Sharif University of Technology

Sharif Mechanical Engineering Journal

https://sjme.journals.sharif.edu

Research Article

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

Mostafa Mozafari[1]* and Mehran Masdari[1,2]

[1]College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2]College of Aerospace Engineering, Coventry University, United Kingdom.
* Corresponding author:(mstfmozafari18@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 5 October 2025

Revised: 18 December 2025

Accepted: 8 February 2026

Keywords:

Sound absorber,
aeroacoustics,
noise reduction,
porous media.

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 important research priority. 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 50% 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 6 dB reduction in OASPL (approximately 11%) for the axial-flow fan, corresponding to a 36% decrease in accumulated acoustic energy. For the ducted wind turbine, the porous structure improved acoustic behavior, leading to an 8% 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.

Introduction

Noise pollution is among the most pervasive environmental problems in industrial societies. It arises from diverse sources, particularly rotating equipment such as wind turbines and industrial fans, which affect environments and human health [1–3]. Continuous exposure to such noises causes consequences beyond annoyance, including sleep disturbance, reduced performance, mental health issues, and cardiovascular risks [4–6]. Conventional porous absorbers (polymeric foams and metal foams), despite their 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

To Cite this article:
Mozafari, M. and Masdari, M. 2026. Novel acoustic absorbers based on TPMS structures: implementation in axial fan casings and ducted wind turbines, Sharif Mechanical Engineering Journal, **42**(1), 37-51.
https://doi.org/10.24200/j40.2026.67925.1754

E-ISSN: 2676-4733 © 2026 The Author(s). Sharif Mechanical Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

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 the limited investigation of TPMS-based porous treatments for radial noise attenuation, 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 120×120×25 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, 55, 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 3×3×4 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 6184 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 and Discussion

Experimental acoustic tests demonstrate that a gyroid porous casing at 50% porosity outperforms both a solid casing and the uncased condition: average Sound Pressure Level (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 6 dB (approximately 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. 11). 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 56.75 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—particularly a gyroid at 50% porosity—provided effective sound absorption with minimal aerodynamic penalty. Experimental results for the fan showed an average OASPL reduction of about 6 dB (approximately 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

مجله علمی مهندسی مکانیک شریف

https://sjme.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

جاذب‌های آکوستیکی نوین بر پایه‌ی ساختارهای TPMS: کاربرد در پوسته‌ی فن‌های محوری و توربین‌های بادی کانالی

مصطفی مظفری*[۱] و مهران مصدری[۱و۲]

[۱] دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲] دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه کاونتری، انگلستان.

*نویسنده مسئول (mstfmozafari18@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

واژگان کلیدی:

جاذب صدا،

آئروآکوستیک،

کاهش نویز،

محیط متخلخل.

چکیده

سامانه‌های دوّار، نظیر فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی، به‌ترتیب نقش مهمی در فرآیندهای خنک‌کاری و تولید انرژی پاک ایفا می‌کنند؛ اما تولید نویز ناشی از آشفتگی‌های جریان، به‌ویژه گردابه‌های نشتی نوک، یکی از چالش‌های اصلی آن‌ها محسوب می‌شود. لذا، توسعه‌ی 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 پژوهش حاضر، ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح کمینه‌ی سه‌گانه‌ی تناوبی (TPMS) به‌منظور ارزیابی عملکرد آئروآکوستیکی سامانه‌های مذکور استفاده شده است. در مرحله‌ی نخست، ضریب جذب صدای ساختارهای مختلف بررسی و ساختار ژایرود با تخلخل ۵۰٪ به‌عنوان گزینه‌ی بهینه انتخاب شده است. سپس ساختار اخیر، در دو کاربرد کلیدی، شامل: پوسته‌ی فن جریان محوری و کانال اطراف توربین بادی کانالی استفاده شده است. برای تحلیل جامع، ترکیبی از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی به‌منظور بررسی هم‌زمان ویژگی‌های آئرودینامیکی و مکانیسم‌های تولید و کاهش نویز استفاده شده است. نتایج نشان داده است که پوسته‌ی مبتنی بر TPMS موجب کاهش قابل‌توجه شدت و ابعاد گردابه‌های نشتی نوک و تعدیل سطح آشفتگی در نزدیکی دیواره‌ی محفظه می‌شود. همچنین طراحی بهینه‌ی اخیر، توانایی مهار نویز فرکانس عبور پره و نویز ناشی از برهم‌کنش آشفتگی را دارد. به‌صورت کمّی، کاهش ۶ دسی‌بل (حدود ۱۱٪) در فن جریان محوری و کاهش ۳۶ درصدی انرژی آکوستیک تجمعی مشاهده شده است، در حالی که در توربین بادی کانالی نیز کاهش ۸ درصدی سطح فشار صدای کلی به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که ساختارهای مبتنی بر TPMS راهکاری مؤثر برای کاهش نویز سامانه‌های دوّار هستند.

۱. مقدمه

آلودگی صوتی به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین معضلات زیست‌محیطی در جوامع صنعتی مدرن، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و کیفیت زندگی محسوب می‌شود.[۱] منابع متنوع نویز، به‌ویژه صدای ناشی از تجهیزات دوّار، مانند توربین‌های بادی،[۲] و فن‌های صنعتی،[۳] روزبه‌روز محیط اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهند. قرارگرفتن مداوم در معرض صداهای ناخواسته‌ی اخیر، پیامدهایی فراتر از آزار شنیداری دارد و طیف وسیعی از آثار مخرب ایجاد می‌کند: از آسیب‌های مستقیم به سیستم شنوایی و اختلال در خواب تا کاهش بهره‌وری کاری و تحصیلی و بروز مشکلات جدی جسمی و روانی.[۴] مطالعات علمی، ارتباط مستقیم آلودگی صوتی را با افزایش اضطراب، استرس، اختلال‌های روانی، تأخیر در رشد شناختی کودکان، و بروز عوارض خطرناک فیزیولوژیکی، مانند افزایش ضربان قلب، فشار خون بالا، و بیماری‌های قلبی-عروقی اثبات کرده‌اند.[۵ و ۶] بر اساس برخی مطالعات پیشین، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از بستری‌های بیمارستانی و مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی و سکته، به قرارگرفتن مداوم در معرض نویز مرتبط است. این نگرانی‌ها سبب شده است نهادهای بین‌المللی برنامه‌های گسترده‌ای را برای تقویت پژوهش‌های مرتبط با کاهش نویز محیطی، به‌ویژه نویز ناشی از صنایع هوایی و انرژی، تدوین کنند. در چنین شرایطی، توسعه‌ی فناوری‌های نوین و کارآمد برای کنترل و کاهش نویز، ضرورتی انکارناپذیر برای حفاظت از سلامت انسان و محیط‌زیست به شمار می‌رود.[۷] از سوی دیگر، هر چند تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است، اما توربین‌های بادی چه در خشکی و چه در دریا، به‌واسطه‌ی صدای تولیدی پره‌ها، اغلب موجب نارضایتی ساکنان محلی

استناد به این مقاله:

مظفری، مصطفی و مصدری ، مهران، ۱۴۰۵. جاذب‌های آکوستیکی نوین بر پایه‌ی ساختارهای TPMS: کاربرد در پوسته‌ی فن‌های محوری و توربین‌های بادی کانالی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۲(۱)، صص.۳۷-۵۱. https://doi.org/10.24200/j40.2026.67925.1754

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۳۳

می‌شوند. افزون بر آن، نویز مزارع بادی فراساحلی در مراحل نصب و بهره‌برداری می‌تواند آثار منفی در حیات آبزیان، از جمله ماهی‌ها و پستانداران دریایی داشته باشد. طی دو دهه‌ی گذشته، بسیاری از کشورها و نهادهای منطقه‌ای برنامه‌های مشخصی را برای کاهش نویز ناشی از منابع مذکور تدوین کرده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی اهمیت و جدیت این موضوع در سطح جهانی است.[۸]

به‌طور سنتی، برای کاهش نویز از مواد متخلخل جاذب صدا، مانند فوم‌های پلیمری و الیاف معدنی استفاده می‌شود؛ که انرژی امواج آکوستیکی را از طریق مکانیزم‌های اتلاف ویسکوز و حرارتی در ساختار متخلخل خود به گرما تبدیل می‌کنند و شدت صدا را کاهش می‌دهند.[۹ و ۱۰] با این حال، چنین موادی محدودیت‌های قابل‌توجهی دارند؛ از جمله ضعف در خواص مکانیکی، مقاومت پایین در برابر شرایط محیطی دشوار، مانند دما و رطوبت بالا، و همچنین امکان ایجاد آلودگی ثانویه‌ی ناشی از ریزش الیاف. محدودیت‌های اخیر، کاربرد آن‌ها را در بسیاری از حوزه‌های مهندسی، به‌ویژه در شرایط جریان هوای شدید، محدود می‌سازد.[۱۱] برای غلبه بر چالش‌های ذکرشده، نسل جدیدی از مواد مهندسی‌شده با عنوان ساختارهای مبتنی بر سطوح کمینه‌ی متناوب سه‌گانه (TPMS)[1] معرفی شده‌اند؛ که که با بهره‌گیری از فناوری ساخت افزودنی تولید می‌شوند، و به دلیل داشتن خواص مکانیکی برتر، سطح ویژه‌ی بسیار بالا، و تخلخل کاملاً کنترل‌شده، عملکردی ممتاز در جذب صدا ارائه می‌دهند. ویژگی‌هایی همچون هندسه‌ی منحصربه‌فرد، نفوذپذیری قابل تنظیم، و استحکام مکانیکی مطلوب سبب شده است که TPMS ها، جایگزینی ایده‌آل برای جاذب‌های سنتی باشند.[۱۲] به‌عنوان مثال، لین و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۳] نشان داده‌اند که پانل‌های ساندویچی مبتنی بر TPMS می‌توانند بیش از ۲۰ دسی‌بل کاهش نویز در گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌ها ایجاد کنند. یکی از مزایای مهم ساختارهای TPMS، قابلیت طراحی و بهینه‌سازی برای شرایط خاص است؛ به‌گونه‌ای که با تغییر پارامترهای هندسی یا استفاده از ترکیب چند نوع TPMS، می‌توان عملکرد آکوستیکی را در بازه‌ی فرکانسی وسیع بهبود داد یا جذب صدا را برای یک فرکانس هدف خاص به میزان بیشینه رساند.

