

کاهش نویز آیرودینامیکی دمنده با الهام از الگوی زیگزاگی بال جغد: یک مطالعه تجربی

حمیدرضا کاویانی*

آ ایران، ملایر، دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، ۶۵۷۱۹-۹۵۳۴۳، استادیار

*پست الکترونیکی: ahr-kaviani@malayeru.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی تجربی تأثیر الگوی زیگزاگی اقتباس شده از لبه فرار بال جغد بر کاهش نویز آیرودینامیکی یک دمنده پنج پره پرداخته است. آزمایش‌ها در اتاق آکوستیک مطابق با استاندارد ISO-۳۷۴۵ و با استفاده از چهار میکروفن کالیبره شده در فاصله یک متری از روتور انجام شد. ابتدا سطح فشار صوتی کلی (OASPL) دمنده در حالت پایه (بدون افزونه) ۶۴.۱۳ دسی بل اندازه گیری شد. سپس الگوی زیگزاگی بر روی لبه حمله و لبه فرار پره‌ها نصب گردید. نتایج نشان داد که نصب افزونه روی لبه حمله موجب کاهش ۱.۶۱ دسی بلی (۲.۵٪) در OASPL شد و بیشینه کاهش منفرد ۱۴ دسی بل در فرکانس ۲ کیلوهرتز (بازه حداکثر حساسیت شنوایی انسان) ثبت گردید. در حالت نصب روی لبه فرار، کاهش ۲.۵۸ دسی بلی (۳.۸٪) در OASPL مشاهده شد و بیشینه کاهش ۱۵ دسی بل در فرکانس ۱۵۰ هرتز حاصل آمد. این پژوهش کارایی الگوی زیگزاگی بال جغد را به عنوان یک راهکار غیرفعال و بیومیمتیک در کاهش نویز آیرودینامیکی دمنده به ویژه در بازه فرکانسی حساس برای انسان تأیید می‌کند. بهینه‌سازی هندسی این الگو و بررسی مکانیسم‌های جریان‌شناسی مرتبط، زمینه‌ای مناسب برای تحقیقات آتی فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: کاهش نویز آیرودینامیکی؛ بیومیمتیک؛ بال جغد؛ آزمایش تجربی.

۱- مقدمه

فن‌ها 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. 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. واسالا و همکاران [۳] 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، ۲۰۲۰ ویژگی‌های نویز آیرودینامیکی یک فن سانتریفیوژ ۱۰۰ میلی‌متری که در سیستم‌های HVAC استفاده می‌شود را بررسی کردند. با استفاده از آرایه‌های میکروفون و تصویربرداری از ذرات (PIV)، 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 [۴] 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 دنداندار در پره‌ها استفاده شود تا ریزش گردابه مختل شود و بدین ترتیب سطوح نویز تا ۳ دسی‌بل کاهش یابد.

روشهای کاهش نویز عمدتاً به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های کنترل نویز فعال (ANC)، در حالی که مؤثر هستند، اغلب به تنظیمات پیچیده‌تری نیاز دارند و بهترین کاربرد را در مواردی دارند که فرکانس‌های نویز به خوبی تعریف شده و پایدار باشد [۵].

در میان مطالعات بررسی‌شده، تکنیک‌های کاهش نویز غیرفعال، مانند تغییرات هندسه پره و استفاده از مواد متخلخل ویسکوز و گرینوود [۶] اثربخشی خوبی در کاهش نویز آیرودینامیکی نشان داده‌اند. در میان این روشها، اثر لبه‌های دنداندار برجسته‌تر بوده است. چن و همکاران، ۲۰۲۰ استراتژی‌های کاهش نویز غیرفعال را برای یک فن محوری ۱۲۰ میلی‌متری بررسی کردند. آن‌ها تغییرات مختلف مانند لبه‌های دنداندار را در لبه حمله و فرار پره آزمایش نمودند. با استفاده از ترکیبی از آزمایش‌های تونل باد و شبیه‌سازی‌های عددی، آن‌ها دریافتند که لبه‌های دنداندار می‌توانند سطوح نویز را تا ۵ دسی‌بل بدون به خطر انداختن عملکرد آیرودینامیکی کاهش دهند.

الهام گرفتن از طبیعت، یا بیومیمتیک، در کاهش صداهای 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 [۷].

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 [۸]. این قابلیت بی‌صدایی نمونه 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. این مکانیسم‌ها 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 [۹].

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 [۱۰].

