

آیروآکوستیک جغد: بررسی یک پرواز صامت

مصطفی مظفری (دانشجوی دکتری)

مهران مصدری* (استادیار)

دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۲)
دوری ۳-۳۹، شماره ۱، ص. ۹۹-۱۱۸، (مهری)

این گردآوری، مرور مختصری از تحقیقات انجام شده همراه با مطالعات اوسینت و مصورسازی، درباره‌ی چگونگی پرواز صامت جغدها و نیز نحوه‌ی الگوبرداری از سازوکارهای کاهش نوفه‌ی جغدها در طراحی‌های مهندسی تدوین شده است. همچنین، با هدف بررسی اجزای ویژگی‌های منحصر به فرد جسمی، فیزیکی و مشخص کردن چگونگی برخی از آنها از دارا بودن یا نبودن قابلیت صامت با سایر گونه‌های دیگر انجام شده است. سپس نوفه‌های موجود در پرواز جغدها همراه با جزئیات هندسی بال که ویژگی‌های غالب پرواز صامت است، بررسی می‌شود. در ادامه، تلاش‌ها برای الگوسازی مشخصات بال جغد که باعث پرواز صامت می‌شود، مورد بررسی و جمع‌بندی قرار می‌گیرد. همچنین، فناوری‌های کاهش نوفه که از الگوها و مشخصه‌های مربوط به جغد الهام گرفته شده بیان می‌شود. به طور کلی دامنه‌ی وسیعی از گمانه‌زنی‌ها و حدس‌ها برای پرواز صامت و مخفی‌کاری جغد وجود دارد؛ اما تاکنون معتبرترین و قانع‌کننده‌ترین دلایل با استدلال‌های موقوع عبارت‌اند از: ساختار دنداندار بال در لبه‌ی حمله، الیاف مخملی بال‌ها و حاشیه‌های لبه‌ی فرار. علاوه بر این، ترکیب حاشیه‌های لبه‌ی فرار و دندان‌های لبه‌ی حمله کاهش قابل توجهی در ترازهای فشارکلی صدا در تمام زوایای حمله را ممکن می‌سازد و باعث پایداری نوسانات سرعت در سطح مکش و حذف صداهای بسامد پایین و بالا می‌شود.

واژگان کلیدی: آیروآکوستیک، پرواز جغد، آیروآکوستیک پرواز صامت جغد.

mstfmozafari18@ut.ac.ir
m.masdari@ut.ac.ir

۱. مقدمه

خاص و الگوی اقتباسی برای کاربرد هواپیماهای کوچک باشد. کاهش نوفه^۶ از اهم مسائل و به‌عنوان یک عارضه‌ی جانبی ناخواسته‌ی پرواز است که می‌توان از راه‌حل‌های زیست‌شناختی به‌عنوان یک الگوی اقتباسی مفید بهره جست. از این رو، نوفه جدا از انرژی تلف شده، اثرات مخربی نیز دارد و این امر به‌ویژه برای افرادی که در نزدیکی فرودگاه‌ها زندگی می‌کنند، حائز اهمیت است. آلودگی صوتی ایجاد شده توسط هواپیماها بر سلامتی انسان تأثیرگذار است - مانند ایجاد فشار خون - و بنابراین، هدف صنایع پروازی کاهش نوفه‌ی تولید شده توسط وسایل نقلیه‌ی هوایی است. به همین ترتیب، نوفه‌ی تولید شده توسط پنکه‌ها (فن)، اعم از فن رایانه یا تهویه‌ی هوا، اغلب نگران‌کننده است و باید کاهش یابد. بنابراین، کاهش نوفه در سایه‌ی علمی نظیر آیرودینامیک و آیروآکوستیک و تکیه بر آنها شدنی است.^[۲]

در دانشگاه کمبریج، طرحی نوین با اقتباس از ساختار بال جغدها ارائه شده است که می‌تواند توربین‌های بادی، پره‌های رایانه و حتی هواپیما را بسیار ساکت‌تر کند. آزمون‌های اولیه در تونل باد، کاهش قابل توجهی در نوفه نشان می‌دهد، بدون

پرواز پرندگان همواره الهام‌بخش انسان‌ها بوده و به‌ویژه نقش مهمی در توسعه‌ی ماشین‌های پروازی نظیر لیلپیتال^۱ داشته است. همچنین، این اقتباس و تلاش‌ها برای بهبود وسایل نقلیه‌ی هوایی موفقیت‌آمیز بوده است.^[۱] هنگام استفاده از ویژگی‌های ریخت‌شناختی^۲ در رویکردهای زیست‌شناختی^۳ برای مسائل پروازی هواپیماها، باید درک کرد که پرواز پرندگان از جهات مختلف با پرواز هواپیماهای تجاری متفاوت است. اولاً پرندگان دارای بال‌های انعطاف‌پذیری هستند و از این بال‌ها برای حالت‌های مختلف پرواز مانند سُریدن^۴ و بال زدن^۵ استفاده می‌کنند. دوماً، خصوصیات آیرودینامیکی پرواز پرندگان با مشخصات هواپیما متفاوت است. این امر به‌ویژه در محدوده‌ی عدد رینولدز عملکردی پرندگان (کم‌تر از 10^6)، کاملاً مشهود است که در بین هواپیماهای تجاری، به هواپیماهای کوچک و پهلوها نزدیک‌تر است. لذا، پرواز پرندگان می‌تواند به‌عنوان پیشنهادی برای حل مسائل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۳/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۱/۵/۲، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۹.

DOI:10.24200/J40.2022.60494.1643

استاد به این مقاله:

مظفری، مصطفی و مصدری، مهران (۱۴۰۲). «آیروآکوستیک جغد: بررسی یک پرواز صامت»، مهندسی مکانیک شریف، (۱) ۳-۳۹، ص. ۹۹-۱۱۸

این‌که تأثیر نامطلوبی در عملکرد آیروآکوستیک داشته باشد. همچنین، فیزیکدان معروف، نایجل پیک^۷ که هدایت تحقیقاتی در این حوزه را بر عهده دارد در بیانیه‌ی گفت: «هیچ پرنده‌ی دیگری از این نوع ساختار پیچیده‌ی بال، برخوردار نیست». پژوهش‌هایی درباره‌ی پرواز جغدها و شکار آنها در سکوت، محققان را قادر ساخته تا نمونه‌ی اولیه‌ی برای پره‌های توربین بادی تولید کنند که می‌تواند میزان نوفه‌ی آنها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. همچنین، این فناوری باعث افزایش سرعت و تولید انرژی بیشتر می‌شود. به عنوان مثال برای یک نیروگاه بادی با اندازه متوسط، این می‌تواند به معنای چندین مگاوات تولید برق اضافی باشد. پروفیسور نایجل بیان می‌کند که بسیاری از جغدها، در درجه اول جغدهای بزرگ مانند جغدهای انبار^۸ و سفید - خاکستری بزرگ می‌توانند به طور پنهانی به شکار بپردازند. در حالی که قرن‌هاست این موضوع خصوصاً بر محققین پوشیده نیست؛ اما آنچه شناخته نشده است، این است که چگونه و چرا جغدها قادرند در سکوت پرواز کنند؟^[۳]

نایجل پیک و همکاران به کمک میکروسکوپ با وضوح بالا پره‌های جغد را دقیق بررسی و مشاهده کردند که پره‌های روی بال جغد دارای یک پوشش پُرزدار^۹ (کرکی) است که از بالا به شکل سایبان جنگلی^{۱۰} دیده می‌شود. به عبارتی دیگر، این سایبان پُرزدار (بال‌های جغد) دارای یک شانه‌ی انعطاف‌پذیر از موهای زبر^{۱۱} با فواصل مساوی از لبه‌ی حمله و کناره‌های چین‌دار^{۱۲} مرتجع و متخلخل لبه‌ی فرار هستند. بیشتر نوفه‌ی ناشی از یک بال اعم از این که پرنده، هواپیما یا پنکه (فن) باشد، از لبه‌ی فرار جایی که جریان عبوری متلاطم می‌شود، نشأت می‌گیرد. لذا، ساختار بال‌های جغد با هموار کردن عبور هوا هنگام گذر از روی بال، باعث کاهش نوفه و پراکندگی^{۱۳} صدا می‌شود تا طعمه متوجه حضورشان نشود.^[۴]

به منظور الگو برداری از ساختار نام‌برده، محققان پوششی را طراحی کرده‌اند که صدای تولید شده توسط تیغه‌های توربین را به مشابه بال جغد کاهش می‌دهد. در آزمایش‌های اولیه، تیغه‌ها را با استفاده از موادی، مشابه پوشش عروس،^{۱۴} پوشاندند که به رغم ساختار باز، زبری سطح زیرین را کاهش می‌دهد. همچنین، تراز نوفه را تا ۳۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد. با این حال استفاده از پوشش عروس در آزمون‌های آزمایشگاهی موفقیت‌آمیز بوده است؛ اما برای استفاده‌ی توربین بادی و هواپیما مناسب نیست. بنابراین، محققان با استفاده از پلاستیک و توسط چاپ سه‌بعدی طرح مشابهی را تولید و آن را روی قطعه‌ی کاملی از تیغه‌ی توربین بادی آزمایش و مشاهده کردند که میزان تولید صدای به وجود آمده توسط تیغه‌ی توربین بادی تا ۱۰ دسی‌بل کاهش یافته است و برای استفاده در بال‌های هواپیما که پیچیده‌تر از تیغه‌های توربین بادی است، ضرورت دارد که بهینه‌سازی و بررسی دقیق‌تری صورت گیرد.^[۴]

حرکت اجسام صلب در میان جریان سیالات (که اغلب جریان آشفتنه است) و تقابل جریان با سازه، باعث تولید نوفه می‌شود. در بسیاری از کاربردهای هوافضایی، منبع اصلی آزار عمومی می‌تواند باشد که اغلب در معرض قوانین نظارتی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، در لندن یکی از محدودیت‌هایی که به شرکت هواپیمایی در فرودگاه هیترو به دلیل نقض تراز نوفه اعمال می‌شود، محدود کردن تراز نوفه در شب است طوری که ۷ دسی‌بل کم‌تر از تراز روز باشد. از این رو، اعمال چنین قوانین و محدودیت‌ها تأم با فشارهای مداوم عموم، باعث بهبود عملکرد و استانداردهای انتشار و همچنین، ضرورت پژوهش و توسعه نوآورانه می‌شود. یکی از موارد قابل توجه، نوفه‌ی ناشی از بدنه است که به دلیل برخورد جریان آشفتنه با بدنه، بال و تجهیزات فرود به وجود می‌آید و در هواپیماهای معمولی در لحظه‌ی نزدیک شدن

به سطح زمین، می‌تواند به اندازه‌ی نوفه‌ی موتور هواپیما در تشدید آلودگی صوتی، تأثیر بگذارد. نوفه‌ی ناشی از تقابل سازه با سیال آشفتنه ممکن است باعث پایه‌ریزی محدودیت‌های نظارتی شود که می‌تواند باعث ظهور انرژی‌های جایگزین و حمل‌ونقل تجاری مانند توربین‌های بادی، تاکسی‌های برقی هوایی، هواپیماهای کوچک و بدون سرنشین شود. در دهه‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی در زمینه‌ی درک منابع صوتی و سازوکارهای تولید نوفه برای طیف وسیعی از جریان‌های صنعتی و مهندسی حاصل شده، اما همچنان علاقه به رشد ابزارهای نوین برای کاهش تولید نوفه‌ی آیروآکوستیک ادامه دارد که این نیز می‌تواند به سایر بخش‌های صنعتی دیگر تعمیم داده شود.

بیش از ۸۰ سال است که پدیده‌ی پرواز جغد در سکوت کامل تصدیق و با اندازه‌گیری پرواز جغدها به صورت مجزا و در مقایسه با سایر پرندهگان از نظر علمی تأیید^[۵] و همین امر باعث اقتباس پژوهشگران از پرنده‌ی آرام و صامت طبیعت، جغد، شده است. در متون درباره‌ی جغد، مفهوم سکوت نشان می‌دهد که طعمه نمی‌تواند شکارچی خود را حس کند یا این‌که زمان برای واکنش طعمه دیر است.^[۶] علاوه بر این، بسیاری از گونه‌های بزرگ‌تر جغد مانند جغد انبار، در هنگام پرواز تنها از طریق شنیدن، طعمه را شناسایی و ردیابی می‌کند. لذا، پرواز ساکت جغد مستلزم این است که نوفه‌ی آیروآکوستیک تولید شده توسط جغد در قابلیت ردیابی صوتی آنها خللی وارد نکند. نتیجه بررسی این فناوری و قابلیت این است که اگر سازوکارهای فیزیکی جغدها در سرکوب کردن پهنای باند نوفه‌ی تولید شده جریان در مقیاس پرنده به خوبی درک شود می‌تواند باعث انتقال و تعمیم طراحی‌های جدید برای کاهش نوفه در سرعت‌های پایین و مهار نوفه در سرعت و مقیاس‌های مختلف شود. تا به امروز، پژوهشگران با دانش خود نتوانسته‌اند وسیله‌ی مشابه با جغد و با قابلیت‌های آن در کاهش نوفه تولید کنند و این چالش همچنان به عنوان نقطه‌ی دست‌نیافتنی است برای آیروآکوستیک‌دان‌ها که به دنبال بازآفرینی پرواز صامت جغدها هستند.

سازوکارهای کاهش صدا در یک دسته از پرندهگان نظیر جغدها تکامل یافته است و برای ردیابی طعمه در شب از اطلاعات شنیداری استفاده می‌کنند. برای انجام این کار به طور مؤثر، این پرندهگان دارای سامانه‌ی شنوایی بسیار پیشرفته با آستانه‌ی کم شنوایی هستند و همین قابلیت در شکار طعمه به جغد کمک می‌کند و دلیل توسعه‌ی پرواز صامت جغدهاست.^[۴] در ادامه، مشاهدات اولیه در مورد مشخصه‌های پرواز صامت جغد مرور خواهد شد. سپس، در مورد پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی پرواز صامت جغد و برخی کاربردهای فنی ملهم از آن پرداخته می‌شود.

خصوصیات ریخت‌شناختی بال جغدها از همان ابتدا مورد توجه زیست‌شناسان و محققین قرار گرفته است. ماشا^[۷] اشاره کرد که از قدیم دندانه‌ها و حالت ارگی بال‌های جغد یک واقعیت شناخته شده است. همچنین، وی قلاب‌های کشیده‌ی بال را به عنوان منبع نرمی سطح بال‌های جغد تشخیص داد و از آن‌جا که به صورت مخمل حس می‌شود، آن را نیز «سطح مخملی» نامید. گراهام^[۸] در سال ۱۹۳۴ حاشیه‌های لبه‌ی فرار را به عنوان سومین مشخصه‌ی پرواز صامت جغد اضافه کرد. سیک^[۹] جزئیات کمی از مشخصه‌های نامبرده در فوق ارائه داد که شامل مقایسه‌ی مشخصه‌ها از گونه‌های مختلف جغد بود.^[۹] هرتل^[۱۰] اولین توضیحات را در مورد چگونگی جلوگیری از تولید نوفه سطح بالایی ارائه داد و او ادعا کرد که سطح مخملی، مانند نوعی بالشتک (کوسن) است تا پرها بتوانند بدون صدا روی یکدیگر بلغزند. ناگل^[۱۱] و همکارش،^[۱۱] مشخصه‌های صوتی و آیروآکوستیک روتورها را با/بدون

نشان دادند که شیب در دندان‌های لبه‌ی حمله می‌تواند عملکرد آبروآکوستیکی را با کاهش تراز نوفه تا حدود ۱/۴ دسی‌بل، بهبود ببخشد و باعث غلبه بر جدایش جریان و ریزش گردابه‌های لبه‌ی حمله بدون تأثیر منفی در عملکرد آبرودینامیکی شود و نوفه‌ی باند پهن را در بسامدهای پایین تا متوسط (۴۰ تا ۴ کیلوهرتز) کاهش دهد.^[۲۱] اثرات دندان‌های لبه‌ی حمله و فرار بر عملکرد آبروآکوستیکی به طور مجزا و گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین رانگ^{۲۷} و لیو در سال ۲۰۲۲، پژوهشی مبتنی بر شبیه‌سازی مشخصه‌ها، اندرکنش آبروآکوستیکی بین دندان‌های لبه‌ی حمله و فرار و تأثیر متقابل هریک منتشر کردند. آنها نشان دادند که دندان‌ها و حاشیه‌های لبه‌ی فرار، کاهش نوفه را در بسامدهای بالا و در زوایای حمله ۵ تا ۱۵ درجه را امکان‌پذیر می‌کند و درعین حال عملکرد آبرودینامیکی قابل مقایسه‌ی در قبال یک الگوی مرجع را ارائه می‌کند. علاوه بر این، ترکیب حاشیه‌های لبه‌ی فرار و دندان‌های لبه‌ی حمله قابل توجهی در ترازهای فشار کلی صدا در تمام زوایای حمله را ممکن می‌سازد و باعث پایداری نوسانات سرعت در سطح مکش و حذف صداها، بسامد پایین و بالا می‌شود. همچنین، نتایج آنها نشان می‌دهد که حاشیه‌های لبه‌ی فرار یک تجهیز قوی کاهش صدا در حل معضل رابطه‌ی تبدلی بین تولید نیروی آبرودینامیکی و کاهش صداست و به عنوان یک طراحی زیست‌شناختی در کاهش مؤثر نوفه، تکمیل‌کننده‌ی دندان‌های لبه‌ی حمله است.^[۲۲] همان‌طور که بیان شد در آبروآکوستیک پرواز جغد، سه مشخصه‌ی اصلی تأثیرگذارند: دندان‌های لبه‌ی حمله، سطح مخملی بال و حاشیه‌های لبه‌ی فرار. اما آنچه که در پرواز پرواز جغد حائز اهمیت است، استفاده‌ی توأمان از این مشخصه‌هاست و عمدتاً در پژوهش‌های صورت گرفته به صورت مجزا از هریک استفاده شده است. همچنین، پیرامون نوع ایرفویل جغد، جنس و الیاف پر جغد کم‌تر پژوهش صورت گرفته است و به نظر می‌رسد که ایرفویل و الیاف پر جغد، جزء مهم‌ترین شاخصه‌های دخیل در پرواز صامت هستند و به عنوان تقلیل‌کننده و جاذب صدا عمل می‌کنند. از طرفی، پرواز جغد و پرنده‌گان جزء پدیده‌های ناپایاست و همچنین جزء بال‌زن‌ها محسوب می‌شوند و بیشتر موارد الهام گرفته در آن در پدیده‌های پایاست. بنابراین، استفاده‌ی توأمان از مشخصه‌های بال جغد، بررسی الیاف پر، الهام‌گیری از ایرفویل و بررسی و الهام‌گیری در پدیده‌های ناپایا جزء مباحثی است که خلاء آن در میان پژوهش‌ها حس می‌شود.