کاهش نویز در توربوماشین‌ها، از جمله فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی کانالی، از جمله حوزه‌هایی هستند که توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. افزایش آلودگی صوتی ناشی از تجهیزات اخیر، ضرورت مطالعه‌ی مکانیزم‌های تولید صدا و توسعه‌ی فناوری‌های نوین برای کنترل جریان و کاهش نویز را آشکار ساخته است. مهم‌ترین مکانیزم‌های تولید نویز در توربوماشین‌ها به پدیده‌های ناپایا در ناحیه‌ی لقی بین پره و پوسته مربوط می‌شود. جریان نشتی نوک پره‌ها با عبور از شکاف میان نوک پره و دیواره‌ی محفظه، منجر به تشکیل گردابه‌های نشتی نوک می‌شود؛ که در اثر اندرکنش با جریان اصلی به شدت ناپایدار می‌شوند و آشفتگی‌های شدیدی را ایجاد می‌کنند. چنین برهم‌کنش‌هایی علاوه‌بر افزایش تلفات آئرودینامیکی، به‌عنوان منبعی قوی برای نویز شعاعی عمل می‌کنند و به‌ویژه در نواحی نزدیک به نوک پره‌های روتور، جایی که گردابه‌های نوک قوی و بی‌نظمی‌های ساختاری برجسته هستند، شدت بیشتری می‌یابند. پدیده‌های اخیر نه فقط دامنه‌ی نویز را افزایش می‌دهند، بلکه طیف فرکانسی آن را نیز گسترده‌تر می‌کنند و به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در کاهش نویز سامانه‌های دوّار مطرح می‌شوند.[۱۴ و ۱۵] در این زمینه، مواد متخلخل به‌عنوان ابزاری کارآمد برای کنترل غیرفعال جریان و کاهش نویز استفاده شده‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که پوشش‌ها یا محفظه‌های متخلخل با جذب انرژی آکوستیکی، می‌توانند سطح نویز فن‌های جریان محوری را کاهش دهند. به‌عنوان نمونه، ژو و مائو[2] (۲۰۱۶)،[۱۶] با استفاده از فوم فلزی، کاهش ۵ دسی‌بل در سطح فشار صدا و افت ۲۰۰ پاسکال در فشار کل را گزارش کرده‌اند. لیو[3] و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۴] فوم‌های فلزی متخلخل را برای فن‌های کوچک پیشنهاد کرده‌اند، که ضمن داشتن وزن سبک‌تر، در کنترل نویز نیز مؤثر بوده‌اند. همچنین، زویلانگ[4] و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۷] نشان داده‌اند که استفاده از مجرای میکروسوراخ‌دار می‌تواند کاهش ۱۶ دسی‌بل در شدت صدا ایجاد کند، بدون آنکه عملکرد آئرودینامیکی دستگاه تحت تأثیر قرار گیرد. ساتلیف[5] و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۱۳)، نیز کاهش ۴ تا ۵ دسی‌بل را با استفاده از پوشش‌های متخلخل در شرایط مختلف سرعت گزارش کرده‌اند.[۱۸ و ۱۹]

در سال‌های اخیر، ساختارهای TPMS نیز در کاربردهای آکوستیکی بسیار موفق عمل کرده‌اند. برای نمونه، ابوئدا[6] و همکاران (۲۰۱۸)،[۲۰] گزارش داده‌اند که ساختارهای TPMS قادر به ایجاد شکاف باند آکوستیکی[7] وسیع در فرکانس‌های بالای ۶۰۰۰ هرتز هستند. این مشخصه ناشی از پراکندگی چندگانه‌ی امواج صدا در سلول‌های تکرارشونده است و سبب می‌شود ساختار TPMS به‌عنوان یک فیلتر عمل کند و فرکانس‌های خاصی از نویز را کاملاً مسدود سازد. موقعیت و پهنای 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[8] و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۱] با بررسی کاربرد ساختارهای TPMS در لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل، کاهش ۲ تا ۳ دسی‌بل در نویز فرکانس‌های پایین را گزارش کرده‌اند. با وجود مزایای ذکرشده، 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 مطالعه‌ی بوون،[۲۱] مشخصاً بر اجزاء ثابت ایرفویل متمرکز بوده و به سامانه‌های دوّار (مانند فن‌ها و توربین‌های بادی) و مسائل کاربردی مرتبط با جریان نشتی نوک و ساختارهای گردابه‌ای در سامانه‌های TPMS نپرداخته است. همچنین، پژوهش‌های پیشین معمولاً از جاذب‌های الیافی و مدل‌سازی عددی با معادلات همگن‌شده‌ی محیط متخلخل بهره برده‌اند.

در مطالعه‌ی حاضر، به‌طور صریح از هندسه‌ی واقعی ساختار TPMS استفاده و جریان داخل خود محیط متخلخل، شبیه‌سازی و تحلیل شده است. همچنین، در راستای سایر کارهای پیشین نویسندگان نوشتار حاضر است، که در سال ۲۰۲۵،[۲۳] بر روی یک فن محوری، یک بررسی محاسباتی- آئرواکوستیکی ساده انجام داده‌اند، که به‌صورت محصور در تحلیل عددی- تجربی بوده و ارزیابی و تحلیل جامع قابلیت جاذب را ارائه نکرده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی وجود یک شکاف تحقیقاتی مهم در طراحی، ساخت، و ارزیابی یکپارچه‌ی ساختارهای TPMS در حوزه‌ی آئروآکوستیک است. بر همین اساس، پژوهش حاضر این شکاف را پُر می‌کند: نخست، با اندازه‌گیری تجربی ضریب جذب صدای نمونه‌های مبتنی بر TPMS و انتخاب ساختار بهینه؛ دوم،

[1] Triply Periodic Minimal Surface
[2] Xu & Mao
[3] Liu
[4] Czwielong
[5] Sutliff
[6] Abueidda
[7] Acoustic bandgap
[8] Bowen

با اجرای دو مطالعه‌ی کاربردی و متمایز: پوسته‌ی فن جریان محوری (آزمون‌های آکوستیک در اتاق بی‌پژواک به‌همراه تحلیل عددی آئرودینامیک برای تبیین مکانیسم‌ها)، و کانال دور توربین بادی داکت‌دار (تحلیل عددی آئرودینامیک و آئروآکوستیک). هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی دقیق ظرفیت کاهش نویز فناوری نوظهور ذکرشده و دستیابی به درکی عمیق‌تر از اندرکنش‌های پیچیده میان ساختار متخلخل و میدان جریان آشفته بوده است.

۲. ساختارهای TPMS و اصول کار

مواد متخلخل به‌طورکلی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: مواد متخلخل با حفره‌های باز و بسته[9]. در مواد متخلخل با حفره‌های باز، شبکه‌ای از کانال‌های به‌هم‌پیوسته وجود دارد که امکان نفوذ سیال خارجی به درون ساختار متخلخل را فراهم می‌کند. در مقابل، در مواد با حفره‌های بسته، منافذ کاملاً ایزوله هستند و ارتباطی با سطح خارجی ندارند، به همین دلیل هیچ سیالی قادر به ورود به ساختار متخلخل نیست. در پژوهش حاضر، از مواد متخلخل با حفره‌های باز استفاده شده است، چرا که این نوع ساختارها علاوه‌بر قابلیت کنترل خواص فیزیکی و شیمیایی، بستر مناسبی برای فرآیندهای انتقال سیال نیز فراهم می‌آورند.[۲۲ و ۲۳] 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؛ که شبکه‌ای از منافذ به‌هم‌پیوسته و ویژگی‌های هندسی دارند و به‌صورت ریاضی قابل تنظیم هستند. ساختارهای TPMS در واقع نوعی سلول‌های متناوب با حفره‌های منظم‌اند، که به دلیل داشتن خواص مکانیکی و آکوستیکی برتر، گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی سازه‌های متراکم و حجیم به شمار می‌آیند.[۲۲ و ۲۳]

۲. ۱. خواص آکوستیکی و سازوکارهای کاهش نویز

در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از پژوهشگران به بررسی خواص آکوستیکی ساختارهای سلولی بر پایه‌ی سطوح کمینه‌ی متناوب سه‌گانه جلب شده است؛ که به‌صورت ریاضی تعریف و در سه جهت متعامد تکرار می‌شوند و ویژگی‌هایی مانند انحنای میانگین صفر و کمینه‌ی مساحت سطح دارند. ساختارهای سلولی مبتنی بر سطوح ذکرشده، نه فقط از نظر مکانیکی (با ویژگی‌هایی همچون سختی و استحکام بالا، جذب انرژی بهینه، رسانایی مناسب و نفوذپذیری بالا، بسیار کارآمد هستند)، بلکه از دیدگاه آکوستیکی نیز توانایی چشمگیری در کاهش ارتعاش‌ها، جذب صدا، و کنترل نویز دارند. همین ویژگی‌های چندمنظوره‌ی ذکرشده سبب شده‌اند که ساختارهای TPMS در حوزه‌های گوناگون موردتوجه قرار گیرند. یکی از ویژگی‌های مهم آن‌ها، قابلیت تنظیم پاسخ آکوستیکی‌شان با تغییر پارامترهای هندسی است؛ به گونه‌ای که می‌توان بازه‌ی فرکانسی و پهنای باند جذب را متناسب با نیاز طراحی کنترل کرد. 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 سه‌بُعدی، امکان تولید دقیق ساختارهای پیچیده‌ی مذکور را فراهم کرده و بررسی‌ها نشان داده‌اند که خواص آکوستیکی ساختارهای TPMS به‌شدت به هندسه، نوع شبکه، میزان تخلخل، و ضخامت بستگی دارد. به‌ویژه در بازه‌ی فرکانسی میانی و بالا، ساختارهای TPMS، توانایی جذب بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند.[۲۲ و ۲۳]

کاهش نویز در ساختارهای متخلخل پیچیده‌ی TPMS از طریق چندین مکانیسم فیزیکی هم‌زمان رخ می‌دهد؛ که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: اتلاف لزجتی[10]، 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[11]، که در اثر فشردگی و انبساط متناوب هوا و تبادل گرما با دیواره‌ها رخ می‌دهد و بخشی از انرژی آکوستیکی را مستهلک می‌سازد. و درنهایت، پراکندگی و بازتاب چندگانه[12]، که در اثر هندسه‌ی پیچیده‌ی ساختار رخ می‌دهد و مسیر حرکت موج را طولانی‌تر می‌سازد و فرصت بیشتری برای عملکرد سازوکارهای اتلاف ایجاد می‌کند.[۲۵ و ۲۶] ترکیب پدیده‌های اخیر، ساختارهای مبتنی بر سطوح کمینه‌ی متناوب را به گزینه‌ای کارآمد برای جذب صدا و کاهش نویز تبدیل کرده است.