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 [۸]. این توانمندی برای شکارچیان شب‌زی بسیار حیاتی است. این پژوهش برای درک بهتر اثرات ایرودینامیکی و ایروآکوستیکی ناشی از پیاده‌سازی مکانیسم "لبه‌های زیگزاگی" بال جغد بر روی یک فن کوچک انجام شده است. هدف از این پژوهش کاهش صوت یک دمنده با حفظ یا ارتقای کارایی ایرودینامیکی و شناخت بیشتر پدیده‌های فیزیکی مرتبط با آن می‌باشد. در ادامه توضیحات بیشتری در مورد مراحل کار ارائه می‌شود..

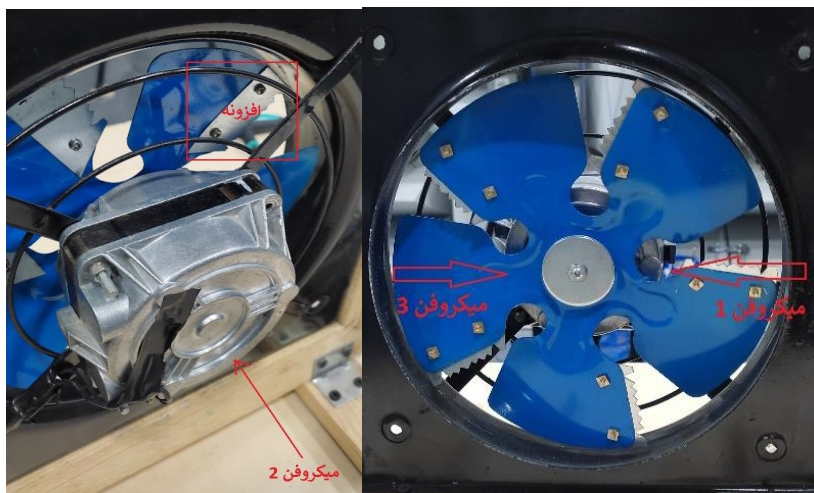
۲- نمونه آزمون و شرایط انجام آزمایش

بعنوان نمونه آزمون از یک دمنده فلزی ۵ پره استفاده شده است (شکل ۱). قطر روتور ۱۹۷ میلی‌متر بوده و شامل ۵ پره می‌باشد. سرعت دورانی نامی فن ۱۳۰۰ دور بر دقیقه بود که هنگام آزمون دور فن ۱۳۴۴ دور بر دقیقه با استفاده از تاکومتر ساخت شرکت Testo آلمان اندازه‌گیری شد. محل انجام آزمایش اتاق آکوستیک کارخانه شرکت امرسان اصفهان بوده است. این اتاق با ابعاد اتاق ۵*۵*۳/۸ متر مکعب، براساس استاندارد ISO-3745 طراحی و ساخته شده است. سیستم تعلیق کف این اتاق مانع از انتقال ارتعاشات اطراف اتاق و تاثیر آن بر نتایج می‌شود و دارای دو درب کامپوزیتی با قابلیت ایزوله صدا می‌باشد. فرکانس قطع این اتاق حداقل ۱۲۵ هرتز می‌باشد. در آزمون تجربی چهار میکروفن در فاصله یک متری از مرکز روتور فن قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱: چیدمان میکروفون‌ها در اطراف دمنده

در زمان آزمایش فشار محیطی ۸۳ کیلوپاسکال، دما ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت ۳۰ درصد بود. عدم قطعیت گسترده اندازه‌گیری گزارش شده، براساس حاصلضرب عدم قطعیت استاندارد (ترکیبی) با ضریب پوشش $k=2$ برای توزیع نرمال است که سطح اطمینان تقریبی ۹۵٪ را فراهم می‌سازد. ارزشیابی عدم قطعیت اندازه‌گیری مطابق با الزامات راهنمای بین‌المللی GUM (ISO Guide 98-3) صورت گرفته است. پروانه فن به صورت رومیزی روی میز استاندارد قرار گرفته و ۴ میکروفون به فاصله ۱ متری از مرکز پروانه در چهار سمت آن قرار گرفته است. موقعیت میکروفون ۱ و ۳ در سمت چپ و راست فن قرار داشت. میکروفون ۲ و ۴ به ترتیب در عقب و جلوی دمنده قرار گرفتند (شکل ۲). مدت زمان داده برداری ۱ دقیقه و فرکانس داده برداری ۵۰۰۰۰ هرتز بوده است. نتایج به صورت باند یک سوم اکتاو هنگامی بدون وزن دهی (Linear) و از ۲۰ تا ۲۰ هزار هرتز گزارش شده‌اند. هر آزمون ۳ بار تکرار شده و میانگین لگاریتمی آنها ارائه شده است.