۲. ارائه‌ی اوسینت و مصورسازی آبروآکوستیک جغد

در این بخش، نتایج حاصل از اوسینت (اطلاعات منابع آزاد)^{۲۸} و مصورسازی آبروآکوستیک پرواز جغدها ارائه می‌شود که توسط یکی از ابزارهای مهم تجزیه و تحلیل علم‌سنجی، به نام نرم‌افزارهای تحلیل‌گر و مصورسازی انجام شده است. در این‌جا از تحلیل هم‌رخدادی^{۲۹} واژگان استفاده شده است و هدف از آن، قادر ساختن افراد به درک داده‌ها و پدیده‌های خاصی است که نمی‌توان مستقیماً از پیکره‌ی پنهان علم به دست آورد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، کلیدواژه‌های مهم در آبروآکوستیک جغد و شاخه‌بندی موضوعی آن ارائه شده است. در این شکل تقسیم‌بندی مطالعات پیرامون جغد و فناوری‌های اقتباسی از آن به ۸ شاخه‌ی موضوعی نشان داده شده است، اما به قدری این شاخه‌ها به هم وابسته‌اند که می‌توان گفت هریک در برخی موارد وابستگی و هم‌پوشانی دارند. همچنین، با توجه به گوی‌های هر کلیدواژه، چنین برداشت می‌شود که آبروآکوستیک بیشترین ارتباط را با آبرودینامیک و در مباحث مربوط به ایرفویل و اصلاح و بهینه‌سازی آن دارد.

دندان‌های لبه‌ی حمله مورد بررسی قرار دادند. همچنین آنها نشان دادند که کاهش نوفه با پیکربندی‌های خاص لبه‌ی حمله و شرایط جاری امکان‌پذیر است. آنها نشان دادند که ریزش گردابه‌های بزرگ تیغی روتور با وجود دندان‌های لبه‌ی حمله سریع‌تر اتفاق می‌افتد و از بین می‌رود. لذا، این ویژگی به معنای مفید بودن و نه لزوماً به عنوان میراگر صدا است. بلکه احتمالاً به عنوان یک روش مؤثر برای کاهش اغتشاشات آبرودینامیکی از انواع مختلف سطوح بالابرنده است. شویند و آلن^[۱۲] به صورت تجربی جریان سطحی روی یک ایرفویل با/بدون لبه‌های دندان‌دار بررسی کردند. در اندازه‌گیری‌های انجام شده در اعداد رینولدز پایین ($10^5 \times 2.7$)، آنها متوجه شدند که دندان‌های مقلد از مژه‌های مصنوعی در سطح فوقانی ایرفویل، با تولید آشفتگی حباب لبه‌ی حمله را از بین می‌برد. همچنین دندان‌ها بیشینه P_{rms} را برای اعداد رینولدز بالا ($10^6 \times 6.2 - 1.2$) تا ۴۱٪ کاهش می‌دهد.

نیوهوس و همکاران^[۱۳] با کار بر روی جغد گندم‌گون، متوجه شدند که بیشترین شدت‌های نوفه ساطع شده در طول پرواز، طیفی بین 200 تا 1500 هرتز را پوشش می‌دهند. در حالت پرواز بال‌زن، نوفه‌ی تولید شده توسط جغد تحت تأثیر حذف دندان‌های لبه‌ی حمله قرار نگرفتند اما، پس از حذف دندان‌ها، کمی افزایش تولید نوفه، اندکی قبل از فرود دیده شد. علاوه بر این، در جریان بر روی بال‌های جغد یک الگوی جریان آرام در مقایسه با سایر گونه‌های پرنده دیده می‌شود.

هرش^{۲۱} و همکاران^[۱۴] به صورت تجربی مطالعات گسترده‌ی را پیرامون کاربرد دندان‌های لبه‌ی حمله به عنوان تجهیز برای کاهش نوفه‌ی گردابه‌ی صدا ساطع شده از ایرفویل‌های ثابت و چرخان در جریان با اعداد رینولدز پایین ارائه دادند. همچنین، انواع مختلفی از دندان‌ها در موقعیت‌های منتخب لبه‌ی حمله ایرفویل ناکا 0012 قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تراز نوفه‌ی ایرفویل‌های متصل به دندان‌ها، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

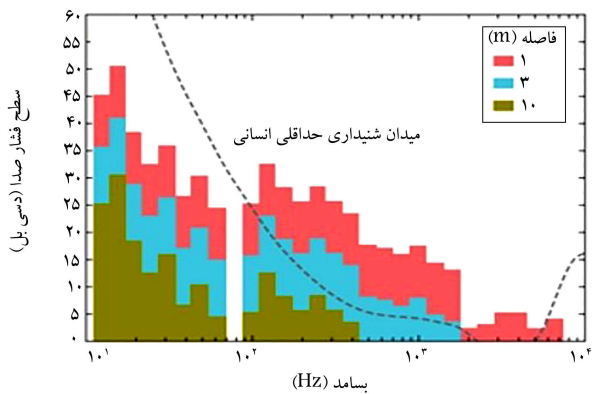
بیشترین مطالعات دانشگاهی پیرامون گونه‌های مختلف جغد، پیرامون جغد انبار است که توسط باخمان^{۲۲} و همکاران^[۱۵-۱۸] در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و 2012 ارائه شده است. این مطالعات پایه برای جغد انبار نسبت به سایر گونه‌ها در بخش‌های بعدی آورده شده است. راث و لیو^{۲۳} در سال 2020 ، تأثیر عدد رینولدز را بر کنترل جریان غیرعامل^{۲۴} در دندان‌های لبه‌ی حمله که از بال جغد الهام گرفته شده است، را به صورت عددی و با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ بررسی کردند. آنها نشان دادند دندان‌های لبه‌ی حمله به عنوان یک میکروتجهیز پیچیده برای کاهش نوفه و کنترل غیرعامل جریان گذار آرام - آشفته مورد تأیید است و هزینه‌ی بی‌استه‌ی است که بابت کاهش عملکرد آبرودینامیکی در اعداد رینولدز پایین پرداخت می‌شود.^[۱۹] از طرفی ژائو و همکاران در سال 2021 ، یک طراحی بهینه برای ایرفویل‌های آبروآکوستیکی با استفاده از دندان‌های لبه‌ی فرار اقتباسی به منظور جبران کاهش عملکرد آبرودینامیکی انجام دادند. آنها نشان دادند که می‌توان از دندان‌ها به عنوان یک تجهیز کنترل جریان برای کاهش نوفه‌ی آبرودینامیکی در پره‌های چرخان توربین بادی استفاده کرد. همچنین، نتایج آنها نشان می‌دهد در حالی که نوفه‌ی آبرودینامیکی کاهش یافته، نسبت لیفت به درگ و ضریب لیفت نیز در نقطه‌ی طراحی افزایش یافته است.^[۲۰] ونگ^{۲۵} و همکاران در سال 2021 ، مشخصه‌های آبروآکوستیکی تیغه‌های اقتباسی از بال جغد و اثرات دندان‌های لبه‌ی حمله و فرار را در یک فن بررسی کردند؛ هدف آنها حل معضل رابطه‌ی تبدلی^{۲۶} بین سرکوب نوفه و عملکرد آبرودینامیکی بود. از این رو، نتایج آنها نشان می‌دهد که دندان‌های لبه‌ی حمله می‌تواند تراز نوفه را کاهش دهد و در عین حال عملکرد آبرودینامیکی فن را حفظ کند اما، دندان‌های لبه‌ی فرار در این فرایند شکست می‌خورند. همچنین،

۱.۳. اندازه‌گیری نوفه‌ی جغد و آستانه‌ی شنوایی

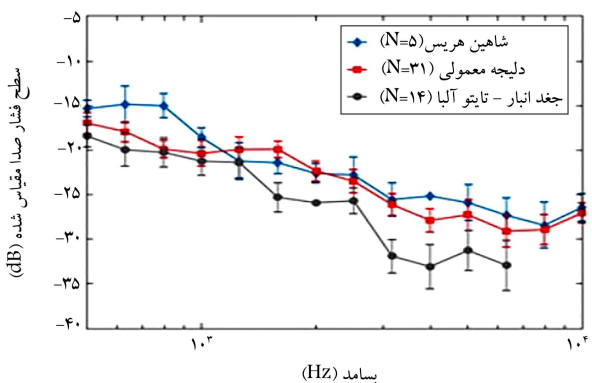
تورپ و گریفین،^[۲۴] اولین اندازه‌گیری‌های صوتی جغدها را در پرواز آزاد انجام دادند، که نوفه‌ی آیرودینامیکی آنها در محدوده‌ی بسامدی فراصوتی (بالای ۱۵ کیلوهرتز) توسط دستگاه تجربی آنها قابل تشخیص نبود. آنها چند گونه‌ی مختلف جغد را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که بسامد فراصوتی از هیچ یک از گونه‌های جغد در طول پرواز سیریدن قابل تشخیص نیست.^[۹] اندازه‌گیری‌های مقایسه‌ی بعدی توسط نیوهوس^[۳۱] و همکاران^[۱۳] انجام شده است؛ آنها دریافتند بیشینه نوفه از یک اردک کوهی در نزدیکی ۴ کیلوهرتز رخ داده است، که در محدوده‌ی بسامدی بیشینه حساسیت برای انسان و جغدها قرار دارد. با این حال بیشینه نوفه برای جغد گندم‌گون در محدوده‌ی بسامدی پایین‌تر از ۲۰۰ تا ۷۰۰ هرتز رخ داده است. همچنین، گزارش شده است که بیشینه‌ی فشار صوتی آن با ضریب ۳۰ (تقریباً ۳۰ دسی‌بل ساکت‌تر) نسبت به اردک کوهی است. علاوه بر این، نیوهوس و همکاران تراز نوفه‌ی مشابهی را برای هر دو پرنده در مرحله‌ی برخاست هنگام بال زدن، گزارش دادند و یک حالت شروع پرسروصدا مشاهده کردند.^[۲]

گروشکا^[۳۲] و همکاران^[۲۵] و کروگر^[۳۳] و همکاران^[۵] اندازه‌گیری نوفه‌ی یک گونه‌ی خاص جغد آموزش دیده، را در یک اتاق بازتابی^[۳۴] مجهز به میکروفون انجام دادند. مقایسه‌ی نتایج طیفی تراز فشار صدا پرواز جغد در برابر آستانه‌ی شنوایی انسان نشان داد که یک جغد به طور مؤثر نسبت به یک ناظر انسانی بیش از فاصله ۳ متری صامت خواهد بود (شکل ۵ الف). این اندازه‌گیری‌ها با نتایج نیوهوس و همکاران^[۱۳] برای جغد جنگلی، در موقعی که صدای بسامد بالا سرکوب و بیشتر انرژی صوتی در بسامدهای کم‌تر از ۱ کیلوهرتز ایجاد می‌شود، سازگارند. همچنین، کونیشی^[۲۶] عنوان کرد که جغد انبار در مقایسه با انسان نسبت به صداها در محدوده‌ی ۵۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز حساسیت بیشتری دارند. برای اطلاعات بیشتر در خصوص حساسیت شنوایی گونه‌های مختلف جغد، می‌توان به پژوهش دایسون^[۳۶] و همکاران^[۲۷] در سال ۱۹۹۸ رجوع کرد. این محدوده‌ی بسامدی حساسیت جغد با پهنای باند نوفه‌های خش خش^[۲۷] تولید شده توسط طعمه‌ها نظیر موش‌های صحرایی، که بیشتر انرژی صوتی آنها در محدوده‌ی ۱ الی ۳ کیلوهرتز است، هم‌پوشانی دارد. همچنین، باید توجه داشت که این گستره‌ی نوفه‌ها طیف بسامدی تا ۱۴ کیلوهرتز را شامل می‌شود.

سراج^[۳۸] و همکاران^[۶] ارزیابی مهمی از اندازه‌گیری‌های موجود از جغدهای زنده در مقایسه با نوفه‌ی سایر پرندگان انجام دادند. همچنین، در این پژوهش با محدودیت‌هایی نظیر دستیابی به نتایج پایدار به دلیل عدم اصلاح سرعت جریان، تجهیزات ثبت صوتی، قناری‌های اندازه‌گیری اولیه و مشکلات در پرواز طبیعی پرندگان به منظور به دست آوردن اندازه‌گیری‌های صوتی مواجه بودند. آنها اندازه‌گیری نوفه‌ی پروازی جغد انبار، شاهین هریس^[۳۹] و دلیجه‌ی معمولی^[۴۰] را با استفاده از یک آرایه‌ی صوتی برای تولید نداشت نواحی منابع صوتی روی پرندگان بررسی کردند. سرعت پروازی همه‌ی پرندگان ثابت و برابر ۵ متر بر ثانیه بود. در تمامی گونه‌ها در بسامدهای کم‌تر از ۱/۶ کیلوهرتز اختلاف قابل توجهی در تراز فشار صدا مشاهده نمی‌شود؛ اما در بسامدهای بالاتر از ۱/۶ کیلوهرتز و مقایسه‌ی بسامدی یک‌سوم اکتاو باند، جغد نسبت به سایر پرندگان با ۳-۸ دسی‌بل ساکت‌تر بود. شکل ۵ ب، نتایج حاصل از مقیاس‌بندی پنج برابر سرعت پروازی را نشان می‌دهد. در بسامدهای بالای ۱/۶ کیلوهرتز، طیف فشار صدای دلیجه و شاهین با نرخ ۱۰ دسی‌بل در یک دهه^[۴۱] کاهش می‌یابد. در حالی که برای جغدهای انبار ۱۵ دسی‌بل در دهه افزایش می‌یابد. همچنین، با نتایج قبلی برای جغد زنده که در آن محتوای بسامد بالا به طور



الف) اندازه‌گیری تراز فشار صدا با استفاده از یک میکروفون تک در فواصل مختلف از پرنده و مقایسه‌ی آن با آستانه‌ی شنوایی انسان [۲۵].

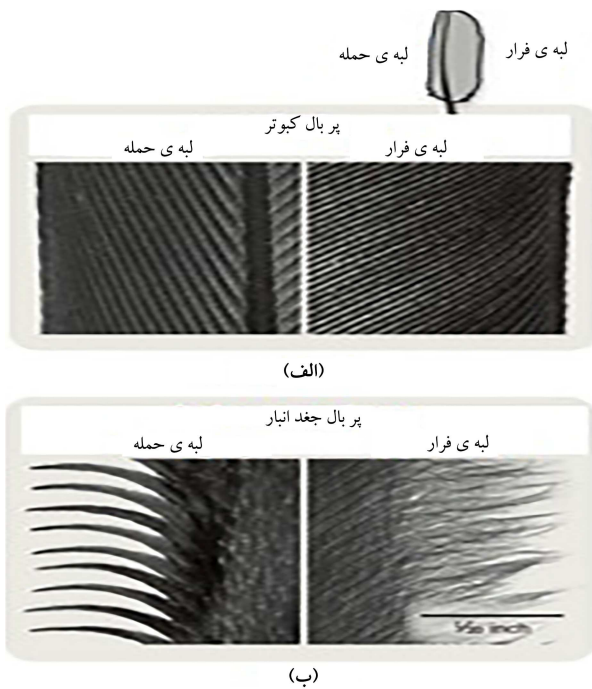


ب) اندازه‌گیری تراز فشار صدا در فاصله‌ی یک متری برای سه گونه پرنده [۶]. شکل ۵. اندازه‌گیری نوفه‌ی جغدهای زنده. [۴]

محسوس وجود ندارد، سازگار است. در ادامه، سراج و همکاران در سال ۲۰۱۱، با وجود این که سرعت پروازی در نظر گرفته تقریباً معادل‌سازی شده بود، بیان کردند که آرایه‌ی صوتی آنها قادر به اندازه‌گیری نوفه‌ی پروازی جغد انبار در بسامدهای فراتر از ۶/۳ کیلوهرتز نیست. همچنین، نتایج آنها با نظریه‌ی مبتنی بر پرواز صامت جغد در آزمایش‌های نمونه‌ی بال ثابت و بال ویژه، توسط محققان^[۲۹،۲۸] تطابق خوبی دارد. مطالعات تجربی توانایی بسیاری از گونه‌های جغد متوسط تا بزرگ را برای سرکوب نوفه‌ی آیرودینامیکی بالاتر از بسامد بحرانی، تقریباً ۱/۶ کیلوهرتز، تأیید می‌کند. این بازه‌ی بسامدی، سرکوب نوفه‌ی آیرودینامیکی در محدوده‌ی حساسیت شنوایی انسان‌ها، جغدها و همچنین شنوایی پستانداران طعمه را تقویت می‌کند. نتایج برای پهنای سرکوب نوفه‌ی آیرودینامیکی بال‌های جغد در اندازه‌گیری‌های زنده و بال‌های ثابت در آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که وجود یک مشخصه یا ترکیبی از چند مشخصه‌ی بال مسئول این کاهش نوفه است.

