

مطالعه تجربی کاهش نویز آیرودینامیکی یک دمنده با استفاده از

دندانه‌های غیرهمگن الهام گرفته از بال جغد

حمیدرضا کاویانی^۱

استادیار

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

Ahr-kaviani@malayeru.ac.ir

چکیده

آلودگی صوتی ناشی از دمنده‌ها و فن‌های صنعتی یکی از چالش‌های مهم در سامانه‌های تهویه و تجهیزات دوار است. در این پژوهش، یک راهکار بیومیمتیک الهام گرفته از ساختار لبه‌های بال جغد برای کاهش نویز آیرودینامیکی یک دمنده پنج‌پره بررسی شده است. بدین منظور، یک افزونه زیگزاگی غیرهمگن، با تکیه بر توزیع ساختارهای گردابه‌ای مبتنی بر یافته‌های مطالعات پیشین، طراحی و به‌صورت جداگانه بر روی لبه حمله و لبه فرار پره‌های دمنده نصب شد. آزمایش‌ها در یک اتاق آکوستیک واجد شرایط بر اساس استاندارد ISO 3745 و با استفاده از چهار میکروفن کالیبره شده در فاصله یک متری از مرکز روتور انجام گرفت. در شرایط آزمون، سرعت چرخش اندازه‌گیری شده ۱۳۴۴ دور بر دقیقه بود و هر آزمون سه بار تکرار شد. در حالت پایه، سطح کلی فشار صوتی برابر ۱۳/۶۴ دسیبل به‌دست آمد. نصب افزونه بر روی لبه حمله، کاهش ۱/۶۱ دسیبلی در سطح کلی فشار صوتی ایجاد کرد و بیشترین کاهش موضعی، حدود ۱۴ دسیبل، در حوالی فرکانس ۲ کیلوهرتز مشاهده شد. نصب افزونه بر روی لبه فرار نیز کاهش ۲/۵۸ دسیبلی در سطح کلی فشار صوتی ایجاد کرد و بیشترین کاهش موضعی، حدود ۱۵ دسیبل، در فرکانس ۱۵۰ هرتز ثبت شد. در این مطالعه، کاهش سطح کلی فشار صوتی به‌عنوان نتیجه مستقیم آزمایش گزارش شده است؛ در مقابل، ارتباط آن با تغییر ساختار گردابه‌ها و نوسانات فشار به‌عنوان یک تفسیر فیزیکی سازگار با مبانی آئروآکوستیک، و نه به‌عنوان یک اثبات مستقیم، بیان می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوی غیرهمگن الهام گرفته از بال جغد می‌تواند یک رویکرد غیرفعال و کم‌هزینه برای کاهش نویز دمنده باشد.

واژگان کلیدی: ایروآکوستیک، الگوی بال جغد، کاهش کنترل غیرفعال صوت، دندانه غیرهمگن، دمنده.

۱. مقدمه

دمنده‌ها و فن‌ها^۱ در بسیاری از کاربردها، از جمله سیستم‌های تهویه مطبوع، تجهیزات الکترونیکی و صنعتی، نقش مهمی ایفا می‌کنند، اما سر و صدای ایجاد شده توسط آنها می‌تواند به آلودگی صوتی فضای اطراف منجر شود. این موضوع به ویژه در محیط‌هایی که نیاز به سکوت و آرامش وجود دارد، مانند کتابخانه‌ها، اتاق خواب و محیط کاری، مشکل‌ساز است. همچنین در فضای باز، سر و صدای فن می‌تواند برای ساکنین اطراف آزاردهنده باشد و بر کیفیت زندگی آنها اثر منفی بگذارد.

آلودگی صوتی اثرات منفی زیادی بر روی زندگی و سلامتی انسان دارد. این اثرات شامل افزایش فشار خون، افزایش ضربان قلب، تنفس سطحی، کاهش تمرکز و اضطراب، ایجاد استرس، اضطراب و عصبانیت، کاهش خواب، خستگی و احساس افسردگی، کاهش شنوایی و وزوز گوش، اختلال در عملکرد سیستم ایمنی، افزایش خطر ابتلا به بیماری قلبی عروقی، مشکلات گوارشی و اختلال در عملکرد هورمونی، کاهش تمرکز، افزایش خطا در کار و کاهش کارایی، اختلال در ارتباط، کاهش کیفیت زندگی و افزایش نزاع و اختلاف می‌شود [۱، ۲]. از این رو کنترل و کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری و صنعتی اهمیت بسیاری دارد.

در سال‌های اخیر فعالیت‌های بسیاری بر روی درک، اندازه‌گیری، شبیه‌سازی و کاهش صوت فن‌ها انجام شده است. صدای تولید شده توسط یک فن یا دمنده از منابع مختلفی ناشی می‌شود که عمدتاً منشأ آئروآکوستیک^۲ (جریان هوا) دارند و سهم منابع مکانیکی و الکترومغناطیسی جزئی‌تر می‌باشد [۳].

مکانیسم‌های آئروآکوستیکی تولید صوت دمنده‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- منابع صدای تونال^۳: صدای تونال، صدایی است با فرکانس‌های گسسته و مشخص که حداقل ۵ دسی‌بل از فرکانس‌های مجاور خود قوی‌تر باشد و معمولاً به صورت یک سوت یا زمزمه شنیده می‌شود. این صدا عمدتاً در فرکانس عبور پره^۴ و هارمونیک‌های آن متمرکز است [۴]. مهم‌ترین منابع دیگر این نوع صدا عبارتند از:

- برهم‌کنش پره-استاتور^۵: این مهم‌ترین منبع صدای تونال در اکثر دمنده‌ها است. زمانی که جریان خروجی از پره‌های دوار (روتور) به پره‌های ثابت (استاتور) یا پایه‌های نگهدارنده موتور برخورد می‌کند، نویز تونال قوی ایجاد می‌شود [۵].

