

مطالعه‌ی تجربی آکوستیک توربین‌های بادی محور افقی کوچک با تکیه بر رویکردهای دینامیک

سیالات محاسباتی و شبکه عصبی

مهیار صادقی ملک آبادی^۱، علیرضا داوری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، گروه هوافضا، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

۲. دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه هوافضا، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

چکیده

عملکرد آیرودینامیکی و انتشار نویز صوتی دو موضوع چالش برانگیز در طراحی مدرن توربین بادی هستند. همچنین، تحلیل آن نیازمند محاسبات خیلی عظیمی است. این مقاله یک رویکرد جدید برای رفع این مشکل با تکیه بر ترکیب روش‌های شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک چندهدفه و دینامیک سیالات محاسباتی ارائه می‌کند. در وهله‌ی اول، بهینه‌سازی آیرودینامیکی و آیروآکوستیکی یک ایرفویل از سری خانواده‌ی S با استفاده از هوش مصنوعی و دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. مقایسه بین نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی، دقت پیش‌بینی شبکه عصبی را تأیید کرده است. همچنین، این روش می‌تواند زمان بهینه‌سازی کلی را تا حدود ۱/۲۰ با استفاده از همان سخت‌افزار کاهش دهد. در بهینه‌سازی چند هدفه هر دو شکل ایرفویل و دندانه‌ها، ۵ تا ۷ درصد بهبود عملکرد آیرودینامیکی و به طور همزمان ۱ تا ۴ درصد کاهش نویز در مقایسه با ایرفویل معیار نشان داده شده است. در گام دوم، مطالعه‌ی تجربی به منظور پیاده‌سازی هندسه‌های مستخرج بهینه‌شده در گام نخست بر روی توربین‌های بادی کوچک صورت گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه اصلی، سطح نویز در حوزه فرکانس کاهش یافته و منتج به کاهش حدود ۱۰ دسی‌بلی (حدود ۱۷ درصد) در سطح فشار صدای کلی شده است.

کلیدواژه‌ها: توربین باد، آیروآکوستیک، بهینه‌سازی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش گردابه‌های بزرگ.

Experimental acoustic study of small horizontal axis wind turbines based on computational fluid dynamics and artificial intelligence approaches

Mahyar Sadeghimalekabadi

Department of Aerospace Engineering Science and Research Branch Islamic Azad University

sadeghi@srbiau.ac.ir Email: mahyar

Ali R. Davari*

Department of Aerospace Engineering Science and Research Branch Islamic Azad University

*Email: * Corresponding Author, ardavari@srbiau.ac.ir*

Abstract

In modern wind turbine design, two significant challenges arise: achieving optimal aerodynamic performance while minimizing acoustic noise emissions. However, the extensive numerical computations required for accurate evaluation often hinder the implementation of multi-objective optimization strategies. This paper introduces an innovative approach to address this issue, leveraging a combination of neural network-based reduced order modeling and a multi-objective genetic algorithm. This methodology aims to optimize the aerodynamic and aero-acoustic characteristics of an S^{xx}-series airfoil, including the trailing edge serration geometry. Utilizing Class-Shape Transformation to parameterize various serrated airfoil geometries, the method minimizes the need for costly computational fluid dynamics (CFD) simulations. Instead, a feed-forward neural network (NN) is trained with a minimal dataset to predict airfoil behavior within a specified range. Comparisons between CFD results and NN predictions validate the accuracy of the neural network. Significantly, this approach substantially reduces optimization time by approximately 95%, maintaining high levels of accuracy. In conducting multi-objective optimization for both the airfoil and serration shapes, the study demonstrates notable improvements: a 5 to 7% enhancement in aerodynamic performance alongside a simultaneous 1-4% reduction in noise levels. Then in the second step, experimental methodology is employed to investigate the aeroacoustic attributes of a small horizontal axis wind turbine with optimized blades. Conducted within a semi-anechoic chamber, this investigation meticulously positions both original and optimized geometry models to measure sound pressure levels (SPL) across various rotational speeds and positions. The results reveal subtle enhancements in aerodynamic performance with the optimized serrated blade configuration, accompanied by a remarkable reduction in noise levels across the frequency spectrum, culminating in an impressive

overall sound pressure reduction of approximately ۱۰ dB. Additionally, intriguing observations highlight the impact of turbine rotational speed on noise production, particularly in the downstream domain. Notably, the noise emission reduction for the serrated optimized blade is more dispersed in the plane of rotation compared to the original blade, which exhibited nearly uniform noise distribution. Overall, these findings offer valuable insights into the intricate interplay between aerodynamics and aeroacoustics in the context of small wind turbines with optimized blades.

Keywords: Wind turbine, aeroacoustics, optimization, computational fluid dynamics, large eddies simulation.

تمهیداتی برای کاهش نویز لبه فرار در نظر گرفته شده است که یکی از این راهکارها، قرار دادن دندان در لبه فرار است. دندانهای لبه فرار زاویه بین مسیر گردابه‌ها را کاهش می‌دهد و از پراکندگی صدا جلوگیری می‌کند [۶].

داوری و همکاران [۷] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ایرفویل ناکا ۴۴۱۲ انجام دادند. نتایج آن‌ها افزایش نیروی برآ را به همراه داشت که این بهینه‌سازی در نسل ۱۰۰ ایجاد گردید. رام و همکاران [۸] بهینه‌سازی را روی توربین‌های بادی کوچک برای دستیابی به عدم حساسیت نوک ایرفویل به زبری توسط الگوریتم ژنتیک و به کمک نرم‌افزار ایکس‌فویل انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نقطه‌ی گذار از جریان آرام به آشسته روی ایرفویل تقریباً به لبه‌ی فرار ایرفویل حرکت می‌کند و بیشتر طول وتر ایرفویل را جریان آرام دربر می‌گیرد. سکو و دی‌ماتوس [۹] تخمین ضرایب آیرودینامیکی هواپیماهای تجاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام دادند. آن‌ها از محاسبات کدهای دینامیک سیالات محاسباتی برای تغذیه روش هوش مصنوعی استفاده نمودند. همچنین، شکل بال، هندسه ایرفویل و وضعیت پرواز را به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی، توانستند زمان محاسبات ضرایب آیرودینامیکی را در مقایسه با کد پتانسیل

۱- مقدمه

از آنجایی که توربین‌های بادی گاه‌ها در نزدیکی مناطق شهری نصب می‌شوند و نویز آن‌ها تأثیرات مخربی بر انسان و حیات مجاور می‌گذارد، لذا ضروری است پیرامون طراحی پیکره و آیرودینامیک آن مطالعاتی صورت گیرد [۱]. پره‌های توربین باد یکی از منابع نویز صوتی است که باعث انتشار صدا به محیط اطراف می‌شوند. از این‌رو، مشخصه‌های آیرودینامیکی و طراحی بهینه‌ی آیرودینامیکی یکی از عوامل مهمی است که باید در کم‌صدا سازی توربین‌های بادی مورد توجه قرار گیرد [۲]. این صداها تولید شده با بسامدهای بالا و پایین می‌تواند در اقلشار آسیب‌پذیر باعث پیامدهای شدیدی مانند ابتلا به فشارخون بالا، دیابت و ... شود [۳].