۲.۳. مشخصه‌های بال

گراهام^[۴۲] در سال ۱۹۳۴^[۸] برای اولین بار شناسایی و استدلال کرد که سه مشخصه بال که فقط مختص جغدها است، ممکن است یک پایه‌ی فیزیکی برای تأثیر بر تولید نوفه‌ی آیرودینامیکی داشته باشد که عبارت‌اند از: یک شانه‌ی الیاف در امتداد لبه‌ی حمله، حاشیه‌ی لبه‌ی فرار خوش‌خو^[۴۳] (موافق)^[۴۳] و پوشش مخملی روی سطح بالایی بال‌ها. گراهام، فقدان این مشخصه‌های بال در جغد ماهی‌خوار^[۴۴] را به عنوان پشتیبان تکاملی^[۴۵] که این مشخصه‌ها مسئول پرواز صامت‌اند را تفسیر کرد. با این حال، هنوز



شکل ۶. مقایسه‌ی پربال جغد انبار با کبوتر. [۲۳]

متماثل به بالا در لبه‌ی حمله ۲۹ درجه است. از این رو، با در نظر گرفتن دندان‌ها و قرارگیری آن روی یک بال جغد انبار به نظر می‌رسد که دندان‌ها حین پرواز تقریباً عمود بر جریان ورودی هستند. همچنین، انحناء و توزیع ضخامت دندان‌ها در موقعیت‌های مختلف روی پرها نیز ثبت شده است.

همچنین، رولین ۵۱ و همکاران، [۳۰] یک الگوی مقدماتی از جغد انبار را با استفاده از داده‌های ۴۳ نمونه‌ی نر و ۵۰ نمونه‌ی ماده تهیه کردند که نشان‌دهنده‌ی مستقل بودن طول دندان از جنس، سن، طول موکرک‌دار (خاردار)، طول پره و سطح پره است.

۲.۴. حاشیه‌ی لبه‌ی فرار

حاشیه، نوک‌های خاردار جداشده از پره‌های داخلی در جایی که چنگک‌های نگهدارنده‌ی پره وجود ندارد را شامل می‌شود. حاشیه‌های پره‌های منفرد باهم لبه‌ی فرار ساییده شده بال مرکب را تشکیل می‌دهند. باخمان و همکاران، [۱۶] اندازه‌گیری‌های جسمانی حاشیه‌های جغدهای انبار با استفاده از پنج پر منفرد در موقعیت پره‌ی داخلی را انجام دادند. این مطالعه پنج پره از پنج موقعیت مختلف بال نشان داده شده در شکل ۳ ($P_{10}, P_5, P_1, P_2, S_1$) را که در مجموع ۲۵ پر بودند، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. میانگین طول حاشیه‌های محدود باریک در نواحی مرکزی پراز ۲ الی ۲/۴ میلی‌متر بود. تغییرات عرضی آماری قابل توجهی در انواع پرها، به جز پر P_{10} که طول حاشیه‌ی آن 0.53 ± 0.49 میلی‌متر بود، وجود نداشت. طولی‌ترین حاشیه‌ها در نواحی مرکزی و انتهایی پر مشاهده می‌شوند و کوتاه‌ترین حاشیه‌ها در نزدیکی پایه‌ی پر است. میانگین چگالی و تراکم خطی محدوده‌ی حاشیه‌ها از ۳/۰۲ تا ۳/۳۵ در میلی‌متر است و تغییرات در تراکم خطی در عرض انواع مختلف پراز نظر آماری ناچیز بود. [۲]

۳.۴. سطح مخملی بال

قلاب‌های کشیده در سطح فوقانی بسیاری از پره‌های جغد، باعث بافت مخملی

یک رابطه‌ی دقیق فیلوژنتیک^{۴۶} در میان گونه‌های مختلف جغد و این مشخصه‌های بال برای تقویت علمی این ظنون و گمانه‌ها ارائه نشده است. در واقع، ویژگی‌هایی مانند سطح مخملی بالای بال در برخی از گونه‌ی پرنده‌های شب یا شبگردان نظیر گونه‌ی دهان‌قورباغه‌ی ۴۷ و شاهین شب ۴۸ (از راسته‌ی شبگردسانان) مشاهده شده است؛ اما در دیگر گونه‌ها، مانند بوف‌سانان،^{۴۹} وجود ندارد. با این وجود، تحقیقات گراهام به کانونی برای آبروآکوستیک‌دان‌ها و زیست‌شناسانی که می‌خواهند ریخت‌شناختی این صفات بال و ظرفیت آنها برای ایجاد سازوکارهای جدید برای کاهش نوفه‌ی آبرودینامیکی را بهتر بشناسند، تبدیل شده است. اندازه‌گیری فیزیکی این مشخصه‌ها و تغییرات آنها در سراسر بال و گونه‌های مختلف جغد در حال حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تک‌تک مؤلفه‌های دخیل در این پرواز صامت مشخص شود.

۳.۳. پره‌های جغد و میرایی صدا

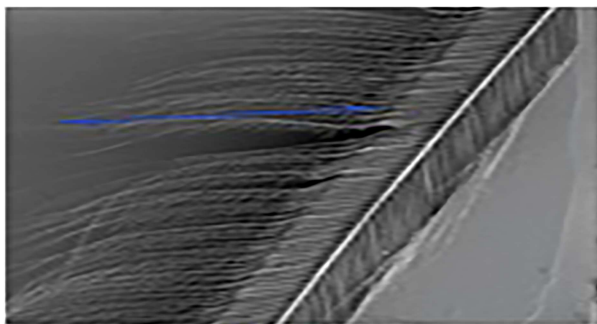
در اثر حرکت جسم در هوا، ارتعاشات و امواج فشاری به وجود می‌آید که این ارتعاشات و امواج فشاری به صورت صدا توسط انسان حس می‌شود. هنگامی که جغد در هوا حرکت می‌کند، می‌تواند به خوبی این ارتعاشات و امواج فشاری را خنثی کند. لبه‌ی حمله‌ی بال جغد دارای موهای رو به پایین است که در سراسر بال وجود دارد. در اثر پرواز در هوا، باد از روبرو به لبه‌ی حمله‌ی بال برخورد می‌کند. سپس، هوای متراکم و فشار از نقطه‌ی آغاز بال به سمت آن نقطه شروع به حرکت می‌کند. وقتی بال به پایان می‌رسد، فشار زیاد شده و باعث ایجاد تلاطم و آشفتگی می‌شود و بال زن با نوفه‌ی اضافی همراه می‌شود. لذا، در جغد دندان‌ها یا شانه مانند ساختار لبه‌ی حمله از جدایش جلوگیری کرده و با ایجاد یک لایه مرزی آشفته بالای هوای روی سطح فوقانی بال، باعث افزایش نیروی برآ می‌شود. این اثرات به صورت توأمان از ایجاد صدا در هنگام پرواز جلوگیری می‌کنند. [۲۳]

۴. اندازه‌گیری‌های جسمانی، فیزیکی و آکوستیکی جغد

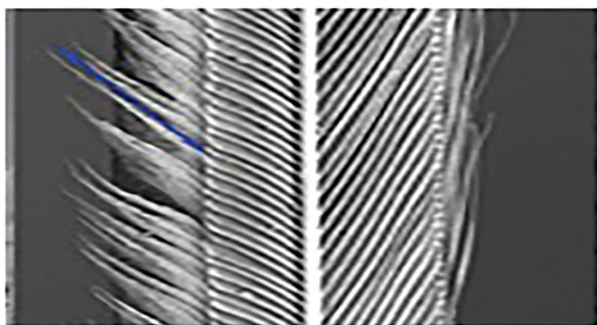
با بررسی دقیق پر جغد با استفاده از میکروسکوپ، می‌توان به وضوح جزئیات را نشان داد (شکل ۶). همان‌طور که مشاهده می‌شود، پره‌های دو پرنده، جغد و کبوتر باهم مقایسه شده‌اند و تفاوت بسیاری از لحاظ ساختاری دارند. از این رو، پر جغد دارای طراحی خاص در «شانه‌ی لبه‌ی حمله» و «حاشیه لبه‌ی فرار» است. در حالی که کبوتر دارای پر معمولی است. لذا پره‌های پروازی جغد دارای شانه‌های دندان‌دار و حاشیه‌های ناهموار است که سبب کاهش تلاطم و نوفه در طول پرواز می‌شود. همچنین، سطح مخملی بال جاذب صداست و به پرواز صامت کمک می‌کند.

۱.۴. شانه‌ی لبه‌ی حمله

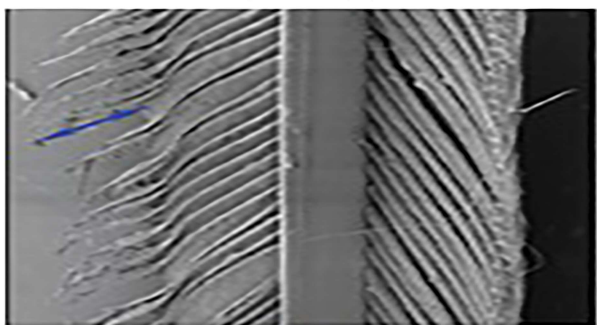
اندازه‌گیری‌های ریخت‌شناختی بدوی در سال ۲۰۰۷ توسط باخمان و همکاران [۱۷] با استفاده از ۵ بال از سه جغد انبار مختلف برای شانه‌ی لبه‌ی حمله با طول دندان میانگین ۱/۸ میلی‌متر، تراکم خطی ۱۸ دندان در سانتی‌متر و عرض پایه‌ی دندان ۵۵۵ میکرومتر با نسبت باریک‌شوندگی خطی دندان‌های نوک‌تیز انجام شده است. سپس، باخمان و وگتر^{۵۰} در سال ۲۰۱۱ کامل‌ترین تحقیق را در زمینه‌ی جزئیات هندسی شانه‌ی لبه‌ی حمله انجام دادند. [۱۸] آنها، شش شاه‌پروا را در ردیف دهم (P_{10}) شکل ۳ را برای ۵ جغد انبار در شرایط ایستایی و در هوای ساکن اندازه‌گیری کردند و گزارش دادند که متوسط طول سرتاسر دندان‌ها ۲۶۷۰ میکرومتر، فاصله‌ی تفکیک بین دندان‌های مجزا ۵۷۵ میکرومتر و میانگین شیب دندان‌های



الف) پره‌های بال جغد؛



ب) پره‌های بال عقاب؛



ج) پره‌های بال کبوتر.

شکل ۷. مقایسه‌ی پره‌های بال سه گونه‌ی مختلف پرنده.

بال می‌شود. کلان^{۵۲} و همکاران قلاب‌های جغد را به سطح زبر منعطف تشبیه^[۳۱] و بیان کردند متوسط اندازه‌گیری‌های جسمانی تقریباً ۲۰۰ قلاب بر میلی‌متر مربع است که قطر هر یک حدوداً ۶ میکرومتر است. برای جغدهای انبار، باخمان و همکاران در سال ۲۰۰۷، مشخص کردند که قلاب‌های روی پره‌ی داخلی بلندتر از پره‌ی خارجی است. همچنین، میانگین طول‌های قلاب‌های روی پره‌ی داخلی (خارجی) برابر ۱۸۷٫۱ ± ۱۲٫۷۱ (۵۷٫۵ ± ۶٫۱) میکرومتر است که طول هرکدام از قلاب‌ها به‌طور قابل توجهی طولانی‌تر از قلاب‌های کبوتر (گونه‌ی کلومبا لیویا دومستیکا)،^{۵۳} ۶۶٫۶ ± ۷٫۹ (۷۹ ± ۱۵٫۰) میکرومتر است.

همچنین، آنها خاطرنشان کردند که قلاب‌های جغد انبار به اندازه‌ی کافی بلند است و می‌تواند تا چهار ساقه‌ی خاردار همسایه در هر پره در عرض گسترش یابد. اگرچه طول قلاب برای جغد انبار بلندتر از کبوتر است؛ اما تراکم قلاب‌ها در واحد سطح برای کبوتر بیشتر از جغدهاست.^[۴]

۴.۴. مؤلفه‌های مکانی پرواز جغد

اکنون لازم است که یک مؤلفه‌ی مکانی برای توصیف پرواز صامت جغد از منظر دینامیک سیالات تعریف شود. سرعت متوسط حدود ۵ تا ۷ متر بر ثانیه است^[۳۶،۵] که منجر به تعریف محدوده‌ی عدد رینولدز بر اساس وتر، $۱۰^۴ \times ۲٫۲$ الی $۱۰^۵ \times ۱٫۳$ می‌شود. به‌عنوان نمونه، پرواز جغد انبار با سرعت ۵ متر بر ثانیه، یعنی پرواز ماخ پایین (عدد ماخ برابر ۰٫۱۵) و عدد رینولدز $۱۰^۴ \times ۰٫۷$ ویژگی‌های بال جغد می‌تواند مقیاس‌های طولی اضافی را معرفی کند: لایه‌ی مخملی تقریباً ۱ میلی‌متر ضخامت دارد و طول نمایشی هر دو حاشیه و شانه‌ی لبه‌ی حمله ۲ میلی‌متر است. این مشخصه‌ها بسیار کوچک‌تر از طول موج صوتی ۱٫۶ کیلوهرتز در هوا (۲۱ سانتی‌متر) است. با این حال، این طول موج صوتی می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از وتر بال در طیف وسیعی از گونه‌های جغد باشد. علاوه بر عدد رینولدز می‌توان گروه‌های بی‌بعد دیگری با استفاده از ضخامت لایه مرزی و اندازه‌گیری‌های جسمانی و اطلاعات دینامیک سیالات به دست آورد. پرواز جغدها عموماً در زوایای خیلی کم حمله رخ می‌دهد. همچنین، بسیاری از سازوکارهای اصلی تولید نوفه‌ی آیرودینامیکی برای بال‌ها می‌تواند در زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.^[۴]

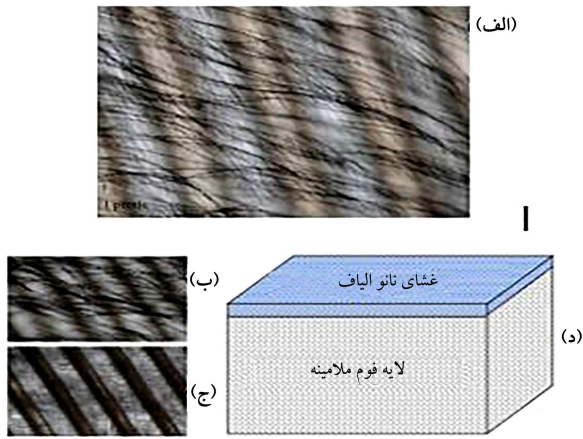
۵.۴. نوفه و جذب آن

بررسی مؤلفه‌های صوتی جغد، یکی از جنبه‌های مهم در این حوزه است. بنابراین، نوفه‌ی بال‌زدن‌های جغد، کبوتر و عقاب برای مقایسه مورد مطالعه و توجه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ردیابی‌های صوتی هر یک از پرنده‌گان ثبت شده و به صورت نگاره‌ی بی (گرافیکی) به تصویر کشیده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که بال جغد نسبت به دو پرنده‌ی دیگر دارای ساقه و ریشه‌های خاردار ظریف و کوچک است.^[۲۳]

۶.۴. صدا و مشخصه‌های بسامدی جغدها

همان‌طور که بیان شد، بال جغد دارای سه ویژگی خاص است: لبه‌ی حمله‌ی دنداندار، الیاف مخملی و حاشیه‌ی لبه‌ی فرار. ترکیب این ویژگی‌ها جغد را به یک شکارچی ماهر تبدیل کرده، در حالی که کبوتر و عقاب از این خصوصیات برخوردار نیستند. این پرنده‌گان در مقایسه با جغد در زمینه‌ی پرواز صامت ضعیف‌اند؛ لذا لبه‌ی حمله‌ی دنداندار و ساختار شانه‌مانند که در پره‌های عقاب و کبوتر وجود ندارد، تفاوت زیادی در مؤلفه‌های نوفه ایجاد می‌کند. هر دندان از نوک ساده‌ی خاردار تشکیل شده است

که برای اهداف آیرودینامیکی در برخی از زوایا می‌تواند خم شود. از این رو، کاملاً مشهود است که ساختار دندانه‌ی تقریباً در هر نقطه از بال، اجازه‌ی تشکیل گردابه‌ی بزرگ منفرد را نمی‌دهد. بنابراین، ضخامت لایه‌ی مرزی و جدایش جریان را کاهش می‌دهد. همچنین، جریان عبوری از روی بال را پایدار و تشکیل گردابه‌ی بزرگ مقیاس را خنثی می‌کند. در وهله‌ی بعد، حاشیه‌های لبه‌ی فرار پراز پره‌های داخلی و خارجی تشکیل شده است (شکل ۸). پرواضح است که لبه‌ی فرار در هواپیماهای بال ثابت، منبع اصلی تولید نوفه هستند، بنابراین حاشیه‌ها کلید کاهش نوفه، تلاطم و گردابه هستند. البته، از این طریق از تبدیل شدن لبه‌ی فرار به منبع تولید نوفه جلوگیری می‌کنند. طول معمولی پره‌های داخلی حدوداً ۳ الی ۵ میلی‌متر و پره‌های خارجی آن حدود ۲ میلی‌متر است. همچنین، یک عامل مهم این است که پرنده‌ی (شاه‌پرنده) از بقیه نرم‌تر و بلندتر و موهای زبر روی بال، ساختار متخلخل چندلایه‌ی دارد که توزیع ارتفاع آن غیر یکنواخت است. با این حال، موهای انتهایی تقریباً موهای ابتدایی را پوشش می‌دهند تا این که روی هم قرار بگیرند. این امر بیان می‌دارد که ساختار موجود در پره‌های جغد جذب صدای بیشتری دارد و ساختار پر مخملی در مقایسه با پره‌های سایر پرنده‌گان بسیاری از نوفه‌های ایجاد شده در طول پرواز را جذب می‌کند.^[۲۳] چنان که بیان شد و مشهود است، پره‌های جغد به‌عنوان جاذب صدا عمل می‌کنند؛



شکل ۹. الف) ساختار پر جغد؛ ب) لایه‌ی پوشش جنگلی؛ ج) لایه‌ی متخلخل گونه؛ د) کامپوزیت دولایه‌ی جاذب صدا. [۳۳]



شکل ۱۰. آشکارسازی حرکت سریدن: الف) جغد انبار؛ ب) جغد جنگلی؛ ج) باز سپید.