- اعوجاج جریان ورودی^۶: اگر هندسه ورودی دمنده نامتقارن یا دارای لبه‌های تیز باشد، جریان هوا به طور یکنواخت به پره‌ها برخورد نمی‌کند. این نامتقارنی باعث ایجاد نوسانات فشار روی پره‌ها و تولید صدای تونال می‌شود [۶].

منابع صدای پهن‌بند^۷: صدای پهن‌بند، صدایی با طیف گسترده و پیوسته از فرکانس‌ها است که معمولاً به صورت خش خش یا شرشر شنیده می‌شود. این صدا حاصل پدیده‌های آشفتگی و تصادفی در جریان هوا است که از مکانیزم‌های زیر بوجود می‌آید:

- نویز گردابه‌های نوک پره^۸: در نوک پره‌ها، به دلیل اختلاف فشار بین دو طرف پره، گردابه‌های قوی تشکیل می‌شود. این گردابه‌ها اگر با جریان اصلی برهم‌کنش انجام

هندسه و بهبود شرایط کاری و استفاده از مواد جاذب و ایزولاتورها تمرکز دارند [۱۰].

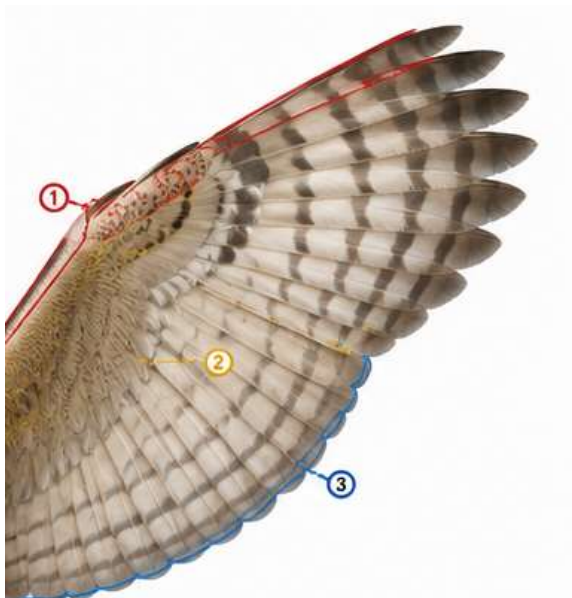
واسلا و همکاران [۱۱] یک مطالعه جامع بر روی یک فن محوری ۱۲۰ میلی‌متری که در سیستم‌های خنک‌کننده کامپیوتر استفاده می‌شود، انجام دادند. هدف اصلی آن‌ها یافتن ارتباط بین سرعت فن و سطح نویز آن بود. بدین منظور صوت فن در سرعت‌های دورانی مختلف (۸۰۰ تا ۲۴۰۰ دور در دقیقه) اندازه‌گیری شد. ایشان دریافتند که سطح صوت به طور نمایی با سرعت افزایش می‌یابد و اجزای توانالی قابل توجهی در فرکانس‌های بالاتر وجود دارد. یافته‌های آن‌ها بر ضرورت کنترل سرعت برای کاهش نویز در کاربردهای عملی تأکید کرد. وانگ و همکاران [۱۲] ویژگی‌های نویز آیرودینامیکی یک فن سانتریفیوژ ۱۰۰ میلی‌متری که در سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود را بررسی کردند. با استفاده از آرایه‌های میکروفون و تصویربرداری از ذرات^{۱۳}، آن‌ها سطوح نویز را در نرخ‌های جریان و سرعت‌های چرخشی مختلف (۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه) اندازه‌گیری کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تلاطم جریان و اثر متقابل پره و گردابه‌ها منابع اصلی نویز در طیف وسیعی از فرکانس‌ها هستند. ایشان پیشنهاد کردند که با بهبود طراحی پره‌ها قدرت گردابه‌ها و نویز مرتبط با آن کاهش یابد. هیرونو و همکاران [۱۳] بر روی یک فن محوری ۹۲ میلی‌متری با کاربردهای خودرویی تحقیق کردند. آن‌ها از ترکیبی از اتاق‌های غیر پژواکی و دوربین‌های صوتی را برای اندازه‌گیری سطوح نویز در سرعت‌های بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سرعت نوک پره عامل مهمی در تولید نویز است. آن‌ها پیشنهاد کردند که از لبه‌های

دهند صدای پهن‌بند، و اگر به دیواره پیرامونی برخورد کنند، صدای تونال ایجاد می‌کنند و در برخی فن‌ها به عنوان منبع غالب شناخته می‌شوند [۳].

- نویز ناشی از تداخل لایه مرزی با لبه فرار^۹: هنگامی که لایه مرزی (آرام یا مغشوش) به لبه فرار می‌رسد، باعث تولید صدای پهن‌بند می‌گردد [۷].
- نویز جدایش جریان و واماندگی^{۱۰}: هنگامی که دمنده در شرایط غیربهبینه (مثلاً فشار پشت زیاد) کار می‌کند، جریان هوا از روی سطح پره جدا می‌شود (واماندگی). این پدیده، نویز پهن‌بند بسیار شدیدی تولید می‌کند که اغلب بر سایر منابع صوتی غلبه می‌کند [۸].
- نویز لبه حمله^{۱۱}: اگر جریان هوای ورودی به دمنده دارای تلاطم باشد، برخورد این جریان آشفته با لبه حمله پره‌ها، منبع دیگری از صدای پهن‌بند خواهد بود [۳].