به‌طور کلی، مکانیزم‌های تولید نویز در توربین باد به دو دسته‌ی نویزهای مکانیکی و آیرودینامیکی تقسیم‌بندی می‌شود. نویز مکانیکی از حرکت نسبی اجزای مکانیکی و پاسخ دینامیکی آن‌ها نشئت می‌گیرد و سطح انرژی آن نسبت به نویز آیرودینامیکی کمتر است [۴]. نویزهای آیرودینامیکی به‌عنوان منابع پهن‌بند شناخته می‌شوند و در توربین‌های بادی محور عمودی و افقی، وقتی که جریان آشسته با لبه فرار برخورد می‌کند، نویز لبه فرار، منبع غالب می‌باشد [۵]. عموماً

کامل ۴۰۰۰ برابر کاهش دهند. همچنین، میانگین خطای مطلق را برای پیش‌بینی ضرایب برآ و پسا کاهش دادند [۹]. سان و همکاران [۱۰] به کمک شبکه عصبی و همچنین پایگاهی از داده‌های ایرفویل‌های مختلف به طراحی و بهینه‌سازی ایرفویل‌ها به روش معکوس پرداختند. ابتدا به کمک پارامتری کردن ایرفویل، هندسه‌ی ایرفویل به‌علاوه ضرایب آیرودینامیکی را به شبکه عصبی داده تا بتواند رفتار ایرفویل را در هندسه‌های مختلف و شرایط مختلف پیش‌بینی کند. سپس به کمک این شبکه عصبی آموزش دیده، عملیات بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. بدن و همکاران [۱۱] به کمک الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی را روی توربین دارینوس به‌منظور دستیابی به یک ایرفویل بهینه‌تر از نظر ضرایب آیرودینامیکی انجام دادند. ایرفویل جدید در زوایای حمله‌ی مثبت نیروی برآی بیشتری تولید می‌کرد. چن و همکاران [۱۲] به کمک الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی را برای توربین بادی انجام دادند. نتایج افزایش نیروی برآ به پسا را نشان می‌داد، اما حساسیت نوک ایرفویل به زبری را به همراه داشت. ژنگ و همکاران [۱۳] ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ را به روش الگوریتم ژنتیک برای بهبود برآ به پسا بهینه کردند. نتایج آن‌ها افزایش این نسبت را به همراه داشت درحالی‌که در ویژگی‌های واماندگی ایرفویل، تغییری حاصل نشد. تندیس و آساره [۱۴] برای بهبود سرعت و دقت در بهینه‌سازی ایرفویل‌ها، از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم زنبور استفاده کردند. نتایج بهبود سرعت و دقت را نسبت به حالتی که از این الگوریتم‌ها به‌تنهایی استفاده می‌شود را نشان می‌داد. در پژوهشی دیگر بوتمیدجتا و همکاران، روند طراحی آیرودینامیکی یک پهنای کوچک را در ارتفاع و عدد رینولدز پایین مورد بررسی قرار دادند. تعیین پارامترهای صفحه‌ای بال از طریق فرآیند بهینه‌سازی آیرودینامیکی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و هوش مصنوعی انجام گرفته شده است

[۱۵]. بین و همکاران [۱۶] یک استراتژی طراحی ایرفویل بهینه برای یک توربین باد محور افقی مقیاس کوچک ارائه نمودند. آن‌ها از ایرفویل ناکا ۴۴۱۲ به‌عنوان ایرفویل مرجع استفاده و آن را بهینه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عملکرد ایرفویل بهینه نسبت به ایرفویل مرجع بهبود یافته و حداکثر ضریب برآ ایرفویل بهینه ناکا ۴۴۱۲، ۱/۰۸ و نرخ برآ به پسا بیشینه ۱/۱۴ شده و در محدوده‌ی وسیعی از زوایای حمله این افزایش را حفظ می‌کند. همچنین، ایرفویل بهینه دارای زاویه حمله واماندگی بزرگتر است. همچنین، تحلیل‌های آن‌ها در حالت سه‌بعدی نشان می‌دهد که مقدار ضریب توان توربین بادی جدید، تقریباً ۲۶ درصد بیشتر و پایداری از توربین بادی اصلی است و از افزایش بیش‌ازحد نیروی پیش‌ران محوری جلوگیری می‌کند. سانگ و همکاران [۱۷] بهینه‌سازی ایرفویل با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری ماشین انجام دادند. ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ به‌عنوان ایرفویل مرجع انتخاب نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم مبتنی بر یادگیری ماشین، در این پژوهش همگرایی نسبتاً خوبی دارد و در مقایسه با الگوریتم ژنتیک سنتی می‌تواند به عملکرد آیرودینامیکی بسیار بهتر و زمان شبیه‌سازی بسیار کوتاه‌تری برای مسئله مشابه بهینه‌سازی ایرفویل دست یابد. ژانگ و همکاران، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه نوین برای لبه‌ی فرار ایرفویل‌ها در شرایط یخ‌زدگی پیشنهاد دادند. آن‌ها تأیید می‌کنند که روش ارائه‌شده، ابزار ارزشمندی برای طراحی ایرفویل توربین‌های بادی در شرایط یخ‌زدگی است [۱۸]. رودریگز و همکاران، یک روش جامع برای بهینه‌سازی طراحی پره‌های توربین بادی پیشنهاد دادند. نتایج حاصل از ایرفویل بهینه‌شده‌ی آن‌ها نشان می‌دهد که نرخ برآ به پسا نسبت به ایرفویل معمولی ناکا ۴۴۱۲ بهبود یافته است [۱۹]. زو و همکاران، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی دو-هدفه پارامترهای وتر، زاویه

توئیست و خمش پره برای به حداکثر رساندن تولید انرژی و حداقل رساندن گشتاور خمشی استفاده نمودند [۲۰].

اسورکن و همکاران، یک طراحی مفهومی و بهینه با استفاده از ترکیب روش حجم محدود، هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای توربین باد محور عمودی انجام دادند. نتایج آن‌ها ثابت می‌کند که تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند به‌طور قابل توجهی فرآیندهای طراحی را در زمینه‌ی مهندسی باد تسهیل و تسریع کنند [۲۱]. در پژوهشی دیگر، رول و همکارش، بهینه‌سازی ایرفویل‌های سری s را با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه و نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی برای به حداکثر رساندن برآ و افزایش نسبت برآ به پسا به‌منظور کاهش هزینه و طراحی پره‌های توربین باد ارائه نمودند [۲۲]. فولدی و همکاران، مسئله‌ی بهینه‌سازی پره‌ی توربین باد محور افقی را برای به حداکثر رساندن ضریب توان مطرح نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که پره‌ی بهینه‌شده، عملکرد بهتری نسبت به پره‌ی معمولی در سرعت‌های پایین نشان می‌دهد [۲۳]. مَشَد و همکاران، بهینه‌سازی هندسه پره‌های توربین باد را در سرعت‌های پایین انجام دادند. چهار ایرفویل بسیار پرکاربرد از خانواده‌ی ناکا با ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ایرفویل‌های بهینه تولیدشده از ایرفویل‌های اصلی، عملکرد بهتری دارند؛ بنابراین، ایرفویل‌های بهینه‌شده برای ساخت پره‌های توربین بادی با سرعت کم و همچنین برای سایر کاربردهای مرتبط با سرعت پایین نیز مناسب می‌باشد [۲۴]. چن و همکاران [۲۵] از نقاط عملیاتی چندگانه و روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای افزایش نسبت برآ به درگ و کاهش صدای کلی یک ایرفویل استفاده کردند. ایرفویل‌های بهینه‌سازی‌شده عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیک بالاتری و کاهش نویز کلی از خود را در مقایسه با نمونه‌های اولیه نشان دادند. ایرفویل بهینه‌شده همچنین

دارای حداکثر ضخامت کاهش یافته با تغییر جزئی در موقعیت خود به سمت سر ایرفویل بود. علاوه بر این، مساحت و محیط ایرفویل بهینه‌شده کاهش یافته که منجر به بهبود ویژگی‌های ساختاری شده است.

در بیشتر مطالعاتی که تاکنون گزارش شده است، شکل ایرفویل بهینه شده است و سپس دندانه‌هایی به لبه‌ی فرار اضافه شده است تا نویز را کاهش دهد و در عین حال ویژگی‌های آیرودینامیکی را حفظ کند. با این حال، بهینه‌سازی شکل دندانه‌ها در ترکیب با خود ایرفویل به دلیل هزینه‌های محاسباتی بالای آن همچنان یک موضوع چالش برانگیز است. برای کاهش این هزینه، شبکه‌های مصنوعی اخیراً برای پیش‌بینی دقیق خروجی‌ها بر اساس برخی از راه‌حل‌های عددی استفاده شده‌اند [۲۶-۲۹]. با این حال، این مطالعات بر روی آیرودینامیک ایرفویل‌ها بدون توجه به رفتار صوتی آن متمرکز شده است.