۲. ۲. اصول و طراحی جاذب

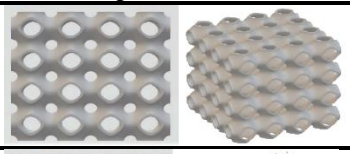
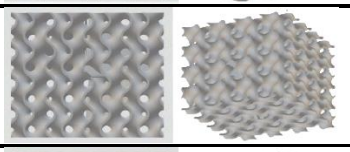
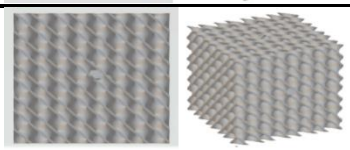
در بخش کنونی، ابتدا اصول و سپس طراحی جاذب بر اساس ساختارهای TPMS بیان شده است. ساختارهای TPMS را می‌توان به‌صورت یک ایزوسطح در نظر گرفت، که در هر سه جهت اصلی فضا به شکل تناوبی تکرار می‌شوند. سطوح مذکور به‌عنوان سطوح حداقلی شناخته می‌شوند و با استفاده از معادله‌های جبری تعریف می‌شوند. معادله‌های مرتبط را می‌توان به‌گونه‌ی $f(x,y,z)=C$ ساده‌سازی کرد؛ که در آن، C یک ثابت مشخص است. همچنین با تغییر پارامترهای تابع، امکان کنترل آسان بر محدوده‌ی توزیع و تناوب سطوح حداقلی فراهم می‌شود.[۳] از میان ساختارهای اصلی TPMS می‌توان به پریمی‌تیو[13] (P)، دایموند[14] (D)، و ژایروید[15] (G) اشاره کرد، که معادله‌های ریاضی و هندسه‌ی 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[16] می‌توان مقدار پارامتر ω را دست‌کاری کرد. از طرفی، C آثار زیادی در مشخصه‌های یک ناحیه‌ی متخلخل دارد. مقدار C استفاده‌شده در معادله‌ها برای تولید ساختارهای TPMS به‌شدت به اندازه‌ی روزنه[17] و تخلخل[18] ساختار، تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، انتخاب C مناسب برای ایجاد 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 شده است. تخلخل، نسبت حجم متخلخل به حجم کل را بیان و همچنین، کسر حجمی جامد ساختار را مشخص می‌کند. اگر مقدار C=۰ باشد، حجم ناحیه‌ی متخلخل و جامد، یکسان است. اندازه‌ی روزنه به‌عنوان قطر بزرگ‌ترین کره‌ای که می‌تواند در فضای خالی

[9] the open and closed-pore porous materials
[10] Viscous Dissipation
[11] Thermal Conduction
[12] Multiple scattering & tortuosity
[13] Primitive
[14] Diamond
[15] Gyroid
[16] Distorted Cell
[17] Hole Size
[18] Porosity

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

Table 1. Mathematical formulation and microscopic detail for various types of TPMS structures.

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)	$f(x,y,z)=\sin(\omega_x x)\cos(\omega_y y)+\sin(\omega_z z)\cos(\omega_x x)$ $+\sin(\omega_y y)\cos(\omega_z z)=C$	

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

Table 2. Porosity relations and extracted pore size coefficientsfor different TPMS structures.

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	$-1.5<C<1.5$	$P_{net-G}=\frac{1}{2}-\frac{1}{3}C$	$a=0.4281$ $b=-0.1598$ $c=-2.37\times10^{-4}$ $d=-0.0432$

سلول واحد قرار گیرد، تعریف می‌شود. برای محاسبه‌ی قطر بزرگ‌ترین کره، ابتدا گره‌هایی در اطراف فضای خالی سلول واحد قرار می‌گیرد، سپس توسط گره‌های مذکور، مکان مرکزهای بزرگ‌ترین کره‌ها تعیین و قطر بزرگ‌ترین کره به‌عنوان کمینه‌ی فاصله بین گره‌ی فضای خالی و سطح سلول تعریف می‌شود. از طرفی، اندازه‌ی روزنه، وابستگی خطی به اندازه‌ی سلول واحد ساختار دارد؛ بنابراین، با تغییر سلول واحد ساختار، اندازه‌ی روزنه‌ها تغییر می‌کند. در ادامه، به‌ترتیب روابط تخلخل و اندازه‌ی روزنه (مطابق جدول ۲) برای حالت اخیر شبکه‌ای ساختارهای ذکرشده به‌صورت رابطه‌ی خطی مرتبه‌ی اول (معادله‌ی ۱) و معادله‌ی درجه‌ی سه (معادله‌ی ۲) تخمین زده شده است، که منحنی داده‌های واقعی و برازش آن‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که استخراج روابط و منحنی‌های مذکور، حاصل کار پژوهشگران حاضر است.

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

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

که در آن‌ها، مقدار κ برای ساختارهای P، G، و D به‌ترتیب برابر با ۳، ۱/۵، و ۱/۴۲ است. مطابق با نتایج، پر واضح است که پارامتر C تأثیر حیاتی در کمیت‌های تخلخل و اندازه‌ی روزنه دارد؛ بنابراین، این امکان وجود ندارد که بتوان در یک تخلخل ثابت، اندازه‌های مختلف روزنه را بررسی کرد. 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 کرد.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به تغییرات تخلخل در ساختارهای ژایروید و دایموند تطابق بسیار خوب و برازش خطی مرتبه‌ی اول برای آن‌ها دقت قابل‌قبولی داشته است. با این حال، در ساختار پریمی‌تیو در محدوده‌های بالاتر از ۷۵٪ و پایین‌تر از ۲۵٪ اختلاف‌هایی ظاهر می‌شود که به همین دلیل، بازه‌های مذکور از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند. از سوی دیگر، منحنی‌های مربوط به اندازه‌ی روزنه‌ها نشان می‌دهند که استفاده از یک چندجمله‌ای مرتبه‌ی سوم، توصیف مناسب‌تری از تغییرات اندازه‌ی روزنه‌ها ارائه می‌دهد. پس از بررسی روابط میان تخلخل، اندازه‌ی روزنه‌ها و پارامتر C، برای طراحی جاذب‌های آکوستیکی مبتنی بر ساختارهای TPMS، یک کد متلب[19] در مختصات دکارتی و استوانه‌ای توسعه داده شده است. کد اخیر، قابلیت تولید هندسه‌های متنوع موردنیاز در پژوهش را فراهم می‌کند و امکان ایجاد جاذب‌های مختلف با درصدهای تخلخل، ابعاد سلول واحد، و انواع ساختارهای متخلخل متفاوت را مهیا می‌سازد. در پایان بخش حاضر، در شکل ۲، نمونه‌هایی از جاذب‌های آکوستیکی متخلخل مبتنی بر TPMS،که توسط کد متلب تولید شده‌اند، مشاهده می‌شوند؛ که بیانگر تنوع در پیکربندی‌ها و درصدهای تخلخل استفاده‌شده هستند.

[19] MATLAB

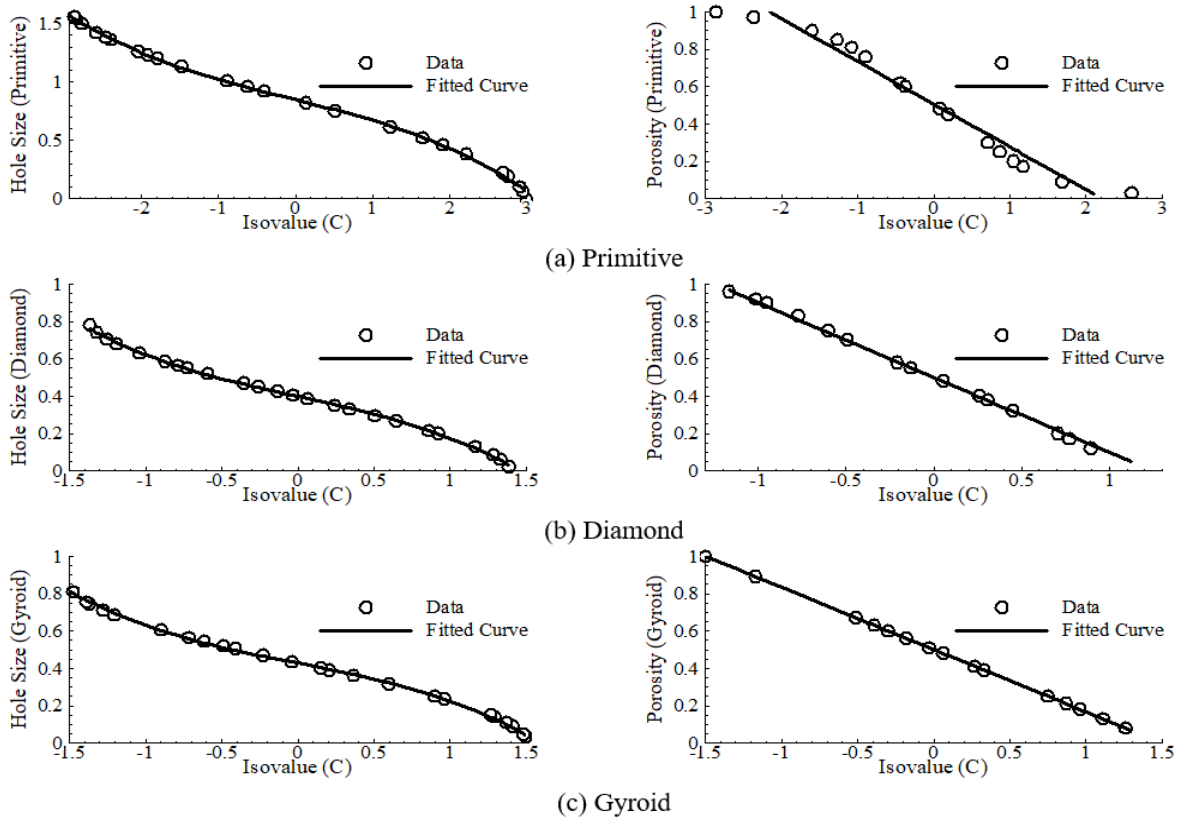


Figure 1. Porosity and pore size distribution and fitting curves for different types of TPMS structures.