ادغام تکنیک‌های اندازه‌گیری پیشرفته، روش‌های شبیه‌سازی دقیق و استراتژی‌های نوآورانه کاهش نویز منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در کنترل نویز آیرودینامیکی در فن‌های روتور کوچک شده است. روش‌های کاهش نویز عمدتاً به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های کنترل نویز فعال^{۱۲} ضمن داشتن تأثیرات مثبت، اغلب به سازوکار پیچیده‌ای نیاز دارند و بهترین کاربرد را در مواردی دارند که فرکانس‌های نویز به خوبی تعریف شده و پایدار باشد [۹]. اما روش‌های کاهش نویز غیرفعال دارای این محدودیت نیستند. این روش‌ها عمدتاً بر روی اصلاح

بارزی از تطابق عالی طراحی طبیعی با نیازهای زیستی این پرندگان برای بقا است. در بال جغدها چندین مکانیسم منحصر به فرد برای کاهش صدا هنگام پرواز وجود دارد که به آنها امکان می‌دهد بسیار بی‌صدا حرکت کنند (شکل ۱).



شکل ۱: مکانیسم‌های ساختاری کاهش صدا در بال جغد شامل ۱- لبه حمله دنداندار (قلاب‌دار) ۲- پره‌های نرم و خردار وسط بال و ۳- لبه فرار نرم و شانه‌ای

مکانیسم‌های ساختاری کاهش صدا در بال جغد شامل موارد زیر هستند:

۱- لبه‌های پیشین دنداندار: این لبه‌ها در قسمت جلویی بال قرار دارند و به کاهش نویز کمک می‌کنند. این دندانها جریان هوا را به جریان‌های کوچک‌تر و آرام‌تر تقسیم می‌کنند و باعث کاهش توربولانس و در نتیجه کاهش صدا می‌شوند [۱۶].

۲- پره‌های نرم و خردار در سطح بال: پره‌های جغد به صورت نرم و خردار طراحی شده‌اند. این ویژگی باعث جذب صدا و کاهش نویز ناشی از برخورد هوا با بال‌ها می‌شود [۱۷].

دنداندار در پره‌ها استفاده شود تا ریزش گردابه مختل شود و بدین ترتیب سطوح نویز تا ۳ دسی‌بل کاهش یابد.

الهام گرفتن از طبیعت، یا بیومیمتیک، در کاهش صداها تولید شده توسط فن‌ها و دیگر سیستم‌های مکانیکی نقش مهمی ایفا می‌کند. این فرآیند به ما اجازه می‌دهد تا از طراحی‌های بهینه‌ای که طبیعت طی میلیون‌ها سال تکامل به دست آورده، بهره ببریم. در طبیعت، موجوداتی مانند جغدها دارای بال‌ها و پرهایی هستند که به آنها امکان پروازی بی‌صدا و بدون ایجاد نویز را می‌دهند. الگوبرداری از چنین ویژگی‌هایی می‌تواند به طراحی پره‌های فن منجر شود که ضمن کاهش صدا، کارایی بالایی نیز داشته باشند [۱۴]. مزیت دیگر الهام گرفتن از طبیعت، کاهش مصرف انرژی است. طراحی‌های طبیعی اغلب بهینه‌تر هستند و با کاهش مقاومت هوا و بهبود جریان آن، نه تنها به کاهش نویز کمک می‌کنند، بلکه مصرف انرژی را نیز کاهش می‌دهند. این روش‌ها به بهبود کارایی پره‌ها نیز می‌انجامد.

یکی از شناخته‌شده‌ترین پرندگانی که کمترین سروصدا را هنگام پرواز تولید می‌کنند، جغد است. جغدها به دلیل ساختار خاص بال‌ها و پره‌های خود، که دارای لبه‌های نرم و دنداندار هستند، می‌توانند بدون ایجاد صدا پرواز کنند. این ویژگی به آنها کمک می‌کند تا به طور موثری شکار را به آرامی تحت نظر داشته و در شب صید کنند بدون اینکه توجهی را جلب کنند. ساختار خاص پره‌های جغد باعث کاهش نویز ناشی از توربولانس هوا می‌شود و همچنین به فرکانس‌های بالاتر تبدیل می‌شود که کمتر شنیده می‌شوند، بنابراین پرواز آنها بسیار بی‌صدا است [۱۵]. این قابلیت بی‌صدایی نمونه

۳- لبه‌های پسین نرم و شانه‌دار: در لبه‌های عقبی بال‌ها، ساختاری نرم و شانه‌دار وجود دارد که به پراکنده کردن جریان هوا کمک می‌کند و از ایجاد صدای بصورت ناگهانی و شدید جلوگیری می‌کند. این مکانیسم‌های ترکیبی به جغدها کمک می‌کند تا شکار خود را بدون جلب توجه دنبال کنند [۱۵]. این توانمندی برای شکارچیان شب‌زی بسیار حیاتی است.

لبه‌های دنداندار یک ابزار قدرتمند و اثبات‌شده برای کاهش نویز آئروآکوستیکی در ایرفویل‌ها هستند [۱۸]. مکانیزم اصلی آن‌ها مبتنی بر تداخل مخرب امواج صوتی و قطع منابع صوتی در لبه است [۱۹]. عملکرد آن‌ها به شدت به پارامترهای هندسی مانند دامنه، طول موج و زاویه وابسته است. در تحقیقاتی که تاکنون بر روی این مساله صورت گرفته است الگوی دنداندار یا زیگزگی اقتباس شده بصورت همگن و یکنواخت بر روی کل پره یا بال اعمال شده است [۲۰-۲۵]. در صورتی که شدت گردابه‌ها، بعنوان یکی از منابع غالب در نویز آیرودینامیک [۷، ۲۶]، از ابتدا تا انتها در طول پره تغییر می‌کند و متناسب با شرایط آن بهتر است هندسه و الگوی زیگزگی هم تغییر کند. از این‌رو، استفاده از یک الگوی غیرهمگن می‌تواند به‌عنوان یک فرضیه طراحی مطرح شود که در آن شدت مداخله هندسی در نواحی مختلف پره متناسب با شدت مورد انتظار منابع جریان و نویز تغییر می‌کند.

