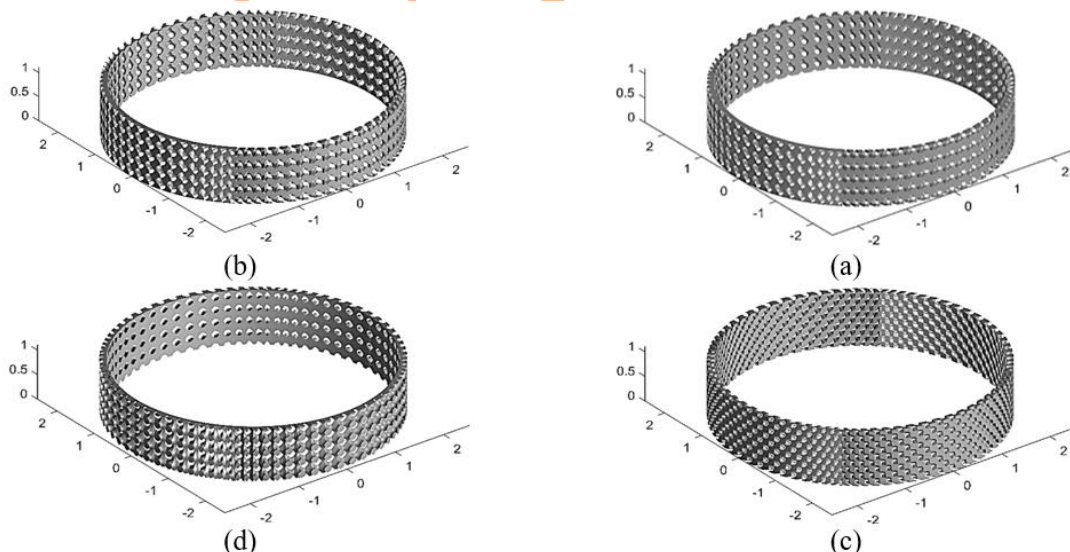


Figure ۲. Various TPMS-based porous casings showcased: (a) Type G with ۵۰% porosity, (b) Type G with ۳۵% porosity, (c) Type P with ۵۰% porosity, and (d) Type D with ۵۰% porosity.

شکل ۲. نمایش انواع جاذب‌های متخلخل مبتنی بر TPMS: (الف) نوع ژایروید با ۳۵٪ تخلخل، (ب) نوع ژایروید با ۵۰٪ تخلخل، (ج) نوع دایموند با ۵۰٪ تخلخل، و (د) نوع پریمی‌تیو با ۵۰٪ تخلخل.

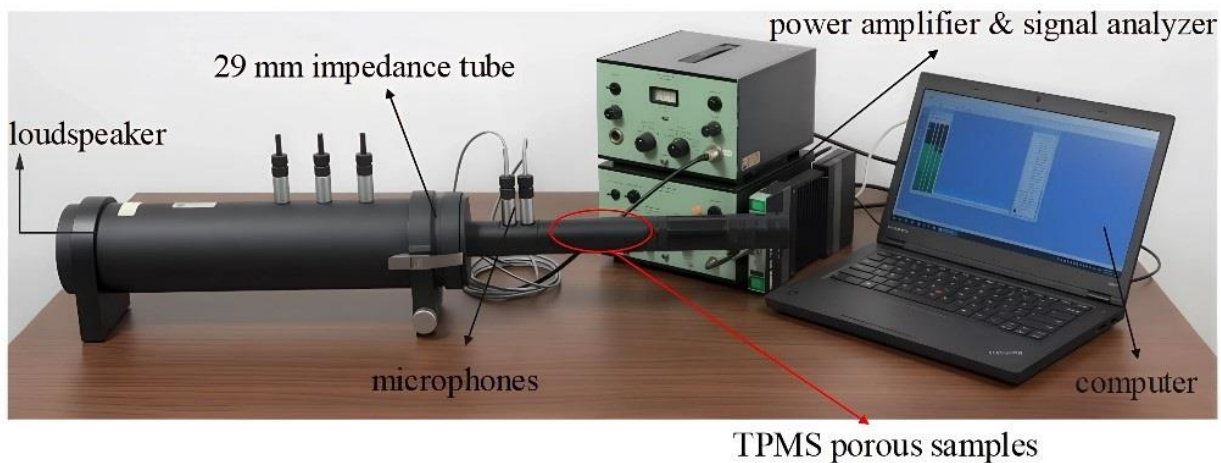


Figure ۳. Impedance tube setup for testing sound absorption properties.

شکل ۳. چیدمان لوله امیدانس برای آزمایش اندازه‌گیری ضریب جذب صدا.

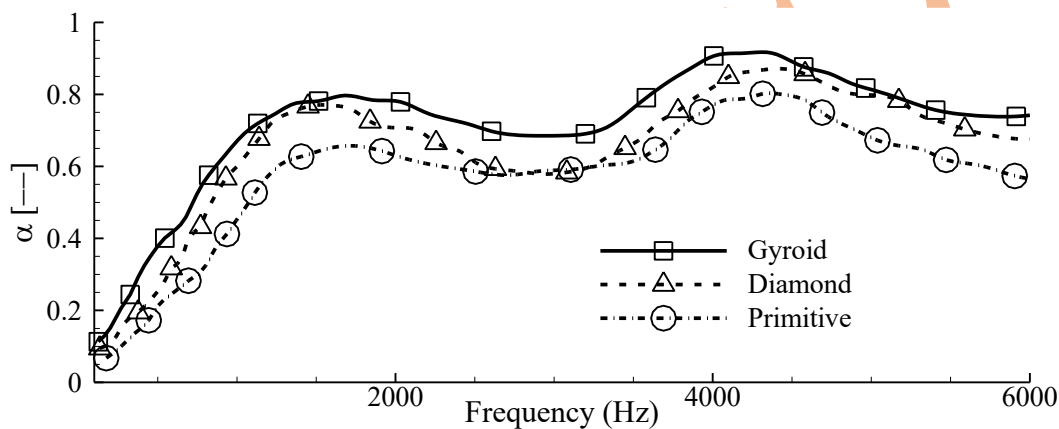


Figure ۴. Impact of TPMS Structure Type on Sound Absorption.

شکل ۴. تأثیر نوع ساختار TPMS بر ضریب جذب صدا.

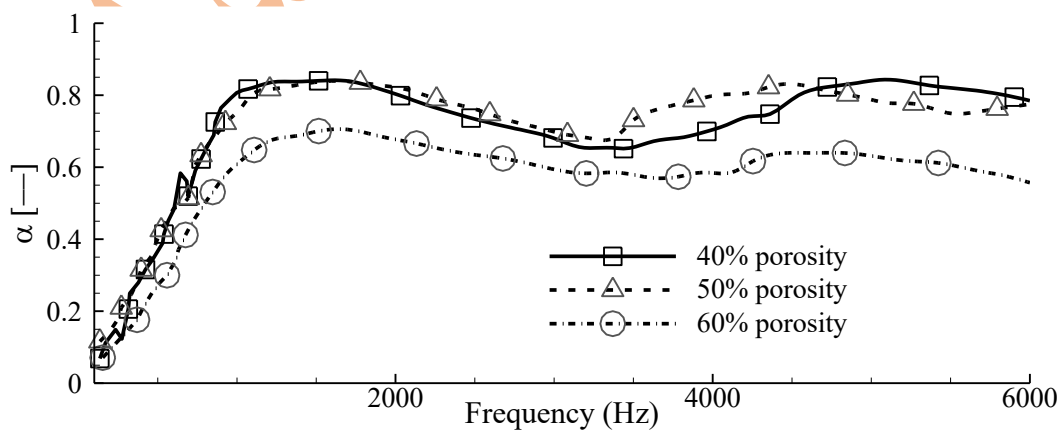


Figure ۵. Influence of Porosity on Sound Absorption for Gyroid.

شکل ۵. تأثیر درصد تخلخل بر ضریب جذب صدا برای ساختار ژایروئید.

