





Investigating the Factors Affecting Aerodynamic Noise Pollution in the Context of Improving Urban Safety

Armin Farhadi Rad^a , Reza Aghaei Togh^b  

^a.Department of Aerospace Engineering, Faculty of Technical and engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

^b. Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Faculty of Technical and engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2071981.1214>

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Noise pollution,
Aviation,
Airfoil,
Wind turbine.

Noise pollution is one of the most important problems related to the aviation industry. It can lead to health problems as well as negative social and economic impacts. Examples of negative impacts of noise pollution include sleep disturbance, community annoyance, cardiovascular diseases, and mental health problems. One of the most important causes of noise pollution is noise pollution from aerodynamic surfaces such as aircraft wings and wind turbine blades. The origin of this noise pollution is the flow separated on the wing. Today, with the help of relationships and methods such as numerical analysis relationships, in addition to identifying the location and intensity of separation, airfoils used in wings and wind turbine blades can be optimized with the help of methods such as postponing the separation point and controlling the flow separated from the desired surface by changing the airfoil geometry in order to reduce noise pollution. The study of new airfoil optimization methods such as the use of artificial intelligence algorithms is not the purpose of this article and will be addressed in future articles

Received:

17 September 2025

Received in revised form:

7 October 2025

Accepted:

17 October 2025

pp.187-204

Corresponding author (Email: r.aghaeitogh@iau.ir)

Copyright © 2025 The Authors. Published by Passive Defense Association of Iran. This is an open access article under the CC BY license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



شاپا الکترونیکی: 2676-556X

مجله شهرایمن
Journal Homepage: www.ispdrc.ir



مقاله پژوهشی

بررسی عوامل موثر بر آلودگی صوتی آیرودینامیکی در راستای بهبود ایمنی شهری

آرمین فرهادی راد- گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
رضا آقائی طوق* - دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2025.2071981.1214>

چکیده	واژگان کلیدی
<p>آلودگی صوتی یکی از مهمترین مشکلات مرتبط با صنعت هوانوردی است. این امر می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی در سلامتی و همچنین اثرات منفی اجتماعی و اقتصادی شود. نمونه‌هایی از اثرات منفی ناشی از آلودگی صوتی عبارتند از اختلال خواب، آزردهی جامعه، بیماری‌های قلبی-عروقی و مشکلات سلامت روان. از مهم ترین علل ایجاد آلودگی صوتی، آلودگی صوتی ناشی از سطوح آیرودینامیکی نظیر بال هواپیما و تیغه توربین های بادی می باشد. منشاء این آلودگی صوتی، جریان جدا شده بر روی بال می باشد. امروزه به کمک روابط و روش هایی مانند روابط تحلیل عددی، علاوه بر تشخیص محل و میزان شدت جدایش می توان ایرفویل های به کار رفته در بال ها و تیغه های توربین های بادی را به کمک روش هایی نظیر به تعویق انداختن نقطه جدایش و کنترل جریان جدا شده از روی سطح مورد نظر به کمک تغییر در هندسه ایرفویل در جهت کاهش آلودگی صوتی بهینه سازی کرد. بررسی روش های نوین بهینه سازی ایرفویل مانند استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی هدف بررسی این مقاله نبوده و در مقالات آینده به آن پرداخته خواهد شد.</p>	<p>آلودگی صوتی هوانوردی ایرفویل توربین بادی</p> <p>تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۶/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۵</p>

۱- مقدمه

آلودگی صوتی به وجود سطوح بیش از حد یا مضر صوت در محیط اشاره دارد که تعادل صوتی طبیعی را مختل می‌کند و بر سلامت و رفاه انسان تأثیر منفی می‌گذارد. طبق تعریف سازمان بهداشت جهانی، آلودگی صوتی به عنوان "صدای ناخواسته یا مضر منتشر شده توسط منابع مختلف تعریف می‌شود که می‌تواند در فعالیت‌های عادی مانند خواب، مکالمه و کار اختلال ایجاد کند و منجر به اثرات نامطلوبی بر سلامت فرد شود." آلودگی صوتی معمولاً با شدت، مدت و فرکانس آن مشخص می‌شود و می‌تواند منابع مختلفی داشته باشد. مطالعه تأثیرات آلودگی صوتی بر سلامت انسان به دلیل طیف گسترده‌ای از اثرات نامطلوب بر سلامتی مرتبط با قرار گرفتن در معرض آلودگی صوتی بیش از حد، بسیار مهم است. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، آلودگی صوتی با چندین مشکل سلامتی، از جمله بیماری‌های قلبی عروقی، کاهش شنوایی و اختلالات خواب مرتبط است. گزارش سازمان بهداشت جهانی تأکید می‌کند که درک این تأثیرات برای تدوین استراتژی‌های مؤثر بهداشت عمومی و کاهش اثرات منفی آلودگی صوتی بر جمعیت ضروری است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که قرار گرفتن مزمن در معرض سطوح بالای سر و صدا می‌تواند منجر به مشکلات سلامتی قابل توجهی مانند فشار خون بالا، بیماری‌های قلبی و سکتة مغزی شود. این مطالعه بر اهمیت مطالعه تأثیرات آلودگی صوتی بر سلامت تأکید می‌کند.

محققان می‌توانند با سیاست‌ها و اقدامات پیشگیرانه، شناسایی و تعیین کمیت این خطرات بهداشتی، توصیه‌های مبتنی بر شواهد را برای کاهش مواجهه و محافظت از سلامت عمومی ارائه دهند. تأثیر آلودگی صوتی بر سلامت روان و عملکرد شناختی یکی دیگر از حوزه‌های مهم تحقیق است. پژوهش‌ها نشان داد که مواجهه با سر و صدا با افزایش استرس، اضطراب و افسردگی مرتبط است. این مطالعه بر نیاز به تحقیقات جامع در مورد چگونگی تأثیر آلودگی صوتی بر سلامت روان و عملکرد شناختی تأکید می‌کند، زیرا این اثرات می‌تواند پیامدهای منفی

گسترده‌ای بر کیفیت زندگی و سلامت کلی افراد داشته باشد. علاوه بر این، اثرات آلودگی صوتی بر رشد شناختی کودکان باید جدی گرفته شود؛ زیرا قرار گرفتن در معرض سطوح بالای سر و صدای محیطی می‌تواند توانایی‌های یادگیری و عملکرد تحصیلی کودکان را مختل کند. درک این تأثیرات برای تدوین استراتژی‌هایی برای محافظت از جمعیت‌های آسیب‌پذیر، مانند کودکان، در برابر اثرات مضر آلودگی صوتی بسیار مهم است. بررسی پیامدهای اجتماعی و اقتصادی آلودگی صوتی نیز حیاتی است. هزینه‌های اقتصادی مرتبط با مشکلات سلامتی ناشی از سر و صدا، از جمله هزینه‌های پزشکی و کاهش بهره‌وری و کمی‌سازی این هزینه‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند.

تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد مدیریت و مداخلات آلودگی صوتی باید اخذ شود. با پرداختن به بار اقتصادی آلودگی صوتی، جوامع می‌توانند منابع را بهتر تخصیص داده و اقدامات مؤثری را برای کاهش مواجهه با سر و صدا اجرا کنند. علاوه بر این، تأثیرات اجتماعی گسترده‌تر آلودگی صوتی، از جمله تأثیرات آن بر رفتار اجتماعی و رفاه جامعه نشان می‌دهد که آلودگی صوتی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت زندگی و نقص انسجام اجتماعی شود و بر اهمیت مطالعه این جنبه‌ها برای توسعه رویکردهای جامع به منظور مدیریت آلودگی صوتی و بهبود سلامت کلی جامعه تأکید می‌کند. بررسی جامع عوامل و درک وسعت و عمق تحقیقات در مورد آلودگی صوتی و تأثیرات آن بر سلامت ضروری است. هدف اصلی این بررسی خلاصه کردن و تجزیه و تحلیل ادبیات موجود در مورد اثرات بهداشتی آلودگی صوتی است. یک متاآنالیز از اهمیت چنین بررسی‌هایی پشتیبانی می‌کند و تأکید می‌کند که ترکیب تحقیقات موجود به درک تأثیر کلی آلودگی صوتی بر سلامت کمک می‌کند. این متاآنالیز، داده‌های حاصل از مطالعات متعدد را برای نتیجه‌گیری‌های گسترده‌تر در مورد خطرات سلامتی ناشی از سر و صدا، تجمیع می‌کند. این روش خلاصه‌سازی برای توسعه توصیه‌های مبتنی بر شواهد و استراتژی‌های بهداشت عمومی بسیار مهم است. یکی دیگر از اهداف کلیدی این بررسی، تجزیه و تحلیل اثرات خاص آلودگی صوتی بر سلامت فرد می‌باشد. تجزیه و تحلیل ادبیات موجود بر شناسایی مسیرهای مشترک و