هدف این پژوهش، ارزیابی تجربی اثر یک الگوی زیگزگی غیرهمگن الهام‌گرفته از بال جغد بر نویز آیرودینامیکی یک دمنده کوچک است. در این طراحی، هندسه اصلی روتور و شرایط دورانی آزمون تغییر داده نشده و تنها افزونه دنداندار بر روی لبه حمله یا لبه

فرار نصب شده است. تأکید اصلی مطالعه بر اندازه‌گیری تغییرات سطح فشار صوتی است؛ بنابراین، هرگونه تفسیر درباره تغییر شدت گردابه‌ها یا نوسانات فشار به‌عنوان سازوکار فیزیکی پیشنهادی و سازگار با ادبیات موضوع ارائه می‌شود و نه به‌عنوان نتیجه مستقیم اندازه‌گیری میدان جریان.

۲. نمونه آزمون و شرایط انجام آزمایش

بعنوان نمونه آزمون از یک دمنده فلزی ۵ پره استفاده شده است (شکل ۲). قطر روتور ۱۹۷ میلیمتر بوده و شامل ۵ پره می‌باشد. سرعت دورانی نامی فن ۱۳۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد، که هنگام آزمون دور فن ۱۳۴۴ دور بر دقیقه به استفاده از تاکومتر لیزری تستو-۱۴۶۰ اندازه‌گیری شد. این تاکومتر لیزری یک دورسنج دیجیتال دقیق ساخت کشور آلمان با دقت سنجش $\pm 0.02\%$ می‌باشد.

محل انجام آزمایش اتاق آکوستیک کارخانه شرکت استوا در شهرک صنعتی مورچه خورت اصفهان بود. این اتاق با ابعاد اتاق $5 \times 5 \times 3/8$ متر مکعب، براساس استاندارد ISO-3745 توسط شرکت اکل^{۱۵} کانادا طراحی و ساخته شده است. ISO-3745 یک استاندارد بین‌المللی، با دقت درجه-۱^{۱۶} است که برای اندازه‌گیری توان صوتی منابع نویز در اتاق‌های بدون پژواک و نیمه‌پژواکی به‌کار می‌رود [۲۷]. یکی از بخش‌های حیاتی این استاندارد، نحوه تأیید و "صلاحیت" یک اتاق بدون پژواک است. برای اینکه یک اتاق استاندارد ISO 3745 در نظر گرفته شود، باید آزمون‌های مشخصی را پشت سر بگذارد. رایج‌ترین روش، آزمون قانون عکس مجذور فاصله^{۱۷} است. در این آزمون، صدایی با بسامد مشخص از یک منبع نقطه‌ای پخش

جدول ۲: مشخصات میکروفن‌ها

مقدار	مشخصه فنی
PCB Piezotronics	سازنده
378B02	مدل
Measurement Condenser Microphone	نوع میکروفن
Free-Field	نوع میدان صوتی
نیم اینچ	قطر اسمی کپسول
Prepolarized	نوع پلاریزاسیون
PCB 426E01 ICP®	پری‌امپلی‌فایر
ICP® / IEPE	نوع تغذیه/خروجی
۵۰ mV/Pa در ۵۰ Hz	حساسیت اسمی
۱۰ kHz تا ۷ Hz	بازه فرکانسی (dB ±۱)
۲۰ kHz تا ۳/۷۵ Hz	بازه فرکانسی (dB ±۲)
۱۵/۵ dB(A)	نویز ذاتی
۱۳۷dB SPL (3% THD)	حد بالای محدوده دینامیکی
دارد	TEDS
IEEE 1451.4	استاندارد TEDS

جدول ۳: مشخصات سیستم دریافت و تحلیل داده

SIRIUS ACC, خانواده Dewesoft	سیستم دریافت داده
DewesoftX	نرم‌افزار
Sound Power, SPL, FFT, Octave/Fractional-Octave	قابلیت تحلیل
ISO 3741 / 3743 / 3744 / 3745	استانداردهای قابل پشتیبانی
Class 1	کلاس دقت زنجیره
۴ کانال میکروفن	تعداد کانال‌های مورد استفاده

می‌شود و سطح فشار صدا در فواصل مختلف از منبع اندازه‌گیری می‌شود. انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقدار تئوری (که باید با مجذور فاصله کاهش یابد) نباید از مقادیر مشخص شده در استاندارد تجاوز کند. جدول ۱ حداکثر انحراف مجاز برای اتاق غیرپژواکی را نشان می‌دهد:

جدول ۱: حداکثر انحراف مجاز در اتاق بدون پژواک در استاندارد

ISO-3745 [۲۷]

حداکثر انحراف مجاز (dB) محدوده فرکانسی (Hz)

کمتر یا مساوی ۶۳۰	±۱/۵
۵۰۰ تا ۸۰۰	±۱
بزرگتر یا مساوی ۶۳۰۰	±۱/۵

سیستم تعلیق کف اتاق از انتقال ارتعاشات محیطی به محل آزمون جلوگیری می‌کند و اتاق دارای سه درب کامپوزیتی با قابلیت عایق‌کاری صوتی است. فرکانس قطع یا آغاز بازه فرکانسی معتبر این اتاق حداقل ۱۲۵ هرتز و نویز زمینه آن ۱۶ دسیبل گزارش شده است. دمنده در شرایط آزمون روی میز استاندارد قرار گرفت و چهار میکروفن در فاصله یک متری از مرکز روتور و در چهار جهت پیرامونی نصب شدند (شکل ۲). فشار محیطی ۸۳ کیلوپاسکال، دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد بود. ارزیابی عدم قطعیت اندازه‌گیری مطابق راهنمای ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) انجام شد. اطلاعات مربوط به مدل، کلاس دقت، حساسیت، بازه فرکانسی میکروفن‌ها و مشخصات سامانه دریافت داده در جدول ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲: چیدمان میکروفون‌ها در فاصله یک متری در اطراف دمنده