۳. فناوری‌های آبروآکوستیکی اقتباس‌شده

برای تثبیت این نکته که ساختارهای متخلخل می‌توانند در کاهش نویز نقش مؤثری ایفا کنند، در این بخش دو کاربرد مهم مورد بررسی قرار گرفته‌اند: فن جریان محوری و توربین باد کانالی. در مورد نخست (فن جریان محوری) آزمون‌های آکوستیکی تجربی در اتاق بی‌پژواک انجام می‌شود تا عملکرد واقعی پوسته‌های متخلخل اندازه‌گیری شود؛ هم‌زمان یک تحلیل عددی صرفاً آیرودینامیک اجرا می‌گردد که هدف آن تبیین سازوکارهای فیزیکی کاهش نویز (مانند تغییر ساختار گردابه‌های نوک، کاهش انرژی جنبشی آشفتگی و تغییر میدان جریان نزدیک دیواره) و نه تطبیق کمی-آکوستیکی دقیق با نتایج تجربی است. در مورد دوم (توربین بادی کانالی) به دلایل محدودیت‌های ساخت نمونه و امکانات تجربی، تحلیل عددی کامل شامل حل آیرودینامیک و پردازش آبروآکوستیک صورت خواهد پذیرفت تا منشأ تغییرات نویز و تأثیر پوشش TPMS به صورت عددی و پیوسته بررسی شود. در هر دو سامانه، با بهره‌گیری از ساختارهای متخلخل نوین، انتظار می‌رود که رفتار آبروآکوستیکی بهبود یابد و نیز سطح نویز کم شود. هدف این است که با این رویکرد نشان داده شود که استفاده از فناوری‌های اقتباس‌شده می‌تواند راهکاری کارآمد برای کنترل و کاهش نویز در سامانه‌های مختلف جریان هوا باشد.

۱.۳. پوسته متخلخل اطراف فن جریان

محوری

در این بخش هدف آن است که پوسته اطراف فن محوری با استفاده از یک لایه متخلخل مبتنی بر ساختارهای TPMS اصلاح شود. ابتدا پوسته‌های مختلف با کمک کد متلب طراحی و سپس با فناوری پرینت سه‌بعدی ساخته شدند. ارزیابی‌ها هم به صورت تجربی در اتاق آکوستیک و هم به صورت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار XFlow انجام گرفته

است. در آزمایش تجربی آکوستیک، از یک فن جریان محوری با ابعاد $120 \times 120 \times 25$ میلی‌متر و دارای هفت پره استفاده شد (شکل ۷). این فن با سرعت دورانی 1200 rpm کار می‌کند و فرکانس گذر پره‌های آن 140 هرتز است. شعاع هاب، شعاع نوک پره و فاصله نوک پره (لقی نوک)^۱ به ترتیب 23 ، 55 و 2 میلی‌متر هستند. فن مورد مطالعه که برای خنک‌سازی رایانه به کار می‌رود، دارای پوسته‌ای پلاستیکی است. به منظور چاپ سه‌بعدی پوسته‌های TPMS، از پلی‌لاکتیک اسید (PLA) استفاده شد. این ماده با چگالی 1250 kg/m^3 و مدول یانگ متوسط 3.225 GPa ، علاوه بر سازگاری بالا با فرآیند پرینت سه‌بعدی، امکان دستیابی به دقت هندسی بالا در ساختارهای پیچیده TPMS را فراهم می‌کند و بنابراین انتخابی ایده‌آل برای این پژوهش بوده است. کلیه اندازه‌گیری‌ها در یک اتاق بی‌پژواک با ابعاد $3 \times 3 \times 4$ متر و فرکانس قطع 100 هرتز انجام شد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اندازه‌گیری صدا با قرار دادن دستی یک میکروفون در 12 نقطه مختلف روی سطح یک کره، به شعاع 0.8 متر از مرکز روتور و با فواصل زاویه‌ای 45 درجه صورت گرفت. چیدمان آزمایش و اجزای آن در شکل ۷ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در حین آزمایش اصلی، منبع تغذیه و رایانه به خارج از اتاق آکوستیک قرار داده شدند. میکروفون در فاصله استاندارد از سطوح جاذب دیواره اتاق قرار گرفت تا اثر بازتاب‌ها به حداقل برسد. کل فرآیند مطابق با استاندارد ملی ایران: ISIRI ۶۱۸۴ «آکوستیک – تعیین سطح توان صدای نویز» اجرا شد. برای اندازه‌گیری از میکروفون PreSonus® PRM1 با بازه فرکانسی 20 هرتز تا 20 کیلوهرتز و حساسیت 14 mV/Pa استفاده شد. داده‌های نویز با نرخ نمونه‌برداری 44.1 kHz و دقت 24 بیت توسط کارت صدا-Zoom AMS-2 جمع‌آوری گردید. هر بار برداشت داده به مدت 20 ثانیه انجام شد. سیگنال‌های ضبط‌شده در نرم‌افزار متلب پردازش شدند و طیف متوسط صدا به صورت سطح فشار صدا برحسب دسیبل ارائه گردید. همچنین نویز پس‌زمینه نیز اندازه‌گیری

^۱ Tip Clearance

شد که شامل صداهای محیطی موجود در زمان خاموش بودن
فن، مانند نویز اپراتور، جابجایی تجهیزات و صدای پس زمینه
اتاق بود.

دید استادی
نشده

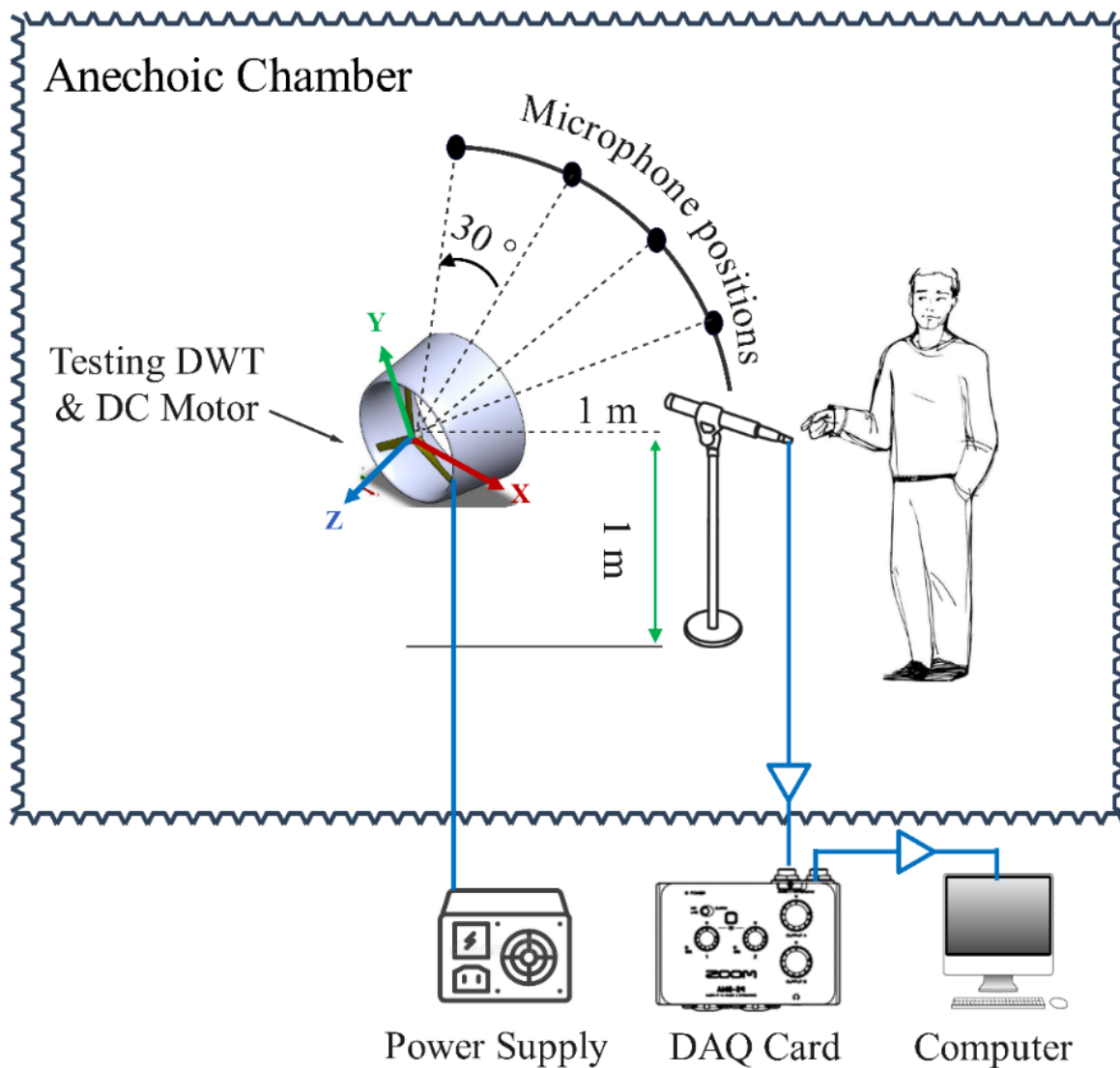
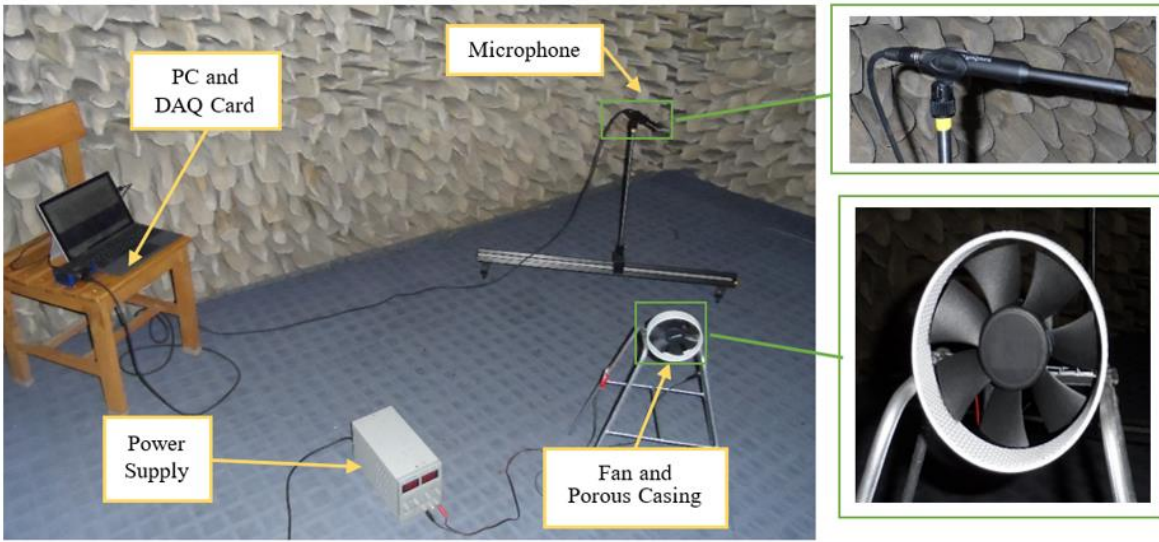