در پروژه تحقیقاتی توسعه ابزارهای طراحی برای توربین‌های بادی با آلودگی صوتی آبرودینامیکی کاهش‌یافته، شکل واقعی ایرفویل (های) مورد استفاده در پره‌های توربین بادی را در نظر می‌گیرند که هدف آن توسعه کدهای پیش‌بینی آکوستیک است که این کار با ترکیبی از کارهای تحلیلی و عددی انجام می‌شود. جنبه دیگر این کار، استفاده از کدهای *CFD* (دینامیک سیالات محاسباتی) پیشرفته برای تولید اطلاعات دقیق از لایه‌های مرزی ایرفویل است. علاوه بر این، مجموعه‌ای گسترده از اندازه‌گیری‌های تونل باد با هدف امکان اعتبارسنجی هر مرحله از توسعه کدهای پیش‌بینی انجام می‌شود. در این پژوهش به بررسی عوامل آلودگی صوتی ناشی از ایرفویل‌ها (هواپیما، توربین‌های بادی و...) بر محیط و سلامت انسان و راهکار کاهش آن پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

در منابع (Brooks & Hodgson, 1981; Brooks & Schlinker, 1983; Schlinker & Amiet, 1981) به بررسی دلایل ایجاد آلودگی صوتی در ایرفویل‌ها پرداخته شده است. در این منابع از جمله عوامل مهم ایجاد آلودگی صوتی به جدایش جریان از روی ایرفویل اشاره شده است. این منابع تنها بر روی یک نوع ایرفویل مطالعه انجام داده و معادلات تجربی ارائه شده در آنها قابل تعمیم به دیگر نوع‌های ایرفویل با کاربرد‌های مختلف نمی‌باشد. در منابع (Bachmann et al., 2007; Graham, 1934; Kroeger et al., 1972) به مطالعه چند روش عملی برای کاهش آلودگی صوتی اشاره شده است. در این منابع روش‌های پیشنهادی برای ایرفویل‌های مورد استفاده در توربین‌ها کاربرد داشته و از آنجایی که میزان درگ و لیفت در ایرفویل‌های مورد استفاده در هواپیماها حائز اهمیت می‌باشند و از آنجایی که این پارامترها در این منابع مورد مطالعه قرار نگرفتند برای تعمیم این روش‌ها برای استفاده در نوع‌های دیگر ایرفویل جای بحث وجود دارد.

کاسالینو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته، تأثیرات آلودگی صوتی وسایل نقلیه شهری با قابلیت برخاست و فرود عمودی را در محیط‌های شهری بررسی کرده‌اند. آن‌ها به تحلیل منابع آکوستیکی و انتشار صدا در این وسایل پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها را با

عوامل خطر مرتبط با قرار گرفتن در معرض آلودگی صوتی تمرکز خواهد کرد و در نتیجه به استراتژی‌های مؤثرتر مدیریت سر و صدا کمک می‌کند. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، خلاصه‌سازی و تجزیه و تحلیل متون علمی به سیاست‌گذاران و متخصصان کمک می‌کند تا در مورد اقدامات کاهش و کنترل آلودگی صوتی، تصمیمات آگاهانه‌ای بگیرند.

شبکه رو به گسترش حمل و نقل و استفاده از منابع جدید انرژی غیر از سوخت‌های فسیلی، جامعه را در طول قرن‌ها متحول کرده است. با افزایش تقاضا به دلیل رشد جمعیت در جامعه مدرن، مقررات مربوط به آلودگی محیط زیست به طور مستمر ایجاد شده و در حوزه مصرف سوخت و مقابله با آلودگی صوتی، سختگیرانه‌تر می‌شوند. به عنوان مثال، صنعت هواپیماسازی یک بازار رو به رشد است و پیش‌بینی می‌شود تقاضای ترافیک هوایی تا سال ۲۰۳۰ تقریباً سه برابر شود. علاوه بر این، در ۵۰ سال گذشته تلاش مداومی برای تحقیق و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و سازگارتر با محیط زیست، مانند انرژی باد، در جریان بوده است. در نتیجه، انتظار می‌رود مزارع توربین بادی ساحلی و خارج از ساحل تا سال ۲۰۳۰ تقریباً دو برابر و تا سال ۲۰۵۰ سه برابر شوند. آلودگی صوتی نگرانی ویژه‌ای برای جوامعی است که در نزدیکی فرودگاه‌ها و مزارع توربین بادی زندگی می‌کنند. سر و صدای هواپیما در مراحل برخاستن و فرود، نگرانی اصلی است.

تخصیص مکان‌های جدید ساحلی برای توربین‌های بادی، عمدتاً به دلیل تولید نویز آبرودینامیکی توسط توربین‌های بادی، به یک مشکل جدی تبدیل شده است. به ویژه برای رشد بیشتر استفاده از انرژی باد در مناطق پرجمعیت مانند هلند و بخش‌هایی از آلمان، باید توربین‌های بی‌صداتری توسعه داده شوند. تلاش‌های انجام شده تاکنون موفقیت محدودی داشته‌اند، که عمدتاً نشان می‌دهد درک، پیش‌بینی و کاهش نویز توربین بادی کار ساده‌ای نیست.

آلودگی صوتی در ایرفویل به دلیل برهمکنش بین تیغه ایرفویل و آشفتگی تولید شده در لایه مرزی خود و دنباله نزدیک آن است که هنگام برخورد یک ایرفویل با جریان ورودی آرام و غیر آشفته تولید می‌شود.

دلیل تنوع خطرات، آلودگی صوتی یک مشکل مدیریتی و حیاتی برای سیاست‌گذاران شهری و منطقه‌ای است. تصویب قانون منصفانه و کارآمد به منظور فعالیت هواپیماها و توزیع مسیر پروازی هواپیماها در مناطق جغرافیایی مختلف می‌تواند از آلودگی صوتی در مناطق مسکونی بکاهد.

با این حال، اجرای هر راه‌حلی ابتدا باید مشکل ایجاد شده برای ساکنان در مورد آلودگی صوتی را حل کند. چنین مقرراتی معمولاً درک ذهنی شفافی از خسارات آلودگی صوتی بر سلامت ساکنین اطراف فرودگاه ایجاد نمی‌کند. بسیاری از بحث‌ها بر پیشرفت‌های تکنولوژیکی یا تعریف استانداردهای آلودگی صوتی متمرکز بوده‌اند که به فرودگاه تا حد مشخص و استاندارد برحسب آلودگی صوتی ایجاد شده، مجوز می‌دهد. هیچ یک از این سیاست‌ها قادر نیستند سطح آسیب آلودگی صوتی را به حدی که با سطح بهینه اجتماعی مطابقت دارد، برساند. این امر صرفاً به این دلیل است که این سیاست‌ها به ارزیابی میزان واقعی عدم مطلوبیت سر و صدا توسط ساکنان متکی نیستند.

۴-۱- تأثیر سر و صدا بر سلامت انسان

تأثیر سر و صدای محیطی بر سلامت در چند سال گذشته اهمیت فزاینده‌ای یافته است. امروزه، مطالعات تحقیقاتی بین‌المللی مختلفی در دسترس هستند که مشاهدات کلیدی در مورد تأثیرات سر و صدای محیطی بر سلامت را ارائه می‌دهند. وقوع آلودگی صوتی نه تنها باعث آزار می‌شوند، بلکه قرار گرفتن طولانی مدت و مداوم در معرض سطوح بالای سر و صدا منجر به زوال سیستم شنوایی، کاهش شنوایی، اختلال خواب، بیماری‌های قلبی عروقی و کاهش ظرفیت یادگیری نیز می‌شوند. توصیه‌های گسترده‌ای در مورد سطوح آلودگی صوتی هواپیما که در آنها اثرات نامطلوب قابل توجهی ایجاد می‌شود، در دسترس است و اتحادیه اروپا از فرودگاه‌های بزرگ می‌خواهد که در مورد میزان این اثرات و تعداد افراد تحت تأثیر گزارش دهند. سازمان بهداشت جهانی (WHO) نیز تحقیقات بین‌المللی را در این زمینه انجام می‌دهد و هر از گاهی گزارشات جدیدی را در مورد این تأثیرات منتشر می‌کند که معمولاً راه خود را به قوانین و مقررات بین‌المللی و در نهایت ملی پیدا می‌کند.

شاید مهمترین شواهد در مورد تأثیرات سر و صدا بر سلامت از WHO باشد. گزارشی در سال ۲۰۱۱ (World Health

داده‌های تجربی مقایسه کرده‌اند (Casalino et al., 2021). ریزی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی تأثیرات آلودگی صوتی عملیات وسایل نقلیه شهری هوایی با استفاده از ابزار طراحی محیطی هوانوردی (AEDT) پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده، تأثیرات آلودگی صوتی را در محیط‌های شهری مدل‌سازی کرده و به تحلیل آن پرداخته‌اند (Rizzi et al., 2021). یونس و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تأثیرات انتشار صدا از وسایل نقلیه شهری هوایی با استفاده از مدل‌های انتشار صدا پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده، تأثیرات انتشار صدا را در محیط‌های شهری مدل‌سازی کرده و به تحلیل آن پرداخته‌اند. (Yunus et al., 2021)

ژائو در سال ۲۰۲۴ به بررسی رویکردی جامع و عادلانه برای مدیریت ترافیک هوایی شهری و تأثیرات آلودگی صوتی آن در محیط‌های شهری پرداخته شده است. این مطالعه رویکردی ترکیبی را برای مدیریت ترافیک هوایی شهری و تأثیرات آلودگی صوتی آن در محیط‌های شهری ارائه می‌دهد (Gao, 2024). همچنین در حوزه ایمنی شهری تحقیقات زیادی انجام شده است. (Nakhaei et al., 2015; Zolfani et al., 2013; Nakhaei et al., 2016; Bitarafan et al., 2022; Bitarafan et al., 2023)

۳- روش پژوهش

در این پژوهش ابتدا به مطالعه عوامل ایجاد آلودگی صوتی در ایرفویل‌های مختلف و همچنین معرفی روابط عمومی و تحلیل عددی جهت پیش بینی میزان آلودگی صوتی پراخته می‌شود این معادلات از معادلات پایه ای تری نظیر معادلات RANS استخراج شده و با توجه به تغییرات لایه مرزی در شرایط مختلف ساده سازی شده است. سپس به معرفی چند روش عملی و آزمایش شده برای کنترل بهتر جریان و به تعویق انداختن نقطه جدایش در ایرفویل‌های مورد استفاده در زمینه های مختلف پرداخته می‌شود. روش های معرفی شده از طرق تجربی بدست آمده اند و در صنایعی نظیر توربین های بادی تست شده اند.