شکل ۳: جهت قرارگیری میکروفن‌ها نسبت به دمنده

عدم قطعیت گسترده اندازه‌گیری گزارش شده، براساس حاصلضرب عدم قطعیت استاندارد (ترکیبی) با ضرب پوشش $k=2$ برای توزیع نرمال است که سطح اطمینان تقریبی ۹۵٪ را فراهم می‌سازد. موقعیت میکروفن ۱ و ۳ در سمت چپ و راست فن قرار داشت. میکروفن ۲ و ۴ به ترتیب در عقب و جلوی دمنده قرار گرفتند (شکل ۳). مدت زمان داده برداری ۱ دقیقه و فرکانس داده برداری ۵۰۰۰ هرتز بوده است. نتایج بدون وزن دهی^{۱۸} در باند یک سوم اکتاو و از ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز گزارش شده‌اند. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمون ۳ بار تکرار شده و میانگین لگاریتمی آنها ارائه شده است.

۳. انجام آزمون تجربی

آزمایشات تجربی در دو مرحله صورت گرفته است. ابتدا توان الکتریکی دمنده اندازه گیری شد و سپس توان صوتی در طیف های مختلف فرکانسی ثبت شد. برای اندازه گیری توان الکتریکی از حاصلضرب ولتاژ در آمپر استفاده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود. آمپر مورد نیاز ۰/۱۸۷ با ولتاژ ۲۱۵ بوده است. بنابراین توان الکتریکی برابر با ۴۰/۲ وات بدست می آید که به توان نامی دمنده (۴۰ وات) بسیار نزدیک است.



شکل ۴: اندازه گیری توان الکتریکی دمنده

برای بیان سطح فشار صوت^{۱۹} یا SPL از یک واحد لگاریتمی به نام دسی بل استفاده می شود که بصورت زیر بیان می شود:

$$SPL = 10 \log \left(\frac{I}{I_{Ref}} \right) = 10 \log \left(\frac{\hat{p}^2}{\hat{p}_{Ref}^2} \right) \quad (۱)$$

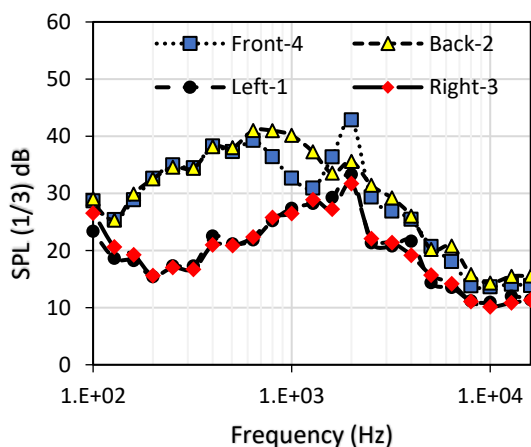
در رابطه فوق $I = \frac{\hat{p}^2}{\rho_0 c_0}$ بیانگر شدت صوت است و ρ_0 چگالی و c_0 سرعت صوت در هوا در شرایط استاندارد است. $\hat{p}$ مجذور میانگین مربعات (rms) فشار صوت است و P_{Ref} فشار صوت مرجع برابر با $20 \mu Pa$ است.

برای تحلیل طیفی از فیلتر یک سوم اکتاو استفاده شد. لازم است تأکید شود که سطح کلی فشار صوتی یا OASPL از میانگین حسابی سطوح دسی بل به دست نمی آید، بلکه باید بر مبنای جمع انرژی باندها محاسبه شود. برای مجموعه باندهای یک سوم اکتاو، رابطه مورد استفاده به صورت زیر است:

$$OASPL = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^N 10^{L_{p,i}/10} \right] \quad (۲)$$

که در آن $L_{p,i}$ سطح فشار صوتی در باند i است. بنابراین، ابتدا سطوح فشار صوتی هر باند از مقیاس دسی بل به کمیت خطی متناظر تبدیل شده، سپس مجموع میانگین مربعات فشار صوتی محاسبه و در نهایت مقدار حاصل مجدداً به مقیاس دسی بل تبدیل می شود.

نتایج اندازه گیری صوت برای دمنده ساده و بدون افزونه در شکل ۵ ارایه شده است. در حالت بدون افزونه، میانگین کلی سطح فشار صوت در کل بازه فرکانسی یا OASPL برابر با ۶۴/۱۳ دسی بل بدست آمد. OASPL با میانگین گیری انتگرالی از شدت فشار صوت در تمامی فرکانسها بدست می آید.