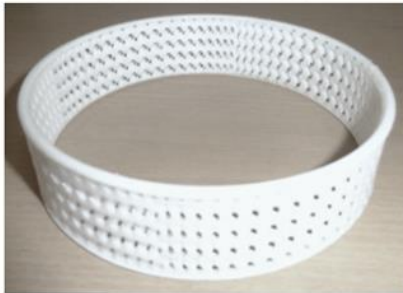
Figure ٦. Schematic representation of experimental setup and microphone array.

شکل ٦. نمایش شماتیک چیدمان آزمایش و آرایه میکروفون.

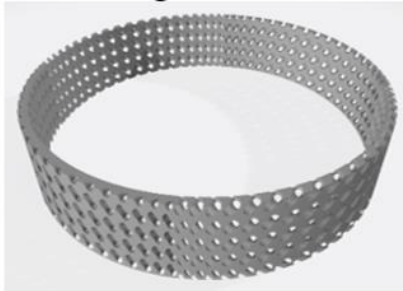


(a)

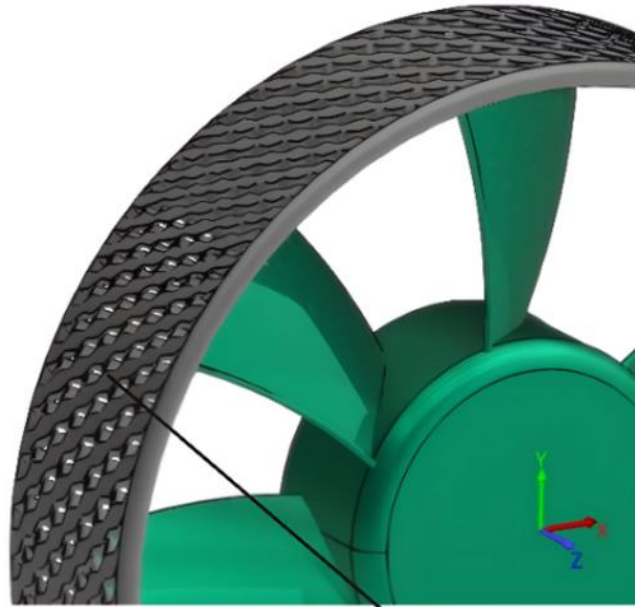
Printed model



Designed model



(c)



(b)

Figure 7. A schematic of the experimental setup for measuring axial flow fan noise using a single microphone: (a) Overall view of the acoustic chamber apparatus, (b) the casings under investigation and (c) Fan casing geometry.

شکل ۷. شماتیکی از چیدمان آزمایش برای اندازه‌گیری نویز فن جریان محوری با استفاده از یک میکروفون: (الف) نمای کلی اتاق آکوستیک، (ب) فن مورد استفاده و (ج) هندسه‌ی پوسته‌ی فن.

در ادامه، نتایج حاصل از آزمون آکوستیک تجربی ارائه می‌شود. شکل ۸ تحلیل مقایسه‌ای از (الف) سطح فشار صدا (SPL) و (ب) طیف تجمعی انرژی آکوستیکی (ASE) برای یک فن جریان محوری را با سه نوع پیکربندی پوسته نشان می‌دهد: پوسته صلب، بدون پوسته و پوسته متخلخل (ژایرید با ۵۰٪ تخلخل). نتایج نشان می‌دهد که پوسته متخلخل در هر دو شاخص SPL و ASE عملکرد بهتری نسبت به پوسته صلب دارد. حالت بدون پوسته نیز کاهش نویز متوسطی ایجاد می‌کند و اگرچه نسبت به پوسته صلب بهتر است، اما همچنان اثربخشی آن کمتر از پوسته متخلخل است. به طور کلی، استفاده از پوسته متخلخل کاهش چشمگیری در نویز فن به همراه دارد؛ چنانکه در شکل ۸ الف دیده می‌شود، SPL در اغلب فرکانس‌ها بین ۳ تا ۴ دسی‌بل کاهش یافته است. همچنین در شکل ۸ ب، سطح زیر منحنی نشان می‌دهد که پوسته متخلخل حدود ۳۶٪ از انرژی آکوستیک تجمعی را کاهش می‌دهد. نمودار SPL کاهش محسوس در سه فرکانس گذر پره (BPF) غالب اول را برجسته می‌سازد و نمودار ASE نیز کاهش چشمگیر انرژی آکوستیکی در این مقادیر فرکانسی را تأیید می‌کند. اگرچه عملکرد جذب صدا پوسته متخلخل در فرکانس‌های گذر پره تضعیف می‌شود، اما همچنان کاهش نویز کلی بهبود یافته است.

شکل ۹ توزیع سطح فشار صدا کلی (OASPL) را برای سه پیکربندی پوسته نشان می‌دهد. پوسته متخلخل کاهش نویز را در تمامی جهات شعاعی فن ایجاد کرده و به طور میانگین باعث افت OASPL به میزان ۶ دسی‌بل (معادل ۱۱٪) شده است. با این حال، در برخی نقاط سمت چپ فن مقادیر نویز بالاتری مشاهده می‌شود که به احتمال زیاد ناشی از چرخش پادساعتگرد فن و برهم‌کنش بین گردابه جدایش و گردابه نوک پره بعدی است.