ولکمر و همکاران [۳۰]، چالش ناشی از نویز توربین بادی با استفاده از بهینه‌سازی پروفیل پره‌ی توربین و افزودن دندانه به لبه‌ی فرار تا حدودی رفع نمودند. به‌طور قابل توجهی، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که می‌توان نویز لبه فرار را با بهینه‌سازی به قیمت کاهش قدرت شفت توربین کاهش داد. این پژوهش در راستای رفع کاستی پژوهش ولکمر انجام می‌شود. از روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ استفاده می‌شود که توانایی بیشتری در بیان پدیده‌ها دارد. همچنین، ولکمر از الگوریتم ژنتیک به تنهایی استفاده نموده است، در حالی که مقرر گردیده است که از شبکه عصبی در کنار الگوریتم ژنتیک استفاده شود. همچنین استفاده از شبکه عصبی باعث کاهش زمان بهینه‌سازی می‌شود. با وجود دانش ارزشمندی که قبلاً در مورد زمینه آیروآکوستیک پره‌های توربین بادی به دست آمده است، هنوز شکاف‌های قابل توجهی در تکنیک‌های کاهش نویز و رفتار صوتی پره‌های توربین بادی وجود دارد. از نظر

نویسندگان، بیشتر مطالعات بر روی توربین‌های بادی بزرگ متمرکز شده‌اند و هنوز تحقیقات بیشتری در مورد سر و صدای توربین‌های بادی کوچک مورد نیاز است.

در این مقاله، ترکیبی از ابزارهای موجود برای اولین بار برای رسیدگی به چالش محاسبات عددی زمان‌بر و پر کردن شکاف بین کیفیت بهینه‌سازی آیرودینامیک و هزینه‌های محاسباتی استفاده شده است. در گام اول، هدف این مقاله بهینه‌سازی هندسه ایرفویل همراه با دندان‌های لبه فرار برای دستیابی به بالاترین عملکرد ممکن در هر دو آیرودینامیک و آیرودینامیک است. شبیه‌سازی گردابی بزرگ و آنالوژی ویلیامز-هاوکینگ به ترتیب برای پیش‌بینی آیرودینامیک و آیرودینامیک ایرفویل استفاده می‌شود. در گام ثانویه، تمرکز بر روی استفاده از تنظیمات اتاق آکوستیک تجربی، برای پیاده‌سازی هندسه‌های بهینه‌شده در گام نخست را بر روی توربین‌های بادی کوچک، می‌باشد. هدف نهایی ارائه‌ی یک پژوهش تجربی است که قادر به پیش‌بینی دقیق عملکرد آیرودینامیک توربین‌های بادی محور افقی کوچک بهینه‌سازی شده است که برای کاهش نویز آیرودینامیکی با کمک شکل بهینه ایرفویل و دندان در لبه فرار بهینه شده است.

۲- تشریح مسئله

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، منابع نویز از جمله نویزهای جریان آشفته و لبه فرار جزء منابع غالب در نویزهای ایرفویل هستند. بنابراین، منابع نویز جریان ورودی آشفته و نویز لبه فرار را نیز می‌توان با اصلاح هندسه (پیشنهاد شکل مقطع ایرفویل بهینه) در خود لبه فرار اصلاح و دست‌کاری نمود. هدف کلی این پژوهش، طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی دو معیار کاهش نویز، اصلاح پروفیل مقطع پره و افزودن دندان‌های لبه فرار، برای یک توربین بادی کوچک با محور

افقی است که با اعداد رینولدز پایین کار می‌کند. لذا، در همین راستا گام‌های پژوهشی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

۱- بهینه‌سازی هندسه ایرفویل و دندان‌های لبه فرار با استفاده از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، به‌منظور دستیابی به بهترین عملکرد آیرودینامیکی و کمترین نویز در هندسه‌ی موردنظر، توربین باد.

۲- استفاده از تجهیزات اتاق آکوستیک تجربی برای بررسی آیرودینامیکی توربین باد.

که برای به تحقق پیوستن این گام‌ها، از ترکیب روش‌های شبکه عصبی استفاده شده است و همچنین برای بهینه‌سازی از یک هندسه‌ی مرسوم اولیه و ایرفویل ۵۸۳۴ به‌عنوان ایرفویل معیار استفاده شده است. بنابراین، در این پژوهش از شبکه عصبی پرسپترون به‌منظور روش داده‌کاوی و برای پیش‌بینی رابطه‌ی غیرخطی موجود بین پارامترهای ورودی و خروجی در مدل‌سازی توربین باد استفاده می‌شود. در این تحقیق از ترکیب روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی با الگوریتم‌های ژنتیک به منظور بهینه‌سازی طراحی آیرودینامیکی و آیرودینامیکی توربین بادی استفاده شده است. این ترکیب قادر به دستیابی به پارامترهای بهینه و کاهش نوفه بیشتر است. در گام اول، با تکیه بر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و هوش مصنوعی ایرفویل بهینه به همراه دندان‌های بهینه استخراج می‌گردد و سپس، هندسه‌های سه بعدی حاصل از گام اول، به کمک آزمون تجربی مورد تحلیل آکوستیکی قرار می‌گیرند.

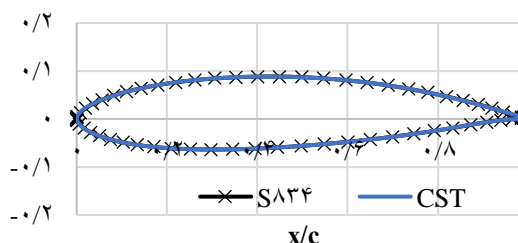
۳- رویکردها و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به روش‌های مورد استفاده در مسئله حال حاضر پرداخته و سپس جزئیات هر یک بیان می‌شود. در ادامه، نیز روش‌های حل پیشنهادی از جمله روش عددی و تجربی همراه با تنظیمات مورد استفاده بیان می‌گردد.

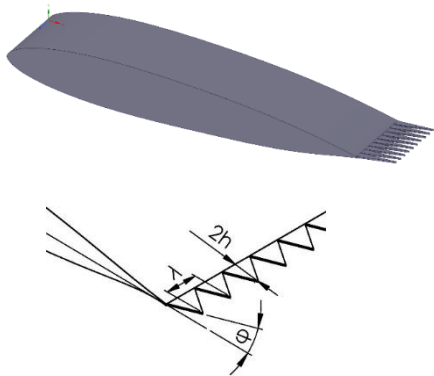
همچنین، شرایط مرزی حاکم بر مسئله، میدان محاسباتی، مطالعه شبکه و منحنی استقلال از شبکه ارائه می‌شود.

۳-۱- فرآیند بهینه‌سازی و طراحی بلید

از شبکه عصبی برای پیش‌بینی رابطه‌ی غیرخطی موجود بین پارامترهای ورودی و خروجی اندازه‌گیری‌شده در بهینه‌سازی ایرفویل موردنظر استفاده می‌شود و احتمال می‌رود که نتایج حاصل از پیش‌بینی پارامترها با این روش داده‌کاوی مذکور توانایی قابل‌قبولی در دستیابی به تطابق مناسب بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده پارامترهای خروجی ایرفویل بهینه‌شده داشته باشد. ایرفویل S۸۳۴ با طول وتر ۰/۵ متر به‌عنوان ایرفویل ابتدایی برای بهینه‌سازی در مطالعات حاضر با عدد رینولدز حدود 10^5 مورد استفاده قرار گرفته است. این ایرفویل به‌طور معمول در کاربردهای توربین‌های بادی استفاده می‌شود. برای اطمینان از دقت نمایش روش پارامترسازی CST حاصل‌شده [۳۱]، خطای جذر میانگین مربعات موردبررسی قرار گرفته است که برابر با 10^{-3} می‌باشد. در شکل ۱، مقایسه‌ای بین هندسه واقعی ایرفویل S۸۳۴ و ایرفویل تولیدشده ناشی از روش CST نشان داده شده است. می‌توان تطابق قابل‌قبولی بین نمایش CST و ایرفویل واقعی مشاهده کرد. ارتفاع ($2h$)، طول موج (λ) و زاویه (φ) دندانه‌ها به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: مقایسه بین S۸۳۴ واقعی و نمایش CST.