۴- آلودگی صوتی در مناطق فرودگاهی

و آثار منفی آن

آلودگی صوتی در اطراف فرودگاه احتمالاً یکی از برجسته‌ترین مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی در شهرهای بزرگ است. به

آلودگی صوتی آبرودینامیکی ناشی از سطوح آبرودینامیکی مانند بال ها و نظیر آن می باشد. از آنجایی که ایرفویل ها شکل اصلی تشکیل دهنده بال های هواپیما و همچنین تیغه توربین ها می باشند، بررسی عوامل ایجاد آلودگی صوتی در این اشکال و ارائه راهکار های بهینه سازی در جهت کاهش عوامل ایجاد آلودگی صوتی کمک شایانی به توسعه بال ها و همچنین تیغه هایی با میزان آلودگی صوتی کمتر می شود.

۵- عوامل ایجاد آلودگی صوتی

آبرودینامیکی در ایرفویل ها

منابع آلودگی صوتی و پیشینه تلاش های تحقیقاتی قبلی (قبل از ۱۹۸۳) برای مکانیسم های آلودگی صوتی پهن باند به تفصیل توسط بروکس^۱ و اشلینکر^۲ (Brooks & Schlinker, 1983) بررسی شده است. در تصویر شماره ۱، شرایط جریان زیرصوت برای پنج مکانیسم تولید آلودگی صوتی مورد توجه در اینجا نشان داده شده است. در عدد رینولدز بالا (بر اساس طول وتر)، لایه های مرزی آشفته (*TBL*) در بیشتر ایرفویل ها ایجاد می شوند. با عبور این آشفستگی از لبه فرار (*TE*)، آلودگی صوتی تولید می شود. در اعداد رینولدز پایین، لایه های مرزی عمدتاً لایه ای (*LBL*) ایجاد می شوند که ناپایداری آنها منجر به ریزش گردابه (*VS*) و آلودگی صوتی مرتبط با آن از *TE* می شود. برای زوایای حمله غیر صفر، جریان می تواند در نزدیکی *TE* در سمت مکش ایرفویل جدا شود و به دلیل ریزش آشفته گردابه، آلودگی صوتی *TE* ایجاد کند. در زوایای حمله بسیار بالا، جریان جدا شده در نزدیکی *TE* جای خود را به جدایش در مقیاس بزرگ (*deep stall*) می دهد که باعث می شود ایرفویل آلودگی صوتی فرکانس پایین مشابه صدای یک جسم صلب در جریان منتشر کند. منبع آلودگی صوتی دیگر، وقوع ریزش گردابه در ناحیه جریان جدا شده کوچک پشت یک *TE* صاف است. منبع باقیمانده که در اینجا در نظر گرفته شده است، به دلیل تشکیل گردابه نوک است که حاوی جریان بسیار آشفته است و در نزدیکی نوک تیغه های تولید کننده برآ یا بال ها رخ می دهد.

(*Organization, 2011*) در مورد بار بیماری ناشی از سر و صدای محیطی، همبستگی بین آلودگی صوتی محیطی، از جمله سر و صدای جاده، راه آهن و هواپیما، با بیماری های قلبی عروقی، اختلال شناختی در کودکان، اختلال خواب و وزوز گوش را ارزیابی کرد. این مطالعه نشان داد که قطعاً شواهد رو به رشدی از مطالعات اپیدمیولوژیک وجود دارد که نشان می دهد سر و صدا واقعاً بر شرایط سلامتی تأثیر می گذارد. داده های مربوط به ارتباط بین فرار گرفتن در معرض سر و صدای هواپیما و فشار خون بالا، فشار خون بالا و بیماری های قلبی و عروقی در سال های اخیر افزایش یافته است. به ویژه سر و صدای هواپیما، به دلیل شدت آن، محل منبع و تغییرپذیری و غیرقابل پیش بینی بودن آن، احتمالاً تأثیر بیشتری بر شناخت و درک مطلب کودکان نسبت به مثلاً سر و صدای ترافیک جاده ای دارد که ممکن است شدت ثابت تری داشته باشد.

مطالعات دیگری نیز وجود داشته است که اثرات سر و صدای حمل و نقل بر سلامت را بررسی کرده اند. به عنوان مثال، نشان داده شده است که سر و صدای شبانه ناشی از حمل و نقل، به دلیل تغییر در خواب، منجر به برانگیختگی و بیداری، اثرات آنی و طولانی مدت بر سلامت دارد. این برانگیختگی شامل فعالیت عصبی و هورمونی است و ممکن است در تغییرات قلبی عروقی و فعالیت حرکتی (حرکتی) منعکس شود. (*Miedema et al., 2002*) علاوه بر این، ثابت شده است که بی خوابی، که می تواند ناشی از اثرات آلودگی صوتی هواپیما در شب باشد، تأثیر منفی بر کیفیت زندگی دارد. این امر با کاهش عملکرد اجرایی، مشکلات حافظه و تمرکز، افسردگی، چاقی، بیماری های قلبی عروقی، فشار خون بالا و افزایش حوادث شغلی مرتبط است. همچنین مشخص شد که سر و صدای هواپیما در طول خواب منجر به افزایش احتمال تحرک در طول این رویدادها و افزایش تعداد بیدار شدن ها می شود. (*Passchier-Vermeer et al., 2002*)

۴-۲- نقش ایرفویل ها در تولید آلودگی صوتی

انواع آلودگی صوتی در هواپیما و توربین های بادی را می توان به چند دسته تقسیم کرد، که از مهم ترین آنها آلودگی صوتی آبرودینامیکی می باشد.

(George, 1984; Schlinker & Amiet, 1981)

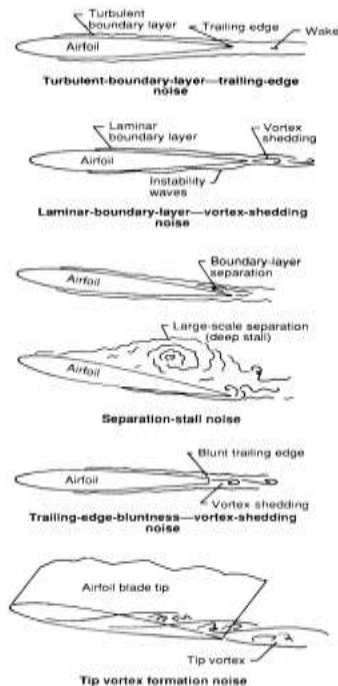
پیش از این، چندین طرح پیش‌بینی برای نویز *TBL-TE* برای آلودگی صوتی روتور هلیکوپتر (A. R. George & Chou, 1984; Schlinker & Amiet, 1981) و توربین‌های بادی (A. R. George & Chou, 1984; Schlinker & Amiet, 1981) استفاده شده است. این طرح‌ها همگی از معادلات قانون مقیاس‌بندی که بر داده‌های نرمال شده مرجع ۶ برازش داده شده بودند، تکامل یافته‌اند و بنابراین، با همان نگرانی‌های کلی که در بالا مورد بحث قرار گرفت، محدود می‌شوند.

۲-۵- آلودگی صوتی جدایش-واماندگی

ارزیابی‌های مکانیسم آلودگی صوتی جریان جدایش برای ایرفویل‌ها در زوایای حمله متوسط تا زیاد بسیار محدود بوده است (Brooks & Schlinker, 1983). اهمیت نسبی آلودگی صوتی واماندگی ایرفویل در داده‌های فینک^۳ و بیلی^۴ (M. R. Fink & Bailey, 1980) در یک مطالعه آلودگی صوتی بدنه هواپیما نشان داده شده است. در حالت واماندگی، آلودگی صوتی بیش از ۱۰ دسی‌بل نسبت به آلودگی صوتی *TBL-TE* که در زوایای حمله پایین منتشر می‌شود، افزایش یافت. پترسون^۵ (Paterson et al., 1975) و همکارانش از طریق همبستگی‌های متقابل سطح به میدان دور، شواهدی یافتند که برای جریان با جداسازی ملایم، آلودگی صوتی غالب از *TE* منتشر می‌شود، در حالی که برای واماندگی عمیق، آلودگی صوتی از کل وتر ساطع می‌شود. این یافته با نتایج مرجع ۹ سازگار است. هیچ روش پیش‌بینی‌کننده‌ای تاکنون توسعه نیافته است. یک روش موفق باید ورود تدریجی آلودگی صوتی جدا شده را با افزایش زاویه حمله ایرفویل در نظر بگیرد. فراتر از زوایای محدودکننده، آلودگی صوتی واماندگی عمیق تنها منبع اصلی مؤثر خواهد بود.