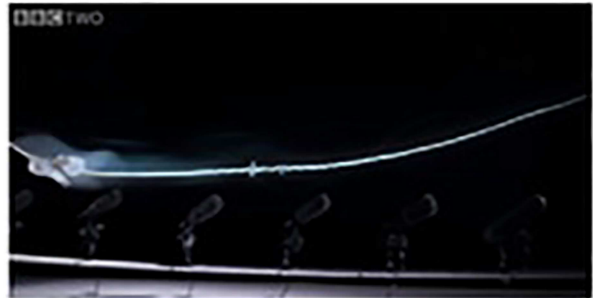
یک گردابه‌ی خطی که از یک فیبر انعطاف پذیر عبور می‌کند، دریافت که سیگنال نوبه تحت تأثیر کوپل شدن هیدرواستاتیک مسیر گردابه و حرکت فیبر قرار می‌گیرد. همچنین، نتیجه گرفت که چنین اندرکنش‌هایی در سطح بالایی بال جغد ممکن است به پرواز بی صدا کمک کند. [۳۵] با این حال، در پژوهشی دیگر ویزن^{۵۶} و همکاران، گردابه‌ی در سمت مکش بال واقعی جغد پیدا نکردند. [۳۶] بنابراین، یافته‌ی جورسکی در ارتباط با پرواز صامت جغد مبهم ماند. در پژوهشی دیگر، آشرود^{۵۷} و همکاران، [۳۷] یک فلش ناگهانی نور را از میان ۲۰۰۰۰۰ حباب پراز هلیوم که در هوا معلق بودند، تابیدند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود آنها حرکت حباب‌ها را در حین پرواز پرندگان (جغد انبار، جغد جنگلی و باز سفید) رصد کردند و مشاهده کردند که گردابه‌هایی در پشت سر پرندگان در حین پرواز نمایان می‌شود و حرکت هریک از حباب‌ها را نیز توسط رایانه رصد و ثبت کردند که نتایج آن مطابق با شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. حرکت چرخش این گردابه‌ها به سمت پایین است که به نیروی برای پرنده کمک می‌کند و سرعت فروزش ناشی از بدنه و دم به طور مدام از سرعت بال‌ها بیشتر است. همچنین، در هنگام سریدن باعث افزایش برآ و کاهش پسا می‌شوند. علاوه بر آن، حباب‌های چرخان پدیده‌ی شگفت‌انگیز دیگری را آشکار کردند که یک



الف) عقاب؛



ب) کبوتر؛



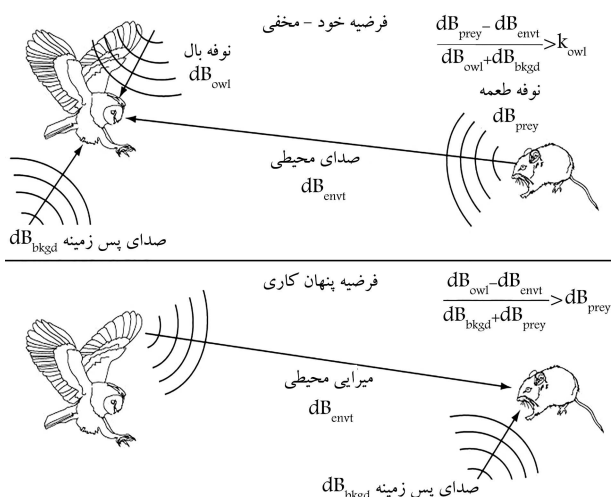
ج) جغد.

شکل ۸. صدا و مشخصه‌های بسامدی. [۳۳]

اما در مقالات به جنس پرها اشاره نشده است. بیشتر پژوهش‌هایی که در این باره انجام شده، ملهم از بال جغد بوده و در آن از الیافی مشابه با پرها استفاده شده است. به عنوان مثال، در پژوهشی از کامپوزیت نانوالیاف با الهام‌گیری از سطوح بال جغد به منظور جاذب صدا بهره برده شده است. آنها، اثرات قطر نانوالیاف، ضخامت غشاهای نانوالیاف و لایه‌های فوم ملامینه^{۵۴} را بر ضرایب جذب صدا مورد تحلیل قرار دادند. این مطالعه بسامد قطع را که در آن ضریب جذب صدا به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، شناسایی می‌کند. این پژوهش می‌تواند بینش جدیدی را در موارد طراحی جاذب‌های صوتی نیمه‌تراوا^{۵۵} جدید در کاربردهای مهندسی ایجاد کند. [۳۳]

۵. شکل‌گیری گردابه در بال جغد در حین پرواز

در پژوهش لیو و همکاران، بخشی به گردابه‌های بال اختصاص دارد. آنها با مشاهده‌ی دینامیک گردابه‌های میدان نزدیک، توزیع فشار و طیف سرعت نشان دادند که حاشیه‌های لبه‌ی فرار می‌تواند جدایش جریان و ریزش گردابه را در نزدیکی لبه‌ی فرار سرکوب کند و در نتیجه اغتشاشات سرعت محلی و تراز فشار صدا را کاهش دهد. [۳۳] مطابق شکل ۹ جورسکی با مطالعه و مدل‌سازی دینامیک و تولید صدای



شکل ۱۳. دو فرضیه موجود در پرواز صامت جغد. [۳۸]

صامت پرواز می‌کند. بر اساس این فرضیه، جغدها با کاهش dB_{owl} می‌توانند صداهایی را که طعمه ایجاد می‌کند، بهتر شناسایی کنند. ۲. فرضیه پنهان‌کاری: سکوت و پرواز صامت به جغد این امکان را می‌دهد که توسط طعمه شناسایی نشود.

بر اساس فرضیه اول، پنج متغیر وجود دارد که بر خود مخفی بودن جغد تأثیر می‌گذارد: صدای تولید شده توسط بال‌ها و بدن در پرواز (dB_{owl})، صدای تولید شده توسط طعمه (dB_{prey})، صدای پس‌زمینه محیط (dB_{bgd})، افت انتقال ناشی از ارسال صدای طعمه از طریق محیط به جغد (dB_{envt}) و توانایی شنوایی جغد (k_{owl}) برای تعیین محل صدای طعمه. معمولاً افت انتقال صدای بال جغد به سبب ثابت بودن فاصله‌ی بین بال تا گوش جغد، ثابت است. لذا به عنوان پارامتر جدا در نظر گرفته نمی‌شود. در عوض، dB_{owl} در محل گوش‌های جغد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، زیرا تنها صدای بال است که به گوش جغد می‌رسد و شنوایی جغد را مختل می‌کند. در نهایت، بیان این متغیرها به عنوان سیگنال به نوبه به صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$\frac{dB_{prey} - dB_{envt}}{dB_{owl} + dB_{bgd}} > k_{owl} \quad (1)$$

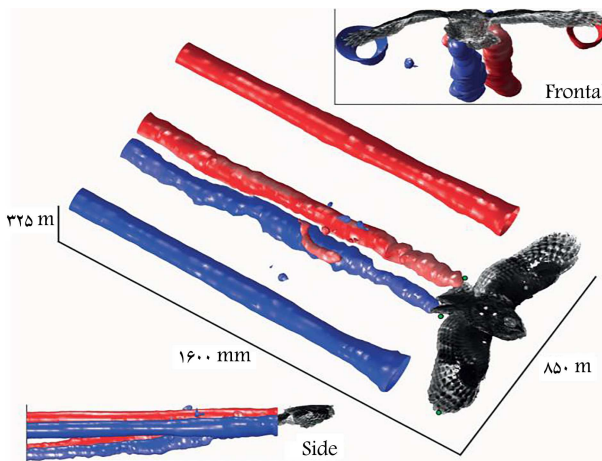
بر اساس فرضیه دوم، عدم توانایی طعمه در شنیدن صدای جغد باعث پرواز صامت می‌شود. پنج متغیر وجود دارد که بر پنهان‌کاری جغد تأثیر می‌گذارد: صدای تولید شده توسط بال‌ها و بدن در پرواز (dB_{owl})، صدای تولید شده توسط طعمه ناشی از جویدن یا حرکت آن (dB_{prey})، صدای پس‌زمینه محیط (dB_{bgd})، افت انتقال ناشی از ارسال صدای بال جغد از طریق محیط به طعمه (dB_{envt}) و توانایی شنوایی طعمه (k_{prey}) برای تعیین محل صدای طعمه. در نهایت، این فرضیه چنین بیان می‌شود:

$$\frac{dB_{owl} - dB_{envt}}{dB_{bgd} + dB_{prey}} > k_{prey} \quad (2)$$

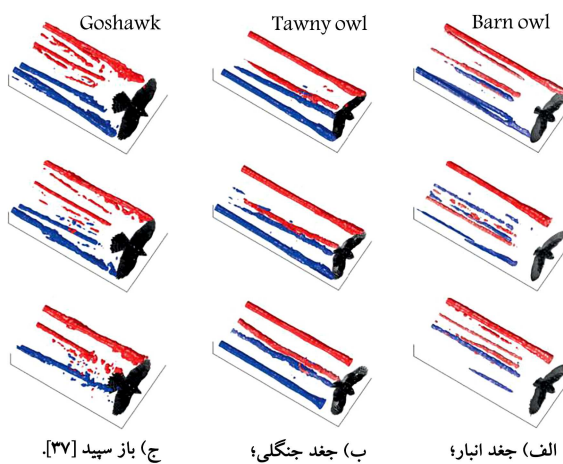
۷. سازوکارهای تولید نوفه و انواع آن در بال جغد

۱.۷. منشأ نوفه‌ی تلاطم (آشفستگی)

تولید نوفه‌ی آبرودینامیکی در جریان با عدد ماخ پایین و عموماً در نواحی با تلاطم به وجود می‌آید که نتیجه‌ی تبدیل انرژی جنبشی هیدرودینامیکی چرخشی به امواج



شکل ۱۱. نمونه‌ی از بازسازی ساختارهای گردابی در پشت سر جغد جنگلی در حال سریدن. سطوح نمایش داده شده برحسب معیار Q دو جفت گردابه دنباله‌دار (یک جفت در پشت نوک بال‌ها و یک جفت باریک‌تر در دم) را نمایش می‌دهند. [۳۷]



شکل ۱۲. ساختارهای گردابی در پشت سر جغد در حال سریدن.

جفت گردابه‌ی ثانویه از دم به سمت پایین حرکت می‌کند. این گردابه‌های ثانویه باعث افزایش برآ می‌شود و چون از دم نشأت می‌گیرند، توزیع برآ در آن به صورت یکساخت است و روی کل بدنه‌ی پرنده بخش می‌شود. همچنین، پسای کل را کاهش می‌دهند و به پایداری پرنده کمک می‌کند.

۶. چرایی پرواز بی‌صدای جغد

با جست‌وجوی انجام گرفته مشاهده شد که به صورت تحلیلی و نظری کم‌تر پیرامون صامت بودن پرواز جغد پرداخته شده است. پژوهش‌هایی به صورت تحلیلی در باره‌ی مشخصه‌های بال جغد از جمله دندان‌های لبه‌ی فرار و لبه‌ی حمله توسط لیو و همکاران در چندین مورد پرداخته شده است. اما، این که خود پرواز صامت به صورت تحلیلی بحث شود، جزء پژوهش‌های نادر است. در پژوهشی توسط کلارک و همکاران [۳۸] مطابق شکل ۱۳ دو فرضیه‌ی عملکردی پیرامون پرواز جغد و شکار بیان شده است. در پرواز صامت جغد دو فرضیه‌ی عملکردی وجود دارد: ۱. فرضیه خودمخفی جغدها برای جلوگیری از تولید صداهای بال و صدای قدم‌های خود به منظور منع شنوایی و عدم توانایی درک صداهای دیگر، به صورت

سال ۱۹۷۰ یکی از اولین تحقیقات در این باره توسط کرایتون و لپینگتون^{۶۲} انجام شد.^[۲۲] آنها به عنوان یک نمونه‌ی ساده، یک سطح نیمه بی‌نهایت خوش‌خو را در نظر گرفتند (دقیقاً سطحی که در آن اثرات کشسانی ضعیف است و سرعت عمودی سطح توسط روابط مقاومت ظاهری (امپدانس) به فشار محلی ربط پیدا می‌کند). آنها نشان دادند که مقدار پراکنش توسط سطح بارگذاری سیال تعیین می‌شود. در نمونه‌های بارگذاری کم روی سیال (که معمولاً به عنوان نمونه ساختارهای سنگین در هوا)، لبه‌ی فرار در پراکنش مؤثر است. اما، برای بارگذاری سیال سنگین (به عنوان مثال نمونه‌ی در آب یا برای ساختارهای سبک و بسامد پایین صدا در هوا) لبه‌ی فرار در پراکنش مؤثر نیست. این نتیجه نشان می‌دهد که احتمال کاهش کارایی پراکنش لبه‌ی فرار، اساساً با عبور گردابه‌های متلاطم از لبه‌ی فرار با شدت کم رخ می‌دهد. در اولین پژوهش‌ها، صفحات خلل و فرج‌دار (متخلخل) به عنوان روشی برای کاهش سروصدای لبه‌ی فرار بررسی شده‌اند. به عنوان مثال، هاو^{۶۴} در سال^[۲۳] ۱۹۷۹ صدای تولید شده توسط گردابه‌ی نقطه‌یی جابه‌جا شده از لبه‌ی فرار را با/بدون صفحات سوراخ‌دار در نظر گرفت. وی مشاهده کرد که وجود حفره‌ها به طور چشمگیری، یک مقیاس دسی‌بل، باعث کاهش دامنه‌ی قله‌ی فشار ضربه‌یی در دست در ارتباط با تغییر ناگهانی شرایط مرزی می‌شود. همچنین، در جهت‌های مختلف، با استفاده از مقاطع دارای مواد متخلخل، در ایرفویل‌های چندجزئی، نیز کاهش در نوفه‌ی لبه‌ی حمله را مشاهده کرد. همچنین، وی نشان داد که مواد متخلخل نه تنها باعث پراکنش در لبه‌ی فرار، بلکه باعث اصلاح منابع نوفه‌ی ذاتی می‌شود. ترکیب هر دو حالت کشسان و متخلخل،^[۲۴] توسط جورسکی و پیکه^{۶۵} با جزئیات کامل مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش این نمونه‌ی مورد بررسی به عنوان یک الگوی ساده از حاشیه‌ی لبه‌ی فرار جغد در نظر گرفته شده بود. سپس، کاوایی^{۶۶} و همکاران،^[۲۵] به صورت عددی و با استفاده از روش انتگرال مرزی برای ایرفویل پروالاستیک^{۶۷} (پروسیته +الاستیک) را تکمیل و مشاهده کردند که پیشرفت‌های قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌ی صلب وجود دارد (یک بینشی که در مورد وتر نیمه بی‌نهایت وجود داشت این بود که تخلخل در کاهش نوفه در مقیاس‌های قابل قیاس با وتر ایرفویل، مؤثرتر به نظر می‌رسد. درحالی که کشسانی در طول موج‌های کوتاه‌تر مؤثرتر است. لذا، ترکیب این دو برای کاهش عملکرد در طیف گسترده‌یی مؤثر است). در سایر کارهای عددی توسط میمنتا^{۶۸} و همکاران،^[۲۶] نشان داده شد که گنجانیدن مشخصه‌های اضافی در جهت دهانه نظیر سوئیب لبه‌ی فرار و دندان‌های لبه‌ی فرار، حتی بیشتر می‌تواند پراکنش را کاهش دهد. احتمالاً باعث ایجاد اثر کاهش همدوسی در جهت دهانه^{۶۹} و بهبود تخریب^{۷۰} منابع در راستای لبه‌ی فرار می‌شوند. در سال ۲۰۱۸ کیسیل و آیتون^[۲۷] با استفاده از یک روش تکراری برای حل مسئله‌ی پراکنش ماتریس وینر - هاپف^{۷۲} توسط یک صفحه‌ی صلب نیمه‌محدود با زائده‌ی متخلخل با طول محدود، استفاده کردند. نکته‌ی جالب توجه از مشخصه‌ی اضافی در این است که زائده‌ی صلب متخلخل به عنوان مکان دوم برای پراکنش متلاطم برای لایه‌مرزی می‌تواند عمل می‌کند. از این رو، صدای حاصل شده سبب تداخل با صدای لبه‌ی فرار می‌شود و یک میدان صوتی که به تنهایی بلندتر از لبه‌ی فرار متخلخل است، تولید می‌کند که به تداخل و بسامد وابسته است. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که هنگام پیش‌بینی نوفه لبه‌ی فرار برای پیکربندی واقعی، اثرات نامتراکم در جهت وتر یک مشخصه‌ی مهم تلقی می‌شود.