در بخش پیشین، رفتار آیروداکوستیکی فن‌های جریان محوری با پوسته‌های متخلخل مبتنی بر TPMS براساس داده‌های تجربی بررسی شد و اثربخشی این ساختارها در کاهش نویز نشان داده شد. در این بخش، به بررسی عوامل بنیادی مؤثر در این کاهش نویز به صورت عددی پرداخته می‌شود. برای درک بهتر مکانیزم‌ها، چندین ویژگی آیرودینامیکی جریان مورد تحلیل قرار گرفته است. در این پژوهش از چارچوب محاسباتی مبتنی بر روش بولتزمن شبکه‌ای^۱ (LBM) در نرم‌افزار XFlow استفاده شده است. همراه با شبکه کارتیزی چندسطحی و تشدید تطبیقی^۲، توانمندی بالایی برای حل گذرای جریان‌های آیرودینامیکی و استخراج سیگنال‌های آکوستیکی دارد، به‌ویژه زمانی که هندسه‌های پیچیده (مانند TPMS) صریحاً در دامنه قرار گیرند. جزئیات دامنه محاسباتی، شرایط مرزی، هندسه فن و موقعیت گذاری آن در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. برای مدل‌سازی جریان سیال از مدل WALE استفاده شد، زیرا این مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته به‌ویژه در نواحی نزدیک دیواره دارد و نسبت به بسیاری از مدل‌های زیرشبکه‌ای دیگر، توانایی بهتری در بازنمایی ساختارهای گردابه‌ای کوچک‌مقیاس و توزیع صحیح و رتبیسته از خود نشان می‌دهد. دامنه محاسباتی به صورت یک جعبه مستطیلی با ابعاد ۷.۲ متر (طول) × ۲.۴ متر (عرض) × ۲.۴ متر (ارتفاع) تعریف شد. فن در مرکز صفحه‌ی x-y و در فاصله ۲.۴ متری از دیواره سمت چپ قرار داده شد. برای شبیه‌سازی دوران فن، از روش چارچوب مرجع دلخواه (ARF) به جای استفاده از هندسه متحرک واقعی بهره گرفته شد. انتخاب ARF هزینه محاسباتی را کاهش می‌دهد و برای بازتولید طیف باندپهن و میدان میانگین جریان مناسب است. در کل، روش انتخابی (WALE + ARF + LBM در Xflow) تعادل مناسبی بین دقت فیزیکی مورد نیاز برای آشکارسازی مکانیزم‌های آیرودینامیکی/آکوستیکی و هزینه محاسباتی فراهم می‌آورد. سرعت چرخش فن روی ۱۲۰۰ rpm تنظیم شد.

^۲ adaptive refinement

^۱ Lattice Boltzmann Method

برای پایداری عددی، عدد کورانت برابر ۱ در نظر گرفته شد و برای مدل‌سازی دیواره‌ها از روش تابع دیواره تقویت‌شده غیرتعادلی استفاده شد. هوای آزاد به عنوان سیال کاری انتخاب شد و شرایط مرزی به‌دقت تعریف گردید. مرزهای ورودی و خروجی به صورت فشار خروجی با مقدار صفر پاسکال (شرایط محیطی) تعریف شدند و دیواره‌های جانبی دامنه محاسبات به صورت شرایط دوردست اعمال شدند. همچنین سطوح فن و محفظه به صورت دیواره با شرط عدم لغزش مدل شدند تا برهم‌کنش واقعی جریان با سطح به‌درستی لحاظ شود. در این شبیه‌سازی، مقدار مقیاس حل‌شده شبکه برای دامنه برابر با ۰.۱ متر و برای فن و محفظه برابر با ۰.۰۰۰۱ متر تعیین شد.

دانشجوی
نشد

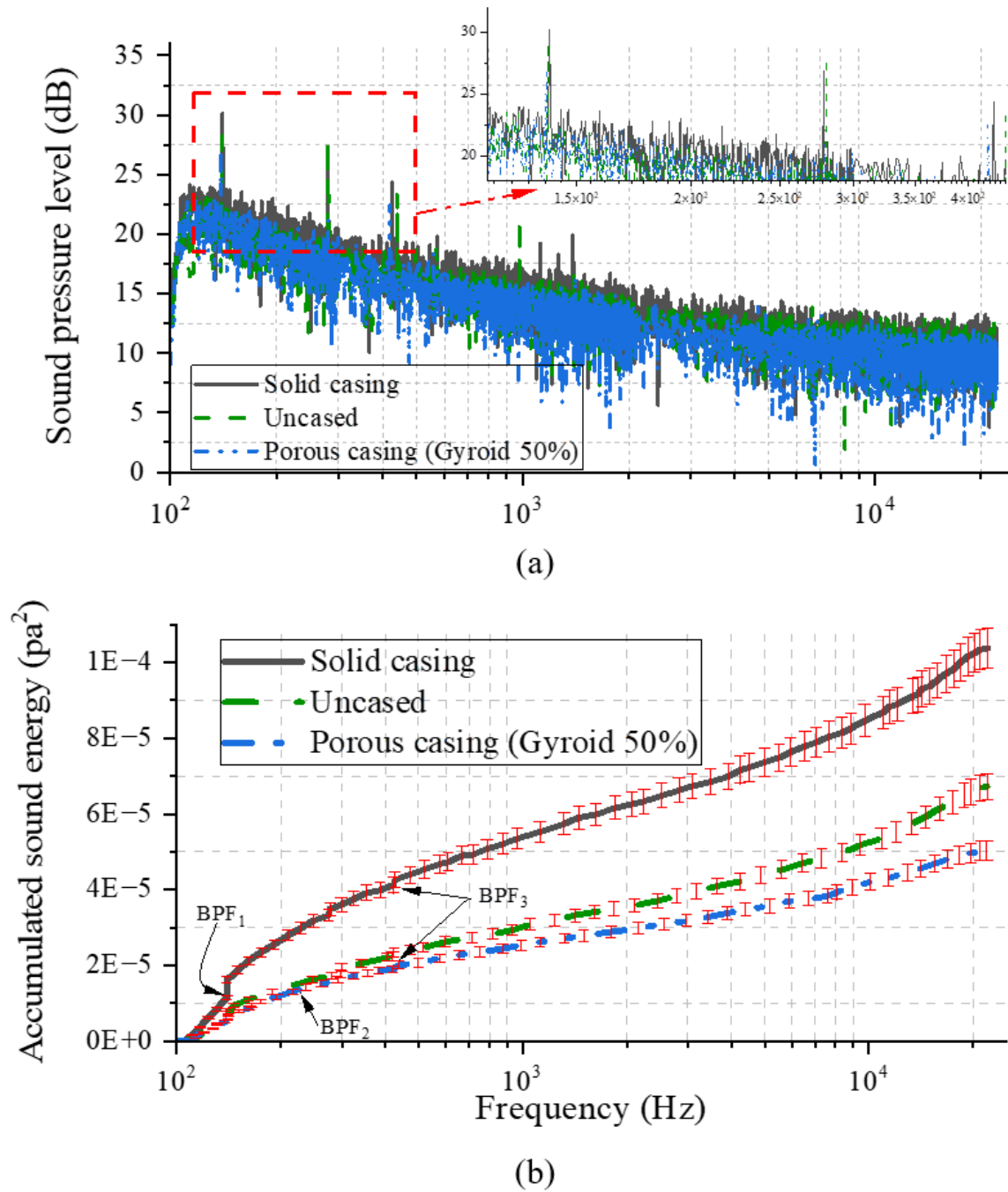


Figure 8. Comparative analysis of sound pressure level and accumulated sound energy spectra for fan with solid casing, uncased, and Gyroid porous casing under identical operating conditions.

شکل ۸. تحلیل مقایسه‌ای تراز فشار صدا و طیف انرژی آکوستیک تجمعی برای فن با پوشش صلب، بدون پوشش و پوشش متخلخل ژایرویدی تحت شرایط عملیاتی یکسان.

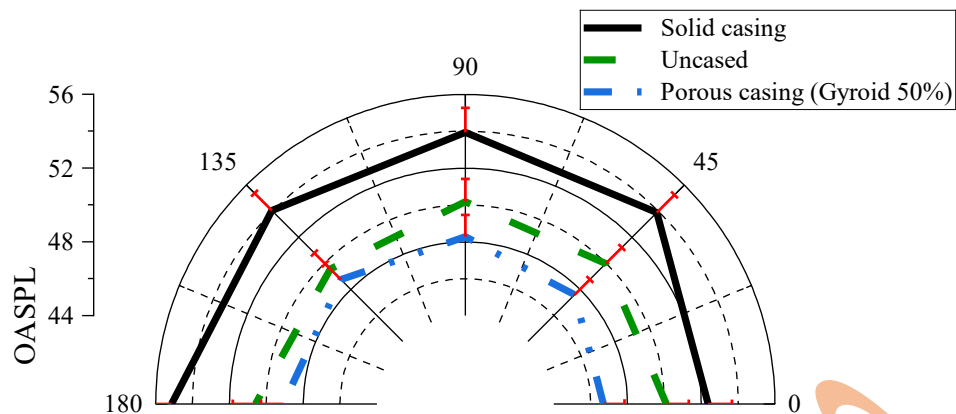


Figure 9. OASPL distribution curve for fan with solid casing, uncased, and Gyroid porous casing under identical operating conditions.

شکل ۹. منحنی توزیع تراز فشار صدای کلی برای فن با پوشش توپر، بدون پوشش و پوشش متخلخل ژئروئیدی تحت شرایط عملیاتی یکسان.