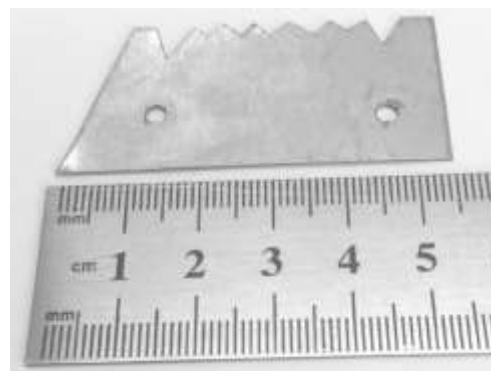
شکل ۵: سطح فشار صوت دمنده در حالت ساده (بدون افزونه)

جدول ۴: مشخصات هندسی افزونه مورد استفاده

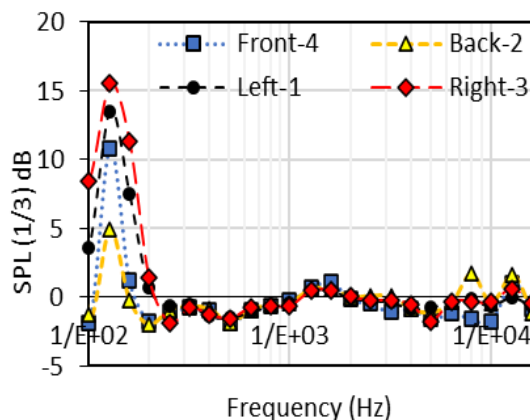
مقدار	نماد	مشخصه هندسی
۵٫۴ میلی‌متر	λ	گام دندانها (فاصله قله تا قله)
۲٫۸ میلی‌متر	h	ارتفاع متوسط دندانها (قله تا دره)
۸۵ درجه	θ	زاویه رأس دندانها
۷	N	تعداد دندانها
۳۷٫۸ میلی‌متر	L	طول کل ناحیه دنداندار
۲٫۱ میلی‌متر	h_{min}	کمترین ارتفاع دندانها
۳٫۸ میلی‌متر	h_{max}	بیشترین ارتفاع دندانها
۰٫۵۲	h/λ	نسبت ارتفاع متوسط به گام
۱ میلی‌متر	t	ضخامت ورق
پیچ و مهره		نحوه اتصال

میانگین سطح فشار صوت OASPL در حالت نصب افزونه بر روی لبه حمله برابر با ۶۲/۵۲ دسی‌بل اندازه‌گیری شد؛ بنابراین کاهش سطح کلی فشار صوتی برابر ۶۱/۱ دسی‌بل است. در این پژوهش، کاهش بر حسب دسی‌بل به‌عنوان معیار اصلی گزارش می‌شود. بیشترین کاهش موضعی مشاهده‌شده حدود ۱۴ دسی‌بل در حوالی فرکانس ۲ کیلوهرتز و در میکروفن ۴ بود که نتیجه یک کاهش طیفی اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. در شکل ۷ صوت کاهش یافته در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۲۰ کیلوهرتز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین کاهش صوت اندکی بعد از فرکانس ۲ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد که در بازه بیشترین حساسیت شنوایی انسان (بین ۲ تا ۵ کیلوهرتز) قرار دارد. این محدوده دقیقاً با محدوده فرکانسی صحبت کردن انسان (صدای گفتار) همپوشانی دارد. در این بازه، گوش انسان می‌تواند حتی صداهای بسیار آرام (با سطح فشار صوتی بسیار پایین) را نیز تشخیص دهد، زیرا رزونانس و تشدید طبیعی

الگوی مورد استفاده در این پژوهش یک الگوی زیگزاگی غیرهمگن و «الهام‌گرفته از فیزیک جریان» است که بر طراحی مبتنی بر فرضیه توزیع مکانی منابع جریان تمرکز دارد، نه یک هندسه حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی رسمی. افزونه از ورقه‌های آلومینیومی پیش‌دنداندار ساخته شد و با پیچ و مهره به لبه پره متصل گردید. انتخاب الگوی غیرهمگن بر پایه مطالعات گذشته درباره اثر دامنه، طول موج و زاویه دندان بر نویز و نتایج سابق شبیه‌سازی‌های مؤلف در توربوماشین‌ها انجام شد. در این مطالعات، شدت ساختارهای گردابه‌ای در نواحی مختلف پره یکنواخت در نظر گرفته نشد و نواحی نزدیک به ابتدا/ناحیه ریشه و نوک پره به‌عنوان نواحی دارای ساختارهای جریان قوی‌تر شناسایی شدند [۲۸، ۲۹]. بر همین اساس، ارتفاع برجستگی‌های دندان در این نواحی بزرگ‌تر و در بخش میانی کوچک‌تر انتخاب شد. این روند، بر پایه شواهد پیشین است و نباید به‌عنوان «بهینه‌سازی» به معنای حل یک مسئله چندهدفه یا جست‌وجوی عددی پارامترها تلقی شود. تصویر و مقادیر عددی طول موج، ارتفاع دندان، زاویه دندان، ضخامت ورق، تعداد دندانها در شکل ۶ و جدول ۴ ارایه شده است.

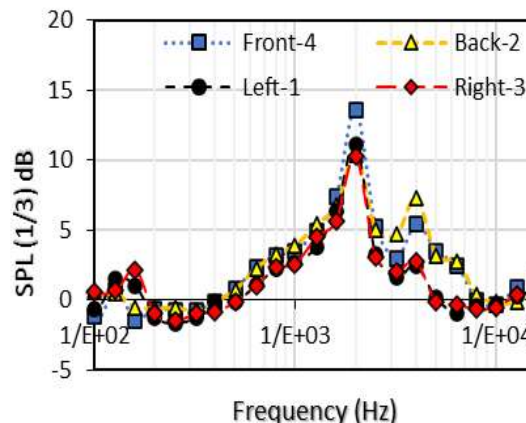


شکل ۶: افزونه مورد استفاده با لبه زیگ-زاگ بهینه شده



شکل ۸: کاهش صوت ثبت شده ناشی از قرارگیری افزونه بر روی لبه فرار پره‌های دمنده

کانال گوش انسان در این محدوده فرکانسی رخ می‌دهد. این مساله اهمیت این کاهش صوت را بر آرامش محیطی و سلامت روان دو چندان می‌کند.