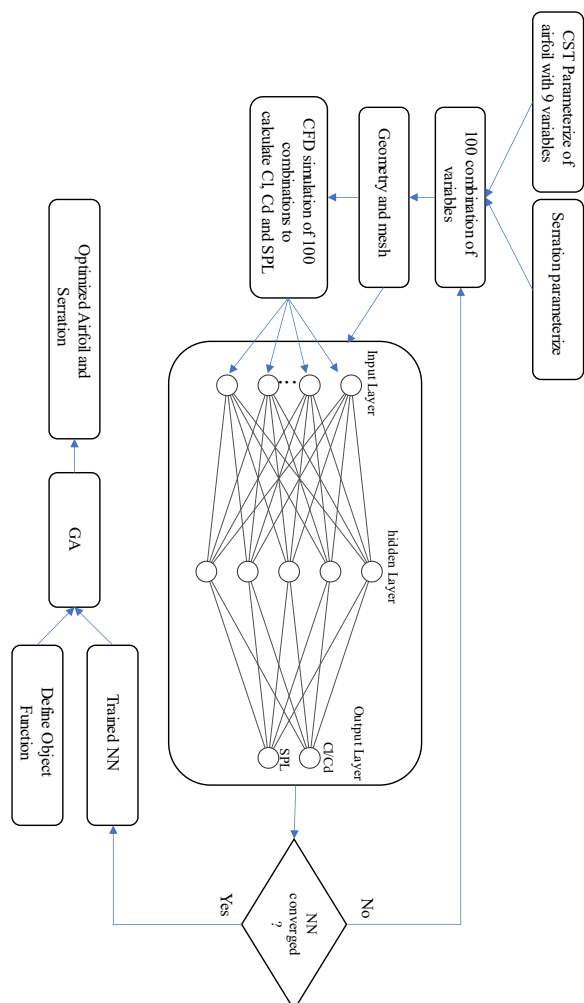
شکل ۲: پارامترهای دندانه‌سازی.

در بهینه‌سازی همزمان هندسه ایرفویل و دندانه‌ها، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با اندازه جمعیت ۵۰ و دقت تابع 10^{-6} استفاده شده است. متغیرها، دامنه تغییرات آن‌ها و پارامترهای خروجی نظیر عملکرد آیرودینامیکی و سطح فشار صدا به‌عنوان توابع هدف در مطالعات حاضر در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. شایان ذکر است که محدوده پارامترهای طراحی براساس تاریخچه‌ی مطالعات انتخاب شده است. یکی دیگر از پارامترهایی که حایز اهمیت است که باید موردبررسی قرار گیرد، زاویه حمله است. زاویه حمله مطابق با یافته‌های پیشین بین 0° تا 6° درجه تنظیم شده است، که نشان می‌دهد که این شرایط کاهش قابل ملاحظه‌ای در سطح صدا و تغییر روشن‌تری در میدان جریان نسبت به زوایای دیگر ارائه می‌دهد. علاوه بر این، برای توربین‌های بادی مدرن با کنترل سرعت متغیر و زاویه پره، بیشتر بخش‌های پره زوایای حمله کمی دارند، به عبارت دیگر معمولاً بین 4° تا 8° درجه واقع می‌شوند.

شکل ۳ نمایش‌دهنده نمودار جریان بهینه‌سازی است. در ابتدا، ۱۰۰ ایرفویل دندانه‌دار تولید شدند و شبیه‌سازی‌های عددی برای محاسبه نسبت برآ به پسا آنها و همچنین تراز فشار صدا کلی انجام شد. یک شبکه عصبی با استفاده از این داده‌ها آموزش داده شده و سپس به عنوان ورودی برای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. این روش نسبت به

کوپلینگ مستقیم حلگرهای CFD به الگوریتم ژنتیک، سریع تر است و زمان بیشتری را صرف بهینه سازی می کند.
جدول ۱: پارامترهای ورودی و خروجی بهینه سازی الگوریتم ژنتیک.

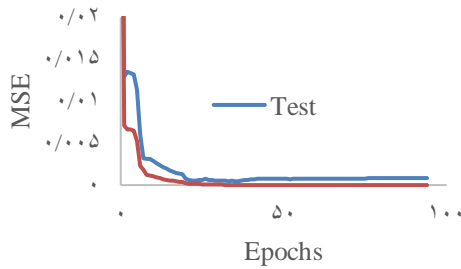
پارامترهای ورودی			
متغیرهای طراحی واقعی	عنوان	حداقل	حداکثر
پارامترهای روش CST	هندسه ایرفویل	-	-
λ (mm)	طول موج دندانه		
r_h (mm)	ارتفاع دندانه	۱۰	۷۰
Φ ($^\circ$)	زاویه دندانه لبه فرار نسبت به وتر	-۱۰	۱۰
α ($^\circ$)	زاویه حمله	.	۶
پارامترهای خروجی			
متغیرهای طراحی واقعی	عنوان		
C_l/C_D	عملکرد آیرودینامیکی		
SPL	سطح فشار صدا		



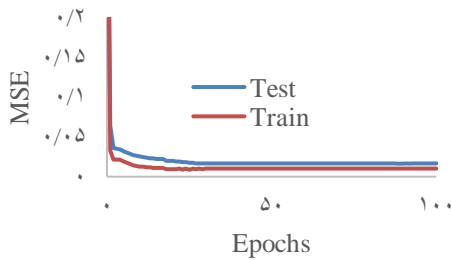
شکل ۳: نمایش نمودار جریان بهینه سازی.

شبکه عصبی براساس پارامترهای ورودی هندسی و جریانی و پارامترهای عملکرد آیرودینامیکی و سطح فشار صدا به عنوان خروجی در آن تعریف شده است، آموزش داده می شود. آموزش این شبکه عصبی به عنوان یک مدل پیش بینی پیچیده، با استفاده از الگوریتم های یادگیری عمیق انجام می شود. این شبکه، از لایه های مختلفی از جمله لایه های ورودی، لایه های مخفی و لایه های خروجی تشکیل شده است. در لایه های ورودی، پارامترهای هندسی و جریانی به شبکه وارد می شوند. سپس اطلاعات این ورودی ها از طریق لایه های مخفی پردازش می شوند تا الگوهای پیچیده تر و ارتباطات غیرخطی میان ورودی و خروجی مدل مدلسازی

شود. با توجه به اینکه شبکه با داده‌هایی که توسط تحلیل انسیس فلونتت به دست آمده، آموزش دیده است، می‌تواند به‌طور دقیق‌تری تغییرات و پیچیدگی‌های جریان را در محیط‌های هوافضا و دینامیک سیالاتی پیش‌بینی کند. بعد از آموزش شبکه، می‌توان به‌طور مکرر و در زمان کم بهینه‌سازی را توسط الگوریتم ژنتیک انجام داد.



(الف)



(ب)

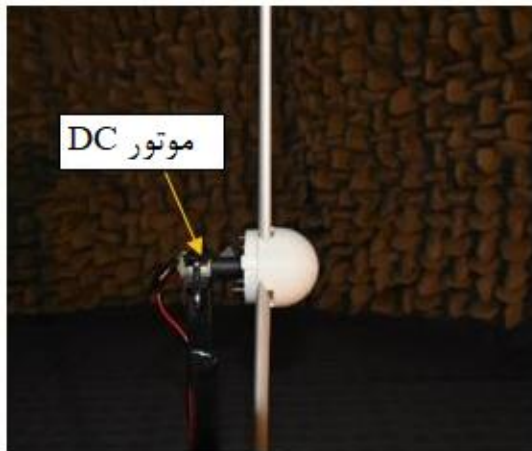
شکل ۴: خطای مربعات میانگین برای داده‌های آموزش دیده و اعتبارسنجی (الف) نسبت برآ به پسا و (ب) میزان سطح فشار صدای کلی.

۳-۲- رویکرد تجربی

در این بخش، ابتدا توربین بادی کوچک با استفاده از پره‌های معیار و بهینه‌ای که توسط روش‌های عددی استخراج شد، طراحی شد و سپس توسط پرینت سه بعدی تولید گردید. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پره مورد استفاده دارای طول ۳۰ سانتی‌متر، صفحه چرخش دهانه ۷۰ سانتی‌متر (با در نظر گرفتن قطر هاب)، زاویه پسگرا صفر درجه و نسبت باریک‌شوندگی ۰.۵ می‌باشد. سپس، این مدل‌های تولید شده به جهت آنالیز آکوستیکی در اتاق آکوستیک قرار داده شد. از این‌رو، سطح فشار صوتی یک توربین بادی کوچک از طریق اندازه‌گیری‌های تجربی در یک محفظه نیمه آنکوئیک واقع در آزمایشگاه الکتروآکوستیک دانشکده فیزیک دانشگاه شریف تعیین شد. همچنین، استاندارد ملی ایران ۶۱۸۴ ISIRI: آکوستیک-تعیین سطوح

در این مقاله از یک شبکه عصبی با ساختار Feed-Forward و دو لایه مخفی با هر کدام ۱۰ نود استفاده شده است. این مدل با استفاده از ۷۰٪ از داده‌های موجود آموزش داده شده، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۱۵٪ دیگر برای آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، روش Levenberg-Marquardt برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه مورد استفاده قرار گرفته است، که باعث به دست آمدن یک مقدار رگرسیون $R^2=0.96$ شده است. میانگین خطای مربعات متوسط (MSE) شبکه عصبی در مرحله اعتبارسنجی به مقدار ۴-۱۰ رسید، که نشان می‌دهد مدل به خوبی توانسته تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی را به حداقل برساند. مقدار پایین MSE نشان می‌دهد که این مدل مناسب برای پیش‌بینی دقیق رفتار سیستم در شرایط مختلف است. MSE مدل شبکه عصبی برای داده‌های آموزش و آزمون در طول مرحله آموزش در شکل ۴ نشان داده شده است. MSE برای داده‌های آموزش و آزمون مدل پیشنهادی به‌طور کلی در طول زمان کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که مدل به خوبی آموزش دیده است و تا حد اکثر تعداد تکرارهای آموزشی بدون بیش‌برازش عمل می‌کند.