شدت گردابه‌های نوک پره را کاهش داده و بازده فن را بهبود بخشید. نمایش کانتور بردارها بیانگر آن است که پوسته متخلخل تأثیر محسوسی بر بردارهای سرعت نزدیک نوک پره‌ها دارد و توزیع یکنواخت‌تری از سرعت روی سطح پره ایجاد می‌کند. ورود پوسته متخلخل به سیستم، دینامیک جریان نشستی نوک را با ایجاد مسیرهای جریان ثانویه در منافذ ریز پوسته تغییر می‌دهد. این تغییر منجر به توزیع کنترل‌شده‌تر گردابه‌ها در ناحیه نوک شده و پایداری جریان را افزایش می‌دهد. این بهبود در پایداری جریان، نوسانات را کاهش داده و اغتشاشات را کم می‌کند. بردارهای سرعت در نزدیکی مرز سیال-متخلخل نشان‌دهنده کاهش تدریجی سرعت محوری در گذر جریان از ناحیه متخلخل هستند. هرچند سرعت در مرز به صفر نمی‌رسد، اما در مقدار نسبتاً ثابتی پایدار می‌شود که این خود نشان‌دهنده تغییر اساسی ویژگی‌های جریان در اثر حضور پوسته متخلخل است. شکل ۱۱ ج، کانتور گردابه‌ای را برای پیکربندی‌های پوسته صلب و متخلخل تحت شرایط یکسان (rpm ثابت) نشان می‌دهد. مقایسه کانتورها آشکار می‌سازد که استفاده از پوسته متخلخل منجر به کاهش مومنتوم جریان نشستی نوک پره در برهم‌کنش با جریان اصلی می‌شود. پوسته متخلخل به‌طور مؤثر شدت گردابه نوک پره را کاهش می‌دهد (دایره‌های سیاه). این کاهش عمدتاً ناشی از تضعیف اختلاف فشار بین سطح مکش و فشار پره است که به نوبه خود تشکیل گردابه در نوک پره را محدود می‌کند. تحلیل ساختار جریان نشان می‌دهد که با افزودن پوسته متخلخل، جریان منظم‌تر شده و شدت گردابه‌ها در ناحیه نوک پره کاهش می‌یابد. بنابراین، حضور پوسته متخلخل موجب کاهش ناپایداری جریان و تضعیف منابع نویز اطراف فن می‌شود که این امر مزیت قابل توجهی در جلوگیری از نوسانات ناخواسته و ارتقای پایداری عملکرد به شمار می‌رود.

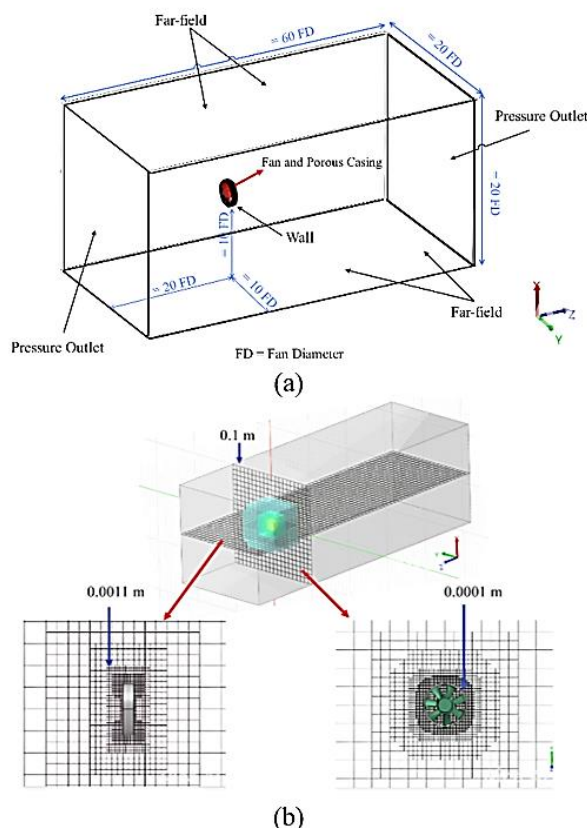


Figure ۱۰. Simulation setting: computational domain and boundary conditions and (b) discrete schematic diagram of domain.

شکل ۱۰. تنظیمات شبیه‌سازی عددی: (الف) میدان محاسباتی و شرایط مرزی و (ب) شبکه مورد استفاده.

شکل ۱۱ الف جریان خطوط اطراف فن و نزدیک پوسته را برای پیکربندی‌های پوسته صلب، پوسته متخلخل تخلخل ۵۰٪ مقایسه می‌کند. حضور پوسته متخلخل تأثیر قابل توجهی بر جریان خطوط، سرعت مطلق جریان و تشکیل و رفتار گردابه‌های نشستی نوک پره در فن‌های کوچک دارد. همان‌طور که در ساختار جریان خطوط نشان داده شده است، پوسته متخلخل به‌طور مؤثری گردابه‌های نوک را تضعیف می‌کند و جریان را منظم‌تر و کم‌اغتشاش‌تر از حالت پوسته صلب نشان می‌دهد. تغییر رنگ از قرمز تیره به آبی روشن در میدان جریان نیز نشان‌دهنده کاهش سرعت مطلق است. علاوه بر این، در شکل ۱۱ ب مشاهده می‌شود که جهت جریان از راستای چرخش فاصله گرفته است؛ تغییری که انتظار می‌رود

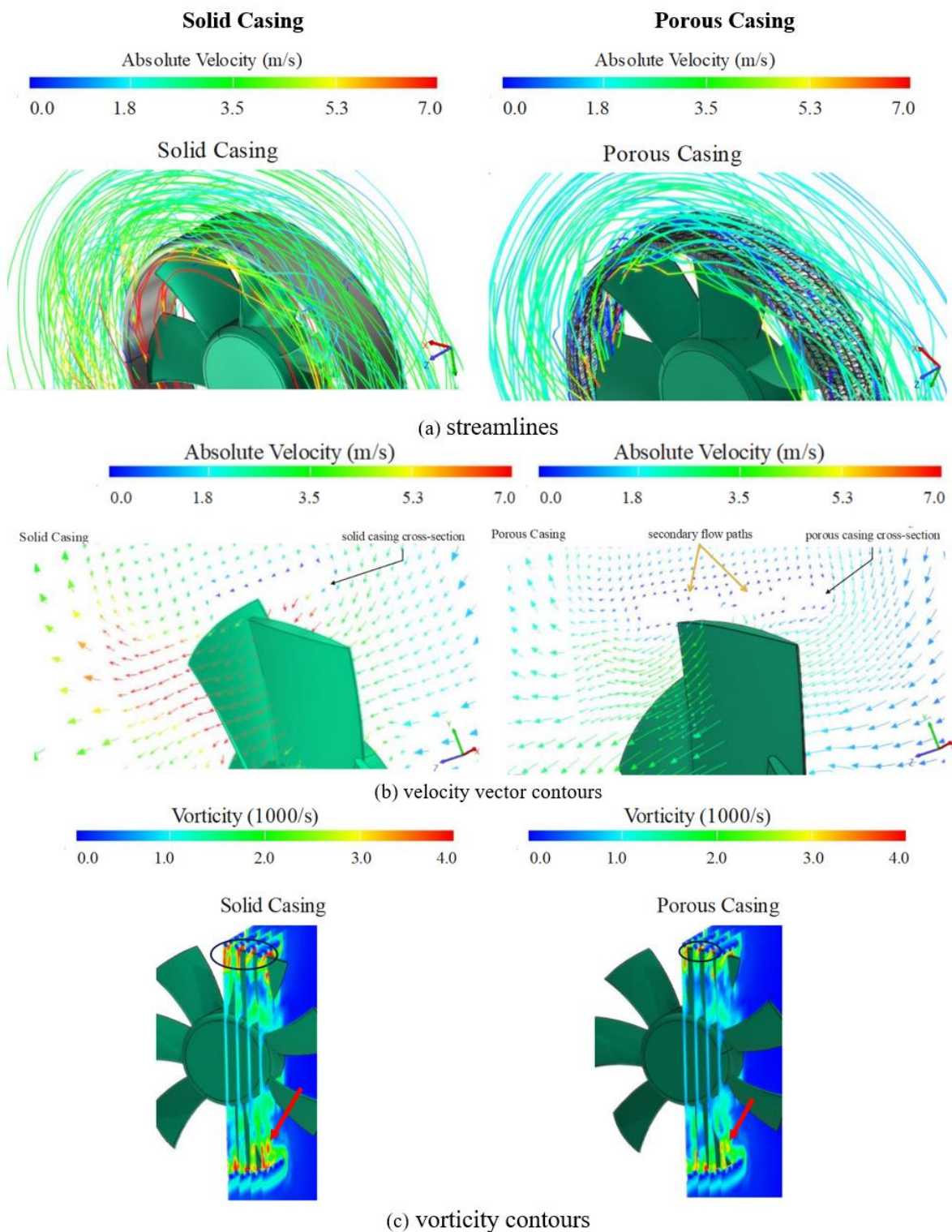


Figure 11. Comparison of aerodynamic characteristic contours for solid and porous casings: (a) streamlines contour, (b) velocity vectors contour, and (c) vorticity contour.