شکل ۷: کاهش صوت ثبت شده ناشی از قرارگیری افزونه بر روی لبه حمله پره‌های دمنده

۴. نتیجه گیری

کاهش نویز آیرودینامیکی در ماشین‌های دوار یکی از مسائل مهم در طراحی آکوستیکی فن‌ها و دمنده‌هاست. در این پژوهش، یک الگوی زیگزاگی غیرهمگن الهام گرفته از ساختار لبه بال جغد برای یک دمنده پنج پره طراحی و به صورت تجربی ارزیابی شد. تفاوت اصلی این رویکرد با الگوهای یکنواخت، تغییر هدفمند ابعاد دندانه در امتداد پره است؛ به گونه‌ای که شدت مداخله هندسی در نواحی مختلف بر اساس توزیع مکانی مورد انتظار ساختارهای جریان یکسان نباشد. این انتخاب بر مبنای مطالعات پیشین و شبیه‌سازی‌های قبلی مؤلف انجام شد و یک راهبرد طراحی مبتنی بر فیزیک را فراهم می‌کند.

در حالت پایه، OASPL برابر ۶۴/۱۳ دسیبل بود. نصب افزونه بر روی لبه حمله موجب کاهش ۱/۶۱ دسیبلی OASPL و بیشینه کاهش موضعی حدود ۱۴ دسیبل در حوالی ۲ کیلوهرتز شد. نصب افزونه بر روی لبه فرار نیز کاهش ۲/۵۸ دسیبلی OASPL و بیشینه کاهش موضعی حدود ۱۵ دسیبل در ۱۵۰ هرتز ایجاد کرد. این اعداد، نتایج مستقیم اندازه‌گیری آکوستیکی هستند. در مقابل، توضیح کاهش نویز بر مبنای تضعیف گردابه‌ها، تغییر مقیاس

در مرحله بعد، افزونه بر روی لبه فرار پره نصب و آزمون تکرار شد. در این حالت کاهش سطح کلی فشار صوتی برابر ۲/۵۸ دسیبل به دست آمد. بیشترین کاهش موضعی، حدود ۱۵ دسیبل، در فرکانس ۱۵۰ هرتز و در میکروفن‌های ۳ و ۱ مشاهده شد (شکل ۹). این نتیجه نشان‌دهنده کاهش اندازه‌گیری شده سطح فشار صوتی در این باند است؛ با این حال، نسبت دادن مستقیم آن به کاهش قدرت گردابه‌های ناشی از برهم‌کنش پره و دیواره بدون داده میدان جریان یا فشار ناپایای سطحی امکان‌پذیر نیست. از دیدگاه فیزیکی، می‌توان فرض کرد که تغییر ساختار جریان نزدیک لبه فرار و تغییر مقیاس‌های غالب نوسانات فشار در شکل‌گیری این کاهش نقش داشته باشد، اما آزمون مستقیم این فرضیه به مطالعات تکمیلی نیاز دارد.

ساختارهای آشفته یا کاهش نوسانات فشار، در مطالعه حاضر مستقیماً با سرعت سنج لیزری، اندازه‌گیری فشار ناپایای سطحی یا شبیه‌سازی ناپایای با تفکیک بالا بررسی نشده است؛ بنابراین این موارد به‌عنوان تفسیر فیزیکی پیشنهادی و سازگار با ادبیات موضوع بیان می‌شوند.

همچنین، اندازه‌گیری توان الکتریکی ورودی حدود ۴۰ وات نشان داد که شرایط الکتریکی آزمون با توان نامی دمنده سازگار بوده است، اما این اندازه‌گیری به‌تنهایی اثبات‌کننده حفظ راندمان یا عملکرد آیرودینامیکی نیست. برای تعیین اثر دندانه‌های غیرهمگن بر عملکرد فن، اندازه‌گیری دبی، افزایش فشار، توان ورودی و راندمان و استخراج منحنی‌های عملکرد در شرایط مختلف ضروری است.

در مجموع، یافته‌های حاضر نشان می‌دهد که الگوی غیرهمگن مورد بررسی ظرفیت ایجاد کاهش قابل اندازه‌گیری در نویز آیرودینامیکی دمنده را دارد. برای تعیین سهم دقیق سازوکارهای جریان، مقایسه علمی با دندانه

یکنواخت و ارزیابی هم‌زمان عملکرد آیرودینامیکی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده سه پیکربندی «بدون دندانه، دندانه‌های یکنواخت با هندسه متفاوت و دندانه‌های غیرهمگن» تحت شرایط یکسان مقایسه شوند و هم‌زمان از اندازه‌گیری میدان جریان، فشار ناپایای سطحی و/یا شبیه‌سازی‌های تلاطم جریان و معادلات تشابه آکوستیکی استفاده شود. چنین رویکردی امکان تعیین دقیق‌تر رابطه میان هندسه دندانه، ساختار جریان، عملکرد آیرودینامیکی و کاهش نویز را فراهم خواهد کرد.

۵. قدردانی

بدین وسیله از مساعدت و همکاری دکتر رامین جهادی و مهندس ساعد عطارلر در آزمایشگاه آکوستیک شرکت اسنوا و کلیه مدیران و کارکنان محترم آن مجموعه که در انجام این آزمایش تجربی مساعدت نمودند مراتب تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