برای هر دو پره به صورت نسبی و مقایسه‌ای انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که پره بهینه‌شده در تمامی موده‌های فرکانسی دارای کمترین نویز است. بنابراین، با وجود احتمالی خطاها و عدم قطعیت‌های داده‌های اندازه‌گیری، می‌توان به اطمینان از رفتار آکوستیک بهتر پره بهینه‌شده نسبت به طرح اولیه در این مقاله امیدوار بود.



(الف)



(ب)

شکل ۵: تنظیمات آزمون تجربی در اتاق آکوستیک.

توان صوتی منابع نویز برای اندازه‌گیری سطح نویز [۳۲] مورد آزمایش استفاده شده است. تنظیمات آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، در شکل ۷ آرایه میکروفونی مورد استفاده با تعداد ۱۴ نقطه‌ی محیطی بر روی کره‌ای با شعاع ۱.۵m نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری از میکروفون های B&K مدل ۲۲۵۰ استفاده شده است که سپس در رایانه در بیرون از فضای اتاق آکوستیک پردازش شد. هر اندازه‌گیری به مدت ۵ ثانیه به طول انجامید و سطح فشار صدا در هر موقعیت میکروفون که ۳۰ درجه از هم فاصله داشتند به طور میانگین محاسبه شد.

مطابق با شکل ۷ الف برای انجام تست تجربی، توربین بادی در نقطه O در مرکز نیمکره قرار گرفته است. سطح فشار صدا برای دو میکروفون در نقاط مرجع A و B در امتداد مسیره‌های ۱ و ۲ برداشت شده است. مختصات این نقاط در شکل ۷ ب نشان داده شده است. علاوه بر این، نویز پس‌زمینه اتاق آزمایش به مدت ۱۰ تا ۱۵ ثانیه ارزیابی شده است مشخص گردید که اتاق نام‌برده از شرایط کافی برای انجام تست برخوردار است.

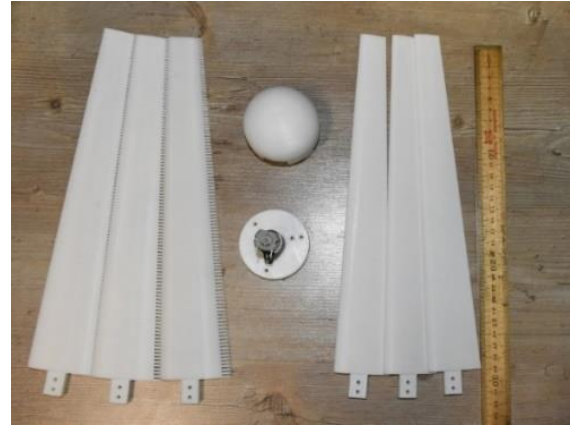
از سیستم Traversing برای حرکت میکروفون در دو جهت y و z با دقت ۱ میلی‌متر و از کولیس برای جابجایی میکروفون در جهت x استفاده شده است. این سیستم موجب پوشش نقاط روی کره فرضی با دقت بالا برای هر دو مدل می‌شود. اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۵۰۰ هرتز انجام شده و از رابط نرم‌افزاری از کدی در محیط LabView استفاده شده است. خروجی میکروفون به صورت power spectrum برحسب زمان در طول دوره داده‌برداری تبدیل شده است و در تحلیل فرکانسی در محیط آکوستیک به دلیل حذف انعکاس امواج صوتی، برخی ملاحظات وجود دارد. در این مقاله، به دلیل انحراف از اهداف اصلی، تحلیل نویز در کل طیف فرکانسی

شکل ۷: (الف) مسیرهای میکروفن‌ها و (ب) موقعیت آرایه میکروفونی.

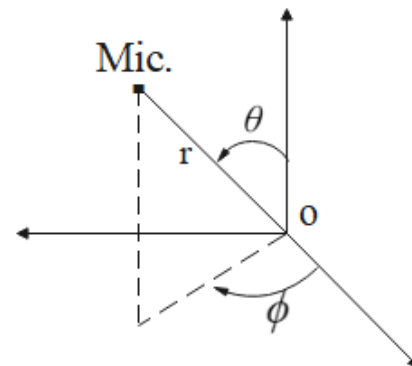
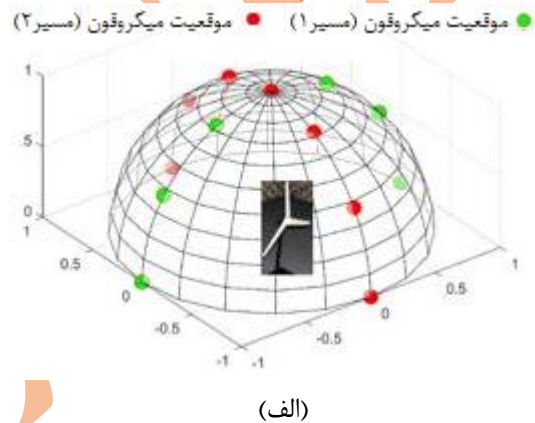
۳-۳- رویکرد عددی

در رویکرد عددی و تحلیل نتایج از نرم‌افزارهای انسیس فلوئنت استفاده شده است. در ادامه، نحوه‌ی الگوسازی هر یک شرح داده می‌شود.

از روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌ی بزرگ، LES، و فاکس ویلیامز-هاوکینگ، FW-H، به ترتیب برای پیش‌بینی آیرودینامیک و آیروآکوستیک ایرفویل استفاده شده است. مدل LES می‌تواند به دقت فیزیک جریان را در لبه فرار ایرفویل که بیشتر انتشار نویز از آنجا ناشی می‌شود، تخمین بزند. در این پژوهش، در گام اول تحلیل عددی و انجام بهینه‌سازی روی هر دو شکل ایرفویل و دندانه‌ها به منظور بهبود همزمان آیرودینامیک و آیروآکوستیک انجام شده است. به منظور سرعت بخشیدن به فرآیند بهینه‌سازی با آموزش یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی آیرودینامیک و آکوستیک ایرفویل پیشنهاد شده است. در گام دوم سپس پس از استخراج حالت بهینه، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و آیروآکوستیک محاسباتی یک نمونه توربین باد کوچک مبتنی بر پره‌های بهینه‌شده شبیه‌سازی می‌گردد. مدل سازی CFD در چارچوب روش حجم محدود در بستر انسیس فلوئنت انجام می‌شود. معادلات ناویر-استوکس همراه با معادله پیوستگی به صورت عددی در ترکیب با مدل‌های آشفتگی حل می‌شوند. از هوا به عنوان سیال کاری و خواص ثابت در شرایط محیطی استفاده می‌شود. جریان تراکم ناپذیر فرض می‌شود که در سرعت‌های غالب کاملاً واقعی است و منجر به حداکثر اعداد ماخ کمتر از ۰/۲ می‌شود. مجدداً برای محاسبه دقیق میدان جریان در گام دوم در این مسئله ترکیبی آیرودینامیکی و آیروآکوستیک، روش شبیه‌سازی گردابه



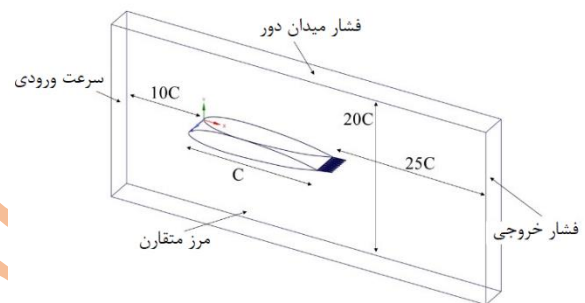
شکل ۶: پره‌های معیار و بهینه تولیدشده توسط پرینت سه بعدی.