شکل ۱۱. مقایسه کانتوری مشخصه‌های آیرودینامیکی برای دو پوسته صلب و متخلخل: (الف) کانتور خطوط جریان، (ب) کانتور بردارهای سرعت و (ج) کانتور گردابه.

۲.۳. اصلاح آکوستیکی توربین بادی کانالی

در این بخش، اصلاح آکوستیکی داکت توربین باد کانالی با بهره‌گیری از ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح کمینه متناوب سه‌گانه بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا یک شبیه‌سازی آیروداکوستیکی با استفاده از روش لیتیس بولتزمن در نرم‌افزار XFlow انجام گرفت تا نواحی پرنویز در سطح داخلی داکت شناسایی شوند. توربین بادی مورد استفاده از نوع DonQi® با پره‌های خطی شده است. لازم به ذکر است در این بخش از ذکر جزئیات طراحی توربین باد و ستاپ عددی اضافی صرف‌نظر شده است. شرایط مرزی شامل ورودی سرعت و خروجی فشار برای شبیه‌سازی جریان آزاد در نظر گرفته شد. سرعت جریان آزاد برابر با ۵ متر بر ثانیه انتخاب گردید که معادل با عدد رینولدز $Re = 3.4 \times 10^6$ بر اساس وتر داکت است. روتور با سرعت زاویه‌ای ۳۹.۸۴ رادیان بر ثانیه کار می‌کرد.

نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهند که دو ناحیه از داکت بیشترین پتانسیل تولید نویز را دارند: لبه حمله و سطح داخلی اطراف توربین. در شکل ۱۲ الف، کانتورهای فشار آکوستیکی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لبه حمله به‌عنوان یک ناحیه بحرانی نوسانات فشار عمل می‌کند. این پدیده می‌تواند ناشی از انحنای زیاد و نسبت ضخامت بالای داکت باشد که تشکیل گردابه‌ها را در این ناحیه تشدید می‌کند. گردابه‌های شکل‌گرفته وارد جریان شتاب‌گرفته اصلی شده و نوسانات فشار را تقویت می‌کنند. همچنین، جدایش جریان در لبه حمله می‌تواند منجر به رشد ناپایداری‌ها و افزایش فشار نوسانی شود. در شکل ۱۲ ب، توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، سطح داخلی داکت به‌ویژه در اطراف توربین و هاب، بالاترین مقادیر TKE را نشان می‌دهد (نواحی مشخص‌شده با بیضی‌های قرمز). این رفتار به‌شدت تحت تأثیر چرخش پره‌ها قرار دارد. هاب و به‌ویژه فاصله نوک پره تا دیواره داکت، به‌عنوان نواحی اوج آشفتگی شناسایی

شدند. دلیل اصلی آن اختلاف فشار بین سطوح مکش و فشار پره است که جریان نشستی نوک پره را ایجاد می‌کند. این جریان هنگام عبور از فاصله نوک پره با جریان اصلی برهم‌کنش داشته و یک گردابه قوی در نوک پره ایجاد می‌کند که یکی از منابع اصلی TKE در این ناحیه به‌شمار می‌رود. بر اساس این نتایج، حدود ۱۰٪ از طول وتر داکت در ناحیه پایین‌دست لبه حمله به‌عنوان ناحیه مناسب برای اعمال اصلاح آکوستیکی انتخاب شد تا نوسانات فشار کاهش یابد، و حدود ۳۰٪ از سطح داخلی داکت برای جذب نویز ناشی از آشفتگی در نظر گرفته شد.

مطابق با بخش ۳-۲، ساختار ژیروید (با تخلخل ۵۰٪) به‌عنوان مرجع برای اصلاح آکوستیکی انتخاب شد. دلیل این انتخاب، ایجاد تعادل مطلوب میان استحکام مکانیکی، همسانگردی و نفوذپذیری آکوستیکی است. ساختار ژیروید می‌تواند جذب صدا را بهبود بخشد. انتخاب تخلخل ۵۰٪ نیز یک راهکار عملی محسوب می‌شود، زیرا ضمن فراهم‌کردن نفوذپذیری کافی برای میرایی صدا، سختی لازم برای ادغام در داکت را نیز حفظ می‌کند. در نهایت، بر اساس ملاحظات آکوستیکی و بررسی‌های انجام شده، ناحیه متخلخل مناسب توسط کد مربوطه تولید گردید و بخش لبه حمله و سطح داخلی داکت با ساختار ژیروید یکنواخت مطابق با شکل ۱۳ پوشش داده شد.

در ادامه این بخش نتایج آکوستیک و آیرودینامیک حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه می‌گردد. در شکل ۱۴ مقایسه سطح فشار صدا برحسب فرکانس بین داکت صلب و داکت مبتنی‌بر ساختار TPMS را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است، در بیشتر بازه‌های فرکانسی، داکت TPMS منجر به کاهش قابل‌توجه سطح فشار صدا نسبت به داکت صلب شده است. در محدوده فرکانس‌های پایین، اختلاف کمتر است اما با افزایش فرکانس تا حدود ۴۰۰۰ هرتز، افت محسوس‌تری مشاهده می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده نقش مؤثر ساختار متخلخل TPMS در تضعیف انتشار موج‌های

شکل ۱۲. نواحی پرنویز در سطح داخلی داکت: (الف) کانتور فشار آکوستیک و (ب) کانتور انرژی جنبشی آشفته‌گی.

در این بخش در صدد آن بودیم که علت کاهش نویز یا به عبارتی مکانیزم‌های کاهش نویز ناشی از لایه‌های متخلخل مبتنی بر TPMS را بررسی شود. برای این منظور، کانتور گردابه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. همان‌طور که اشاره شد، ناحیه فاصله‌ی نوک پره می‌تواند به‌عنوان یک منبع اضافی نویز عمل کند، زیرا نوسانات سرعت آشفته در این فاصله افزایش می‌یابد (رجوع شود به شکل ۱۲). این نوسانات معمولاً ناشی از برهم‌کنش بین گردابه‌های نوک پره و لایه مرزی آشفته‌ای است که روی سطح داخلی داکت توسعه می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در حالت داکت صلب گردابه‌های شدید عمده‌تاً در نزدیکی لبه‌های حمله، ناحیه فاصله نوک پره و اطراف هاب متمرکز هستند؛ همان نواحی‌ای که پیش‌تر به‌عنوان منابع قوی نویز شناسایی شده بودند. این تمرکز نشان‌دهنده وجود گردابه‌های بزرگ، منسجم و پرانرژی است که می‌توانند به‌عنوان منابع آکوستیکی قوی، به‌ویژه برای نویزهای تونال، عمل کنند. نمای سه‌بعدی نیز همین ساختارهای گردابه‌ای متمرکز را نشان می‌دهد. اما در حالت داکت مبتنی بر TPMS، گرچه گردابه همچنان وجود دارد، توزیع فضایی آن به‌وضوح متفاوت است: به جای چند ناحیه بسیار شدید و متمرکز، گردابه‌ها به صورت نواحی کوچک‌تر و پراکنده‌تر در امتداد و داخل لایه متخلخل و سطح داخلی داکت دیده می‌شوند. به بیان دیگر، ساختار TPMS به نظر می‌رسد که گردابه‌های بزرگ را به گردابه‌های کوچک‌تر با قدرت کمتر و متعدد تجزیه می‌کند. این انتقال به مقیاس‌های کوچک‌تر گردابه معمولاً منجر به افزایش اتلاف ویسکوزی در مقیاس‌های کوچک شده و در نتیجه از ایجاد منابع آکوستیکی قوی و منسجم جلوگیری می‌کند. به طور خلاصه، این نتایج نشان می‌دهد که اعمال یک لایه TPMS روی لبه حمله و سطح داخلی داکت باعث می‌شود جریان به جای تشکیل گردابه‌های بزرگ و متمرکز (که منابع اصلی نوسانات فشار و