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

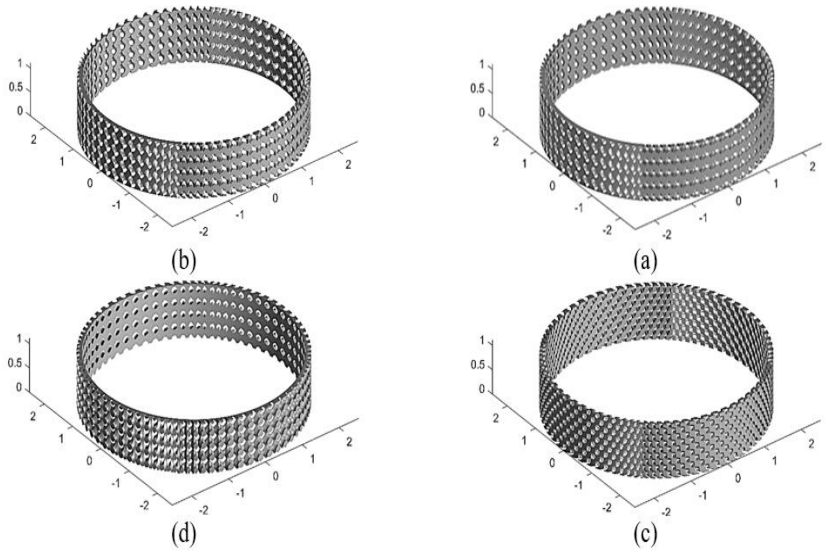


Figure 2. Various TPMS-based porous casings showcased: (a) Type G with 50% porosity, (b) Type G with 35% porosity, (c) Type P with 50% porosity, and (d) Type D with 50% porosity.

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.

۲. ۳. اندازه‌گیری ضریب جذب صدا و بررسی اثر پارامترهای طراحی در آن

در بخش کنونی، تحلیلی روشن و ساده از جذب صدا در ساختارهای TPMS ارائه شده است. ضریب جذب صدا (α) ، میزان انرژی آکوستیکی ورودی را که به‌جای بازتاب، توسط یک ماده جذب می‌شود، توصیف می‌کند؛ به‌طوری‌که مقدار ۰ نشانگر 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. میزان تخلخل، هم مقاومت آکوستیکی و هم مکانیزم اتلاف انرژی آکوستیکی در بستر متخلخل را کنترل می‌کند. بعد از تولید نمونه‌ها توسط کد متلب، سپس آن‌ها با استفاده از فناوری چاپ سه‌بُعدی تولید شده‌اند. پس از چاپ، نمونه‌ها در محلول استات‌اتیل قرار

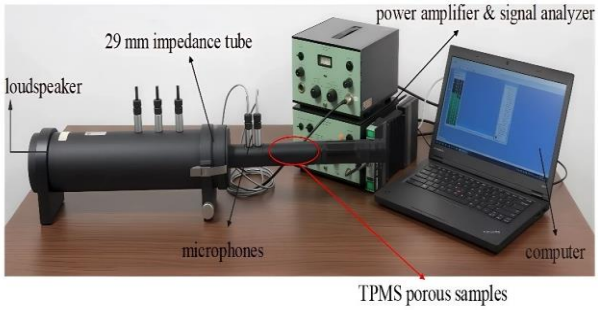


Figure 3. Impedance tube setup for testing sound absorption properties.

شکل ۳. چیدمان لوله‌ی امپدانس برای آزمایش اندازه‌گیری ضریب جذب صدا.

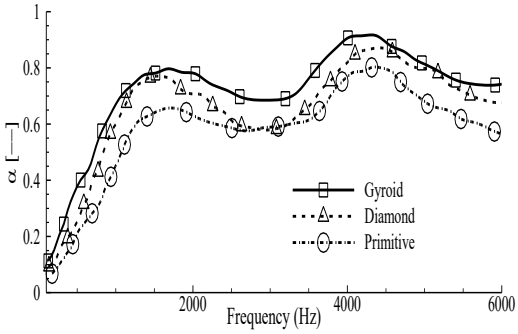


Figure 4. Impact of TPMS Structure Type on Sound Absorption.

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

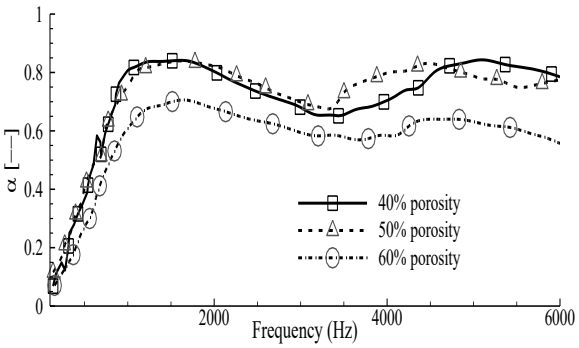


Figure 5. Influence of Porosity on Sound Absorption for Gyroid.

شکل ۵. تأثیر درصد تخلخل در ضریب جذب صدا برای ساختار ژایروید.

گرفته‌اند تا سطح آن‌ها صاف و یکنواخت شود. سامانه‌ی آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب جذب (مطابق شکل ۳)، شامل یک لوله‌ی امپدانس با قطر ۲۹ میلی‌متر، بلندگو، تقویت‌کننده‌ی توان، میکروفون‌ها، و تحلیل‌گر سیگنال است. اندازه‌گیری‌ها بر اساس روش تابع انتقال دوکاناله و طبق استاندارد ۲-۱۰۵۳۴ ISO انجام شده‌اند. آزمون‌ها در بازه‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۶۰۰۰ هرتز و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ضخامت ۳۰ میلی‌متر و قطر ۲۹ میلی‌متر صورت گرفته‌اند.

بر اساس تحلیل دقیق داده‌ها، پیکربندی‌های بهینه برای کاربردهای مختلف شناسایی شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که فقط بیشینه‌ی ضریب جذب در نظر گرفته نشده است، بلکه گستره‌ی فرکانسی عملکرد نیز لحاظ شده است، چرا که هر کاربرد به ویژگی‌های آکوستیکی متفاوتی نیاز دارد. تأثیر نوع ساختار TPMS در شکل ۴ و تأثیر تخلخل در شکل ۵ مشاهده می‌شوند.

در میان تمام حالت‌ها، ساختار ژیروید با تخلخل ۵۰٪ بهترین عملکرد کلی را نشان داده است. پیکربندی مذکور توانسته است جذب پهن باند را با میانگین ضریب ۰/۷۶۱و مقادیر اوج تا ۰/۹۳۸ در نزدیکی ۴۰۰۰ هرتز به دست آورد. عملکرد برتر اخیر، به سطح ویژه‌ی بالا و اتصال کامل منافذ ژایروید نسبت داده می‌شود، که باعث افزایش اتلاف لزجتی و حرارتی می‌شود. تخلخل ۵۰٪ ضمن ایجاد تطابق امپدانسی مؤثر با هوا، سطح کافی برای اتلاف انرژی فراهم می‌سازد و این ویژگی موجب بیشینه‌سازی جذب در گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌ها می‌شود. درنهایت، بر اساس نتایج اخیر، ساختار TPMS از نوع ژایرود با تخلخل ۵۰٪ به عنوان طراحی بهینه‌شده‌ی جاذب برای کاربردهای موردی در پژوهش حاضر استفاده شده است.

۳. فناوری‌های آئروآکوستیکی اقتباس‌شده

برای تثبیت این نکته که ساختارهای متخلخل می‌توانند در کاهش نویز نقش مؤثری ایفا کنند، در بخش حاضر، دو کاربرد مهم بررسی شده‌اند: فن جریان محوری و توربین باد کانالی. در مورد نخست (فن جریان محوری)، آزمون‌های آکوستیکی تجربی در اتاق بی‌پژواک انجام شده‌اند، تا عملکرد واقعی پوسته‌های متخلخل اندازه‌گیری شود؛ هم‌زمان نیز یک تحلیل عددی فقط آئرودینامیک اجرا شده است، 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 کمّی- آکوستیکی دقیق با نتایج تجربی بوده است. در مورد دوم (توربین بادی کانالی)، به‌دلایل محدودیت‌های ساخت نمونه و امکانات تجربی، تحلیل عددی کامل شامل حل آئرودینامیک و پردازش آئروآکوستیک صورت پذیرفته است، تا منشأ تغییرات نویز و تأثیر پوشش TPMS به‌صورت عددی و پیوسته بررسی شوند. در هر دو سامانه، با بهره‌گیری از ساختارهای متخلخل نوین، انتظار می‌رود که رفتار آئروآکوستیکی بهبود یابد و نیز سطح نویز کم شود. هدف این بوده است که با رویکرد مذکور نشان داده شود که استفاده از فناوری‌های اقتباس‌شده می‌تواند راهکاری کارآمد برای کنترل و کاهش نویز در سامانه‌های مختلف جریان هوا باشد.