Mic.	r (m)	θ ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)
A	۱	۳۰	۹۰
B	۱	۹۰	۱۵۰

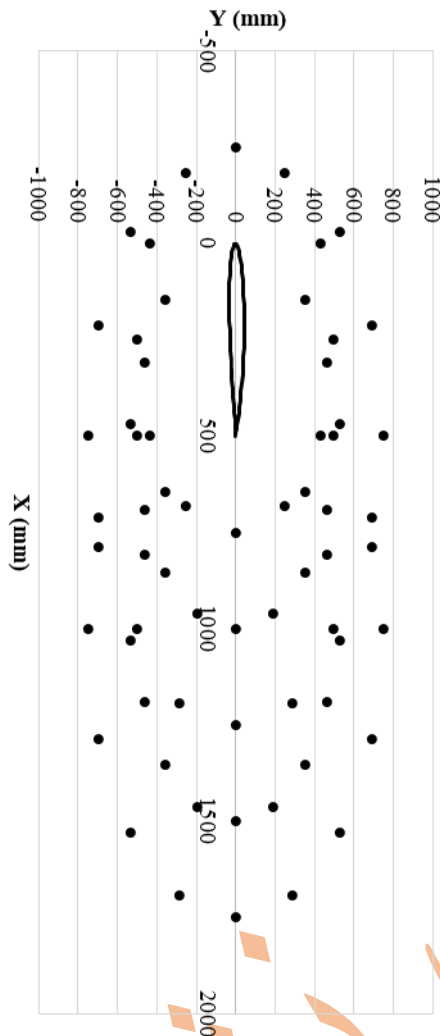
(ب)

بزرگ و روش فاکس ویلیامز-هاوکینگ استفاده شده است. در گام اول شرایط مرزی و میدان محاسباتی مطابق با شکل ۸ لحاظ شده است. همچنین، مرزهای دامنه ۱۰ برابر طول وتر از لبه حمله ایرفویل سمت مکش و سمت فشار و همچنین ۲۵ برابر از لبه فرار قرار می‌گیرند تا از اثرات مرزی جلوگیری شود. شرایط ورودی سیال با ورودی سرعت تعریف می‌شود، در حالی که شرایط خروجی سیال توسط خروجی فشار تعیین می‌شود. در فرآیند مدل‌سازی، یک مقطع شامل ۱۰ دندانه در نظر گرفته می‌شود که منجر به استفاده از شرایط مرزی متقارن در دو طرف دامنه می‌شود.



شکل ۸: میدان محاسباتی و شرایط مرزی برای گام اول مسئله.

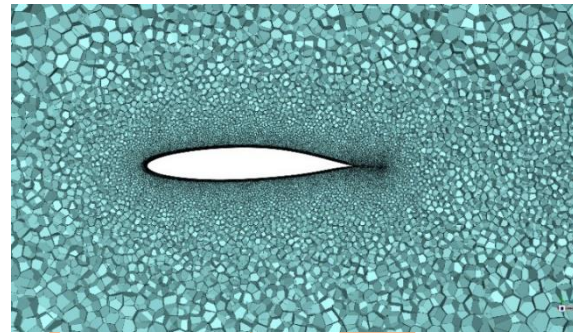
در تحلیل آکوستیک به کمک روش فاکس ویلیامز-هاوکینگ، ابتدا نیاز که منبع تولید نویز و میکروفون‌های فرضی تعریف شوند. از این‌رو، سطح بالایی و پایینی ایرفویل و همچنین دندانه‌های لبه فرار به‌عنوان منبع صدای تولید در شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به گام زمانی انتخاب شده، محدوده فرکانس مورد بررسی برابر ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز است و خواص آیروآکوستیک در جریان آزاد با سرعت ثابت اندازه‌گیری شده است. در مطالعه حاضر در گام اول، ۶۴ گیرنده در اطراف ایرفویل همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری سطح فشار صدای کلی ساطع‌شده از ایرفویل قرار داده شد.



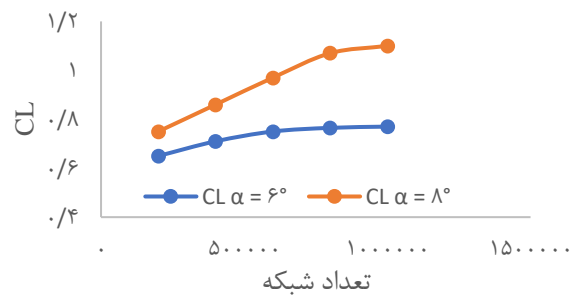
شکل ۹: موقعیت میکروفون‌ها در فضای اطراف ایرفویل و مرتبط با شبیه‌سازی در گام اول.

برای گام اول، از یک شبکه‌بندی متناسب با شکل ۹ استفاده شده است که شامل شبکه‌های محاسباتی حول ایرفویل و دندانه‌های لبه فرار است. برای ثبت جریان در اطراف ایرفویل و دندانه‌ها، از شبکه‌های چند وجهی با تراکم بالا در این مناطق استفاده شده است. برای تضمین استقلال شبکه، پنج نوع شبکه مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ضریب برآ در زاویه حمله ۶ و ۸ درجه به‌عنوان منحنی استقلال شبکه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. جزئیات شبکه در جدول ۲

ذکر شده است. براساس نتایج، شبکه‌ای با ۸۰۰۰۰۰ سلول برای انجام گام اول انتخاب شده است.



شکل ۹: شبکه محاسباتی اطراف ایرفویل.



شکل ۱۱: منحنی استقلال از شبکه.

جدول ۲: جزئیات شبکه مورد استفاده.

مقادیر					پارامتر شبکه
۱	۲	۳	۴	۵	تعداد کل شبکه
۱/۵	۲	۳	۳/۵	۴	اندازه سلول در اطراف ایرفویل (میلی‌متر)
۱	۱	۲	۲/۵	۳	اندازه سلول در اطراف ایرفویل (میلی‌متر)
۱۰	۱۰	۱۰	۵	۵	تعداد المان‌های لایه مرزی

صحت از دقت نتایج برای هر کدام، مقایسه‌ای با نتایج پژوهش‌های قبلی صورت گرفته است.

در گام نخست به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های جریان هوا در مقایسه با داده‌های تجربی [۳۳]، تحلیلی دقیقتر در زاویه حمله ۰ درجه و عدد رینولدز 10^5 انجام گرفته است. در این تحلیل، ابتدا نتایج مرتبط با ضریب فشار بر روی سطوح بالا و پایین ایرفویل در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که در نمودار دیده می‌شود، نتایج به خوبی با یکدیگر تطابق دارند. با این حال، تفاوت‌هایی وجود دارد که به علت فرضیات مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی توجیه می‌شوند. همچنین، برای تایید نتایج آکوستیک، از داده‌های تجربی گرهارد و همکاران [۳۳] استفاده شده و نموداری مربوط به این تایید در شکل ۱۳ ارائه شده است. در این مطالعه، تمرکز بر روی ایرفویل S۸۳۴ با طول وتر 0.2 متر، زاویه حمله $\alpha = 4.7$ درجه، عدد رینولدز $3/5 \times 10^6$ و گام زمانی $\Delta t = 6.4 \times 10^{-4}$ بوده است. یک میکروفون فرضی در موقعیت $x/c = 0.8$ روی سطح پایینی ایرفویل قرار داده شد. اگرچه برخی از نتایج فرکانسی تفاوت‌هایی بیش از ۱۰٪ نشان می‌دهند و تفاوت‌ها در فرکانس‌های پایین و بالا ناچیز می‌باشد. به صورت کلی، شبیه‌سازی جریان هوا با استفاده از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تغییرات سطح فشار صدا را به درستی تخمین می‌زند. با این حال، اوج‌های مشاهده شده در موارد عددی در شرایط تجربی وجود ندارد. این اختلافات ممکن است به دو عامل مرتبط شوند: از یک سو، فرضیات استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی و از سوی دیگر، وجود ساختارها و موانع در تنظیمات تجربی.