صدا است. به‌طور کمی، مقدار OASPL برای داکت صلب ۵۶.۷۵ دسیبل و برای داکت TPMS برابر ۵۲.۱۶ دسیبل گزارش شده است که بیانگر کاهش کلی ۸ درصدی در سطح فشار صدا است. این نتایج نشان می‌دهد که طراحی مبتنی بر TPMS می‌تواند به‌عنوان یک فناوری آبروآکوستیکی کارآمد برای کاهش نویز در سامانه‌های جریان محوری و داکت‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

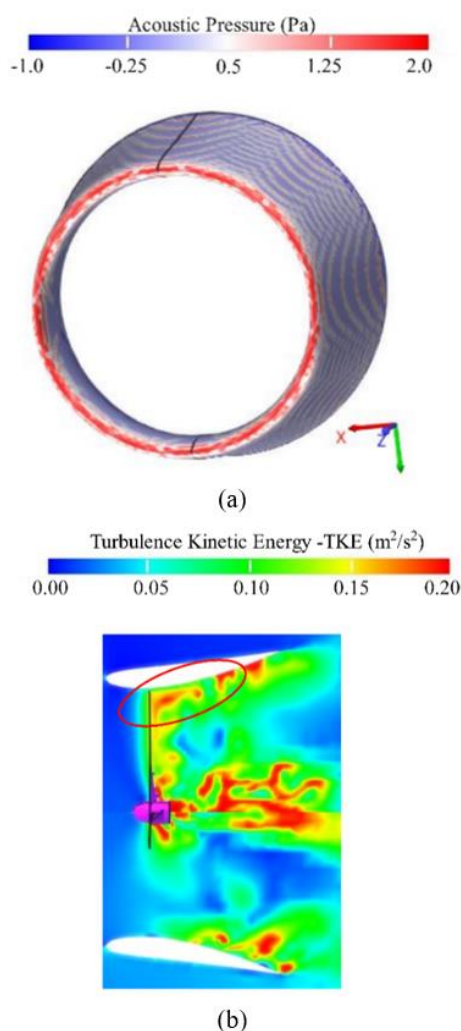


Figure ۱۲. Noisy regions on the duct inner surface: (a) acoustic pressure contour and (b) turbulent kinetic energy contour.

نویز هستند)، به حالتی با گردابه‌های کوچک‌تر و پراکنده‌تر تغییر یابد. ساده‌تر بگوییم، ساختارهای TPMS انرژی آشفته را پخش و خرد می‌کنند و از تشکیل گردابه‌های بزرگ و منسجم که منشأ نویز قوی هستند جلوگیری می‌کنند. این مکانیزم‌ها می‌توانند دلایل فیزیکی اصلی کاهش نویز ناشی از استفاده از TPMS در داکت باشند.

دید استاتی
نشده

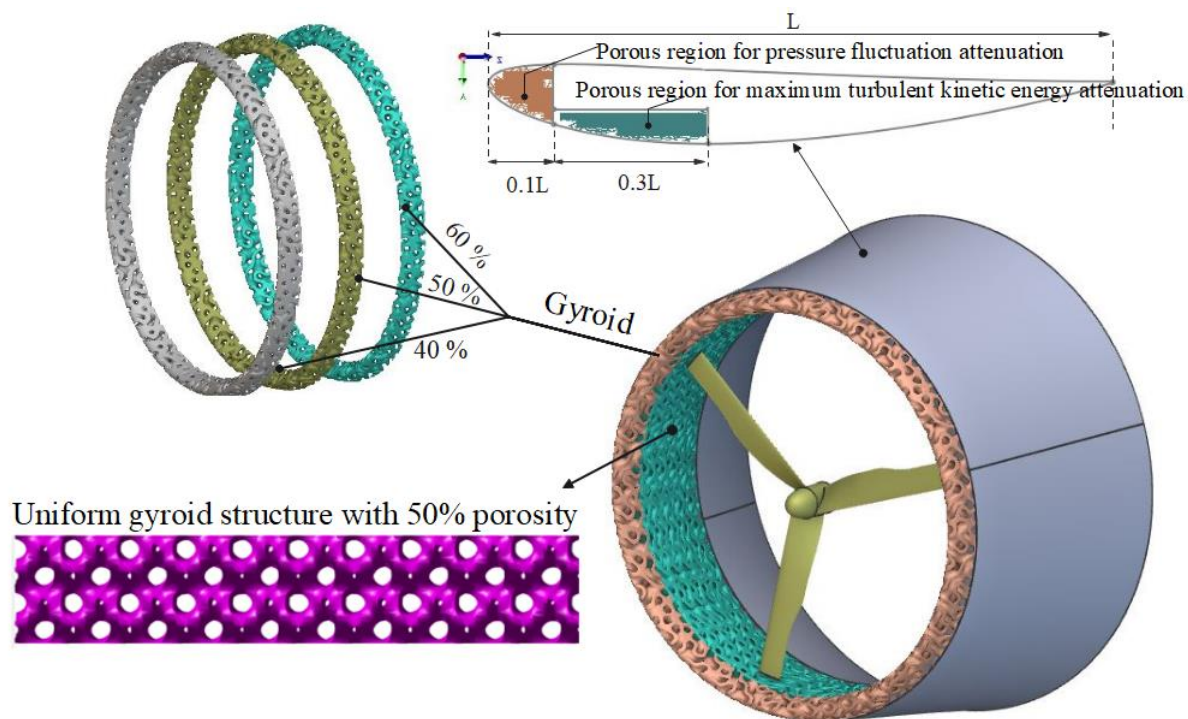


Figure ۱۳. Design and schematic of duct acoustic treatment using a gyroid structure.

شکل ۱۳. طراحی و شماتیک اصلاح آکوستیکی داکت با استفاده از ساختار ژایرود.

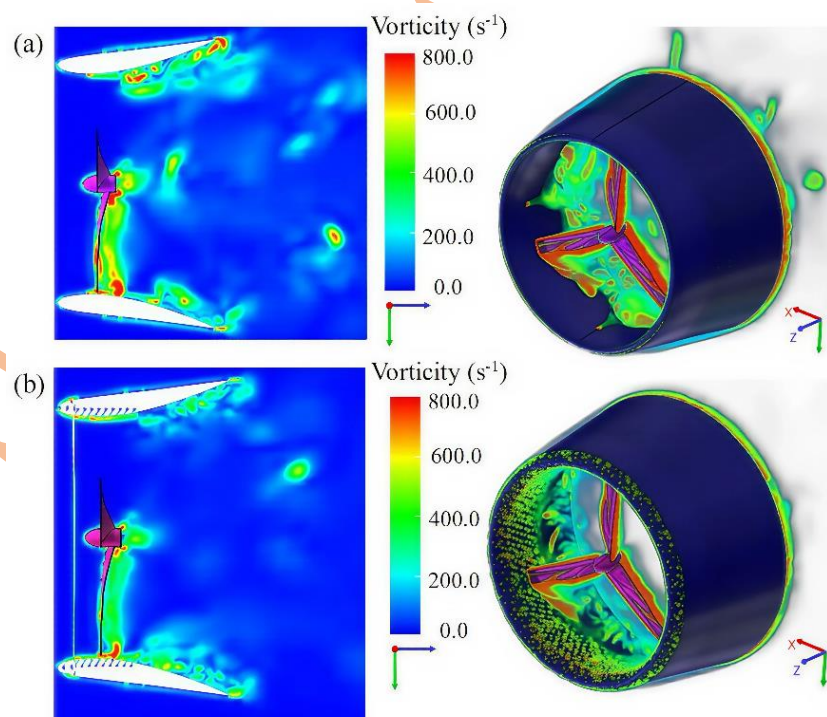


Figure ۱۴. Comparison of vorticity contours for: (a) rigid duct and (b) TPMS-based duct.

شکل ۱۴. مقایسه کانتورهای گردابه برای: (الف) داکت صلب و (ب) داکت مبتنی بر ساختار TPMS.

نزدیک دیواره، به عنوان یک فناوری آیروآکوستیکی نوظهور، عملکردی مؤثر و پایدار داشته باشد.