۱.۳. پوسته‌ی متخلخل اطراف فن جریان محوری

در بخش حاضر هدف آن است که پوسته‌ی اطراف فن محوری با استفاده از یک لایه‌ی متخلخل مبتنی بر ساختارهای TPMS اصلاح شود. ابتدا پوسته‌های مختلف با کمک کد متلب طراحی و سپس با فناوری پرینت سه‌بُعدی ساخته شده‌اند. ارزیابی‌ها هم به‌صورت تجربی در اتاق آکوستیک و هم به‌صورت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار XFlow انجام شده است. در آزمایش تجربی آکوستیک، از یک فن جریان‌محوری با ابعاد ۱۲۰×۱۲۰×۲۵ میلی‌متر و دارای ۷ پره استفاده شده است، که با سرعت دورانی ۱۲۰۰rpm کار می‌کند و فرکانس گذر پره‌های آن ۱۴۰ هرتز است (شکل ۷). شعاع هاب، شعاع نوک پره، و فاصله‌ی نوک پره (لقی نوک)[20] به‌ترتیب ۲۳، ۵۵، و ۲ میلی‌متر بوده است. فن مطالعه‌شده، که برای خنک‌سازی رایانه به‌کار رفته است، پوسته‌ی پلاستیکی داشته است. به‌منظور چاپ سه‌بُعدی پوسته‌هایTPMS، از پلی‌لاکتیک اسید (PLA) استفاده شده است؛ که با چگالی ۱۲۵۰kg/m³ و مدول یانگ متوسط ۳/۲۲۵ GPa، علاوه‌بر سازگاری بالا با فرآیند پرینت

[20] Tip Clearance

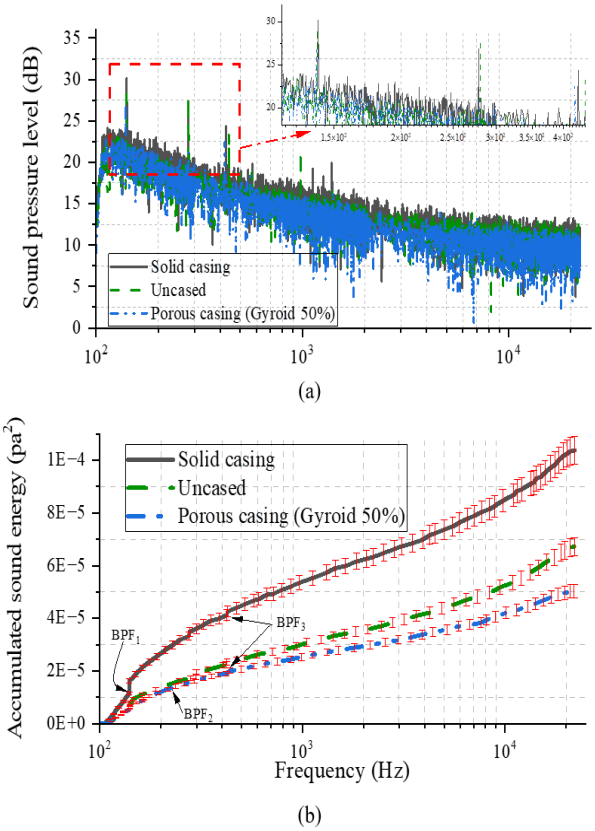


Figure 8. Comparative analysis of sound pressure level and accumulated sound energy spectra for fan with solid casing, uncased, and Gyroid porous casing under identical operating.

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.

اتاق آکوستیک قرار داده شده‌اند. میکروفون در فاصله‌ی استانداردی از سطوح جاذب دیواره‌ی اتاق قرار گرفته است، تا اثر بازتاب‌ها به میزان کمینه برسد. کل فرآیند مطابق با استاندارد ملی ایران: ISIRI ۶۱۸۴ «آکوستیک– تعیین سطح توان صدای نویز» اجرا شده است. برای اندازه‌گیری از میکروفون PreSonus® PRM1 با بازه‌ی فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز و حساسیت ۱۴ mV/Pa استفاده شده است. داده‌های نویز با نرخ نمونه‌برداری ۴۴/۱ kHz و دقت ۲۴ بیت توسط کارت صدای Zoom AMS-2 جمع‌آوری شده است. هر بار برداشت داده به مدت ۲۰ ثانیه انجام شده است. سیگنال‌های ضبط‌شده در نرم‌افزار متلب پردازش و طیف متوسط صدا به‌صورت سطح فشار صدا بر حسب دسیبل ارائه شده است. همچنین نویز پس‌زمینه نیز اندازه‌گیری شده است، که شامل صداهای محیطی موجود در زمان خاموش‌بودن فن، مانند نویز اپراتور، جابجایی تجهیزات، و صدای پس‌زمینه‌ی اتاق بوده است.

در ادامه، نتایج حاصل از آزمون آکوستیک تجربی ارائه شده است. در شکل ۸، تحلیل مقایسه‌ای از: (الف) سطح فشار صدا (SPL) و (ب) طیف تجمعی انرژی آکوستیکی (ASE) برای یک فن جریان محوری با سه نوع پیکربندی پوسته مشاهده می‌شود: پوسته‌ی صلب، بدون پوسته، و پوسته‌ی متخلخل (ژایروید با ۵۰٪ تخلخل). نتایج نشان می‌دهند که پوسته‌ی متخلخل در هر دو شاخص SPL و ASE عملکرد بهتری نسبت به پوسته‌ی صلب داشته است. حالت بدون پوسته نیز کاهش نویز متوسطی ایجاد کرده و اگرچه نسبت به پوسته‌ی

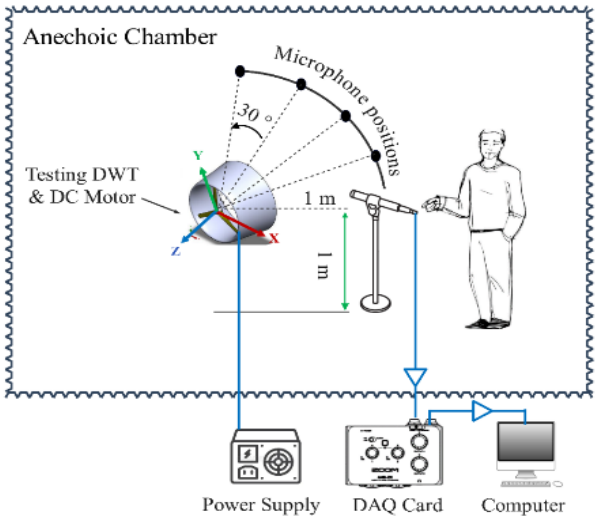


Figure 6. Schematic representation of experimental setup and microphone array.

شکل ۶. نمایش شماتیک چیدمان آزمایش و آرایه‌ی میکروفون.

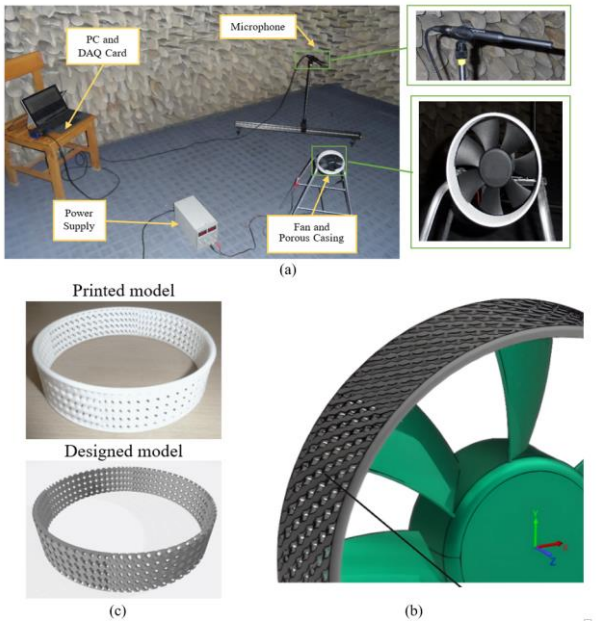


Figure 7. A schematic of the experimental setup for measuring axial flow fan noise using a single microphone: (a) Overall view of the acoustic chamber apparatus, (b) the casings under investigation and (c) Fan casing geometry.

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

سه‌بُعدی، امکان دستیابی به دقت هندسی بالا در ساختارهای پیچیده TPMS را فراهم ساخته و بنابراین، انتخابی ایده‌آل برای پژوهش حاضر بوده است. کلیه‌ی اندازه‌گیری‌ها در یک اتاق بی‌پژواک با ابعاد ۳×۳×۴ متر و فرکانس قطع ۱۰۰ هرتز انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری صدا با قراردادن دستی یک میکروفون در ۱۲ نقطه‌ی مختلف روی سطح یک کره، به شعاع ۰/۸ متر از مرکز روتور و با فواصل زاویه‌ای ۴۵ درجه صورت گرفته است. چیدمان آزمایش و اجزاء آن در شکل ۷ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در حین آزمایش اصلی، منبع تغذیه و رایانه در خارج از

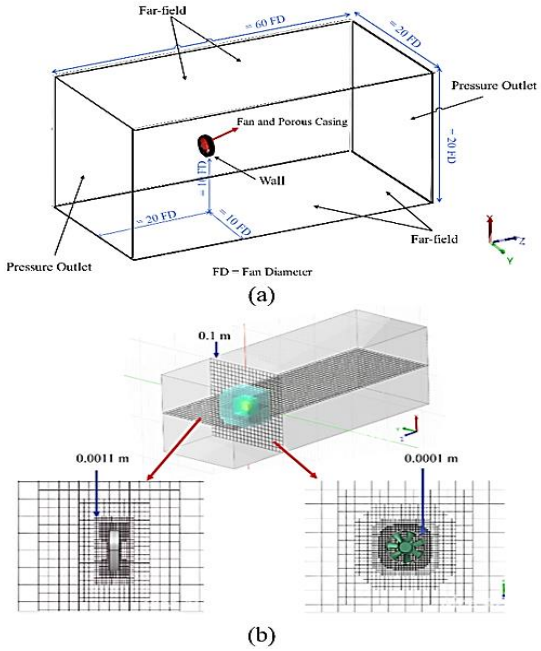


Figure 10. Simulation setting: computational domain and boundary conditions, and (b) discrete schematic diagram of domain.

شکل ۱۰. تنظیم‌های شبیه‌سازی عددی: (الف) میدان محاسباتی و شرایط مرزی، و (ب) شبکه‌ی استفاده‌شده.