شکل ۲: جهت قرارگیری میکروفن‌ها نسبت به دمنده

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 ۳ 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.

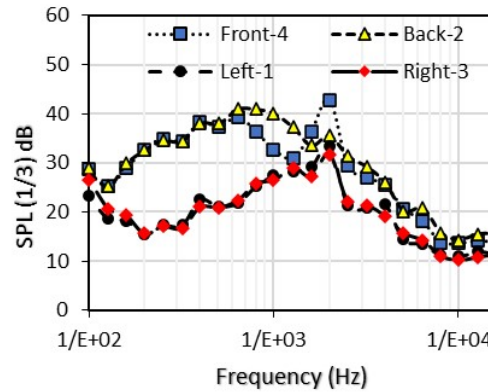


شکل ۳: اندازه گیری توان الکتریکی دمنده

برای بیان سطح فشار صوت (Sound Pressure Level) یا SPL از یک واحد لگاریتمی به نام دسی بل استفاده می شود. SPL در واحد دسی بل، برابر است با ده برابر لگاریتم بر پایه ۱۰ نسبت میانگین فشار مربع به مربع فشار صوت مرجع (۲۰ μPa) که بصورت زیر بیان می شود:

$$SPL = 10 \log \left(\frac{I}{I_{Ref}} \right) = 10 \log \left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{p}_{Ref}^2} \right) \quad (1)$$

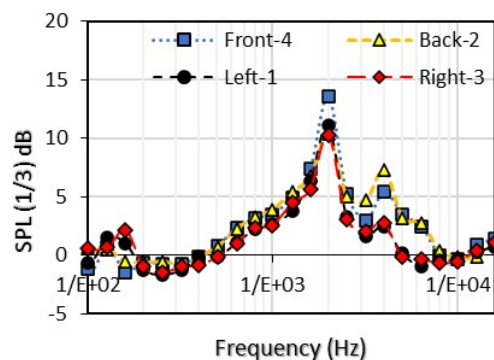
در رابطه فوق $I = \frac{\bar{p}^2}{\rho_n c_n}$ بیانگر شدت صوت است و ρ_n چگالی و c_n سرعت صوت در هوا در شرایط استاندارد است. $\bar{p}$ مجذور میانگین مربعات (rms) فشار صوت است و $\bar{p}_{Ref}$ فشار صوت مرجع برابر با ۲۰ μPa است. با توجه به اینکه بررسی و مقایسه سطح فشار صوت در هر فرکانس کار مشکلی است، استفاده از فیلترهایی نظیر یک اکتاو و یک سوم اکتاو در کاربردهای مهندسی امری متداول است. در این پژوهش از فیلتر یک سوم اکتاو (میانگین گیری از سطح فشار صوت در فواصل یک سوم اکتاو) استفاده شده است. ابتدا اندازه گیری صوت برای دمنده ساده و بدون افزونه انجام شد.



شکل ۴: سطح فشار صوت دمنده در حالت ساده (بدون افزونه)

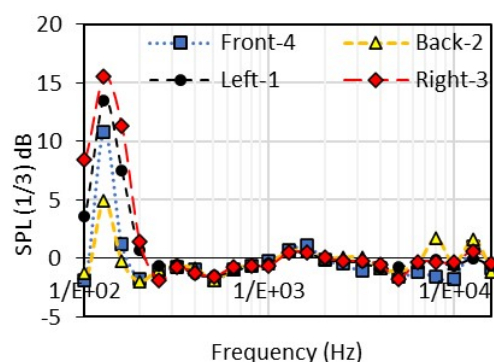
در حالت بدون افزونه، میانگین تراز فشار صوت در کل بازه فرکانسی یا OASPL برابر با ۶۴.۱۳ دسیبل بدست آمد. الگوی بهینه شده زیگزاگ بال جغد با استفاده از ورقه های آلومینیومی که از قبل دندانه دار شدند، و با استفاده از پیچ و مهره به لبه های حمله فن متصل شدند. برای بدست آوردن الگوی مناسب از نتایج تحقیقات قبلی بهره گرفته شد. همچنین در شبیه‌سازیهای قبلی که در زمینه توربوماشین‌ها توسط مولف انجام شده بود، مشاهده شد که شده گردابه‌ها در ابتدا و انتهای پره بیشتر از قسمتهای میانی آن است و این گردابه‌ها تاثیر قابل توجهی بر ناهمگونی میدان جریان و ایجاد صوت ایرودینامیک دارند. دلیل این مساله در ابتدای پره، وجود تغییر شکل ناگهانی و نزدیکی به هاب می‌باشد. اما دلیل افزایش شدت گردابه‌ها در نوک پره بیشتر اختلاف فشار بین دو طرف پره و گردابه نوک نوک پره می‌باشد. به همین جهت در ابتدا و انتهای الگوی بال جغد دامنه یا ارتفاع برجستگیها بلندتر انتخاب شد تا تاثیر بیشتری بر کاهش قدرت گردابه‌ها در این نواحی داشته باشد.