۳-۵- آلودگی صوتی لایه مرزی آرام (LBL-VS)

هنگامی که یک لایه مرزی آرام (*LBL*) در بیشتر حداقل یک طرف ایرفویل وجود داشته باشد، آلودگی صوتی ناشی از



تصویر (۱): عوامل مختلف ایجاد آلودگی صوتی در ایرفویل

۱-۵- آلودگی صوتی لبه انتهایی لایه مرزی آشسته (TBL-TE)

با استفاده از فشارهای سطحی اندازه‌گیری شده، بروکس و هاجسون^۱ (Brooks & Hodgson, 1981) نشان دادند که اگر اطلاعات کافی در مورد میدان فشار سطحی همرفتی *TBL* که از *TE* عبور می‌کند، شناخته شود، می‌توان نویز *TBL-TE* را به طور دقیق پیش‌بینی کرد. شلینکر و آمیت^۲ (Schlinker & Amiet, 1981) از یک توصیف تجربی تعمیم‌یافته از فشار سطح برای پیش‌بینی آلودگی صوتی اندازه‌گیری شده استفاده کردند.

با این حال به نظر می‌رسد داده‌های نرمال شده مستقیماً تحت تأثیر عواملی مانند عدد رینولدز و زاویه حمله قرار دارند که در تحلیل‌های قبلی فرض می‌شد فقط از طریق تأثیر آنها بر ضخامت و ضخامت لایه *TBL* اهمیت دارند (Chou &

Bailey^۴
Paterson^۵

Hodgson^۱
Amiet^۲
Fink^۳

داده‌های طیفی از مطالعات بال دلتا (که فرض می‌شود جریان گردابی نوک بال مورد نظر را تقریب می‌زند)، مطالعات جریان میانگین چندین شکل نوک بال و تحلیل آلودگی صوتی TE ارائه دادند. بروکس و مارکولینی (Brooks & Marcolini, 1986) یک مطالعه تجربی برای جداسازی نویز نوک بال به صورت کمی انجام دادند. داده‌ها با مقایسه مجموعه‌ای از نتایج آزمایش دو و سه‌بعدی برای اندازه‌های مختلف مدل، زوایای حمله و سرعت‌های جریان تونل به دست آمدند. از مقیاس‌بندی داده‌ها، یک روش پیش‌بینی کمی پیشنهاد شد که با روش مرجع ۷ سازگاری اساسی داشت.

۵-۵- آلودگی صوتی لبه انتهایی-صاف-ریزش

گرداب

آلودگی صوتی ناشی از ریزش گرداب از لبه‌های انتهایی کند بال توسط بروکس و هاجسون (Brooks & Hodgson, 1981) به عنوان یک منبع مهم نویز خودکار ایرفویل معرفی شد. سایر مطالعات مربوط به اثرات کندی، همانطور که توسط بلیک^۷ (Blake, 1984) و بروکس و اشلینکر (Brooks & Schlinker, 1983) بررسی شده‌اند، فقط در حوزه آبرودینامیکی بوده‌اند و به ضخامت‌های TE که در مقایسه با لایه مرزی بزرگ بودند، پرداخته‌اند.

۶- بررسی و پیش‌بینی نقاط جدایش

همانطور که قبل تر اشاره شد از مهم ترین عوامل ایجاد آلودگی صوتی آبرودینامیکی جدایش جریان می باشد. بنابراین شناخت و پیش‌بینی آن می تواند در جهت بهینه سازی ایرفویل های برای کاهش آلودگی صوتی مفید باشد. (Cebeci et al., 1972) برای جریان‌های دوبعدی پایدار و متقارن محوری، نقطه جدایش به عنوان نقطه‌ای تعریف می‌شود که در آن تنش برشی دوباره برابر با صفر است، یعنی:

$$(\partial u / \partial y)_w = 0 \quad (1)$$

ریزش گردابه می‌تواند رخ دهد. ظاهراً ریزش گردابه به حلقه‌های بازخورد آبرودینامیکی برانگیخته شده صوتی متصل است (M. Fink, 1978; Tam, 1974; Wright, 1976). در مراجع ۱۱ و ۱۲، حلقه بازخورد بین TE ایرفویل و یک نقطه "منبع" بالادست روی سطح گرفته می‌شود، جایی که امواج ناپایداری تولمین-اشلیختینگ^۱ از LBL سرچشمه می‌گیرند. طیف نویز حاصل از شبه‌تن‌های مربوط به نرخ ریزش در TE تشکیل شده است. روند کلی وابستگی فرکانسی توسط پاترسون و همکارانش (Paterson et al., 1975) با مقیاس‌بندی بر اساس عدد استروهل^۲ با ضخامت LBL در TE که مقیاس طول مربوطه است، یافت شد. از نظریه صفحه تخت ساده برای تعیین ضخامت‌های لایه مرزی و در مقایسه‌های فرکانسی استفاده شد. استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، علاوه بر این برای زاویه حمله صفر، بروکس^۳ و مارکولینی^۴ (Brooks & Marcolini, 1986) دریافته‌اند که سطوح کلی آلودگی صوتی $LBL VS$ می‌توان نرمال‌سازی کرد به طوری که گذار از آلودگی صوتی $LBL VS$ به آلودگی صوتی $TBL TE$ تابعی منحصر به فرد از عدد رینولدز باشد. هیچ روش پیش‌بینی آلودگی صوتی $LBL VS$ پیشنهاد نشده است، زیرا اکثر مطالعات بر بررسی وابستگی فرکانسی نسبتاً نامنظم شبه‌تون‌های منفرد در تلاش برای توضیح مکانیسم اساسی تأکید کرده‌اند. با این حال، موفقیت‌های مقیاس‌بندی که در بالا در مرجع ۱۴ توضیح داده شد، می‌توانند علیرغم پیچیدگی کلی مکانیسم، راهنمایی‌های مقیاس‌بندی اولیه‌ای را برای توسعه پیش‌بینی‌ها ارائه دهند.

۵-۴- آلودگی صوتی تشکیل گرداب های نوک

منبع آلودگی صوتی نوک با آشفستگی در جریان جدا شده محلی مرتبط با تشکیل گرداب نوک شناسایی شده است (A. George et al., 1980). جریان روی نوک تیغه شامل یک گرداب با هسته متلاطم لزج ضخیم است. مکانیسم تولید آلودگی صوتی، آلودگی صوتی TE ناشی از عبور آشفستگی از روی TE ناحیه نوک بال در نظر گرفته می‌شود. جورج^۵ و چو^۶ (A. R. George & Chou, 1984) یک مدل پیش‌بینی بر اساس

^۵George

^۶Chou

^۷Blake

^۱Toulmin-Schlichting instability waves

^۲Strouhal number

^۳Brooks

^۴Marcolini

حداکثر مقدار H به عنوان نقطه جدایی در نظر گرفته می‌شود. (Cebeci et al., 1972)

در گروه دیگری، روش‌هایی وجود دارند که نیازی به محاسبات دقیق لایه مرزی ندارند. جداسازی توسط فرمول‌های ساده یا معادلات دیفرانسیل ساده‌ای که بسیار سریع و آسان برای اعمال هستند، پیش‌بینی می‌شود. این روش‌ها همچنین از ماهیت مرکب لایه مرزی آشفته استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، استراتفورد لایه مرزی آشفته را به نواحی داخلی و خارجی تقسیم می‌کند و تحلیل خود را بر اساس دو فرض بنا می‌کند: (۱) در ناحیه خارجی، نیروهای فشار باعث کاهش مستقیم هد دینامیکی می‌شوند و (۲) در ناحیه داخلی، نیروی فشار با گرادبان نیروی برشی متعادل می‌شود. روش گلدشمید همچنین لایه مرزی متشکل از نواحی داخلی و خارجی را در نظر می‌گیرد. تحلیل او بر اساس فرضیات شباهت ناحیه داخلی تحت هر گرادبان فشار و یک خط هد کل ثابت در فاصله ثابت از دیواره است. در این مقاله، دقت چندین روش فعلی برای پیش‌بینی نقطه جداسازی لایه مرزی آشفته را گزارش می‌دهیم. به طور خاص، ما یک روش دیفرانسیلی (روش Cebeci Smith یا CS)، یک روش انتگرال مومنوم (روش Head's method) و دو روش ساده - یعنی روش‌های Stratford و Goldschmied - را در نظر می‌گیریم. روش‌های پیش‌بینی جداسازی لایه مرزی آشفته روش Head's روش Head's یک روش انتگرالی است که می‌تواند هم برای محاسبه پارامترهای لایه مرزی و هم برای پیش‌بینی موقعیت جداسازی در جریان‌های آشفته استفاده شود. این روش از معادله انتگرالی مومنوم

$$d\theta/dx + (H + 2)(\theta/u_e)(du_e/dx) = c_f/2 \quad (3)$$

و دو معادله کمکی - یعنی عبارت Ludwig-Tillman

برای ضریب اصطکاک پوسته

$$c_f = 0.246(10)^{-0.678H} R^{-0.268} \theta \quad (4)$$

و یک رابطه ضریب شکل $G(H)$ که از خواص پیوستگی لایه مرزی آشفته به دست می‌آید، استفاده می‌کند. مورد دوم همچنین به یک ضریب شکل دیگر H_1 مربوط می‌شود. روابط پیوستگی و ضریب شکل به شرح زیر است. رابطه پیوستگی