۳-۳-۲- اعتبارسنجی

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان گردید، در این مسئله دو گام محاسباتی لحاظ گردیده است. برای اعتبارسنجی و

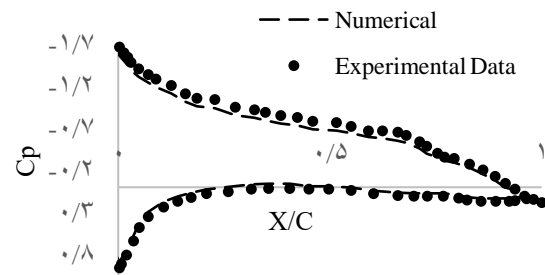
دندانه ثابت و ایرفویل دندانه دار بهینه شده در جدول ۳ در زاویه حمله ۶ درجه نشان داده شده است. به ترتیب بهبود (۵- 0.7) و ($1-0.4$) در مشخصه‌های آیرودینامیکی و سطح فشار صدای کلی را می‌توان در هر دو بهینه‌سازی در مقایسه با ایرفویل پایه مشاهده کرد. با توجه به این جدول، بهینه‌سازی شکل ایرفویل همراه با دندانه‌های ثابت منجر به عملکرد آیرودینامیکی بالاتر می‌شود، در حالی که بهینه‌سازی ایرفویل دندانه‌دار رفتار آکوستیک بهتری را در کنار بهبود عملکرد آیرودینامیکی قابل توجه ارائه می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه عملکرد آیرودینامیکی و تراز فشار صدا کلی برای ایرفویل S۸۳۴ و ایرفویل بهینه‌شده در زاویه حمله ۶ درجه با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه.

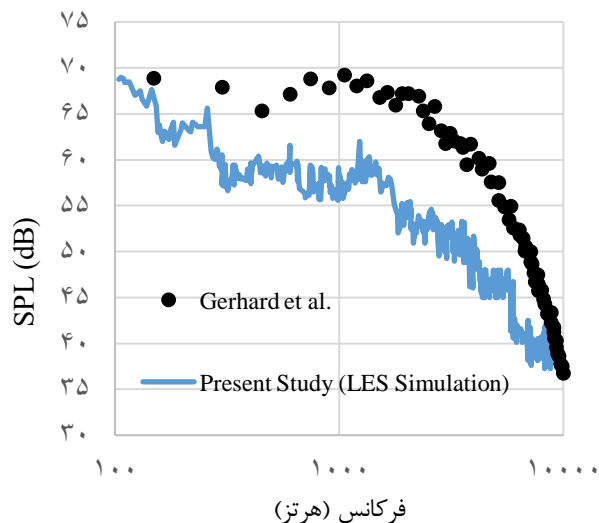
OASPL (dB)	CL/Cd	نمونه
۶۶	۸۹	ایرفویل S۸۳۴
۶۴	۹۶	ایرفویل بهینه‌شده با دندانه معمولی
۶۲	۹۴	ایرفویل دندانه‌دار بهینه‌شده

شکل ۱۴ مقایسه‌ای بین هندسه ایرفویل بهینه‌سازی شده و ایرفویل پایه S۸۳۴ در زاویه حمله ۶ درجه ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هر دو ایرفویل بهینه شده دارای خمیدگی و ضخامت کمتری در نزدیکی لبه فرار هستند، که یک ویژگی اجتناب‌ناپذیر برای ایرفویل کم نویز است. علاوه بر این، برای یک شکل دندانه ثابت، هم ضخامت بخش جلو و هم قسمت عقب افزایش یافته است که باعث افزایش برآ و کمی افزایش پسا می‌شود. همچنین، در مقایسه با حالتی که هر دو شکل ایرفویل و دندانه به‌طور همزمان بهینه شده‌اند، نسبت ضریب برآ به پسا افزایش می‌یابد.

همانطور که قبلاً بیان شد، در بیشتر بهینه‌سازی‌هایی که تاکنون انجام شده است، یک دندانه به لبه فرار یک ایرفویل



شکل ۱۲: نتایج اعتبارسنجی ضریب فشار با داده‌های تجربی.



شکل ۱۳: اعتبارسنجی نتایج آکوستیک عددی با داده‌های تجربی در گام اول مسئله.

۴. نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندگانه و سپس مربوط آزمون تجربی و عددی برای هر دو حالت آیرودینامیک و آیروآکوستیک ارائه می‌گردد.

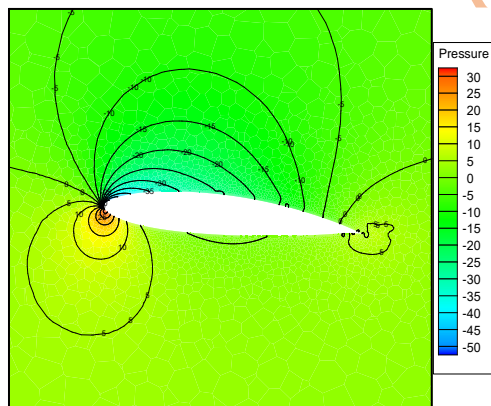
۴-۱- پاسخ بهینه برای حالت‌های چند هدفه

پس از بهینه‌سازی تک هدف، بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای به دست آوردن هندسه بهینه ایرفویل همراه با دندانه انجام می‌شود که منجر به حداکثر نسبت ضریب برآ به پسا و حداقل سطح فشار صدای کلی می‌شود. مقادیر نسبت ضریب برآ به پسا و سطح فشار صدای کلی برای ایرفویل پایه S۸۳۴، ایرفویل بهینه شده با

۴-۲- نتایج آیرودینامیک تحلیل عددی ایرفویل

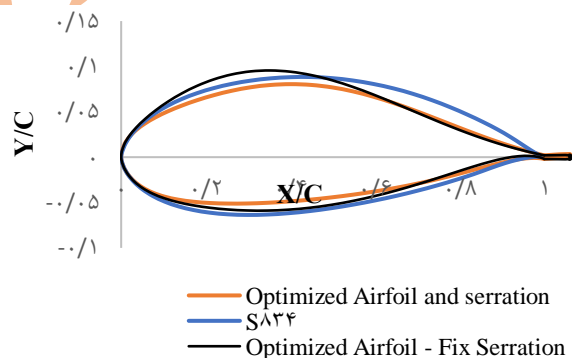
در این بخش، تحلیل آیرودینامیکی ایرفویل‌های معیار و بهینه مورد بحث قرار گرفته است. اهمیت بررسی این بخش این است که هدف اصلی توربین بادی تولید نیرو است و بهینه‌سازی کاهش نویز نباید بر ضرایب آیرودینامیکی آن تأثیر منفی بگذارد و تولید توان آن را بیشتر کاهش دهد.

در شکل ۱۵، کانتورهای فشار برای هر دو معیار اولیه و ایرفویل دندانه‌دار بهینه‌شده نمایش داده شده است. از تحلیل منحنی ضریب فشار و خطوط کانتور در وضعیت بهینه (با دندانه و ایرفویل)، مشاهده می‌شود که توزیع فشار در سمت فشار افزایش یافته است که به افزایش انحنای ایرفویل و طول وتر برمی‌گردد. حضور دندانه در سمت مکش باعث افزایش اندازه خطوط کانتور کم‌فشار و پوشش مساحت بیشتری می‌شود، که این افزایش ممکن است ناشی از ناحیه جدایش بزرگتر و گرداب ویک در سطح بالایی ایرفویل باشد که به بهبود عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل بهینه‌شده کمک می‌کند.



(الف)

بهینه‌سازی شده اضافه شده است تا سطح نویز را کاهش دهد. در این مقاله، پارامترهای هندسی دندانه نیز به متغیرهای بهینه‌سازی اضافه شده است و شکل داندانه‌ها همزمان با هندسه ایرفویل بهینه شود. پارامترهای هندسی دندانه قبل و بعد از بهینه‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است. نسبت λ/h پارامتری مهمی در دندانه تلقی می‌شود که این نسبت در حالت دندانه‌های ثابت مقداری بالاتر است. در دندانه‌های بهینه برای ایرفویل دندانه‌دار، زاویه‌ی دندانه‌ها از وتر در مقایسه با دندانه‌های ثابت کمی کج می‌شود. این ویژگی طراحی به کاهش بیشتر سطح فشار صدای کلی تولیدشده کمک می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای ایرفویل و دندانه بهینه‌شده در زاویه حمله ۶ درجه، عملکرد آیرودینامیکی و سطح فشار صدای کلی را به ترتیب حدود ۹۲ و ۶۳ دسی بل نشان داده‌اند. نتایج دقت بهینه‌سازی شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک چندهدفه را تایید می‌کند که برای پارامترهای فوق به ترتیب ۹۴ و ۶۲ دسی بل بودند.