منابع

1. World Health Organization, ۲۰۱۱. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. *World Health Organization*. DOI: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241566947>
2. Mozafari, M., Sadeghimalekabadi, M., Fardi, A., Bruecker, C. and Masdari, M., ۲۰۲۴. Aeroacoustic investigation of a ducted wind turbine employing bio-inspired airfoil profiles. *Physics of Fluids*, 36 (۴). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0204000>
3. Mozafari, M., Masdari, M., Zhang, Q. and Tahani, M., ۲۰۲۵. Aeroacoustic impact of triply periodic minimal surface porous casings on axial flow fans. *Physics of Fluids*, 37 (۱). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248030>
4. Gedik Toker, Ö., Tas Elibol, N., Kuru, E., Görmezoglu, Z., Görener, A. and Toker, K., ۲۰۲۵. Industrial noise: impacts on workers' health and performance below permissible limits. *BMC Public Health*, 25 (۱), pp. ۱-۱۰. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22732-1>
5. Basner, M., ۲۰۱۴. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383 (۹۹۲۵), pp. ۱۳۲۵-۱۳۳۲. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)21113-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)21113-X)
6. Belojevic, G. and Evans, G. W., ۲۰۱۲. Traffic noise and blood pressure in low-socioeconomic status, African-American urban schoolchildren. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (۳), pp. ۱۴۰۳-۱۴۰۶. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4739449>
7. Rhodes, D., Weston, E. and Jones, K., ۲۰۱۳. ERCD report ۱۲۰۹ proposed methodology for

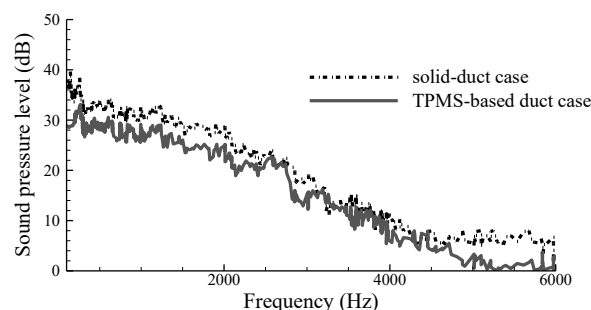


Figure ۱۵. Comparison of sound pressure level as a function of frequency between the solid duct and the TPMS-based duct.

شکل ۱۵. مقایسه سطح فشار صدا بر حسب فرکانس بین داکت صلب و داکت مبتنی بر ساختار TPMS.

۴. نتیجه گیری و اهم موضوعات

در این پژوهش، نقش ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح کمینه تناوبی سه گانه (TPMS) در کاهش نویز فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی کانالی بررسی شد. یکی از دستاوردهای کلیدی این تحقیق، تأیید توانایی ساختارهای TPMS در جذب صدا است. برخلاف جاذب‌های سنتی، ساختارهای TPMS علاوه بر کاهش نویز، کمترین تأثیر منفی را بر عملکرد آیرودینامیکی سیستم‌ها برجای گذاشتند. نوآوری دیگر این پژوهش، پیاده‌سازی عملی ساختارهای TPMS در دو کاربرد صنعتی واقعی (فن جریان محوری و توربین بادی کانالی) بود که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نتایج عددی و تجربی نشان داد که استفاده از پوسته‌های متخلخل، به‌ویژه ساختار ژاپرود با تخلخل ۵۰ درصد، منجر به کاهش قابل توجهی در شدت نویز می‌شود. به‌طور مشخص، در فن جریان محوری کاهش سطح فشار کلی صدا تا حدود ۶ دسی‌بل (معادل ۱۱ درصد) و کاهش انرژی آکوستیکی تجمعی تا ۳۶ درصد حاصل شد. همچنین در توربین بادی کانالی، این ساختار موجب کاهش ۸ درصدی سطح فشار صدای کلی گردید. این نتایج نشان داد که TPMS می‌تواند با تضعیف گردابه‌های ناشی نوک و کاهش آشفته‌گی

۱۵. Sadeghi Malekabadi, M. and Davari, A. R., ۲۰۲۴. Experimental acoustic study of small horizontal axis wind turbines based on computational fluid dynamics and artificial intelligence approaches. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 40 (۲), pp.۵۲-۶۳ [In Persian]. DOI: <https://doi.org/10.24200/j.40.2.52.63.139.139>
۱۶. Xu, C. and Mao, Y., ۲۰۱۶. Experimental investigation of metal foam for controlling centrifugal fan noise. *Applied Acoustics*, 104, pp.۱۸۲-۱۹۲. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.11.014>
۱۷. Czwielong, F., Floss, S., Kaltenbacher, M. and Becker, S., ۲۰۲۱. Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans. *Applied Acoustics*, 174, pp.۱۰۷۷-۷۸۶. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107757>
۱۸. Sutliff, D. and Jones, M., ۲۰۰۸. Foam-metal liner attenuation of low-speed fan noise. In *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*, p.۲۸۹۷. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2008-2897>
۱۹. Sutliff, D. L., Jones, M. G. and Hartley, T. C., ۲۰۱۳. High-speed turbofan noise reduction using foam-metal liner over-the-rotor. *Journal of Aircraft*, 50 (۵), pp.۱۴۹۱-۱۵۰۳. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2013-3201>
۲۰. Abueidda, D. W., Jasiuk, I. and Sobh, N. A., ۲۰۱۸. Acoustic band gaps and elastic stiffness of PMMA cellular solids based on triply periodic minimal surfaces. *Materials & Design*, 145, pp.۲۰-۲۷. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.032>
۲۱. Bowen, L., Celik, A., Azarpeyvand, M. and da Silva, C. R., ۲۰۲۱. Porous geometry effects on the generation of turbulence interaction noise. In *AIAA Aviation 2021 Forum*, p.۲۱۹۳. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2021-2193>
۲۲. Dewangan, R. and Kumar, N., ۲۰۲۳. Triply periodic minimal surface (TPMS) metamaterial exhibiting simultaneously superior acoustic and mechanical energy absorption performance. In estimating the cost of sleep disturbance from aircraft noise. Environmental Research and Consultancy Department Civil Aviation Authority.
۲۳. Pedersen, E. and Persson Waye, K., ۲۰۰۴. Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116 (۶), pp.۳۴۶۰-۳۴۷۰. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1810091>
۲۴. Dong, B., Xie, D., He, F. and Huang, L., ۲۰۲۱. Noise attenuation and performance study of a small-sized contra-rotating fan with microperforated casing treatments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, pp.۱۰۷۰-۸۶. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107086>
۲۵. Xu, C. and Mao, Y., ۲۰۱۶. Passive control of centrifugal fan noise by employing open-cell metal foam. *Applied Acoustics*, 103, pp.۱-۱۹. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.10.006>
۲۶. Yang, M. and Sheng, P., ۲۰۱۷. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*, 47 (۱), pp.۸۳-۱۱۴. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070116-124032>
۲۷. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A., Tuck, C. and Ashcroft, I., ۲۰۱۷. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*, 16, pp.۲۴-۲۹. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>
۲۸. Lin, C., Wen, G., Yin, H., Wang, Z.-P., Liu, J. and Xie, Y. M., ۲۰۲۲. Revealing the sound insulation capacities of TPMS sandwich panels. *Journal of Sound and Vibration*, 540, pp.۱۱۷۳-۲. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117303>
۲۹. Liu, N., Jiang, C., Huang, L. and Wang, C., ۲۰۲۱. Effect of porous casing on small axial-flow fan noise. *Applied Acoustics*, 175, pp.۱۰۷۸-۸. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107080>

ISME International Conference on Advances in Mechanical Engineering, Springer, pp. ۸۵-۹۷.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-3651-5_8

۲۳. Mozafari, M., Masdari, M. and Tahani, M., ۲۰۲۵. Triply periodic minimal surfaces casing treatment on an axial flow fan: a computational aeroacoustic study. *Physics of Fluids*, 37 (۹). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0280377>

۲۴. Mozafari, M. and Masdari, M., ۲۰۲۳. Owl aeroacoustics: analysis of a silent flight. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 39 (۱), pp. ۹۹-۱۱۸ [In Persian]. DOI: <https://doi.org/10.24201/j.40.2022.6.494.1643>

۲۵. Failla, G., Marzani, A., Palermo, A., Russillo, A. F. and Colquitt, D., ۲۰۲۴. Current developments in elastic and acoustic metamaterials science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 382 (۲۲۷۸), pp. ۲۰۲۳.۳۶۹. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0369>

۲۶. Li, X., ۲۰۲۴. ۳D-printed lattice structures for sound absorption: current progress, mechanisms and models, structural-property relationships, and future outlook. *Advanced Science*, 11 (۴), pp. ۲۳.۰۵۲۳۲. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.2023.05232>