به عنوان یادداشت نهایی در این بخش، بیشتر کارهایی که شرح داده شد مربوط به راه‌های کاهش کارایی برخی از جریان‌های متلاطم هستند که توسط لبه‌ی فرار به صدا تبدیل می‌شوند، نه این‌که چگونه متلاطم ذاتی را می‌توان نوفه‌ی کم اصلاح کرد. در سال ۱۹۸۹ بروکس^{۷۳} و همکاران،^[۲۸] طیف وسیعی از آزمایش‌ها را در شرایط

صوتی طولی با طول موج‌هایی بلندتر از مقیاس طولی جریان متلاطم محلی است؛ این نوفه سپس توسط ناظر در میدان دوردست شنیده می‌شود. در سال ۱۹۵۲، لایت‌هیل بازاریبی معادلات جرم و حرکت به شکل یک معادله‌ی موج منفرد برای چگالی $\rho(x, t)$ و تخمین نوفه‌ی آیرودینامیکی را که ناشی از تنش سیال در نواحی منبع تلاطم است، ممکن کرد. او نشان داد:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_o^2 \nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (۳)$$

که در آن، T_{ij} تانسور تنش لایت‌هیل است که در جریان با عدد ماخ پایین با تنش رینولدزی $\rho u_i u_j$ تقریب زده می‌شود. همچنین، u سرعت سیال و c_o سرعت صدا در محیط ساکن است. برای جریان‌های سرعت پایین، گردابه‌های آشفته‌گی معمولاً به طور کامل با یک منبع نقطه‌یی چهارقطبی الگوسازی می‌شود. بنابراین اغتشاشات چگالی، ρ' ، در دوردست به صورت معادله‌ی ۴ نشان داده می‌شود:

$$\rho'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_o^2 |x|} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int T_{ij}(y, t - |x|/c_o) d^3 y. \quad (۴)$$

توجه شود که تنها زمان تأخیر،^{۵۸} $t - |x|/c_o$ در توزیع منبع ظاهر می‌شود که بیانگر تراکم صوتی^{۵۹} در نظر گرفته شده در مقیاس طول موج‌های صوتی معمولی است.^[۲۱]

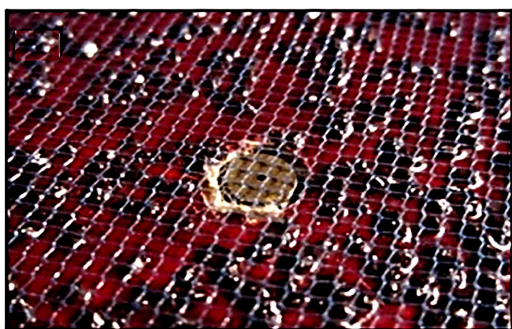
۲.۷. نوفه‌های ساختاری

ساختار پیچیده‌ی بال‌های پرنده، علاوه بر نوفه‌ی لبه‌ی حمله می‌تواند باعث منابع نوفه‌ی اضافی دیگر شود. عبور هوا از میان پره‌های خوش‌خو می‌تواند منجر به بال‌بال‌زدن آیرولاستیک شود که باعث ایجاد صدای وزوز و خیش خیش برای پرندگان شود (رجوع شود به پژوهش کلارک و پرام.^[۲۹] همچنین، دایوس^{۶۱} در سال ۱۹۲۴،^[۳۰] از مشاهدات خود از جغد شاخ‌دار کوچک در حال پرواز بیان می‌کند که بیشتر پروازش را در سکوت و آرام است و گاهی اوج می‌گیرد و شیرجه‌یی کوتاه می‌زند و با حرکت رو به بالا خاتمه می‌یابد. صدای شنیده شده در حالت بال‌زدن جغد، شبیه صدایی است که پرنده‌ی محبوس در قفس می‌خواند یا این که پرچمی در باد خیلی شدید تکان می‌خورد. به طور کلی در جغد دو گونه صدا شنیده می‌شود، صدایی شبیه آواز برای ابراز احساسات و صدای بال‌زدن که به نوعی صدای اعتراضی است که گاهی اوقات به معنای آگاه ساختن جوجه‌ها از تهدید خارجی است.^[۳۰]

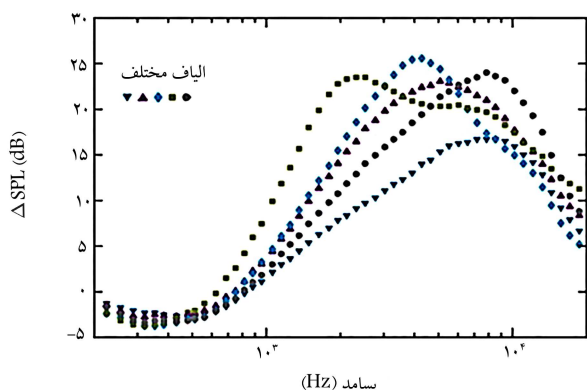
کلارک^[۴۱] بیان می‌کنند که بسیاری از گونه‌های پرندگان به دلیل زدن پرها به هم یا روی بدن و همچنین مالش پر به پر، صداهای متنوعی تولید می‌کنند. مطابق پژوهش سیک^[۹] و هرتل،^[۱۰] ۱۹۶۲ قلاب‌های کشیده روی سطح بالایی پره‌های جغد، باعث کاهش نوفه‌ی اصطکاک بین پرها و سرکوب سازوکارهای بالقوه‌ی زیستی نوفه می‌شود. همچنین، باخمان و همکاران،^[۱۶] نشان دادند که حاشیه در لبه‌ی فرار هر پر جغد، شیارهای پره‌های همسایه را پر می‌کند و باعث ایجاد یک شکل پایدار در بال می‌شود که مقاومت بیشتری در برابر جریان و کاهش نوفه‌ی مالشی پر را سبب می‌شود.

۳.۷. نوفه‌ی لبه‌ی فرار

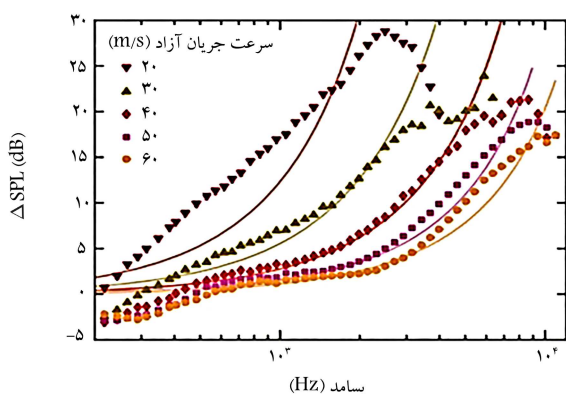
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نوفه‌ی ناشی از پراکنش یک لایه‌مرزی متلاطم در عبور از لبه‌های صلب تیز به طور بالقوه بر سایر منابع نوفه‌ی دیگر از نظر مقیاس‌بندی عدد ماخ غالب است. سوآلی که اخیراً توجه همه را به خود جلب کرده، این است که چگونه با اصلاح مناسب خصوصیات هندسی یا موادی لبه‌ی فرار، این اثر کاهش یابد؛ در



الف) سایبان پارچه‌ی معلق بالای کاغذ سمباده زبر و میکرون نصب شده روی سطح؛



ب) میرایی اغتشاشات سطحی برای هر سایبان با زبری بالای ۳ mm در جریان آزاد با سرعت ۶۰ m/s؛



ج) مقایسه‌ی میرایی فشار سطحی اندازه‌گیری شده تجربی (نمادها یا شکلک‌ها) در چندین سرعت جریان آزاد با پیش‌بینی‌های نظری محافظ برشی (خطوط پر) [۴].

شکل ۱۴. کاهش فشارهای سطحی روی سطح زبر با استفاده از پوشش‌های معلق در ساختارهای همسوی جریانی.

برای یک ایرفویل بیضوی در زاویه‌ی حمله‌ی صفر تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. همچنین، آنها نتیجه گرفتند که برای سرعت‌های پایین و بسامدهای بالا مورد توجه جغد، دماغه‌ی لبه‌ی حمله باعث کاهش صدای میدان دوردست می‌شود. در آخر این بخش به پژوهش‌گیر و همکارانش [۵۰] اشاره می‌شود. آنها اندازه‌گیری‌های صوتی در تونل باد آیرودینامیکی با/بدون شانه‌ی لبه‌ی حمله را برای نمونه بال‌های جغد انجام دادند. همچنین، آنها متوجه شدند که به نظر نمی‌رسد وجود شانه تأثیر واضح و مطلوبی بر روی نوفه پروازی در زوایای حمله داشته باشد. با این حال، این محققین دریافتند که در زوایای حمله‌ی بالا، همان‌طور که ممکن است در آخرین مرحله شکار و حمله به طعمه رخ دهد، حضور شانه موجب کاهش چشمگیر نوفه

جریانی مختلف از جمله زوایای حمله مختلف، اعداد ماخ و رینولدز مختلف و سایر پارامترها برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ صلب زیر نظر کمیته مشاوره ملی و هوانوردی ۷۴ انجام دادند. در حقیقت، آنها سازوکارهای دیگری علاوه بر جریان متلاطم عبوری، نظیر ریزش گردابه‌ی همدوس را که باعث تولید نوفه لبه‌ی فرار می‌شوند، در اعداد رینولدز پایین و زوایای حمله بالاتر و نوفه‌ی نوک مهم هستند، را بررسی کردند. از این رو، به منظور درک کامل نوفه‌ی لبه‌ی فرار برای ایرفویل پروالاستیک، این پژوهش تجربی انجام شده است.

۴.۷. نوفه‌ی زبری ۷۵

برای روشن کردن نقش پوشش کرک‌دار روی بال جغد، کلارک و همکاران، [۴۱] یک مجموعه آزمایش برای بررسی اثر آن بر نوفه و فشار ناپایای سطحی یک الیاف کرک‌دار معلق در بالای یک سطح زبر در داخل یک جریان را انجام دادند. وجود پوشش کرک‌دار روی نوفه‌ی دوردست تأثیر به‌سزایی دارد (اگرچه، در بسامدهای بسیار بالا الیافی که به صورت عرضی با جریان تراز می‌شوند، باعث اضافه شدن نوفه‌ی ناشی از گردابه‌ی ریزش می‌شوند). با این حال، پوشش کرک‌دار تأثیر چشمگیری بر طیف فشاری سطح دارد و باعث کاهش ۲۵ دسی‌بل در بسامد قله می‌شود (شکل ۱۴ ب). از پنج پارچه‌ی مورد استفاده برای پوشش کرکی، چهار عدد دارای نرخ سطح آزاد (αH) ۷۰٪ بودند، درحالی‌که یکی (شکل ۱۴ ب، دارای نمادهای مربعی است) دارای بافت متراکم و تقریباً دارای نرخ ۴۰٪ است. یک توضیح احتمالی برای این رفتار قابل توجه، وجود محافظ برشی است که سازوکاری برای سرکوب اغتشاشات عرضی سیال است. به طور مشابه برای الگوهای معمولی سایبان جنگلی (نوعی پوشش کرک‌دار)، پسی (درگ) اعمال شده توسط سایبان ممکن است جریان را به تعویق بیندازد و باعث ناپایداری کلونین - هلمهولتز ۷۶ شود. ناپایداری کلونین - هلمهولتز باعث رشد نمایی اغتشاشات سرعت در جهت جریان و همراه با فروپاشی نمایی در جهت عرضی است. به عنوان مثال، در بالا و داخل ناحیه‌ی سایبانی، به طور نمایی فشار روی دیواره ناشی از انتشار اختلالات بالای پوشش سایبان را کاهش می‌دهد. کلارک و همکاران در سال ۲۰۱۶، با در نظر گرفتن انتشار امواج بسامد ثابت در یک پروفایل برشی خطی، یک الگوی نظری ساده از این فرایند را بررسی کردند. همان‌طور که در شکل ۱۴ ج مشاهده می‌شود با استفاده از مقادیر مناسب انتخاب شده برای عرض و قدرت لایه‌ی برشی، تطابق خوبی بین منحنی‌های میرایی تجربی و نظری می‌توان یافت. [۴]

۵.۷. نوفه‌ی لبه‌ی حمله

در سال ۱۹۷۰، ویلیام و هال استدلال‌هایی برای اهمیت نوفه‌ی لبه‌ی حمله به دلیل تغییر ناگهانی هندسه ارائه دادند که به همان اندازه در تقویت نوفه‌ی ناشی از تلاطم در حضور لبه‌ی حمله ایرفویل نیز صدق می‌کند. البته، تفاوت در اینجا این است که برای اندرکنش لبه‌ی حمله، تلاطم باید در بالادست جریان وجود داشته باشد، نه این که از طریق انتقال لایه‌مرزی در لبه‌ی فرار ایجاد شود.

یکی از مشخصه‌های نوفه‌ی لبه‌ی حمله که در لبه‌ی فرار دیده نمی‌شود، این است که هنگام مشاهده بنده‌ی ایرفویل توسط تلاطم جابه‌جایی جریان بالادست، سرعت جریان آزاد باید سریعاً به صفر میل کند و حدوداً در نزدیکی لبه‌ی حمله، به نقطه‌ی سکون برسد. این تغییرات سریع محلی گردابه‌های متلاطم جریان متوسط، به‌طور قابل توجهی در جهت جریان تأثیر دارند و منجر به اصلاح فشار سطحی و طیف صدای دوردست می‌شوند. نتایج محاسبه شده توسط آیتون^{۷۷} و پیکه، [۴۹]

گرفتند. در نهایت، باید همهی فناوری‌های کاهش صدا بتوانند باعث یک انگیزه‌ی اقتصادی اعم از هزینه‌ی کم طراحی و تعمیر و نگهداری در جنبه‌های صنعتی نظیر هواپیما و توربین بادی ایجاد کنند.

۱.۸. دندان‌های لبه‌ی حمله

هرش^{۸۲} و همکاران^[۱۴] به صورت تجربی مطالعات گسترده‌ی را پیرامون کاربرد دندان‌های لبه‌ی حمله به عنوان تجهیز برای کاهش نوفه‌ی گردابه‌ی صدا ساطع شده از ایرفویل‌های ثابت و چرخان در جریان با اعداد رینولدز پایین ارائه دادند. همچنین، انواع مختلفی از دندان‌ها را در موقعیت‌های منتخب لبه‌ی حمله ایرفویل ناکا ۵۰۱۲ قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تراز نوفه‌ی ایرفویل‌های متصل به دندان، در هر دو حالت تیغه ثابت و دوار به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، باعث ریزش گردابه‌ی یک می‌شود که تأثیر مثبتی در حذف نوفه‌ی تونال دارد و کاهش نوفه نوارپهن^{۸۳} تقریباً ۳-۵ دسی‌بل در زوایای حمله‌ی بالا مطابق با واماندگی ایرفویل مشاهده شده است.

اندازه‌گیری‌های آیرودینامیک دندان‌های لبه‌ی حمله پیرامون لبه‌های دندان‌دار، موج‌دار و شکاف‌دار و همچنین، در حالت سه‌بعدی به صورت ترکیبی از دندان و شکاف‌دار بررسی شده‌اند. فضای گسترده طراحی و محدوده‌ی اعداد رینولدز به طور کلی باعث عدم شناسایی بهترین روش‌ها برای تخمین و حذف نوفه لبه‌ی حمله می‌شود. با این حال، در سال ۲۰۱۶ لیو و همکاران^[۵۳] همچنین، در پژوهشی در سال ۲۰۱۷^[۵۴]، تداخل صوتی مخرب بین دندان‌ها را به عنوان سازوکار اصلی برای کاهش صدای لبه‌ی حمله دندان‌ها شناسایی و بررسی کردند. در پژوهش سال ۲۰۱۶^[۵۳]، آنها یک الگوی تحلیلی برای پیش‌بینی نوفه از لبه‌های فرار دندان‌دار را توسعه دادند. نتایج به دست آمده از الگوی جدید، کاهش نوفه تا ۱۰ دسی‌بل در لبه‌ی فرار را پیش‌بینی می‌کند که همچنین با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارد. در حالی که، تحقیقات تجربی اغلب متمرکز بر کاهش نوفه در ۹۰ درجه بالای لبه‌ی فرار است، مدل تحلیلی جدید نشان می‌دهد که اثرات پراکندگی تداخل مخرب ناشی از دندان‌ها باعث کاهش چشمگیری نوفه در زوایای قطبی بزرگ در نزدیک لبه‌ی حمله می‌شود. همچنین، مشاهده شده است که دندان‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی مشخصه‌های هدایت‌کننده ایرفویل را در بسامدهای بالا تغییر دهند و منجر به افزایش نوفه در اعداد ماخ بالا شوند. در سال ۲۰۱۷ نیز^[۵۴] آنها یک الگوی تحلیلی دیگر برای پیش‌بینی نوفه ساطع شده توسط یک ایرفویل همراه با دندان‌های لبه‌ی حمله در یک جریان متلاطم زیرصوتی ارائه و بررسی کردند. افزون بر این نشان داده شده است که برای دستیابی به کاهش قابل قبول نوفه، دندان‌ها باید دو معیار هندسی مربوط به تیزی دندان و خواص هیدرودینامیکی جریان متلاطم را داشته باشند. علاوه بر این، دندان‌ها می‌توانند تراز فشار صوتی کلی را در بیشتر زاویه‌های تابش، به ویژه در زوایای پایین دست نزدیک به سطوح ایرفویل، کاهش دهند.