$$(1/u_e)(d/dx)(u_e \theta H_1) = 0.0299(H_1 - 3.0)^{-0.6169} \quad (5)$$

با کامپیوترهای پرسرعت، معادلات لایه مرزی حاکم برای جریان آرام را می‌توان دقیقاً حل کرد و در نتیجه، نقطه جدایش آرام را می‌توان تقریباً به طور دقیق تعیین کرد. علاوه بر این، چندین روش ساده وجود دارد که نیازی به حل معادلات لایه مرزی به شکل دیفرانسیلی آنها ندارند و می‌توانند برای پیش‌بینی نقاط جدایش به طور کاملاً رضایت‌بخشی استفاده شوند. روش انتگرال مومنوم توایتز و روش استراتفورد نمونه‌هایی از این دو روش هستند. مورد دوم حتی نیازی به حل معادلات لایه مرزی آرام ندارد. برای یک توزیع فشار معین مثلاً $C_p(x)$ ، عبارت:

$$C^{1/2} p(Xd C_p/dx) \quad (2)$$

در اطراف جسم محاسبه می‌شود. جدایش لایه‌ای زمانی پیش‌بینی می‌شود که به مقدار 0.102 برسد. از سوی دیگر، پیش‌بینی نقطه جدایش در جریان‌های آشفته کار بسیار دشوارتری است. در نتیجه وجود میانگین زمانی کمیت‌های نوسانی که در معادلات حاکم ظاهر می‌شوند، حل دقیق معادلات لایه مرزی برای جریان‌های آشفته غیرممکن است. در نتیجه، هنگامی که معادلات با فرض مناسبی برای این کمیت‌ها حل می‌شوند، راه‌حل‌ها تجربی هستند و باید با آزمایش بررسی شوند. روش‌های پیش‌بینی فعلی در این زمینه را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. در یک گروه، روش‌هایی وجود دارند که نیاز به حل دقیق معادلات لایه مرزی دارند. این روش‌ها یا از نوع دیفرانسیلی هستند (به این معنی که معادلات دیفرانسیل جزئی حل می‌شوند) یا از نوع انتگرالی هستند (به این معنی که معادلات انتگرال مومنوم یا انتگرال انرژی حل می‌شوند). ارزیابی انتقادی از این روش‌ها را برای جریان‌های آشفته تراکم‌ناپذیر دو بعدی ارائه می‌دهد. در روش‌های دیفرانسیلی، پارامتر مورد استفاده برای پیش‌بینی نقطه جدایش، تنش برشی دیواره صفر است. از سوی دیگر، در روش‌های انتگرالی، معمولاً از ضریب شکل $H = \delta^*/\theta$ برای تعیین محل نقطه جدایی استفاده می‌شود. در روش‌های انتگرالی، با نزدیک شدن جریان به جدایی، مقدار H افزایش می‌یابد. فرض می‌شود که جدایی جریان زمانی رخ می‌دهد که H به مقداری بین 1.8 تا 2.4 برسد. با این حال، در برخی موارد، مقدار H در نزدیکی جدایی به سرعت افزایش می‌یابد و سپس شروع به کاهش می‌کند. سپس، نقطه مربوط به

عنوان $u_m(x_m - \hat{x})/v$ در نظر می‌گیریم. که $x_m - \hat{x}$ توسط داده شده است:

$$x_m - \hat{x} = 58 \frac{v}{u_m} \left[\frac{u_{tr}}{v} \int_0^{x_{tr}} \left(\frac{u_e}{u_m} \right)^5 dx \right]^{3/5} + \int_{x_{tr}}^{x_m} \left(\frac{u_e}{u_m} \right)^4 dx \quad (8)$$

با عبارتی که توسط معادله (8) داده شده است، می‌توان از معادله (7) برای پیش‌بینی نقطه جداسازی در جریان‌های آشفته استفاده کرد. با این حال، برای انجام این کار، لازم است مقداری برای k در نظر گرفته شود که طبق نظریه طول اختلاط، 0.4 باشد. این بدان معناست که سمت راست معادله (7) باید 0.5 باشد، اما مقایسه با آزمایش، طبق گفته استراتفورد، مقدار کمتری از $F(x)$ را در حدود 0.35 و 0.40 نشان می‌دهد. برای یک جریان لایه مرزی آشفته معمولی با گرادیان فشار نامطلوب، مشخص می‌شود که $F(x)$ با نزدیک شدن به جدایش افزایش می‌یابد و پس از جدایش کاهش می‌یابد. به همین دلیل، استراتفورد پس از اعمال روش خود بر روی چندین جریان با جدایش آشفته، مشاهده کرد که اگر حداکثر مقدار $F(x)$ (الف) بیشتر از 0.40 باشد، جدایش زمانی پیش‌بینی می‌شود که $F(x) = 0.40$ باشد؛ (ب) بین 0.35 و 0.40 باشد، جدایش در حداکثر مقدار رخ می‌دهد؛ (ج) کمتر از 0.35 باشد، جدایش رخ نمی‌دهد. روش گلداشمید معیار جداسازی گلداشمید، مانند روش استراتفورد، مبتنی بر وجود نواحی داخلی و خارجی در لایه مرزی آشفته است. گلداشمید فرض می‌کند که در ناحیه داخلی خطی با فاصله ثابت y_c از دیواره وجود دارد، با هد کل ثابت h_c به طوری که

$$h_c = p + \frac{1}{2} \rho u_c^2 \quad (9)$$

علاوه بر این، از آنجایی که خط در ناحیه‌ای است که قانون دیواره در آن اعمال می‌شود، او فرض می‌کند که مستقل از توزیع فشار است و لبه بیرونی ناحیه داخلی را در شروع گرادیان فشار معکوس به عنوان نقطه شروع خط انتخاب می‌کند. او فرض می‌کند که لبه بیرونی ناحیه داخلی تقریباً با $u/u^* = 20$ و $\gamma u^*/v = 500$ مشخص می‌شود. سپس هد کل در شروع گرادیان فشار معکوس را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$H_1 = G(H) \text{ که در آن } G(H) = \begin{cases} 0.8234(H - 1.1)^{-1.287} & H \\ 1.5501(H - 0.6778)^{-3.064} + 3.3 & H \end{cases} \quad (6)$$

این روش، مانند اکثر روش‌های انتگرالی، از ضریب شکل به عنوان معیار جداسازی استفاده می‌کند. اگرچه نمی‌توان مقدار دقیقی برای H مربوط به جداسازی ارائه داد، اما وقتی H بین 1.8 و 2.4 باشد، فرض می‌شود که جداسازی وجود دارد. تفاوت بین حد پایین و بالای H تفاوت بسیار کمی در تعیین محل نقطه جداسازی ایجاد می‌کند، زیرا نزدیک به جداسازی، ضریب شکل به سرعت افزایش می‌یابد. روش استراتفورد روش استراتفورد برای جریان‌های آشفته، روشی ساده است که فقط از توزیع فشار برای پیش‌بینی جداسازی لایه مرزی استفاده می‌کند. این روش نیازی به محاسبات دقیق لایه مرزی ندارد. در حال حاضر، چندین روش بر اساس ایده‌های مطرح شده در این روش وجود دارد. با این حال، دقت این روش‌ها مشابه روش استراتفورد است و بنابراین این روش‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند. به تفصیل در این گزارش.

روش استراتفورد بر اساس ایده تقسیم لایه مرزی به بخش‌های بیرونی و درونی است. این روش از اصولی پیروی می‌کند که با موفقیت برای جریان‌های آرام اتخاذ شده‌اند. طبق این روش، جداسازی برای لایه‌های مرزی آشفته از عبارت زیر پیش‌بینی می‌شود.

$$F(x) \equiv C_p(x dC_p/dx)^{1/2} (10^{-6} R_x)^{-1/10} = 1.25k \quad (7)$$

عبارت فوق برای جریانی با گرادیان فشار نامطلوب که از لبه جلویی شروع می‌شود و همچنین جریان کاملاً آشفته در همه جا اعمال می‌شود. هنگامی که ناحیه‌ای از جریان آرام یا ناحیه‌ای از جریان آشفته با گرادیان فشار مطلوب وجود دارد، استراتفورد فرض می‌کند که در نقطه فشار حداقل $x = x_m$ ، پروفیل سرعت تقریباً مشابه یک لایه مرزی آشفته صفحه تخت است که از مبدا کاذب $x = \hat{x}$ شروع می‌شود. در این حالت، x را با $(x - \hat{x})$ در (7) جایگزین می‌کنیم و مقدار R_x را به