مدل‌های زیرشبکه‌ای دیگر، توانایی بهتری در بازنمایی ساختارهای گردابه‌ای کوچک‌مقیاس و توزیع صحیح ورتیسیته از خود نشان می‌دهد. دامنه‌ی محاسباتی به‌صورت یک جعبه‌ی مستطیلی با ابعاد ۷/۲ متر (طول) × ۲/۴ متر (عرض) × ۲/۴ متر (ارتفاع) تعریف شده است. فن در مرکز صفحه‌ی x-y و در فاصله‌ی ۲/۴ متری از دیواره‌ی سمت چپ قرار داده شده است. برای شبیه‌سازی دوران فن، از روش چارچوب مرجع دلخواه (ARF) به جای استفاده از هندسه‌ی متحرک واقعی استفاده شده است. انتخاب ARF، هزینه‌ی 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 موردنیاز برای آشکارسازی مکانیزم‌های آئرودینامیکی/ آئروآکوستیکی، و هزینه‌ی محاسباتی فراهم می‌سازد. سرعت چرخش فن روی ۱۲۰۰ rpm تنظیم شده است. برای پایداری عددی، عدد کورانت برابر ۱ در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی دیواره‌ها از روش تابع دیواره‌ی تقویت‌شده غیرتعادلی استفاده شده است. هوای آزاد به‌عنوان سیال کاری انتخاب و شرایط مرزی به‌دقت تعریف شده است. مرزهای ورودی و خروجی به‌صورت فشار خروجی با مقدار صفر پاسکال (شرایط محیطی) تعریف و دیواره‌های جانبی دامنه‌ی محاسبات به صورت شرایط دوردست اعمال شده‌اند. همچنین سطوح فن و محفظه به صورت دیواره با شرط عدم لغزش مدل شده‌اند، تا برهم‌کنش واقعی جریان با سطح به‌درستی لحاظ شود. در این شبیه‌سازی، مقدار مقیاس حل‌شده‌ی شبکه برای دامنه مساوی ۰/۱ متر و برای فن و محفظه برابر با ۰/۰۰۰۱ متر تعیین شده است.

در شکل ۱۱- الف، جریان خطوط اطراف فن و نزدیک پوسته برای پیکربندی‌های پوسته‌ی صلب، پوسته‌ی متخلخل تخلخل ۵۰٪ مقایسه شده است. حضور پوسته‌ی متخلخل، تأثیر قابل‌توجهی در جریان خطوط، سرعت مطلق جریان،

[22] Adaptive refinement

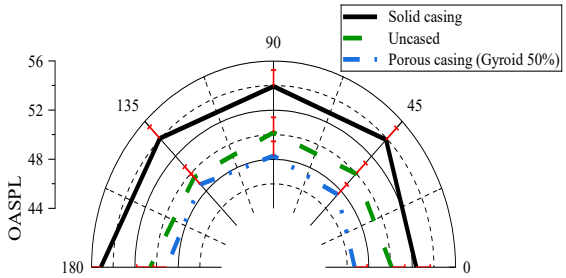


Figure 9. OASPL distribution curve for fan with solid casing, uncased, and Gyroid porous casing under identical operating conditions.

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

صلب بهتر بوده است، اما همچنان اثربخشی آن کمتر از پوسته‌ی متخلخل بوده است.

به‌طورکلی، استفاده از پوسته‌ی متخلخل کاهش چشمگیری در نویز فن به همراه دارد؛ چنانکه در شکل ۸- الف مشاهده می‌شود، SPL در اغلب فرکانس‌ها بین ۳ تا ۴ دسی‌بل کاهش یافته است. همچنین در شکل ۸- ب، سطح زیر منحنی نشان می‌دهد که پوسته‌ی متخلخل حدود ۳۶٪ از انرژی آکوستیک تجمعی را کاهش داده است. نمودار SPL کاهش محسوس در سه فرکانس گذر پره‌ی (BPF) غالب اول و نمودار ASE نیز کاهش چشمگیر انرژی آکوستیکی در مقادیر فرکانسی اخیر را برجسته ساخته‌اند. اگرچه عملکرد جذب صدای پوسته‌ی متخلخل در فرکانس‌های گذر پره تضعیف شده است، اما همچنان کاهش نویز کلی، بهبود یافته است.

در شکل ۹، توزیع سطح فشار صدا کلی (OASPL) برای سه پیکربندی پوسته مشاهده می‌شود. پوسته‌ی متخلخل سبب کاهش نویز در تمامی جهات شعاعی فن و به‌طور 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 گردابه‌ی جدایش و گردابه‌ی نوک پره‌ی بعدی است.

در بخش پیشین، رفتار آئروآکوستیکی فن‌های جریان محوری با پوسته‌های متخلخل مبتنی بر TPMS بر اساس داده‌های تجربی بررسی و اثربخشی ساختارهای TPMS در کاهش نویز نشان داده شده است. در بخش کنونی، به بررسی عوامل بنیادی مؤثر در کاهش نویز ذکرشده به‌صورت عددی پرداخته شده است. برای درک بهتر مکانیزم‌ها، چندین ویژگی آئرودینامیکی جریان تحلیل شده است. در پژوهش حاضر، از چارچوب محاسباتی مبتنی بر روش بولتزمن شبکه‌ای[21] (LBM) در نرم‌افزار XFlow استفاده شده است؛ که همراه با شبکه‌ی کارتیزینی چندسطحی و تشدید تطبیقی[22]، توانمندی بالایی برای حل گذرای جریان‌های آئرودینامیکی و استخراج سیگنال‌های آکوستیکی، به‌ویژه زمانی که هندسه‌های پیچیده (مانند TPMS) صریحاً در دامنه قرار گیرند، دارند. جزئیات دامنه‌ی محاسباتی، شرایط مرزی، هندسه‌ی فن، و موقعیت‌گذاری آن در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند. برای مدل‌سازی جریان سیال از مدل WALE استفاده شده است، زیرا که دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته به‌ویژه در نواحی نزدیک دیواره دارد و نسبت به بسیاری از

[21] Lattice Boltzmann Method

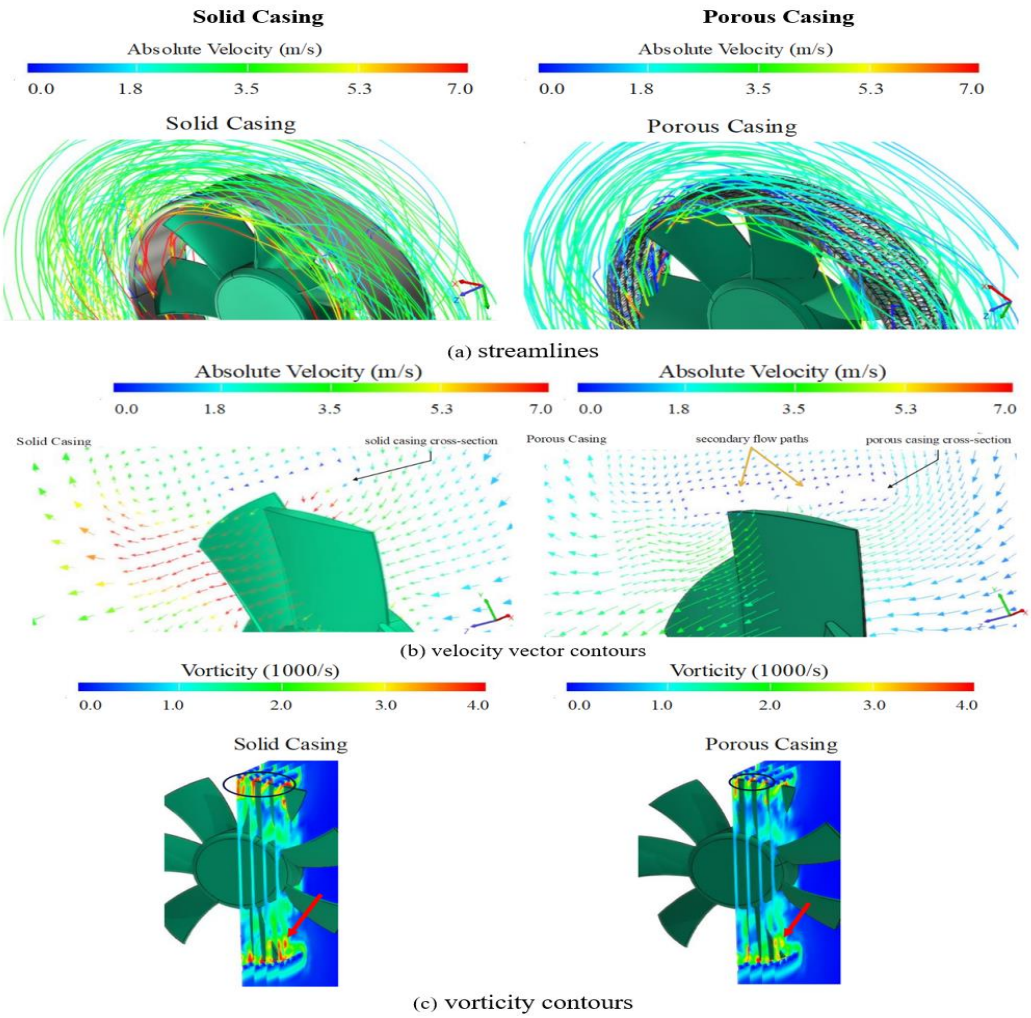


Figure 11. Comparison of aerodynamic characteristic contours for solid and porous casings: (a) streamlines contour, (b) velocity vectors contour, and (c) vorticity contour.

شکل ۱۱. مقایسه‌ی کانتوری مشخصه‌های آئرودینامیکی برای دو پوسته‌ی صلب و متخلخل: (الف) کانتور خطوط جریان، (ب) کانتور بردارهای سرعت، و (ج) کانتور گردابه.