کلان و همکاران^[۵۶،۵۵] و ویزن^{۸۴} و همکاران^[۳۶] تأثیر دندان‌ها بر رفتار آیرودینامیکی نمونه قرار داده شده در تونل باد و بال‌های واقعی جغد مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهشگران یک نمونه بال جغد با انواع مختلف دندان‌ها و از جنس‌های مختلف نظیر فلز یا سلیکون (شکل ۱۵ الف) در اعداد رینولدز ۴۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ در یک تونل باد در شرایط استاتیکی آزمایش کردند. همچنین، آنها رفتار آیرودینامیکی بال را با لبه‌ی حمله‌ی اصلاح شده با رفتار آیرودینامیکی یک بال مرجع مقایسه کردند. سازه‌های مصنوعی باعث کاهش اندازه‌ی ناحیه‌ی جدایش می‌شود (شکل ۱۵ ب). برای نمونه با دندان‌های سلیکونی نسبت به نمونه با دندان‌های فلزی باعث کاهش

است (در حدود سه دسی‌بل). علاوه بر این، آنها نشان دادند که به نظر می‌رسد وجود لبه‌ی حمله، از تشکیل یک منبع نوفه قوی در نزدیکی نوک، جلوگیری می‌کند. این که آیا چنین تأثیری روی جغد زنده وجود دارد؟ هنوز یک سؤال باز است! با این حال، طبق پژوهش‌های بروکس و همکاران در سال^[۳۸] ۱۹۸۹، پیرامون ایرفویل ناکا ۵۰۱۲، مشاهده شده که اثرات نوک تیغه می‌تواند حداقل با نوفه‌ی ناشی از بقیه‌ی دهانه در مواردی که یک گردابه‌ی نوک قوی وجود داشته باشد، مقایسه شود. سازوکار تولید نوفه که توسط آنها ارائه شد، مشابه با نوفه‌ی نوک که توسط تلاطم و هسته‌ی گردابه‌ی نوک که به اطراف نوک تیز بال و لبه‌های فرار جابه‌جا می‌شود، است. لذا، شانه‌ی لبه‌ی حمله می‌تواند نقش مهمی در کاهش تغییرات جریان در جهت دهانه، که ناشی از جدایش در زوایای حمله بالا است، ایفا کند. در نتیجه، قدرت گردابه نوک و صدای مربوط به آن را نیز کاهش می‌دهد.

۶.۷. اندرکنش‌های مشترک بین مشخصه‌های بال

بیشتر تحقیقات به دست آمده از اطلاعات در مورد سازگاری بال جغد، این را در نظر گرفته‌اند که سازگاری بال به طور مستقل عمل می‌کند. با این حال، شانه‌ی لبه‌ی حمله و الیاف مخملی می‌توانند در تغییر اساسی جریان مرزی روی بال خیلی مهم‌تر از محتوای طیفی^{۷۸} عمل کنند. محتوای طیفی لایه‌مرزی متلاطم در عقبه‌ی بال، محتوای نوفه لبه‌ی فرار را تعیین می‌کند. لذا نوفه‌ی لبه‌ی فرار ذاتاً به شرایط بالادستی بستگی دارد.

هرگونه تأثیر مثبت یا منفی ناشی از ویژگی‌های جریان بالادست روی نوفه‌ی لبه‌ی فرار باید ابتدا قادر به مقاومت تا رسیدن به لبه‌ی فرار باشند. همچنین، بهبود اغتشاشات جریانی هنگامی که جریان در حالت تنش برشی بیش از حد در لایه‌مرزی (مانند انتقال از سطح خشن به صاف) است، نسبت به لایه‌مرزی از صاف به سخت، طولانی‌تر است. در مقابل، مشخصه‌های لبه‌ی حمله مانند شانه‌ها یا مولدهای گردابه روی بال ممکن است ساختارهای همدوس^{۷۹} را ایجاد کنند که در نمو و مواجهه با لبه‌ی فرار و اندازه‌گیری‌های تجربی نیاز است تا برهم‌کنش‌های تولید نوفه و آیرودینامیک بال درک شود. راتو^{۸۰} و همکاران^[۵۱] نشان دادند که برای یک صفحه‌ی صاف در زاویه‌ی حمله‌ی ۲۰ درجه، جریان از میان دندان‌های (اره‌گی‌ها) لبه‌ی حمله می‌تواند نوفه‌ی لبه‌ی فرار را در اعداد رینولدز حدود $10^3 \times 5$ کاهش دهد. اخیراً، در کارهای تجربی و تحلیلی لیو^{۸۱} و همکاران^[۵۲] در اعداد رینولدز بالا ($10^5 \times 6.3$) که از اهمیت بالایی در کاربردهای هوافضایی برخوردار است، نشان داده‌اند که شکل لبه‌ی حمله می‌تواند تأثیر توأمان روی نوفه‌ی لبه‌ی حمله ناشی از تلاطم داخلی و سرکوب نوفه‌ی آشفستگی بسامد بالا از لبه‌ی حمله که عموماً در محدوده‌ی بسامدی نوفه‌ی ذاتی است بگذرد که سازوکارهای نوفه‌ی لبه‌ی فرار مرتبط است.

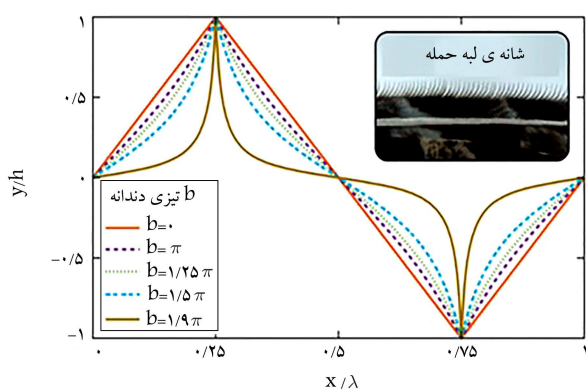
۸. فناوری‌های آیرودینامیکی اقتباس شده از بال و پرواز جغد

مشخصه‌های بال جغد منجر به کشف راهبردهای مختلف طراحی بال برای حذف نوفه‌ی آیرودینامیکی شده است. در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به ویژه در بخش‌های هوافضا و انرژی، این نوآوری‌ها باید بتوانند ضمن حفظ عملکرد آیرودینامیکی استاندارد یا معیار قابل قبول برای سنجش عملکرد کاهنده یا کاهش نوفه، نوفه را کاهش دهند. در حال حاضر، بسیاری از طراحی‌های بال یا تیغه‌های آن در پرواز صامت جغد به عنوان سازوکارهای اصلی سرکوب صدا، در پژوهش‌ها مورد توجه بسیاری قرار

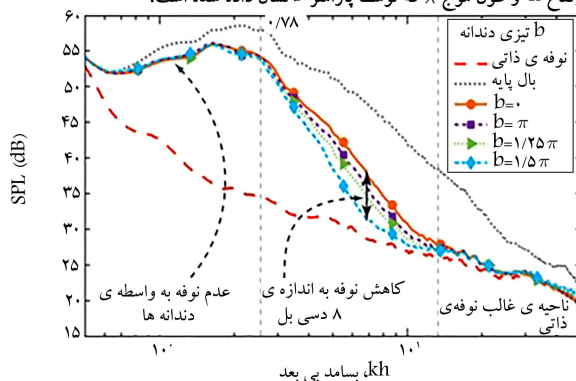
در سال ۲۰۱۷، چایتانیا^{۸۷} و همکاران^[۵۸] عملکرد و سازوکار دندان‌های سینوسی لبه‌ی حمله را برای کاهش نوفه‌ی ناشی از تقابل جریان متلاطم و ایرفویل را به صورت تجربی بررسی کردند. همچنین، یک مطالعه‌ی پارامتری دقیق برای بررسی حساسیت کاهش نوفه به اندازه و طول موج دندان‌ها انجام شده و طول موج بهینه‌ی دندان‌ها شناسایی شد. در این طول موج، حداکثر کاهش نوفه رخ می‌دهد و مربوط به زمانی است که مقیاس طول انتگرالی عرضی^{۸۸} تقریباً یک‌چهارم طول موج دندان است. در این طول موج، منابع صوتی واقع در دندان از تحریک هم‌دوس فقط به ناهم‌دوس منتقل می‌شوند که برای هر دو هندسه‌های صفحه تخت و ایرفویل واقعی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همچنین، مشاهده شده که کاهش نوفه به طور کلی با افزایش بسامد، افزایش می‌یابد و این روند تا بسامدی که نوفه‌ی ذاتی ایرفویل بر سایر نوفه‌ها غالب می‌شود، ادامه دارد. در انتهای این بخش، به پژوهش آقای لیو و همکارانش^[۵۲] در سال ۲۰۱۹ پرداخته می‌شود که آنها مطالعه‌ی تحت عنوان «بهینه‌سازی صوتی شکل دندان‌های لبه‌ی حمله» انجام دادند. آنها هندسه‌های مختلف دندان‌دار را برای به حداکثر رساندن کاهش نوفه مورد بررسی قرار دادند. همچنین، به صورت تجربی تراز فشار صوتی برای بسامدهای مختلف در حالت‌های دندان‌های مختلف برای صفحه تخت بررسی کردند که نتایج آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، دندان‌های مختلف در ناحیه‌ی میانی باعث کاهش نوفه به اندازه‌ی ۸ دسی‌بل می‌شود. همچنین، در ناحیه‌ی که نوفه‌ی ذاتی غالب است، دندان‌ها باعث حذف نوفه‌ی لبه‌ی حمله می‌شوند.

بیشتر اندازه‌ی ناحیه‌ی جدایش می‌شود. همچنین، دندان‌های مصنوعی باعث ایجاد ساختارهای گردابی با اندازه‌ی یکنواخت توسط ریزش حباب جدایش، می‌شوند. با توجه به شکل ۱۵ ج، پیشینه تنش برشی رینولدزی^{۸۵} در نمونه‌های دندان‌دار در مقایسه با نمونه‌ی مرجع کاهش می‌یابد. در مقابل، ضریب پسا کاهش یافته و ضریب برآ نیز ثابت باقی مانده است. بنابراین، عملکرد آیرودینامیکی کلی به دلیل کاهش نسبت برآ به پسا، کم شده است (شکل ۱۵ د).^[۲]

ترنروکیم^[۵۷] برای کشف اهمیت سامانه گردابه‌ی نعل اسبی تولید شده توسط دندان‌ها و تأثیر آن بر قدرت منبع صوتی در موقعیت ریشه دندان‌ها، شبیه‌سازی عددی غیرلزج از برهم‌کنش یک گردابه با یک صفحه تخت همراه دندان‌های موج‌دار را انجام دادند. این مطالعه بر اساس توصیف حرکت پایین‌رونده‌ی گردابه در جهت دهانه و تولید گردابه‌های ثانویه در حین عبور از لبه‌ی حمله ایرفویل بنا شده است. هدف اصلی این پژوهش، درک دقیق روابط بین اغتشاش سرعت القایی گردابه و نوسانات فشاری دیواره بر روی هندسه لبه‌ی حمله موج‌دار است. همچنین، نتایج آنها سازگاری در طیف فشاری دیواره همراه با نتایج متفاوت نوفه در میدان صوتی دوردست باعث شد تا این فرضیه که انتشار ناشی از پراکندگی امواج صوتی به عنوان یک سازوکار مهم برای لبه‌های حمله را تقویت بخشد.

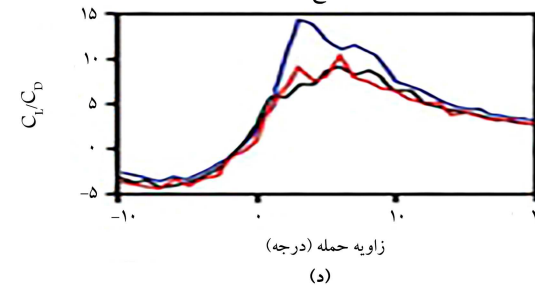
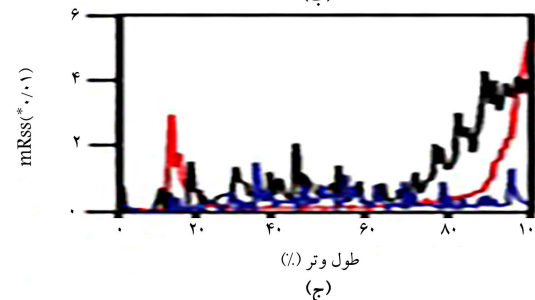
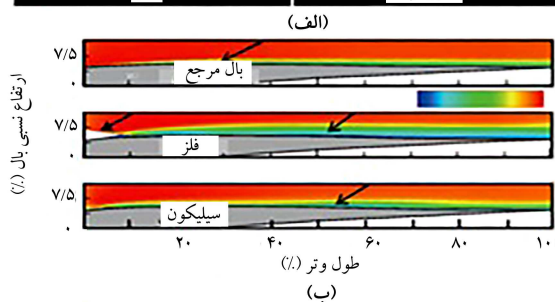
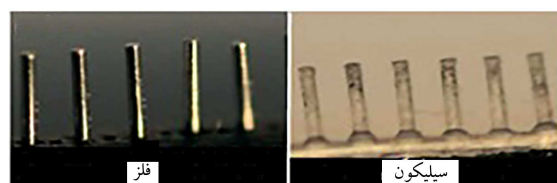


الف) هندسه‌های دندان‌دار برای به حداکثر رساندن کاهش نوفه، تیزی (برندگی) دندان‌ها با ارتفاع h و طول موج λ که توسط پارامتر b نشان داده شده است؟



ب) اندازه‌گیری‌های تجربی تراز فشار صوتی در میدان دوردست برای صفحه تخت در زاویه حمله‌ی صفر درجه به عنوان تابعی از بسامد بی بعد شده با عدد موج صوتی k و ارتفاع h [۵۲].

شکل ۱۶. حذف نوفه‌ی آیرودینامیکی ناشی از دندان‌های لبه‌ی حمله و وابستگی آن به هندسه.^[۴]



شکل ۱۷. اثر آیرودینامیکی دندان‌ها.^[۲]

و اندازه‌گیری نوفه را انجام دادند. تحقیقات آنها نشان داد که نواحی متخلخل کوچک در نزدیکی لبه‌ی فرار در سرکوب تولید نوفه آیرودینامیکی در محدوده‌ی حساس شتابی انسان مؤثرند.

ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۱، یک طراحی بهینه برای ایرفویل‌های آیروآکوستیکی با استفاده از دندانه‌های لبه‌ی فرار اقتباسی انجام دادند. آنها نشان دادند که می‌توان از دندانه‌ها به عنوان یک تجهیز کنترل جریان برای کاهش نوفه‌ی آیرودینامیکی در پره‌های چرخان توربین بادی استفاده کرد. همچنین، آنها به منظور جبران کاهش عملکرد آیرودینامیکی، یک روش طراحی بهینه برای ایرفویل‌ها همراه با دندانه‌ها ارائه کردند که نتایج آنها نشان می‌دهد که نوفه‌ی آیرودینامیکی کاهش یافته است. به علاوه، نسبت لیفت به درگ و ضریب لیفت نیز در نقطه‌ی طراحی به ترتیب ۱/۹٪ و ۳۲/۵٪ افزایش یافته است.^[۲۰]

۳.۸. خس‌های کشسان لبه‌ی فرار

با استفاده از الهام‌گیری از ساختار حاشیه بال جغد، هرو و دوبرزینسکی^[۶۲] ۱۹۲ خس‌های کشسانی^{۹۳} را به لبه‌ی فرار صفحه‌ی تخت نصب کردند تا سازوکار پراکندگی نوفه‌ی متلاطم را تضعیف کند. از این رو، نتایج و اندازه‌گیری‌های صوتی آنها نشان داد که خس‌های کشسان دراز بین بردن نوفه برای محدوده‌ی عدد رینولدز 10^6 الی 10^7 مؤثرند (منجر به ریزش گردابه در لبه‌ی فرار می‌شوند) و نیز، وجود خس‌ها بر روی جریان محلی ناحیه متلاطم تأثیر می‌گذارد. در پژوهشی دیگر، هر^[۶۳] از خس‌های کشسان در هندسه‌های واقعی ایرفویل استفاده کرد و نشان داد که خس‌ها با کم‌ترین فاصله از دهانه (کم‌تر از 0.1 میلی‌متر) بهترین کاهش نوفه را به همراه دارند و همچنین، این فرضیه را که خس‌ها مانند مواد متخلخل در جذب انرژی هیدرودینامیکی می‌توانند مؤثر واقع شوند، قوت بخشید. علاوه بر این، بیشترین کاهش نسبی تراز فشار صوتی در کم‌ترین بسامد اندازه‌گیری شده (1725 کیلوهرتز) رخ داد، جایی که خس سفت میزان صدا تا 3 دسی‌بل و خس منعطف تا 3 دسی‌بل اضافه‌تر صدا را کاهش داد. همچنین، کاهش نوفه با افزایش بسامد تا 16 کیلوهرتز به طور یکنواخت کاهش می‌یابد و در آن زمان لبه‌ی فرار همراه با خس منعطف و کشسان، همان تولید نوفه را دارد که نیز لبه‌ی فرار سخت و غیرقابل نفوذ دارد.^[۴]

۴.۸. طراحی سطح برای مهار نوفه‌ی متلاطم (آشفستگی)

اندازه‌گیری‌های کلارک و همکاران در سال 2016 ،^[۴۱] برای نوفه‌ی جریان گذری از پوشش متخلخل روی دیواره‌های زبر، هم‌سویی اعضای جسمانی پوشش با جهت جریان را به عنوان راهبرد طراحی نشان می‌دهد. همچنین، نیروی برآ عرضی ناشی از تلاطم (آشفستگی) باعث کمینه‌سازی نوفه‌ی تولید شده توسط الیافی می‌شود که هم‌راستا با جریان نیستند. از این رو، این راهبرد منجر شد که کلارک و همکاران، ساختار باله‌های جهت‌جریانی و سطوح ریلی را که پیک^{۹۴} نامیده می‌شود، توسعه دهند. ارتفاع معمول و فاصله آنها 10 الی 15 واحد دیواره است. پرک‌ها نسبتاً بزرگ‌تر هستند و 10 الی 100 درصد ضخامت لایه‌مرزى هستند و کل لایه‌مرزى را پوشش می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، هنگام اتصال به یک مقطع ایرفویل توربین بادی ساکن مدل $DU96 - W180$ و قرار دادن پرک‌های صلب در بالادست لبه‌ی فرار، لایه‌مرزى را قبل از این که به لبه‌ی فرار برسد، اصلاح و پیش‌درمان می‌کنند. چنان که در شکل ۱۷ الف مشاهده می‌شود، کاهش نوفه‌ی آیرودینامیکی تا 10 دسی‌بل در دامنه‌ی وسیعی از زوایای حمله حاصل می‌شود. همچنین، بیشترین کاهش نوفه در شرایط زاویه‌ی برآی صفر است و به

رائو و لیو در سال 2020 ، تأثیر عدد رینولدز را بر کنترل جریان غیرفعال در دندانه‌های لبه‌ی حمله را به صورت عددی بررسی کردند. آنها دندانه‌های لبه‌ی حمله به عنوان یک میکرو تجهیز پیچیده برای کاهش نوفه و کنترل غیرعوامل جریان گذار آرام - آشفته مورد تأیید است و هزینه‌ی است که بابت کاهش عملکرد آیرودینامیکی در اعداد رینولدز پایین پرداخت می‌شود.

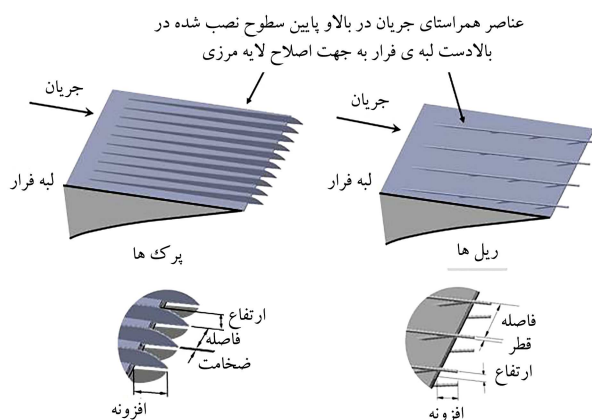
نتایج حاصله نشان می‌دهد که دندانه‌های لبه‌ی حمله به طور مؤثر در کاهش نوسانات آشفته در محدوده‌ی وسیعی از عدد رینولدز ($10^5 - 10^7$) به خوبی عمل می‌کنند و باعث بهبود عملکرد آیرودینامیکی (نسبت برآ به پسا) با افزایش عدد رینولدز می‌شود. میدان‌های آیروآکوستیکی ارتباط نزدیکی با انتشار منابع ناشی از جریان آشفته دارد که مشاهده می‌شود تبدیلی بین کاهش غیرعوامل اغتشاشات آشفته (سرکوب نوفه‌ی آیروآکوستیکی) و عملکرد آیرودینامیکی وجود دارد که می‌توان در زوایای بزرگ حمله و رینولدزهای بالا آن را کاهش داد؛ بنابراین، می‌بینیم که دندانه‌های لبه‌ی حمله یک سازوکار غیرعوامل جایگزین کنترل جریان در اعداد رینولدز بالاست و می‌تواند شدت آشفستگی را به صورت غیرعوامل کاهش دهد. همچنین، آنها مشاهده کردند که دندانه‌های بلندتر در وسط دهانه‌ی بال می‌تواند ریزش و شکست گردابه‌های لبه‌ی حمله را بهبود ببخشد و باعث کاهش انرژی جنبشی آشفته در سطح فوقانی بال شود.

۲.۸. تخلخل شکل و لبه‌های آیرودینامیکی

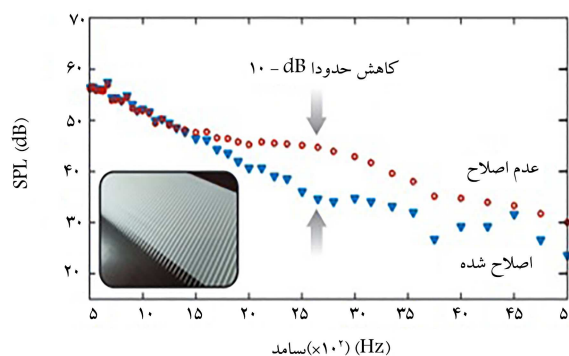
نوفه‌ی لبه‌ی فرار بیانگر کمینه‌ترین تراز ممکن نوفه برای بدنه و تیغه‌های متحرک است؛ بنابراین، تغییرات و اصلاحات در لبه‌ی فرار به عنوان عاملی برای حذف نوفه‌ی متلاطم ناشی از پراکنش لبه، از اهمیت بسزایی برخوردار است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، نوفه‌ی لبه ناشی از عدم پیوستگی مقاومت ظاهری صوتی که توسط گردابه‌های متلاطم هنگام حرکت از روی سطح ایرفویل (بدون نفوذ) در داخل و یک تجربه می‌شود، است. اثر این ناپیوستگی ممکن است توسط لبه متخلخل یا بهبود یافته، ملایم‌تر و کاسته‌تر شود.

هایدن^{۸۹} در سال 1976 ،^[۵۹] چندین حالت مختلف از طراحی لبه‌ی فرار برای رسیدن به شیب متخلخل مؤثر بالای ناحیه محدود در نزدیک لبه‌ی فرار را شناسایی و بررسی کرد که عبارت‌اند از: لبه‌ی متخلخل یکنواخت با ضخامت‌های مختلف، یک ایرفویل با سطح متخلخل با حفره‌های داخلی تکی و چندگانه و یک سطح صلب با لبه‌ی شکاف‌دار (دندانه‌دار). کاربردهای تجربی این طراحی لبه‌ی با مقاومت ظاهری متغیر (امپدانس متغیر) در قسمت فلپ لبه‌ی فرار و همراه با دمش در سطح بالایی، در قله‌های پایین بسامد باعث کاهش 6 دسی‌بل می‌شود و در بسامدهای بالا تقریباً 3 الی 6 دسی‌بل کاهش نوفه مشاهده شده است. در پژوهشی دیگر در سال 2011 توسط هر و ریچنبرگر،^[۶۰] کاهش نوفه حدوداً 3 الی 4 دسی‌بل برای ایرفویل‌ها با لبه‌های فرار سوراخ‌دار پوشیده از مشبک و سطوح متخلخل گزارش شده است که با افزایش زاویه‌ی حمله، تأثیر آن کم‌تر می‌شود. علاوه بر این، نسبت به برخی آرایش‌ها و مواد متخلخل مشخص که در بسامدهای بالا باعث تولید نوفه اضافه می‌شود، شناخت پیدا شد. متأسفانه، در این پژوهش توزیع بهینه‌ی تخلخل برای بیشینه‌سازی کاهش نوفه انجام نشده است؛ اما در سال 2018 ، به صورت عددی پژوهشی پیرامون توزیع‌های بهینه توسط ژو^{۹۱} و همکاران^[۶۱] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ انجام شده است. همچنین، گیرو و همکاران در سال‌های 2011 و 2014 در پژوهش‌هایی تأثیر سطح متخلخل را در قسمت لبه‌ی فرار و همچنین، پارچه‌ی متخلخل یکنواخت را بررسی و بر آنها تحلیل نیروی

با انجام شبیه‌سازی محاسباتی اهمیت این سیرهای برشی (پرک‌ها) را تأیید کردند. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، آنها نشان دادند که نواحی با انرژی جنبشی متلاطم بیشینه در موقعیت بالای پرک‌ها و دور از لبه‌ی فرار قرار دارند. در ادامه، اهمیت ناحیه‌ی ورودی پرک‌ها را مشخص و بیان کردند که این ناحیه می‌تواند به عنوان منبع نوفه‌ی ذاتی عمل کند و باعث عدم کاهش هرگونه نوفه در لبه‌ی فرار شود.

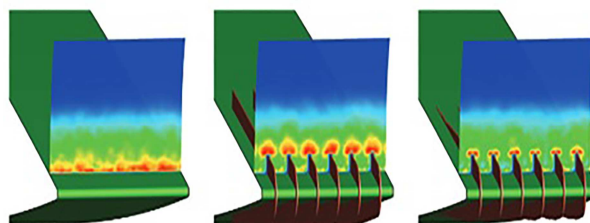
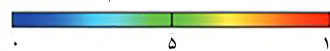


شکل ۱۷. طرح‌واره‌ی سطوح ریلی و پرک‌های اضافه‌شده به لبه‌ی فرار. [۶۴]



الف) پرک‌های نصب‌شده در بالادست لبه‌ی فرار و کاهش نوفه تا ۱۰ دسی بل برای مقطع ایرفویل [۴۱]

انرژی جنبشی متلاطم



ب) نمایش بیشینه انرژی جنبشی متلاطم بر بالای پرک‌ها و دور از لبه‌ی فرار (ناحیه‌ی ورودی پرک‌ها می‌تواند به منبع نوفه‌ی غالب تبدیل شود و تاثیر مداوم بر جریان لبه‌ی فرار داشته باشد) [۶۵].

شکل ۱۸. سطوح اصلاح‌شده با پرک و تأثیر آنها بر روی جریان محلی و نوفه‌ی لبه‌ی فرار. [۴]

آرامی تا سطح تراز نوفه‌ی حالت بدون اصلاح نزدیک و اما ندگی آیرودینامیکی کاهش می‌یابد. [۴]

مطالعات پارامتری ارتفاع پرک، اهمیت برش لایه مرزی را برای از بین بردن تلاطم در جهت دهانه نشان می‌دهد که به عنوان یک محرک برای نوفه‌ی لبه‌ی فرار شناخته می‌شود. همچنین، اندازه‌گیری نیرویی در ایرفویل‌های اصلاح‌شده و بدون اصلاح نشان می‌دهد که مشخصه‌های برآ تحت تأثیر منفی قرار نمی‌گیرد و نیروی درگ با توجه به نصب پرک و افزایش سطح تماس، افزایش می‌یابد. کلارک در پژوهش‌های بعدی خود نشان داد که پرک‌ها با بالا بردن تلاطم لایه مرزی، می‌توانند کارایی پراکندگی گردابه‌های متلاطم بسامد بالا را کاهش دهند. در سال ۲۰۱۹، شرما و بودلینگ [۶۵]

۹. نتیجه‌گیری

تحقیقات زیادی برای کشف راز پنهان‌کاری صوتی جغد با استفاده از الهام‌گیری پرواز صامت جغد، انجام شده است. رویکردهای فنی برای رسیدن به این هدف تا حد زیادی یکی از دو مسیر زیر را دنبال می‌کند: نخست، از دیدگاه زیست‌شناختی قیاسی و ریخت‌شناختی جغدها در میان گونه‌های جغد و سایر گونه‌های غیرجغد برای مشخص کردن علت پرواز صامت. دوم، از جنبه‌ی فیزیک، مشخصه‌های بال جغد به طور ضمنی منشأ پرواز صامت آنها فرض می‌شود و تفاوت‌های جسمانی بین مشخصه‌های بال جغد و ایرفویل‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است تا مشخص شود که چگونه سازوکارهای شناخته‌شده تولید نوفه آیرودینامیکی را اصلاح کنند. این رویکردها قابل قبول‌اند اما هنوز به طور قطعی مشخص نکرده‌اند که چگونه جغدها به صورت بی‌صدا پرواز می‌کنند.

برای رفع این خلأ دانش در مورد نقش‌های تخصصی بال جغد و سایر عواملی که ممکن است در سرکوب صدای آیرودینامیکی آنها نقش داشته باشد، محققان نیازمند داده‌های نوفه پرواز جغد از اندازه‌های متوسط تا کوچک‌تر هستند که دارای مشخصه‌های بال جغد نیز باشند. از این رو، درک ارتباط عمیق این مشخصه‌ها با سیر تکاملی روی گونه‌های مختلف جغد نیاز به ارتباط فیلوژنتیکی از مشخصه‌های بال جغد با اندازه‌گیری‌های جسمانی و نوفه دارد که به اطلاعات و ابزارهای از جوامع آیروآکوستیک و زیست‌شناختی برای پیشرفت و توسعه نیاز است.

سازوکارهای جدید برای کاهش نوفه آیرودینامیکی بر اساس فیزیک جغدها، تأثیر بسزایی در صنایع انرژی، هوافضا و حمل‌ونقل دارند که محدودیت‌های زیست‌شناختی جغد را برطرف می‌کند و طراحی مکانیکی را می‌توان بر اساس جسمانی جغد برای حذف نوفه نیز بهینه کرد. با این حال، مشکل اصلی در طراحی فتاوری‌های الهام گرفته از جغد، عدم درک فیزیک اساسی پرواز صامت جغد، حتی در مقیاس پرنده است. در واقع، طراحی و آزمایش بال مصنوعی جغد با مشخصه‌های هم‌اندازه و هم مقیاس بال و به علاوه، مقایسه‌ی مطلوب بال‌های واقعی پرنده یک جهش روبه‌جاو در نشان دادن فیزیک اساسی و استفاده از این درک برای کاربردهای دیگر در جریان‌های سرعت پایین در مقیاس‌های مختلف است. دنبال کردن این راهبردها برای سرکوب نوفه پهن‌بند همراه با پیشرفت و توسعه در الگوسازی تحلیلی تولید نوفه، فتاوری‌های اندازه‌گیری صوتی و آیروآکوستیک محاسباتی بوده است.