زیست تقلید به عنوان مطالعه ساختار و عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی به عنوان مدل‌هایی برای طراحی و مهندسی مواد و ماشین‌آلات تعریف می‌شود. در چارچوب این مطالعه و دینامیک سیالات، پرواز بدون صدای جغد برای اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط گراهام^۲ (Graham, 1934)، در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط کروگر^۳ (Kroeger et al., 1972) به عنوان بخشی از برنامه‌ای که طرح‌های جدیدی را برای هواپیماهای بی‌صداتر بررسی می‌کرد، لیلی^۴ (Lilley, 1998) و همچنین اخیراً توسط باخمن^۵ (Bachmann et al., 2007) و کلان^۶ (Klan et al., 2009) مورد بررسی قرار گرفت. یک مطالعه عمیق از ساختار بال نشان داد که در طول میلیون‌ها سال تکامل، بال جغد شامل لبه‌های حمله موج‌دار و یا دندان‌دار و لبه‌های فرار حاشیه‌ای ایجاد کرده است که صدایی زیر ۲ کیلوهرتز تولید می‌کنند، در حالی که سیستم شنوایی تیز طعمه‌های آنها معمولاً در محدوده ۲ تا ۲۰ کیلوهرتز است. باخمن (Bachmann et al., 2007) در تصویر شماره ۲ تصویر دقیقی از ساختار بال نشان داده شده ارائه داد که در آن ویژگی‌های لبه حمله و لبه فرار برجسته شده‌اند. کروگر و لیلی همچنین نشان دادند که دندان‌های لبه جلویی بال جغد، جدایی جریان را که معمولاً در طول یک مسیر دید شیب‌دار رو به پایین ۲۴ درجه در عدد رینولدز پایین حدود ۱:۵ ± ۱۰۵ رخ می‌دهد، کاملاً کنترل می‌کنند. در عوض، گردابه‌ها از هر دندان جدا می‌شوند و لایه مرزی متصل باقی می‌ماند، حتی زمانی که دینامیک بال به حالت واماندگی نزدیک می‌شود، بنابراین کاهش نویز تا حدود ۲۰ دسی‌بل را فراهم می‌کند. هنگامی که ساختار شانه لبه جلویی برداشته شد، پرواز جغد ناپایدار و به اندازه هر پرنده دیگری پر سر و صدا شد. علاوه بر این، حاشیه‌های لبه انتهایی بال، اختلاط نرمی از لایه مرزی بالایی و پایینی ایجاد می‌کنند و پراکندگی را توسط ناپیوستگی لبه کاهش می‌دهند. لیلی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های نویز انجام شده روی پرنده‌ای با اندازه و جرم مشابه، کاهش حدود ۶-۷ دسی‌بل را فقط به دلیل حاشیه‌های لبه انتهایی مرتبط دانست. لیلی همچنین انتشار نویز بسیار کم در فرکانس‌های بالای ۲ کیلوهرتز را به جذب انرژی لایه مرزی توسط سطح همگرا که بال بالایی و پنجه‌های جغد را پوشانده است، نسبت می‌دهد، که

$$h_m = p_m + \frac{1}{2}(20u_m^*)^2 \quad (10)$$

سپس از معادلات (۹) و (۱۰)

$$P_m - P + \frac{1}{2}\rho[400(\tau_w/\rho)] = \frac{1}{2}\rho u_c^2 \quad (11)$$

با در نظر گرفتن $u_m^* = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ و حل دو طرف معادله با u_m^2 :

$$P_m - P + \frac{1}{2}\rho[400(\tau_w/\rho)] = \frac{1}{2}\rho u_c^2 \quad (12)$$

با تعریف پارامترهای زیر:

$$c_{fm} = \tau_w / \frac{1}{2}\rho u_m^2$$

و

$$c_{fm} = \tau_w / \frac{1}{2}\rho u_m^2$$

معادله ۱۲ به شکل زیر تغییر میکند:

$$c_{fm} = \tau_w / \frac{1}{2}\rho u_m^2 \quad (13)$$

او همچنین نشان می‌دهد که در جدایش، عبارت $u_c/u_c = 1/3.45[c_{fm}/2]^{1/2}$ آنقدر کوچک است که می‌توان از آن صرف نظر کرد. سپس معادله (۱۳) به (۱۴) کاهش می‌یابد و معیار جداسازی برای روش گلداسمید می‌شود. (Cebeci et al., 1972)

$$C_{psep} = 200c_{fm} \quad (14)$$

۷- بهینه سازی ایرفویل ها در جهت

کاهش آلودگی صوتی

زیست تقلید^۱ و طراحی لبه‌های فرار جدید و مطالعه پدیده‌هایی که در طبیعت رخ می‌دهند، اغلب دانشمندان را به ایده‌های جدید و مهندسی فناوری‌های جدید سوق داده است.

Lilley^۴
Bachmann^۵
Klan^۶

Biomimetics^۱
Graham^۲
Kroeger^۳

شد و هیچ اثر قابل توجهی بیشتر از ۲ دسی بل گزارش نشده است، به جز عدم هم‌ترازی دندان‌های اره‌ای با جهت جریان ۱۵ درجه که در آن نویز روی صفحه *at* در فرکانس‌های بالا افزایش یافته است (تصویر شماره ۳).

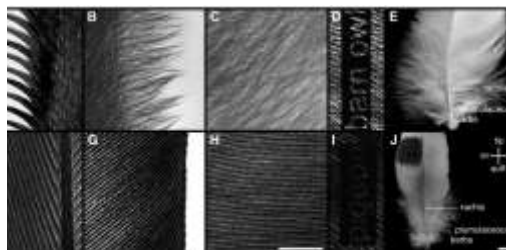
یک مطالعه گسترده و دقیق در مورد کاهش نویز در توربین‌های بادی به عنوان بخشی از پروژه *STENO* (نویز لبه انتهایی دندان‌دار) انجام شد که هدف آن بررسی انتقال عملکرد کاهش نویز به دست آمده در یک ایرفویل دوبعدی (Dassen et al., 1996) در یک تونل باد به یک توربین بادی سه‌بعدی در مقیاس کامل بود. دندان‌ها به لبه انتهایی پره توربین بادی اعمال شدند تا تأثیر طول، موقعیت و جهت دندان‌ها بر کاهش نویز تعیین شود. این مطالعه همچنین شامل آزمایش‌های در مقیاس کوچک بود که در آن مشخص شد دندان‌ها باعث کاهش کلی ۲ دسی بل در فرکانس‌های پایین می‌شوند در حالی که نویز را در فرکانس‌های بالا و در زوایای حمله بالا افزایش می‌دهند. در سال ۱۹۹۹، پارچن و همکارانش (Parchen et al., 1999) آزمایش‌هایی را با استفاده از لبه‌های انتهایی دندان‌دار انجام دادند تا نتایج را با نظریه هاو^۵ (Howe, 1991a, 1991b) مقایسه کنند. دندان‌ها هم در مقیاس تونل باد و هم در مقیاس کامل توربین‌های بادی اعمال شدند. کاهش نویز پهنای باند حدود ۶ دسی بل حاصل شد. این اندازه‌گیری تأیید کرد که مدل نظری هاو، کاهش آلودگی صوتی بسیار بیشتری را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر این، گزارش شده است که در اندازه‌گیری‌های مقیاس کامل، افزایش نویز برای دندان‌های ناهم‌تراز نسبت به جهت جت مشاهده شده است.

اورلمنز و همکارانش (Oerlemans et al., 2009) استفاده از دندان‌ها و بهینه‌سازی شکل ایرفویل را برای کاهش نویز لبه فرار بررسی کردند. آزمایش‌هایی روی یک توربین بادی سه پره با قطر ۹۴

متر و در یک تونل باد جت باز انجام شد. یک مدل ایرفویل

که طول موج‌های آن تنها کمی بزرگتر از مقیاس‌های طول کولموگوروف^۱ است.

با توجه به رشد صنعت هواپیما در اوایل دهه ۱۹۹۰ و توسعه مزارع توربین بادی پس از آن، محققان با استفاده از



تصویر (۲) : پر پرندهگان با لبه فرار شانه ای

روش‌های غیرفعال مانند دندان‌ها، برس‌ها و لبه‌های فرار متخلخل، به حل مشکل آلودگی صوتی لبه فرار ایرفویل پرداختند. همانطور که به عنوان مثال توسط داسن^۲ و همکاران (Dassen et al., 1996) در سال ۱۹۹۶ و پارچن^۳ و همکاران (Parchen et al., 1999) در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است، لبه‌های دندان‌دار به عنوان وسیله‌ای برای کاهش نویز خود لبه فرار در آزمایش‌های تونل باد ایرفویل و برای کاربردهای توربین بادی، در مقاله اورلمنز^۴ و همکاران (Oerlemans et al., 2009)، استفاده شده‌اند. همه این مطالعات به طور مداوم کاهش نویز تا ۵ دسی بل را در باندهای فرکانسی بزرگ نشان داده‌اند، اما افزایش نویز در فرکانس‌های بالاتر را نشان داده‌اند. داسن و همکاران (Dassen et al., 1996) به صورت تجربی کاهش نویز لبه فرار ایرفویل را با استفاده از دندان‌ها بررسی کردند. هشت ایرفویل و شش صفحه در طول وتر ۲۵۰ میلی‌متر با هندسه‌های مختلف آزمایش شدند.