و تشکیل و رفتار گردابه‌های نشتی نوک پره در فن‌های کوچک دارد. همان‌طور که در ساختار جریان خطوط مشاهده می‌شود، پوسته‌ی متخلخل به‌طور مؤثری گردابه‌های نوک را تضعیف کرده و جریان را منظم‌تر و کم‌اغتشاش‌تر از حالت پوسته‌ی صلب نشان داده است. تغییر رنگ از قرمز تیره به آبی روشن در میدان جریان نیز نشان‌دهنده‌ی کاهش سرعت مطلق است. علاوه‌بر این، در شکل ۱۱- ب مشاهده می‌شود که جهت جریان از راستای چرخش فاصله گرفته است؛ تغییری که انتظار می‌رود شدت گردابه‌های نوک پره را کاهش دهد و بازده فن را بهبود بخشد. نمایش کانتور بردارها بیانگر آن است که پوسته‌ی متخلخل تأثیر محسوسی در بردارهای سرعت نزدیک نوک پره‌ها دارد و توزیع یکنواخت‌تری از سرعت روی سطح پره ایجاد می‌کند. ورود پوسته‌ی متخلخل به سیستم، دینامیک جریان نشتی نوک را با ایجاد مسیرهای جریان ثانویه در منافذ ریز پوسته تغییر می‌دهد. این تغییر منجر به توزیع کنترل‌شده‌تر گردابه‌ها در ناحیه‌ی نوک می‌شود و پایداری جریان را افزایش می‌دهد. این بهبود در پایداری جریان، نوسان‌ها را کاهش می‌دهد و اغتشاش‌ها را کم می‌کند. بردارهای سرعت در نزدیکی مرز سیال– متخلخل، نشانگر کاهش تدریجی سرعت محوری در گذر جریان از ناحیه‌ی متخلخل هستند. هر چند سرعت در مرز به صفر نمی‌رسد، اما در مقدار نسبتاً ثابتی پایدار می‌شود، که این خود نشان‌دهنده‌ی تغییر اساسی ویژگی‌های جریان در اثر حضور پوسته‌ی متخلخل است. در شکل ۱۱- ج، نیز کانتور گردابه‌ای برای پیکربندی‌های پوسته‌ی صلب و متخلخل تحت شرایط یکسان (rpm ثابت) مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی کانتورها آشکار می‌سازد که استفاده از پوسته‌ی متخلخل منجر به کاهش مومنتوم جریان نشتی نوک پره در برهم‌کنش با جریان اصلی می‌شود. پوسته‌ی متخلخل به‌طور مؤثر شدت گردابه‌ی نوک پره را کاهش می‌دهد (دایره‌های سیاه). این کاهش عمدتاً ناشی از تضعیف اختلاف فشار بین سطح مکش و فشار پره است، که به نوبه‌ی خود تشکیل گردابه در نوک پره را محدود می‌سازد. تحلیل ساختار جریان نشان می‌دهد که با افزودن پوسته‌ی متخلخل، جریان منظم‌تر می‌شود و شدت گردابه‌ها در ناحیه‌ی نوک پره کاهش می‌یابد. بنابراین، حضور پوسته‌ی متخلخل موجب کاهش ناپایداری جریان و تضعیف منابع نویز اطراف فن می‌شود، که این امر مزیت قابل‌توجهی در جلوگیری از نوسان‌های ناخواسته و ارتقاء پایداری عملکرد به شمار می‌رود.

۳. ۲. اصلاح آکوستیکی توربین بادی کانالی

در بخش حاضر، اصلاح آکوستیکی داکت توربین باد کانالی با استفاده از ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح کمینه‌ی متناوب سه‌گانه بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا یک شبیه‌سازی آئروآکوستیکی با استفاده از روش

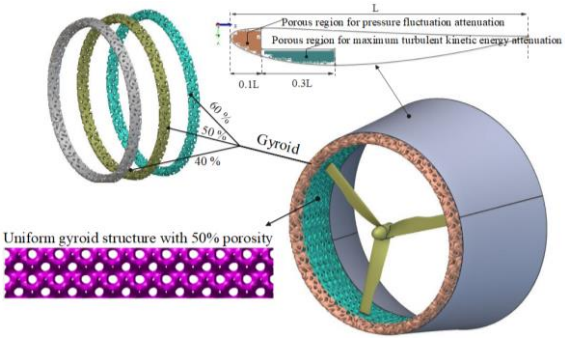


Figure 13. Design and schematic of duct acoustic treatment using a gyroid structure.

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

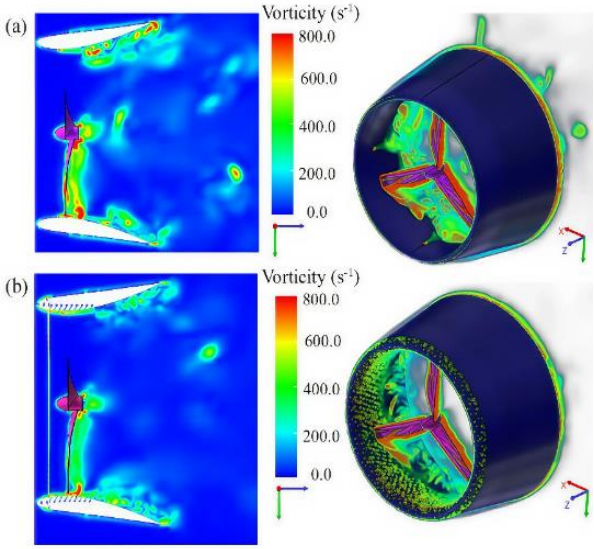


Figure 14. Comparison of vorticity contours for: (a) rigid duct and (b) TPMS-based duct.

شکل ۱۴. مقایسه‌ی کانتورهای گردابه برای: (الف) داکت صلب و (ب) داکت مبتنی‌بر ساختار TPMS.

به‌شمار می‌رود. بر اساس نتایج ذکرشده، حدود ٪۱۰ از طول وتر داکت در ناحیه‌ی پایین‌دست لبه‌ی حمله به‌عنوان ناحیه‌ی مناسب برای اعمال اصلاح آکوستیکی انتخاب شده است، تا نوسان‌های فشار کاهش یابند، و حدود ٪۳۰ از سطح داخلی داکت، برای جذب نویز ناشی از آشفتگی در نظر گرفته شده است.

مطابق با بخش ۳-۲، ساختار ژیروید (با تخلخل ٪۵۰) به‌عنوان مرجع برای اصلاح آکوستیکی انتخاب شده است؛ که به دلیل ایجاد تعادل مطلوب میان استحکام مکانیکی، همسانگردی، و نفوذپذیری آکوستیکی بوده 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 انجام‌شده، ناحیه‌ی متخلخل مناسب توسط کد مرتبط تولید و بخش لبه‌ی حمله و سطح داخلی داکت با ساختار ژیروید یکنواخت مطابق با شکل ۱۳ پوشش داده شده است.

در ادامه، نتایج آکوستیک و آئرودینامیک حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه شده است. در شکل ۱۴، سطح فشار صدا بر حسب فرکانس بین داکت صلب و داکت

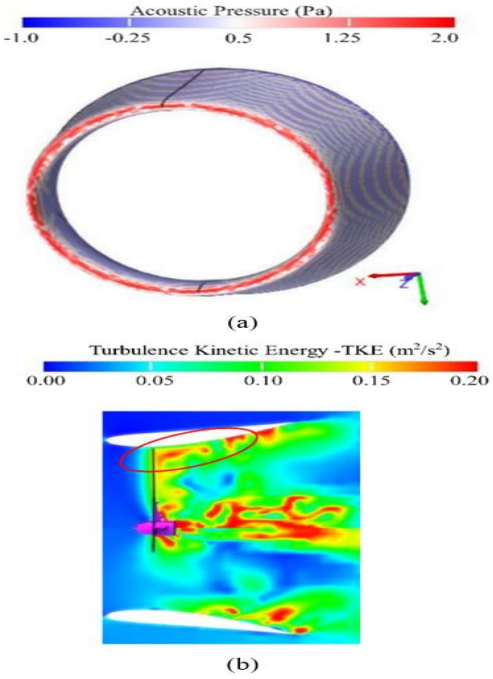


Figure 12. Noisy regions on the duct inner surface: (a) acoustic pressure contour and (b) turbulent kinetic energy contour.

شکل۱۲. نواحی پرنویز در سطح داخلی داکت: (الف) کانتور فشار آکوستیک و (ب) کانتور انرژی جنبشی آشفتگی.

لتیس بولتزمن در نرم‌افزار XFlow انجام شده است، تا نواحی پُر نویز در سطح داخلی داکت شناسایی شوند. توربین بادی استفاده‌شده از نوع DonQi® با پره‌های خطی‌شده بوده است. شایان ذکر است که در بخش کنونی 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 شده است. سرعت جریان آزاد برابر با ۵ متر بر ثانیه انتخاب شده است، که معادل با عدد رینولدز R_e=۳/۴×۱۰^5 و بر اساس وتر داکت و سرعت زاویه‌ای کار روتور، ۳۹/۸۴ رادیان بر ثانیه بوده است.

نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهند که دو ناحیه از داکت، بیشترین پتانسیل تولید نویز را داشته‌اند: لبه‌ی حمله و سطح داخلی اطراف توربین. در شکل ۱۲- الف، کانتورهای فشار آکوستیکی مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، لبه‌ی حمله به‌عنوان یک ناحیه‌ی بحرانی نوسان‌های فشار عمل می‌کند. این پدیده می‌تواند ناشی از انحنای زیاد و نسبت ضخامت بالای داکت باشد، که تشکیل گردابه‌ها را در ناحیه‌ی مذکور تشدید می‌کند. گردابه‌های شکل‌گرفته وارد جریان شتاب‌گرفته‌ی اصلی می‌شوند و نوسان‌های فشار را تقویت می‌کنند. همچنین، جدایش جریان در لبه‌ی حمله می‌تواند منجر به رشد ناپایداری‌ها و افزایش فشار نوسانی شود. در شکل ۱۲- ب، توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) مشاهده می‌شود. 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 فاصله‌ی نوک پره تا دیواره‌ی داکت، به‌عنوان نواحی اوج آشفتگی شناسایی شده‌اند؛ که دلیل اصلی آن، اختلاف فشار بین سطوح مکش و فشار پره است، که جریان نشتی نوک پره را ایجاد می‌کند. این جریان هنگام عبور از فاصله‌ی نوک پره با جریان اصلی، برهم‌کنش دارد و یک گردابه‌ی قوی در نوک پره ایجاد می‌کند، که یکی از منابع اصلی TKE در ناحیه‌ی مذکور

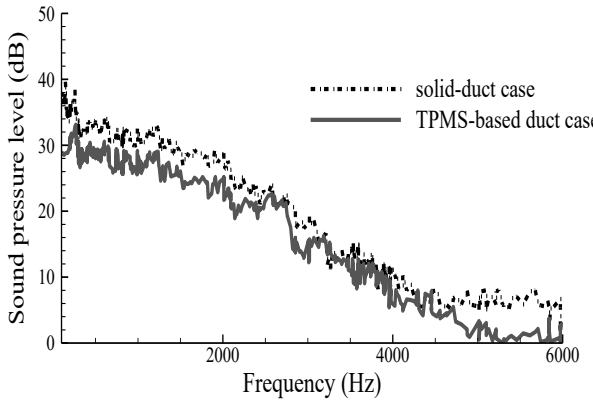


Figure 15. Comparison of sound pressure level as a function of frequency between the solid duct and the TPMS-based duct.