در ادامه اهم مطالب به صورت مختصر بیان می‌شود:

- بسیاری از جغدها نوفه را در محدوده‌ی شنوایی طعمه خود و خودشان سرکوب می‌کند (به ویژه تولید نوفه در لبه‌ی فرار). اندازه‌گیری‌های صوتی جغدهای زنده نشان می‌دهد که کاهش نوفه آیرودینامیکی بالای ۱/۶ کیلوهرتز در محدوده‌ی فراصوتی است؛

- تنوع‌های مختلف در رفتار شکار و ساختار بال در بین انواع جغد‌ها، سازوکارهای جسمانی تولید نوفه و منابع صدا که سرکوب می‌شوند را پیشنهاد می‌دهد. همچنین، مشخصه‌هایی نظیر سطح مخملی بال در برخی از گونه‌های غیر جغد نیز مشاهده می‌شود و برای تعیین نقش این مشخصه‌های بال روی تولید نوفه آیرودینامیکی و در صورت وجود کاهش نوفه در گونه‌های غیر جغد، نیاز به تلاش‌ها و مطالعات بیشتری است؛
- تجهیزات ملهم از حاشیه‌ی لبه‌ی فرار و سطح مخملی بال برای کاهش نوفه، باعث کاهش چشمگیر نوفه لبه‌ی فرار در مقطع ایرفویل توربین باد واقعی شده که در آزمایش‌های تونل باد دیده شده است. با این حال، هنوز درک دقیق فیزیکی از این روند وجود ندارد؛
- شواهد موجود نشان می‌دهد که شانه‌ی لبه‌ی حمله نقش مهمی در کاهش نوفه در زوایای بالای حمله، از طریق مهار نوفه‌ی جریان در نوک بال ایفا می‌کنند؛
- در انتهای این بخش و به عنوان آخرین موضوع مطرح شده، مسائل و موضوعات آینده بیان می‌شود؛
- با توجه به مشخصه‌ها و ویژگی‌های بسیاری که دلیل پرواز صامت جغد است. منطقی به نظر می‌رسد که در یک وسیله نقلیه هوایی به اندازه جغد که طیف نوفه‌ی جغد را تکرار می‌کند، راهبردهای کاهش نوفه را بتوان استفاده کرد. با این حال، مبنای فیزیکی و نفس کار این کاهش مهم است که می‌تواند در کاربردهایی فراتر از فضای پارامتری موجود با پرواز جغد مورد استفاده قرار گیرد؛
- اگرچه مشخصه‌های بررسی شده‌ی بال جغد، مسؤل سرکوب نوفه‌ی آیرودینامیکی هستند، این مشخصه‌ها به تنهایی نمی‌توانند مسؤل تمام کاهش نوفه‌ی مشاهده شده در آزمایش‌های پروازی جغد باشند. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در اندازه‌گیری حرکت‌های پرنده‌گان زنده ممکن است برای یافتن سرنخ‌ی در مورد
- چگونگی مدیریت جغدها در حرکات بدن و بال‌ها برای کاهش و حذف نوفه‌ی آیرودینامیکی، مفید باشند؛
- داده‌ها و اطلاعات صوتی موجود، برای پرواز جغد محدود به جغد انبار است؛ اما اندازه‌گیری‌های نوفه از گونه‌های کوچک‌تر جغد با رفتارهای مختلف شکاری برای تعیین نقش‌های اندازه بر روی کاهش و سرکوب نوفه مورد نیاز است. علاوه بر این، نیاز به داده‌هایی است برای تعیین این‌که آیا گونه‌های جغد کوچک‌تر نیز قادر به پرواز صامت هستند؟
- آیا یک اساس تکاملی برای ویژگی‌های بال وجود دارد که گفته می‌شود مسؤل پرواز صامت جغد است؟ برای پرداختن به این سؤال، یک تجزیه و تحلیل مقایسه‌ی فیلولوژنتیک مورد نیاز است که مستلزم اندازه‌گیری‌های فیزیکی بسیاری از جغدها و سایر گونه‌های پرنده‌گان و همچنین اندازه‌گیری‌های صوتی کامل است تا بتوان نتیجه‌گیری محکمی از زیست‌شناختی (بیولوژی) را انجام داد. این مسیر تحقیقاتی فرصتی برای تحقیق‌های بین‌رشته‌ی از جمله مکانیک سیالات و زیست‌شناختی است؛
- اصلاحات هندسی لبه‌ها و سطوح بال منجر به تغییرات در جریان محلی می‌شود که می‌تواند بر نوفه‌ی تولید شده اثر بگذارد. همچنین، اصلاحات باعث بهبود درک فیزیکی از اثرات جریان محلی ناشی از لبه و سطح هندسه و نقش آنها در تولید نوفه و انتشار آن در دوردست می‌شود. از این رو، محققین باید فیزیک این کاربردها و الگوها را برای فناوری‌های کاهش نوفه در تجهیزات در سرعت‌ها و مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار دهند؛
- راهبردهای کاهش نوفه با الهام‌گیری از جغد ممکن است منجر به کاهش هزینه عملکرد آیرودینامیکی که به عنوان ارزیابی سریع آیرودینامیک - آیروآکوستیک است، شود. همچنین، یکی از موارد مهم در طراحی مفهومی است.

پانویس‌ها

1. Lilienthal
2. Morphometric
3. Biological
4. Gliding
5. Flapping
6. Noise
7. Nigel Peake
8. Barn Owls
9. Downy Covering
10. Forest Canopy
11. Bristles
12. Fringe
13. Scattering
14. Wedding Veil
15. Mascha
16. Graham
17. Sick
18. Hertel
19. Nagel
20. Schwind & Allen

21. Hersh
22. Bachmann
23. Rao and Liu
24. Passive
25. Wang
26. Tradeoff
27. Rong
28. Open Source INTelligence (OSINT)
29. Co-Occurrence
30. Thorpe & Griffin
31. Neuhaus
32. Gruschka
33. Kroeger
34. Reverberation Room
35. Konishi
36. Dyson
37. Rustling
38. Sarradj
39. Harris's Hawk (Parabuteo Unicinctus)
40. Common Kestrel (Falco Tinnunculus)
41. DB/Decade
42. Graham
43. Compliant

44. Fish Owl
45. Evolutionary Support
46. Phylogenetics
47. Frogmouths (Podargidae)
48. Nighthawks (Caprimulgiformes)
49. Strigiformes
50. Wagner
51. Roulin
52. Klän
53. Columba Livia Domestica
54. Melamine Foam
55. Semi-Permeable
56. Winzen
57. Usherwood
58. Retarded Time
59. Acoustical Compactness
60. Clark & Prum
61. Dubois
62. Hertel
63. Crighton & Leppington
64. Howe
65. Jaworski & Peake
66. Cavalieri
67. Poroeleastic
68. Pimenta
69. Spanwise Coherence
70. Destructive
71. Kisil & Ayton
72. Matrix Wiener-Hopf
73. Brooks
74. National Advisory Committee For Aeronautics
75. Roughness Noise
76. Kelvin-Helmholtz
77. Ayton
78. Spectral Content
79. Coherent Structures
80. Rao
81. Lyu
82. Hersh
83. Broadband
84. Winzen
85. Maximum Reynolds Shear Stress (MRSS)
86. Turner & Kim
87. Chaitanya
88. Transverse Integral Length Scale
89. Hayden
90. Herr & Reichenberger
91. Zhou
92. Herr & Dobrzynski
93. Elastic Brushes
94. Finlet
95. Sharma & Bodling

منابع (References)

1. KleinHeerenbrink, M. and Hedenström, A. "Wake analysis of drag components in gliding flight of a jackdaw (corvus monedula) during moult", *Interface Focus*, **7**, p. 20160081 (2017).
2. Wagner, H., Weger, M., Klaas, M. and et al. "Features of owl wings that promote silent flight", *Interface Focus*, **7**, p. 20160078 (2017).
3. Cambridge, U.O. "Silent flights: how owls could help make wind turbines and planes quieter available:", <https://www.cam.ac.uk/research/news/silent-flights-how-owls-could-help-make-wind-turbines-and-planes-quieter> (2015).
4. Jaworski, J.W. and Peake, N. "Aeroacoustics of silent owl flight", *Annual Review of Fluid Mechanics*, **52**, pp. 395-420 (2020).
5. Kroeger, R.A., Grushka, H.D. and Helvey, T.C. "Low speed aerodynamics for ultra-quiet flight", Tennessee Univ Space Inst Tullahoma (1972).
6. Sarradj, E., Fritzsche, C. and Geyer, T. "Silent owl flight: Bird flyover noise measurements", *AIAA Journal*, **49**, pp. 769-779 (2011).
7. Mascha, E. "Über die schwungfedern", *Zeitschrift Für Wissenschaftliche - Zoologie*, **77**, pp. 606-651 (1904).
8. Graham, R. "The silent flight of owls", *The Aeronautical Journal*, **38**, pp. 837-843 (1934).
9. Sick, H. "Morphologisch-funktionelle untersuchungen über die feinstruktur der vogelfeder", *Journal Für Ornithologie*, **85**, pp. 206-372 (1937).
10. Hertel, H. and Struktur, F. "Bewegung", Otto Krauskopf-Verlag Mainz (1963).
11. Arndt, R. and Nagel, T. "Effect of leading edge serrations on noise radiation from a model rotor", *In Society of Naval Architects and Marine Engineers, and US Navy, Advanced Marine Vehicles Meeting*, p. 655 (1972).
12. Schwind, R. and Allen, H. "The effects of leading-edge serrations on reducing flow unsteadiness about airfoils", *Aerospace Sciences Meeting, AIAA*, pp. 73-89 (1973).
13. Neuhaus, W., Bretting, H. and Schweizer, B. "Morphologische und funktionelle untersuchungen über den, lautlosen" flug der eulen (strix aluco) im vergleich zum flug der enten (anas platyrhynchos)", *Biologisches Zentralblatt*, **92**, pp. 495-512 (1973).
14. Hersh, A.S., Soderman, P.T. and Hayden, R.E. "Investigation of acoustic effects of leading-edge serrations on airfoils", *Journal of Aircraft*, **11**, pp. 197-202 (1974).
15. Bachmann, T. "Anatomical, morphometrical and biomechanical studies of barn owls' and pigeons' wings", RWTH Aachen University, Germany (PhD Thesis) (2010).
16. Bachmann, T., Blazek, S., Erlinghagen, T. and et al. "Barn owl flight", *In Nature-Inspired Fluid Mechanics*, ed: Springer, pp. 101-117 (2012).
17. Bachmann, T., Klän, S., Baumgartner, W. and et al. "Morphometric characterisation of wing feathers of the barn owl tyto alba pratincola and the pigeon columba livia", *Frontiers In Zoology*, **4**, pp. 1-15 (2007).
18. Bachmann, T., Mühlenbruch, G. and Wagner, H. "The barn owl wing: An inspiration for silent flight in the aviation industry?", *In Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication*, p. 79750N (2011).
19. Rao, C. and Liu, H. "Effects of reynolds number and distribution on passive flow control in owl-inspired leading-edge serrations", *Integrative and Comparative Biology*, **60**, pp. 1135-1146 (2020).
20. Zhao, M., Cao, H., Zhang, M. and et al. "Optimal design of aeroacoustic airfoils with owl-inspired trailing-edge serrations", *Bioinspiration and Biomimetics*, **16**(5), p.056004 (2021).

21. Wang, J., Ishibashi, K., Joto, M. and et al. "Aeroacoustic characteristics of owl-inspired blade designs in a mixed flow fan: effects of leading-and trailing-edge serrations", *Bioinspiration & Biomimetics*, **16**, p. 066003 (2021).
22. Rong, J. and Liu, H. "Aeroacoustic interaction between owl-inspired trailing-edge fringes and leading-edge serrations", *Physics of Fluids*, **34**(1), p. 011907 (2022).
23. Sagar, P., Teotia, P., Sahlot, A.D. and et al. "An analysis of silent flight of owl", *Materials Today: Proceedings*, **4**, pp. 8571-8575 (2017).
24. Thorpe, W. and Griffin, D. "The lack of ultrasonic components in the flight noise of owls compared with other birds", *Ibis*, **104**, pp. 256-257 (1962).
25. Gruschka, H., Borchers, I. and Coble, J. "Aerodynamic noise produced by a gliding owl", *Nature*, **233**, pp. 409-411 (1971).
26. Konishi, M. "How the owl tracks its prey: Experiments with trained barn owls reveal how their acute sense of hearing enables them to catch prey in the dark", *American Scientist*, **61**, pp. 414-424 (1973).
27. Dyson, M., Klump, G. and Gauger, B. "Absolute hearing thresholds and critical masking ratios in the european barn owl: A comparison with other owls", *Journal of Comparative Physiology A*, **182**, pp. 695-702 (1998).
28. Geyer, T., Sarradj, E. and Fritzsche, C. "Silent owl flight: Experiments in the aeroacoustic wind tunnel", *NAG/DAGA*, pp. 734-736 (2009).
29. Geyer, T., Sarradj, E. and Fritzsche, C. "Silent owl flight: Comparative acoustic wind tunnel measurements on prepared wings", *Acta Acustica United with Acustica*, **99**, pp. 139-153 (2013).
30. Roulin, A., Mangels, J. and Wakamatsu, K. "Sexually dimorphic melanin-based colour polymorphism, feather melanin content, and wing feather structure in the barn owl (*tyto alba*)", *Biological Journal of the Linnean Society*, **109**, pp. 562-573 (2013).
31. Klän, S., Burgmann, S. Bachmann, T. and et al. "Surface structure and dimensional effects on the aerodynamics of an owl-based wing model", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, **33**, pp. 58-73 (2012).
32. Wolf, T. and Konrath, R. "Avian wing geometry and kinematics of a free-flying barn owl in flapping flight", *Experiments in Fluids*, **56**, pp. 1-18 (2015).
33. Ji, G., Cui, J., Fang, Y. and et al. "Nano-fibrous composite sound absorbers inspired by owl feather surfaces", *Applied Acoustics*, **156**, pp. 151-157 (2019).
34. Rong, J. and Liu, H. "Aeroacoustic interaction between owl-inspired trailing-edge fringes and leading-edge serrations", *Physics of Fluids*, **34**, p. 011907 (2022).
35. Jaworski, J. "Vortex sound generation from flexible fibers", *In 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, p. 2752 (2016).
36. Winzen, A., Roidl, B., Klän, M. and et al. "Particle-image velocimetry and force measurements of leading-edge serrations on owl-based wing models", *Journal of Bionic Engineering*, **11**, pp. 423-438 (2014).
37. Usherwood, J.R., Cheney, J.A., Song, J. and et al. "High aerodynamic lift from the tail reduces drag in gliding raptors", *Journal of Experimental Biology*, **223**, p. jeb214809, (2020).
38. Clark, C.J., LePiane, K. and Liu, L. "Evolution and ecology of silent flight in owls and other flying vertebrates", *Integrative Organismal Biology*, **2**, p. obaa001 (2020).
39. Clark, C.J. and Prum, R.O. "Aeroelastic flutter of feathers, flight and the evolution of non-vocal communication in birds", *Journal of Experimental Biology*, **218**, pp. 3520-3527 (2015).
40. Dubois, A.D. "A nuptial song-flight of the short-eared owl", *The Auk*, **41**(2) pp. 260-263 (1924).
41. Clark, I.A., Daly, C.A. Devenport, W. and et al. "Bio-inspired canopies for the reduction of roughness noise", *Journal of Sound and Vibration*, **385**, pp. 33-54 (2016).
42. Crighton, D. and Leppington, F. "Scattering of aerodynamic noise by a semi-infinite compliant plate", *Journal of Fluid Mechanics*, **43**, pp. 721-736 (1970).
43. Howe, M. "On the added mass of a perforated shell, with application to the generation of aerodynamic sound by a perforated trailing edge", *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, **365**, pp. 209-233 (1979).
44. Jaworski, J.W. and Peake, N. "Aerodynamic noise from a poroelastic edge with implications for the silent flight of owls", *Journal of Fluid Mechanics*, **723**, pp. 456-479 (2013).
45. Cavalieri, A., Wolf, W. an Jaworski, J. "Numerical solution of acoustic scattering by finite perforated elastic plates", *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **472**, p. 20150767 (2016).
46. Pimenta, C., Wolf, W.R. and Cavalieri, A.V. "A fast numerical framework to compute acoustic scattering by poroelastic plates of arbitrary geometry", *Journal of Computational Physics*, **373**, pp. 763-783 (2018).
47. Kasil, A. and Ayton, L.J. "Aerodynamic noise from rigid trailing edges with finite porous extensions", *Journal of Fluid Mechanics*, **836**, pp. 117-144 (2018).
48. Brooks, T.F., Pope, D.S. and Marcolini, M.A. "Airfoil self-noise and prediction vol. 1218: National aeronautics and space administration", Office of Management ... (1989).
49. Ayton, L.J. and Peake, N. "Interaction of turbulence with the leading-edge stagnation point of a thin aerofoil", *Journal of Fluid Mechanics*, **798**, pp. 436-456 (2016).
50. Geyer, T.F., Claus, V.T., Hall, P.M. and et al. "Silent owl flight: the effect of the leading edge comb", *International Journal of Aeroacoustics*, **16**, pp. 115-134 (2017).
51. Rao, C., Ikeda, T., Nakata, T. and et al. "Owl-inspired leading-edge serrations play a crucial role in aerodynamic force production and sound suppression", *Bioinspiration & Biomimetics*, **12**, p. 046008 (2017).
52. Lyu, B., Ayton, L.J. and Chaitanya, P. "On the acoustic optimality of leading-edge serration profiles", *Journal of Sound and Vibration*, **462**, p. 114923 (2019).
53. Lyu, B., Azarpeyvand, M. and Sinayoko, S. "Prediction of noise from serrated trailing edges", *Journal of Fluid Mechanics*, **793**, pp. 556-588 (2016).

54. Lyu, B. and Azarpeyvand, M. "On the noise prediction for serrated leading edges", *Journal of Fluid Mechanics*, **826**, pp. 205-234 (2017).
55. Klän, S., Klaas, M. and Schröder, W. "The influence of leading edge serrations on the flow field of an artificial owl wing", *In 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, p. 4942 (2010).
56. Klän, S., Bachmann, T., Klaas, M. and et al. "Experimental analysis of the flow field over a novel owl based airfoil", *In Animal Locomotion*, Ed: Springer, pp. 413-427 (2010).
57. Turner, J.M. and Kim, J.W. "Aeroacoustic source mechanisms of a wavy leading edge undergoing vortical disturbances", *Journal of Fluid Mechanics*, **811**, pp. 582-611 (2017).
58. Chaitanya, P., Joseph, P., Narayanan, S. and et al. "Performance and mechanism of sinusoidal leading edge serrations for the reduction of turbulence-aerofoil interaction noise", *Journal of Fluid Mechanics*, **818**, pp. 435-464 (2017).
59. Hayden, R. "Reduction of noise from airfoils and propulsive lift systems using variable impedance systems", *AIAA Paper*, **500** (1976).
60. Herr, M. and Reichenberger, J. "In search of airworthy trailing-edge noise reduction means", *In 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference)*, p. 2780 (2011).
61. Zhou, B.Y., Koh, S.R., Gauger, N.R. and et al. "A discrete adjoint framework for trailing-edge noise minimization via porous material", *Computers & Fluids*, **172**, pp. 97-108 (2018).
62. Herr, M. and Dobrzynski, W. "Experimental investigations in low-noise trailing edge design", *AIAA Journal*, **43**, pp. 1167-1175 (2005).
63. Herr, M. "Design criteria for low-noise trailing-edges", *In 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference)*, p. 3470 (2007).
64. Clark, I.A., Alexander, W.N., Devenport, W. and et al. "Bioinspired trailing-edge noise control", *AIAA Journal*, **55**, pp. 740-754 (2017).
65. Bodling, A. and Sharma, A. "Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil", *Journal of Sound and Vibration*, **453**, pp. 314-327 (2019).