اگرچه هیچ طیف آلودگی صوتی ارائه نشد، آزمایش‌ها نشان داد که صفحات دندان‌دار منجر به کاهش آلودگی صوتی تا ۱۰ دسی بل از ۱ تا ۶ کیلوهرتز می‌شوند، در حالی که ایرفویل‌های دندان‌دار کاهش تا ۸ دسی بل را نشان دادند. پیاده‌سازی‌های مختلف دندان‌ها در انتهای صفحه، همانطور که در شکل ۱.۲ نشان داده شده است، روی صفحات *at* آزمایش

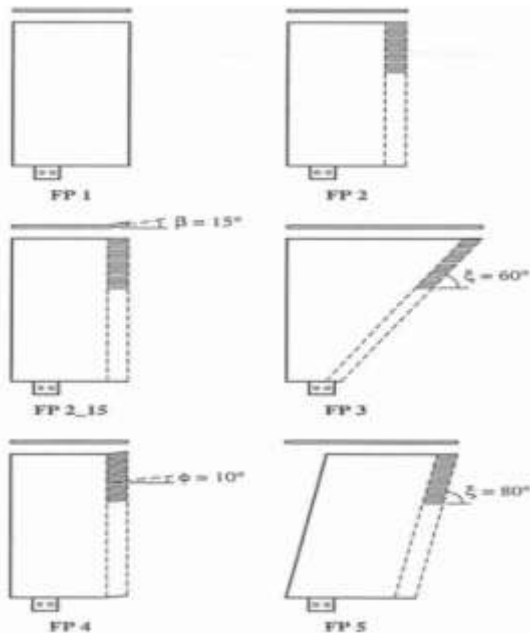
Oerlemans^۴

Howe^۵

Kolmogorov length scales^۱

Dassen^۲

Parchen^۳



تصویر (۳): ایرفویل با لبه شانه ای و فواصل مختلف بین آن

علاوه بر این، قطر برس و فاصله جداسازی بین برس‌ها باید تا حد امکان به مقیاس‌های داخلی در لایه مرزی آشفته نزدیک باشد، معمولاً کمتر از ۰:۱ میلی‌متر، فاینز^۲ و همکارانش (Finez et al., 2010) همچنین یک مطالعه تجربی مشابه را در تونل باد جت باز *ECL* با استفاده از یک ردیف برس لبه انتهایی انجام دادند. علاوه بر کاهش قابل توجه پهنای باند تا ۳ دسی‌بل، اندازه‌گیری‌های همبستگی فضا-زمان سرعت در دنباله در پشت برس‌ها انجام شد و کاهش تا ۲۵٪ از طول همبستگی در جهت دهانه در ناحیه لبه انتهایی را نشان داد. همانطور که در تصویر شماره ۳ نشان داده شده است، جونز^۳ و همکارانش (Jones & Sandberg, 2010) شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم جریان اطراف یک ایرفویل *NACA0012* را که به نوبت با یک لبه مستقیم، دندان‌های کوتاه با دامنه مشابه ضخامت لایه مرزی و دندان‌های بلند با دامنه حدود ۲، در عدد رینولدز $Rec = 50$ و $M = 0.4$ تنظیم شده بود، انجام دادند. کاهش نویز پهنای باند بین ۶ تا ۱۰ دسی‌بل به دست آمد و مشخص شد که کاهش نویز برای دندان‌های بلند بیشتر است و در پهنای باند فرکانسی بزرگتری پخش می‌شود. فقط برای دندان‌های کوتاه‌تر،

NACA-64418 به دلیل کاربرد رایج آن در توربین‌های بادی مدرن به عنوان پره مرجع انتخاب شد. یک پره برای آیرودینامیک، یک پره برای کاهش نویز لبه فرار با دندان‌هایی در امتداد دهانه بهینه شد و یک پره بدون تغییر باقی ماند و به عنوان پره مرجع استفاده شد. ایرفویل بهینه شده، کاهش آلودگی صوتی کلی لبه فرار ۳.۲ دسی‌بل را نشان داد و حداکثر کاهش آلودگی صوتی ۵ دسی‌بل را تا ۱ کیلوهرتز ارائه داد. دندان‌ها کاهش بیشتری در حدود ۲-۳ دسی‌بل را نشان دادند. علیرغم کاهش نویز در فرکانس‌های پایین، افزایش قابل توجه نویز فرکانس بالا نیز گزارش شد و به عدم هم‌ترازی دندان‌ها با جریان نسبت داده شد. در سال ۲۰۰۴، یک مطالعه تجربی در مورد لبه‌های انتهایی دندان‌دار روی یک ایرفویل توسط هر^۱ (Herr & Dobrzynski, 2005) انجام شد. او پیکربندی‌های مختلفی از برس‌ها را در لبه انتهایی ایرفویل معرفی کرد. قطرهای مختلف برس، فاصله جدایی بین برس‌ها و طول برس‌ها در آزمایش‌های تونل باد مورد آزمایش قرار گرفت. کاهش نویز بین ۲ تا ۱۰ دسی‌بل در باندهای فرکانسی بزرگ رخ داد، به ویژه به دلیل سرکوب ریزش گردابه از لبه انتهایی خط پایه صاف. بیشترین کاهش آلودگی صوتی با ضخیم‌ترین برس لبه انتهایی حاصل شد. هر پیشنهاد می‌کند که این کاهش ممکن است ناشی از میرایی ویسکوز سرعت‌های آشفته ناپایدار در ناحیه برس باشد. این روش لبه انتهایی مشابه حاشیه‌های متصل به بال لبه انتهایی جغد است که اختلاط نرمی بین فشارهای لایه مرزی از هر دو طرف فشار و مکش ایرفویل ایجاد می‌کند. هر (Finez et al., 2010) همچنین اندازه‌گیری‌هایی را گزارش کرد که با استفاده از یک ردیف برس و لبه‌های انتهایی از نوع شکاف انجام شده بود، که در آن دو پارامتر حیاتی برای دستیابی به کاهش آلودگی صوتی معرفی شدند. اول، طول برس‌ها باید حداقل به اندازه ضخامت مرز یا بزرگتر باشد.

^۳Jones

^۱Herr

^۲Finez

بررسی عوامل موثر بر آلودگی صوتی آبرودینامیکی در راستای بهبود ایمنی شهری

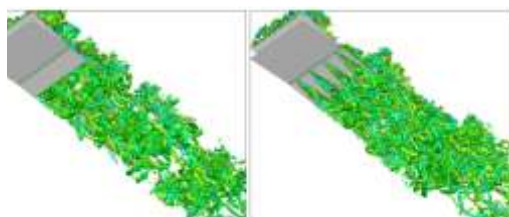
بیماری‌های قلبی عروقی، کاهش شنوایی، اختلالات خواب و اختلالات شناختی مرتبط است. علاوه بر این، آلودگی صوتی استرس، اضطراب و افسردگی را تشدید می‌کند و رشد شناختی را در کودکان مختل می‌کند. هزینه‌های اقتصادی آلودگی صوتی قابل توجه است و شامل هزینه‌های مراقبت‌های بهداشتی و کاهش بهره‌وری می‌شود، در عین حال بر انسجام جامعه و کیفیت زندگی نیز تأثیر منفی می‌گذارد. این امر بر نیاز فوری به استراتژی‌های مؤثر مدیریت سر و صدا، از جمله اجرای مقررات، بهبود برنامه‌ریزی شهری و افزایش آگاهی عمومی، تأکید می‌کند. برای پرداختن بهتر به این چالش‌ها، تحقیقات بیشتر ضروری است. مطالعات بیشتری برای درک اثرات بلندمدت آلودگی صوتی بر سلامت، اصلاح فناوری‌های کاهش سر و صدا و بررسی تأثیرات آن بر جمعیت‌های خاص مورد نیاز است. تحقیقات میان‌رشته‌ای در توسعه راه‌حل‌های جامع و بهبود استراتژی‌های کنترل سر و صدا بسیار مهم خواهد بود.

پیشرفت‌های قابل توجهی در سال‌های اخیر حاصل شده است که به درک بهتر فیزیک جریان، توسعه مدل‌های آبرودینامیکی دقیق‌تر و کارآمدتر، ظهور فناوری‌های شبیه‌سازی نوآورانه و ظهور کاربردهای مهندسی چند رشته‌ای کمک کرده است. با وجود ماهیت فراگیر این بررسی، موضوعات خاصی پوشش داده نشده‌اند، به ویژه کاربردهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در مطالعات تجربی آلودگی صوتی، می‌تواند در کوتاه‌مدت باعث ناراحتی جامعه و کمبود خواب و در درازمدت باعث بیماری‌های قلبی-عروقی و مشکلات سلامت روان شود. پیشرفت‌های تکنولوژیکی به کاهش آلودگی صوتی کمک می‌کند، اما تقاضای رو به رشد ترافیک هوایی به این معنی است که باید تلاش بیشتری از سوی همه ذینفعان درگیر برای کاهش سطح سر و صدا در اطراف فرودگاه‌ها با استفاده از روش‌های محاسباتی نوین انجام شود.

افرادی که در مجاورت فرودگاه‌ها زندگی می‌کنند بیشترین آسیب را از سر و صدای هواپیما می‌بینند.

از طرف دیگر با توجه به رشد روز افزون توریسم‌های بادی در جهت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و گسترش این توریسم‌ها از خارج مناطق شهری به سمت بافت شهری و تأثیر این مزارع در افزایش آلودگی صوتی در محیط‌های شهری،

افزایش نویز در فرکانس‌های بالا مشاهده شد. جهت‌گیری نویز TE تحت تأثیر حضور TE دنداندار قرار نگرفت. مشخص شد که خواص لایه مرزی تحت تأثیر کمی از وجود دندان‌ها قرار می‌گیرند و گزارش شده است که تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در پشت دندان‌ها رخ می‌دهد و باعث اختلاط سریع‌تر آشفتگی در دنباله ایرفویل می‌شود.