۶. منابع

- [1] Hahad, O., et al., Noise and mental health: evidence, mechanisms, and consequences. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2025. 35(1): p. 16-23.
- [2] Tsimpida, D. and A. Tsakiridi, The Relationship between Noise Pollution and Depression and Implications for Healthy Aging: A Spatial Analysis Using Routinely Collected Primary Care Data. *Journal of Urban Health*, 2025. 102(1): p. 101-112.
- [3]. Zhao, W., Sahan Wasala, and Tim Persoons. "Large eddy simulation for aeroacoustic prediction and characterization of electronics cooling axial fans under various operating conditions." *Applied Acoustics* 231 (2025): 110530..
- [4] <https://www.punker.com/en/fan-technology-guide/>.
- [5]. Krishnappa, G.C.b.n.s.l.s.a.n.m.M.E.R., National Research Council Canada, Division of Mechanical Engineering, Engine Laboratory, no. ME-244, December 1976..
- [6]. Huang, L., and Jian Wang. "Acoustic analysis of a computer cooling fan." *The Journal of the Acoustical Society of America* 118.4 (2005): 2190-2200..
- [7]. Kaviani, H. and E. Bashtalem, Investigating the effect of modeling and simulation of vortices on aeroacoustic calculations in homogeneous shear flow. *Modares Mechanical Engineering*, 2023. 23(11): p. 615-626.
- [8] Kaviani, H. and E. Bashtalam, Investigating the effect of SGS models in the LES method on the shape of eddies and calculating the emitted sound by implementing the Ffowcs Williams–Hawkins equation. *Journal of Vibration and Sound*, 2023. 12(23): p. 55-71.

- [9]. Rosenhouse, G., State-of-the-art In Active Noise Control (ANC). WIT Transactions on The Built Environment, 2025. 11.
- [10] Weitsman, D. and E. Greenwood, Passive Blade–Vortex Interaction Noise Reduction Using Embedded In-Blade Resonator Cavities. AIAA Journal, 2025: p. 1-13.
- [11] Wasala, S., et al. Aeroacoustic noise prediction from a contra-rotating cooling fan used in data center cooling systems. in AIAA AVIATION 2021 FORUM. 2021.
- [12] Wang, M.H., L.M. Wu, and X.M. Liu, Study on flow analysis and noise reduction of centrifugal fan for air conditioner based on the modification of volute tongue. Kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal of Engineering Thermophysics, 2020. 41(1): p. 147-153.
- [13] Casagrande Hirono, F., et al. Aeroacoustic design and optimisation of an all-electric ducted fan propulsion module for low-noise impact. in 28th AIAA/CEAS aeroacoustics 2022 conference. 2022.
- [14] Fan, J., et al., Aerodynamic noise optimization of a voluteless centrifugal fan with biomimetic blades inspired by eagle-owl wingtip morphology. Physics of Fluids, 2025. 37(7).
- [15] Rong, J. and H. Liu, Aeroacoustics in owl flight: biomechanisms and biomimetics. Bioinspiration & Biomimetics, 2025.
- [16] Wei, Y., et al., Experimental investigation of a biomimetic propeller coupled with owl-inspired leading and trailing edges serrations. Physics of Fluids, 2025. 37(4).
- [17] Liu, L.G. and C.J. Clark, Acoustics of rubbing feathers: the velvet of owl feathers reduces frictional noise. Journal of Experimental Biology, 2025. 228(2): p. jeb246234.
- [18] Zhang, H.-Y., et al., Biomimetic Structures for Enhancing Fluid Flow and Heat Transfer: From Mechanisms to Applications. Energies, 2026. 19(12): p. 2888.
- [19] Rak, A., L. Kranjcevic, and J.W. Kim, Aerodynamic and aeroacoustic analysis of airfoils with a serrated trailing edge during flow acceleration. Advances in Aerodynamics, 2025. 7(1): p. 18.
- [20] Yu, F.-Y., et al., Analysis of wavy leading-edge noise reduction and source mechanism in rod-airfoil interactions. Physics of Fluids, 2024. 36(4).
- [21] Wang, L., et al., Numerical analysis of broadband noise generated by an airfoil with spanwise-varying leading edges. Biomimetics, 2024. 9(4): p. 229.
- [22] Zhou, W., et al., An experimental investigation into the aerofoil trailing-edge broadband noise reduction using ogee serrations. Applied Acoustics, 2025. 239: p. 110851.
- [23] Lee, S., et al., Turbulent boundary layer trailing-edge noise: Theory, computation, experiment, and application. Progress in Aerospace Sciences, 2021. 126: p. 100737.
- [24] Zhou, W. and B. Lyu, An Experimental Investigation Into Trailing-Edge Broadband Noise Reduction Using Ogee Serrations. in AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2025. 2025.
- [25] Ahn, B., D. Han, and S. Lee, Effects of serration angle on noise reduction mechanism of trailing edge serration. Journal of Sound and Vibration, 2025. 594: p. 118672.
- [26] Kaviani, H. and E. Bashtalam, Investigating the effect of non-dimensional distances on the calculation of sound intensity in large eddy simulation method. Journal of Vibration and Sound, 2023. 11(22): p. 61-78.
- [27] ISO, E.N.A.-D.o.s.p.l.o.n.s.u.s.p.P.m.f.a.a.h.-a.r., 2003..
- [28] Kaviani, H. and A. Nejat, Aeroacoustic and aerodynamic optimization of a MW class HAWT using MOPSO algorithm. Energy, 2017. 140: p. 1198-1215.
- [29] Kaviani, H. and A. Nejat, Aerodynamic noise prediction of a MW-class HAWT using shear wind profile. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017. 168: p. 164-176.

1. Blowers and Fans
2. Aeroacoustics
3. Tonal Noise
4. Blade Passing Frequency - BPF
5. Rotor-Stator Interaction
6. Inlet Flow Distortion
7. Wideband Noise
8. Tip Vortex Noise
9. Trailing Edge Noise-Boundary Layer Interaction
10. Flow Separation & Stall Noise
11. Leading Edge Noise
12. Active Noise Cancellation-ANC
13. PIV
14. TESTO 460
15. ECKEL
16. Grade-1 accuracy
17. Inverse Square Law Test
18. Non-weighted or Linear
19. Sound Pressure Level-SPL