شکل۱۵. مقایسه‌ی سطح فشار صدا بر حسب فرکانس بین داکت صلب و داکت مبتنی بر ساختار TPMS.

مبتنی بر ساختار TPMS مقایسه شده است؛ که مطابق آن، در بیشتر بازه‌های فرکانسی، داکت TPMS منجر به کاهش قابل‌توجه سطح فشار صدا نسبت به داکت صلب شده است. در محدوده‌ی فرکانس‌های پایین، اختلاف کمتر بوده است؛ اما با افزایش فرکانس تا حدود ۴۰۰۰ هرتز، افت محسوس‌تری مشاهده می‌شود. رفتار اخیر، نشان‌دهنده‌ی نقش مؤثر ساختار متخلخل TPMS در تضعیف انتشار موج‌های صداست. به‌طور کمّی، 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 صداست. این نتایج نشان می‌دهد که طراحی مبتنی بر TPMS می‌تواند به‌عنوان یک فناوری آئروآکوستیکی کارآمد برای کاهش نویز در سامانه‌های جریان محوری و داکت‌شده استفاده شود.

در بخش حاضر سعی بر آن بوده است که علت کاهش نویز یا به‌عبارتی، مکانیزم‌های کاهش نویز ناشی از لایه‌های متخلخل مبتنی بر TPMS بررسی شود. برای این منظور، کانتور گردابه‌ها تحلیل شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، ناحیه فاصله‌ی نوک پره می‌تواند به‌عنوان یک منبع اضافی نویز عمل کند، زیرا نوسان‌های سرعت آشفته در فاصله‌ی مذکور افزایش می‌یابند (رجوع شود به شکل ۱۲). نوسان‌های مذکور معمولاً ناشی از برهم‌کنش بین گردابه‌های نوک پره و لایه‌ی مرزی آشفته‌ای است که روی سطح داخلی داکت توسعه می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در حالت داکت صلب، گردابه‌های شدید عمدتاً در نزدیکی لبه‌های حمله، ناحیه‌ی فاصله‌ی 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 سه‌بُعدی 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 ناحیه‌ی بسیار شدید و متمرکز، گردابه‌ها به صورت نواحی کوچک‌تر و پراکنده‌تر در امتداد و داخل لایه‌ی 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 می‌شود و در نتیجه، از ایجاد منابع آکوستیکی قوی و منسجم جلوگیری می‌کند. به طور خلاصه، این نتایج نشان می‌دهند که اعمال یک لایه‌ی TPMS روی لبه‌ی حمله و سطح داخلی داکت باعث می‌شود جریان به جای تشکیل گردابه‌های بزرگ و متمرکز (که منابع اصلی نوسان‌های فشار و نویز هستند)، به حالتی با گردابه‌های کوچک‌تر و پراکنده‌تر تغییر یابد. یعنی، ساختارهای TPMS انرژی آشفته را پخش و خرد می‌کنند و از تشکیل گردابه‌های بزرگ و منسجم که منشأ نویز قوی هستند، جلوگیری می‌کنند. مکانیزم‌های اخیر می‌توانند دلایل فیزیکی اصلی کاهش نویز ناشی از استفاده از TPMS در داکت باشند.

۴. نتیجه‌گیری و اهم موضوعات

در پژوهش حاضر، نقش ساختارهای متخلخل مبتنی بر سطوح کمینه‌ی تناوبی سه‌گانه (TPMS) در کاهش نویز فن‌های جریان محوری و توربین‌های بادی کانالی بررسی شده است. یکی از دستاوردهای کلیدی پژوهش کنونی، تأیید توانایی ساختارهای TPMS در جذب صداست. برخلاف جاذب‌های سنتی، ساختارهای TPMS علاوه‌بر کاهش نویز، کمترین تأثیر منفی را در عملکرد آئرودینامیکی سیستم‌ها بر جای گذاشته‌اند. نوآوری دیگر پژوهش کنونی، پیاده‌سازی عملی ساختارهای TPMS در دو کاربرد صنعتی واقعی (فن جریان محوری و توربین بادی کانالی) بوده است، که تاکنون کمتر به آن توجه شده است. نتایج عددی و تجربی نشان داده‌اند که استفاده از پوسته‌های متخلخل، به‌ویژه ساختار ژایرود با تخلخل ۵۰٪، منجر به کاهش قابل‌توجهی در شدت نویز می‌شود. به‌طور مشخص، در فن جریان محوری کاهش سطح فشار کلی صدا تا حدود ۶ دسی‌بل (معادل ۱۱٪) و کاهش انرژی آکوستیکی تجمعی تا ۳۶٪ حاصل شده است. همچنین در توربین بادی کانالی، ساختار TPMS موجب کاهش ۸ درصدی سطح فشار صدای کلی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که TPMS می‌تواند با تضعیف گردابه‌های نشتی نوک و کاهش آشفتگی نزدیک دیواره، به‌عنوان یک فناوری آئروآکوستیکی نوظهور، عملکردی مؤثر و پایدار داشته باشد.

References - منابع

1. World Health Organization, 2011. 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/9789241569472

2. Mozafari, M., Sadeghimalekabadi, M., Fardi, A., Bruecker, C. and Masdari, M., 2024. Aeroacoustic investigation of a ducted wind turbine employing bio-inspired airfoil profiles. *Physics of Fluids*, *36* (4). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0204050

3. Mozafari, M., Masdari, M., Zhang, Q. and Tahani, M., 2025. Aeroacoustic impact of triply periodic minimal surface porous casings on axial flow fans. *Physics of Fluids*, *37* (1). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0248030

4. Gedik Toker, Ö., Tas Elibol, N., Kuru, E., Görmezoğlu, Z., Görener, A. and Toker, K., 2025. Industrial noise: impacts on workers' health and performance below permissible limits. *BMC Public Health*, *25* (1), pp.1–10. DOI: https://doi.org/10.1186/s12889-025-22732-1

5. Basner, M., 2014. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, *383* (9925), pp.1325–1332. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X

6. Belojevic, G. and Evans, G. W., 2012. Traffic noise and blood pressure in low-socioeconomic status, African-American urban schoolchildren. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *132* (3), pp.1403–1406. DOI: https://doi.org/10.1121/1.4739449

7. Rhodes, D., Weston, E. and Jones, K., 2013. ERCD report 1209 proposed methodology for estimating the cost of sleep disturbance from aircraft noise. Environmental Research and Consultancy Department Civil Aviation Authority.

8. Pedersen, E. and Persson Waye, K., 2004. Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *116* (6), pp.3460–3470. DOI: https://doi.org/10.1121/1.1815091

9. Dong, B., Xie, D., He, F. and Huang, L., 2021. Noise attenuation and performance study of a small-sized contra-rotating fan with microperforated casing treatments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *147*, pp.107086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107086

10. Xu, C. and Mao, Y., 2016. Passive control of centrifugal fan noise by employing open-cell metal foam. *Applied Acoustics*, *103*, pp.10–19. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.006

11. Yang, M. and Sheng, P., 2017. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*, *47* (1), pp.83–114. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-124032

12. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A., Tuck, C. and Ashcroft, I., 2017. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*, *16*, pp.24–29. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003

13. Lin, C., Wen, G., Yin, H., Wang, Z.-P., Liu, J. and Xie, Y. M., 2022. Revealing the sound insulation capacities of TPMS sandwich panels. *Journal of Sound and Vibration*, *540*, pp.117303. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117303

14. Liu, N., Jiang, C., Huang, L. and Wang, C., 2021. Effect of porous casing on small axial-flow fan noise. *Applied Acoustics*, *175*, pp.107808. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107808

15. Sadeghi Malekabadi, M. and Davari, A. R., 2024. Experimental acoustic study of small horizontal axis wind turbines based on computational fluid dynamics and artificial intelligence approaches. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, *40* (2), pp.52–63 [In Persian]. DOI: https://doi.org/10.24200/j40.2024.64121.1704

16. Xu, C. and Mao, Y., 2016. Experimental investigation of metal foam for controlling centrifugal fan noise. *Applied Acoustics*, *104*, pp.182–192. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.11.014

17. Czwielong, F., Floss, S., Kaltenbacher, M. and Becker, S., 2021. Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans. *Applied Acoustics*, *174*, pp.107746. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107746

18. Sutliff, D. and Jones, M., 2008. Foam-metal liner attenuation of low-speed fan noise. *In 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*, p.2897. DOI: https://doi.org/10.2514/6.2008-2897

19. Sutliff, D. L., Jones, M. G. and Hartley, T. C., 2013. High-speed turbofan noise reduction using foam-metal liner over-the-rotor. *Journal of Aircraft*, *50* (5), pp.1491–1503. DOI: https://doi.org/10.2514/1.C032021

20. Abueidda, D. W., Jasiuk, I. and Sobh, N. A., 2018. Acoustic band gaps and elastic stiffness of PMMA cellular solids based on triply periodic minimal surfaces. *Materials & Design*, *145*, pp.20–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.032

21. Bowen, L., Celik, A., Azarpeyvand, M. and da Silva, C. R., 2021. Porous geometry effects on the generation of turbulence interaction noise. *In AIAA Aviation 2021 Forum*, p.2193. DOI: https://doi.org/10.2514/6.2021-2193

22. Dewangan, R. and Kumar, N., 2023. Triply periodic minimal surface (TPMS) metamaterial exhibiting simultaneously superior acoustic and mechanical energy absorption performance. *In ISME International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, Springer, pp.85–97. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-3651-5_8

23. Mozafari, M., Masdari, M. and Tahani, M., 2025. Triply periodic minimal surfaces casing treatment on an axial flow fan: a computational aeroacoustic study. *Physics of Fluids*, *37* (9). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0285377

24. Mozafari, M. and Masdari, M., 2023. Owl aeroacoustics: analysis of a silent flight. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, *39* (1), pp.99–118 [In Persian]. DOI: https://doi.org/10.24200/j40.2022.60494.1643

25. Failla, G., Marzani, A., Palermo, A., Russillo, A. F. and Colquitt, D., 2024. Current developments in elastic and acoustic metamaterials science. *Philosophical Transactions of the Royal Society* A, *382* (2278), pp.20230369. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0369

26. Li, X., 2024. 3D-printed lattice structures for sound absorption: current progress, mechanisms and models, structural-property relationships, and future outlook. *Advanced Science*, *11* (4), pp.2305232. DOI: https://doi.org/10.1002/advs.202305232

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.