میانگین تراز فشار صوت در حالت نصب افزونه بر روی لبه حمله برابر با ۶۲.۵۲ دسیبل بدست آمد که بیانگر ۱.۶۱ دسیبل کاهش صوت می‌باشد. این مقدار تقریباً معادل ۲.۵ درصد کاهش است. در شکل ۸ 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 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. بیشترین مقدار کاهش صوت در این وضعیت برابر با ۱۴ دسیبل برای میکروفون-۴ (روبروی دمنده) می‌باشد.



شکل ۵: کاهش صوت ثبت شده ناشی از قرارگیری افزونه بر روی لبه حمله پره‌های دمنده

در مرحله بعدی تراز فشار صوت در حالت نصب افزونه بر روی لبه فرار پره مورد بررسی قرار گرفت. میانگین تراز فشار صوت در این ۲.۵۸ دسیبل کاهش صوت نشان داد که تقریباً معادل ۳.۸ درصد است. شکل ۹ کاهش صوت صورت گرفته ناشی از قرارگیری افزونه الهام گرفته از بال جغد را به تفکیک فرکانسی نمایش می‌دهد. بیشترین کاهش صوت در این وضعیت حدود ۱۵ دسیبل در فرکانس ۱۵۰ هرتز می‌باشد.



شکل ۶: کاهش صوت ثبت شده ناشی از قرارگیری افزونه بر روی لبه فرار پره‌های دمنده

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر الگوی اقتباس شده از لبه فرار بال جغد بر کاهش نویز آیرودینامیکی یک دمنده پرداخته شد. آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاه آکوستیک کارخانه امرسان اصفهان و با استفاده از تجهیزات کالیبره شده انجام گرفت. برای اطمینان از صحت نتایج، از منبع تغذیه پایدار استفاده شد و پارامترهای الکتریکی و دورانی دمنده مطابقت مناسبی با مقادیر نامی داشت. در حالت پایه (پره ساده)، میانگین سطح فشار صوتی کلی (OASPL) ۶۴.۱۳ دسیبل اندازه‌گیری شد. با نصب الگوی بال جغد روی لبه حمله، این مقدار به ۶۲.۵۲ دسیبل رسید که کاهش ۱.۶۱ دسیبلی (معادل ۲.۵٪) را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش در این حالت، حدود ۱۴ دسیبل در فرکانس ۲ کیلوهرتز (بازه حداکثر حساسیت شنوایی انسان) رخ داد. در حالت نصب الگو روی لبه فرار، کاهش چشمگیرتری مشاهده شد: میانگین تراز فشار صوتی ۲.۵۸ دسیبل (معادل ۳.۸٪) کاهش یافت و بیشترین کاهش منفرد حدود ۱۵ دسیبل در

فرکانس ۱۵۰ هرتز ثبت شد. در مجموع، الگوی اقتباس شده از بال جغد به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش نویز آیرودینامیکی شناخته شد. بهینه‌سازی این الگو و شناسایی سازوکارهای دقیق کاهش صدا، نیازمند آزمایش‌های تجربی بیشتر و شبیه‌سازی‌های عددی با دقت بالاست که می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده باشد.

۵- تشکر و قدردانی

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

مراجع

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. 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.
4. 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.
5. Rosenhouse, G., State-of-the-art In Active Noise Control (ANC). *WIT Transactions on The Built Environment*, 2025. 11.
6. Weitsman, D. and E. Greenwood, Passive Blade-Vortex Interaction Noise Reduction Using Embedded In-Blade Resonator Cavities. *AIAA Journal*, 2025: p. 1-13.
7. 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).
8. Rong, J. and H. Liu, Aeroacoustics in owl flight: biomechanisms and biomimetics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2025.
9. 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).
10. 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.