تصویر (۴): تأثیر فاصله بین شانه‌ها بر جریان

گایگر^۱ (Geiger, 2004) تغییرات در بارگذاری ثابت پره و در دنباله متوسط و آشفته پشت دو لبه انتهایی دنداندار با دامنه $h = 12:7mm$ و $h = 25:4mm$ را بررسی کرده است. بارگذاری ثابت، که با استفاده از شیرهای فشار استاتیک توزیع شده روی سطح ایرفویل اندازه‌گیری شد، تفاوت‌هایی کمتر از ۹٪ در کل بدنه ایرفویل نشان داد و تقریباً هیچ تغییری در نزدیکی لبه انتهایی ایرفویل در مقایسه با یک TE مستقیم وجود نداشت.

همانطور که در این پژوهش اشاره شد روش‌هایی در جهت کاهش آلودگی صوتی ایجاد شده در ایرفویل‌ها معرفی شدند. این روش علاوه بر کاربرد در ایرفویل‌های مورد استفاده در بال هواپیما برای موارد استفاده دیگر ایرفویل مانند تیغه‌های توربین‌های بادی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۸- نتیجه‌گیری

آلودگی صوتی بر سلامت جسمی و روانی تأثیر منفی می‌گذارد و عواقب قابل توجهی برای گروه‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان و سالمندان دارد. سطح بالای سر و صدا با افزایش خطر

^۱Geiger

بدون نیاز به استفاده از روابط تحلیل عددی و به صورت دقیق تر، سیستمی را در جهت تولید ایرفویل هایی بهینه در راستای کاهش آلودگی صوتی تولید نمود که در حال حاضر هدف این مقاله نبوده و در مقالات آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بهینه سازی توربین ها در جهت کاهش آلودگی صوتی و حفظ سلامت جامعه از اهمیت بسزایی برخوردار می باشد. با شناخت عوامل موثر در تولید آلودگی صوتی مانند جدایش جریان و ایجاد تغییراتی در ایرفویل مانند اضافه کردن المان های هندسی به ایرفویل به کمک روش های موجود مانند استفاده از روابط تحلیل عددی برای پیش بینی و محاسبه این عوامل می تواند به ساخت ایرفویل هایی با میزان آلودگی صوتی تولیدی کمتر دست پیدا کرد که این امر موجب کاهش صدمات زیست محیطی عواملی مانند هواپیما ها و مزارع توربین بادی می شود. امروزه با پیدایش راهکار هایی نظیر الگوریتم های هوش مصنوعی می توان با صرف هزینه پایین تر و در زمان کمتر و

۹- سیاهه‌ی نمادها

جدول ۱- سیاهه‌ی نمادها

Symbol	Discription
h	<i>Total head</i>
c_f	<i>local skin friction coefficient</i>
u^*	<i>friction velocity</i>
C_p	<i>pressure coefficient</i>
θ	<i>momentum thickness</i>
R_x	<i>local Reynolds number</i>
τ	<i>Shear stress</i>
ρ	<i>density</i>
v	<i>Kinematic velocity</i>

- [1] Bachmann, T., Klän, S., Baumgartner, W., Klaas, M., Schröder, W., & Wagner, H. (2007). Morphometric characterisation of wing feathers of the barn owl *Tyto alba pratincola* and the pigeon *Columba livia*. *Frontiers in Zoology*, 4(1), 23.
- [2] Bitarafan, A., Hossieni, S. B., Jalali, G. R., Yazdanfar, S. A., & Norouzian, S. (2022). Assessment of Urban Green Space Arrangements to Reduce Explosion Impacts on Buildings. *Safe City*, 5(1), 37–49.
- [3] Bitarafan, M., Hosseini, K. A., & Zolfani, S. H. (2023). Identification and assessment of man-made threats to cities using integrated Grey BWM-Grey MARCOS method. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(2), 581–599.
- [4] Blake, W. K. (1984). *Aero-Hydroacoustics for Ships. Volume 2*.
- [5] Brooks, T. F., & Hodgson, T. (1981). Trailing edge noise prediction from measured surface pressures. *Journal of Sound and Vibration*, 78(1), 69–117.
- [6] Brooks, T. F., & Marcolini, M. A. (1986). Airfoil tip vortex formation noise. *AIAA Journal*, 24(2), 246–252.
- [7] Brooks, T. F., & Schlinker, R. H. (1983). Progress in rotor broadband noise research. *Vertica*, 7(4), 287–307.
- [8] Casalino, D., van der Velden, W. C., & Romani, G. (2019). *Community noise of urban air transportation vehicles*. 1834.
- [9] Cebeci, T., Mosinskis, G., & SMITH, A. M. (1972). Calculation of separation points in incompressible turbulent flows. *Journal of Aircraft*, 9(9), 618–624.
- [10] Chou, S.-T., & George, A. (1984). Effect of angle of attack on rotor trailing-edge noise. *AIAA Journal*, 22(12), 1821–1823.
- [11] Dassen, T., Parchen, R., Bruggeman, J., & Hagg, F. (1996). *Results of a wind tunnel study on the reduction of airfoil self-noise by the application of serrated blade trailing edges*.
- [12] Finez, A., Jacob, M., Jondeau, E., & Roger, M. (2010). *Broadband noise reduction with trailing*

- edge brushes*. 3980.
- [13] Fink, M. (1978). Fine structure of airfoil tone frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(S1), S22–S22.
- [14] Fink, M. R., & Bailey, D. A. (1980). *Airframe noise reduction studies and clean-airframe noise investigation*.
- [15] Gao, Z., Yu, Y., Wei, Q., Topcu, U., & Clarke, J.-P. (2024). Noise-aware and equitable urban air traffic management: An optimization approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 165, 104740.
- [16] Geiger, D. H. (2004). *Comparative analysis of serrated trailing edge designs on idealized aircraft engine fan blades for noise reduction*.
- [17] George, A., Najjar, F., & Kim, Y. (1980). *Noise due to tip vortex formation on lifting rotors*. 1010.
- [18] George, A. R., & Chou, S.-T. (1984). *Broadband rotor noise analysis*. NASA.
- [19] Graham, R. (1934). The silent flight of owls. *The Aeronautical Journal*, 38(286), 837–843.
- [20] Herr, M., & Dobrzynski, W. (2005). Experimental Investigations in Low-Noise Trailing Edge Design. *AIAA Journal*, 43(6), 1167–1175.
- [21] Howe, M. S. (1991a). Aerodynamic noise of a serrated trailing edge. *Journal of Fluids and Structures*, 5(1), 33–45.
- [22] Howe, M. S. (1991b). Noise produced by a sawtooth trailing edge. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(1), 482–487.
- [23] Jones, L., & Sandberg, R. (2010). *Numerical investigation of airfoil self-noise reduction by addition of trailing-edge serrations*. 3703.
- [24] Klän, S., Bachmann, T., Klaas, M., Wagner, H., & Schröder, W. (2009). Experimental analysis of the flow field over a novel owl based airfoil. *Experiments in Fluids*, 46(5), 975–989.
- [25] Kroeger, R. A., Grushka, H. D., & Helvey, T. C. (1972). *Low speed aerodynamics for ultra-quiet flight*.
- [26] Lilley, G. (1998). *A study of the silent flight of the owl*. 2340.
- [27] Miedema, H. M. E., Passchier-Vermeer, W., Vos, H., & en Gezondheid, T. P. (2002). *Elements*

- for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance*. TNO Inro.
- [28] Nakhaei, J., Bitarafan, M., & Lale Arefi, S. (2015). Choosing the best urban tunnels as safe space in crisis using AHP method: A case study in Iran. *Journal of Architecture and Urbanism*, 39(2), 149–160.
- [29] Oerlemans, S., Fisher, M., Maeder, T., & Kögler, K. (2009). Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations. *AIAA Journal*, 47(6), 1470–1481.
- [30] Parchen, R., Hoffmans, W., Gordner, A., & Braun, K. (1999). *Reduction of airfoil self-noise at low Mach number with a serrated trailing edge*. 3433–3440.
- [31] Passchier-Vermeer, W., Vos, H., Steenbekkers, J., Van der Ploeg, F., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2002). Sleep disturbance and aircraft noise exposure. *Exposure-Effect Relationships*. TNO-Rapport.
- [32] Paterson, R. W., Amiet, R. K., & Munch, C. L. (1975). Isolated airfoil-tip vortex interaction noise. *Journal of Aircraft*, 12(1), 34–40.
- [33] Schlinker, R., & Amiet, R. (1981). *Helicopter rotor trailing edge noise*. 2001.
- [34] Tam, C. K. (1974). Discrete tones of isolated airfoils. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55(6), 1173–1177.
- [35] World Health Organization. (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. In *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*.
- [36] Wright, S. (1976). The acoustic spectrum of axial flow machines. *Journal of Sound and Vibration*, 45(2), 165–223.
- [37] Zolfani, S. H., Esfahani, M. H., Bitarafan, M., Zavadskas, E. K., & Arefi, S. L. (2013). Developing a new hybrid MCDM method for selection of the optimal alternative of mechanical longitudinal ventilation of tunnel pollutants during automobile accidents. *Transport*, 28(1), 89–96.