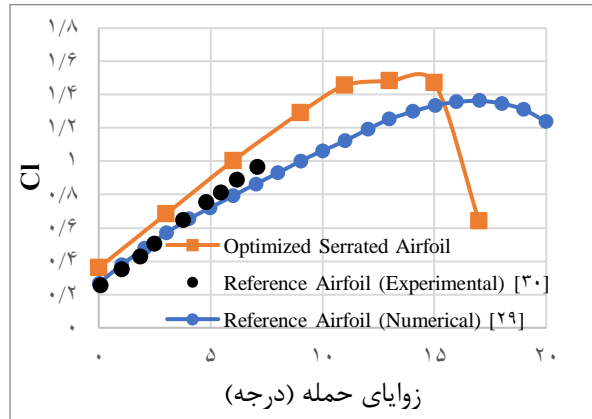


شکل ۱۴: مقایسه هندسه ایرفویل.

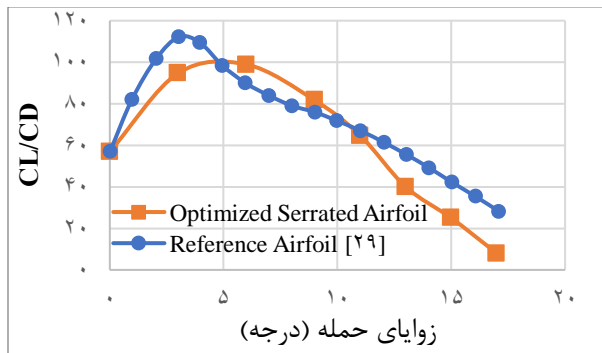
جدول ۴: پارامترهای هندسی دندانه قبل و بعد از بهینه‌سازی.

متغیرها	دندانه ثابت	دندانه بهینه‌شده برای ایرفویل
$2h$	۶۰ mm	۵۷.۷ mm
λ	۵ mm	۵.۶ mm
φ	۰	۵.۴°

دارای یک عملکرد آیرودینامیکی بهتر است. به صورت کلی شایان ذکر است که داده‌های شبیه‌سازی عددی مقاله حاضر و همچنین پیش بینی شده توسط شبکه عصبی مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارند.



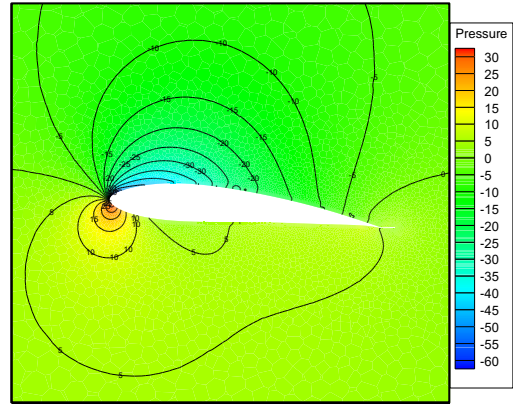
شکل ۱۶: مقایسه نتایج ضریب برآ برای ایرفویل دندانه‌دار بهینه‌شده با ایرفویل معیار.



شکل ۱۷: مقایسه نتایج نسبت ضریب برآ به پسا برای ایرفویل دندانه‌دار بهینه‌شده با ایرفویل معیار.

۴-۴- نتایج تجربی آکوستیک

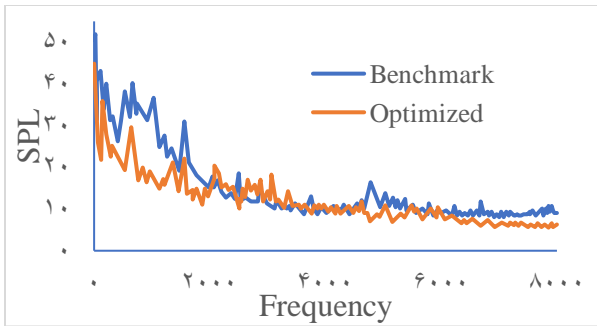
مهمترین بخش نتایج، بررسی نتایج تجربی اتاق آکوستیک است. برای تجزیه و تحلیل نویز توربین، نتایج به صورت نقطه‌ای بررسی شده است که منحنی سطح فشار صدا در محدوده تمام فرکانس‌ها را نشان می‌دهد. تحلیل فرکانس نویز تولیدشده در دو نقطه ارزیابی شد. نقطه اولیه به صورت شعاعی و نقطه دوم در موقعیت پشت توربین نیز برای ارزیابی اتخاذ گردیدند.



(ب)

شکل ۱۵: میدان‌های فشار ناشی از شبیه‌سازی‌های عددی ایرفویل اولیه و بهینه‌شده در زاویه حمله ۶ درجه، (الف) ایرفویل پایه، (ب) ایرفویل بهینه‌شده.

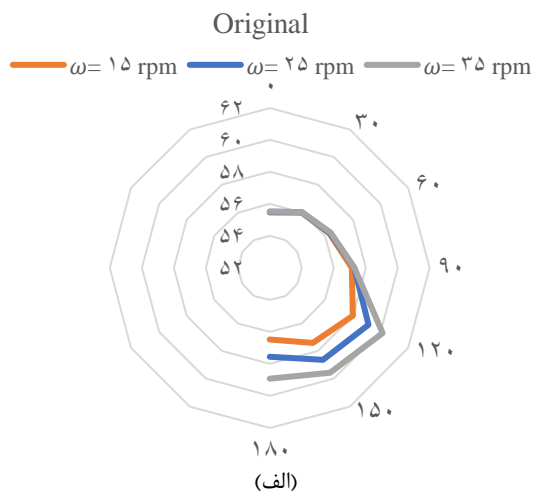
در ادامه‌ی نتایج آیرودینامیک در این قسمت و پس از استخراج ایرفویل بهینه‌شده، به منظور تایید آن، نتایج ضریب برآ و نسبت برآ به پسا با پژوهش‌های عددی و تجربی دیگر مقایسه گردید. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب ضریب برآ و نسبت برآ به پسا را در زوایای حمله مختلف نشان می‌دهند. در این مقاله، بهینه‌سازی در محدوده‌ی زاویه حمله ۵ تا ۱۰ درجه انجام شده است. شکل ۱۶ نشان می‌دهد با اینکه زاویه واماندگی برای ایرفویل بهینه‌شده از ۱۷ درجه به ۱۵ درجه کاهش یافته است، اما ضریب برآ برای ایرفویل بهینه‌سازی شده نسبت به ایرفویل اصلی [۳۴] بهبود یافته است؛ که این افزایش برآ در زوایای حمله بیش از ۵ درجه قابل توجه است و معادل افزایش حدود ۲۰ درصد است. ممکن است در نگاه اول بنظر برسد که محدوده‌ی زوایای حمله حالت بهینه‌شده کاهش یافته است، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود ایرفویل بهینه‌شده از ضریب برآ بالاتر و ضریب برآ بیشینه‌ی بیشتری برخوردار است. همچنین، شکل ۱۷ نشان می‌دهد که در این محدوده زوایای حمله ۵ تا ۱۰ درجه، ایرفویل بهینه‌شده دارای نسبت برآ به پسا بالاتری (به‌طور میانگین حدود ۱۲ درصد) است، در حالی که خارج از این محدوده، ایرفویل اصلی [۳۵]



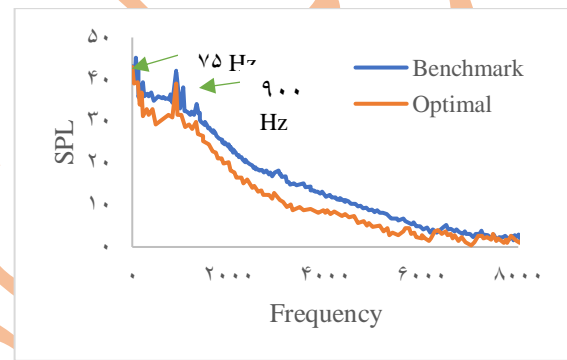
شکل ۱۹: مقایسه منحنی سطح فشار صدا بین پره استاندارد و پره بهینه‌شده در موقعیت دوم.

علاوه بر بررسی فرکانس نویز تولیدشده توسط پره توربین برای یک نقطه، نویز سطح فشار صدای کلی در اطراف توربین نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

شکل ۲۰ نتایج اندازه‌گیری جهت‌مندی آکوستیک را برای توربین‌های بادی استاندارد و بهینه‌شده در سرعت‌های چرخشی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به تقارن ساختاری توربین بادی و جهت‌دهی متقارن نویز تابشی، اندازه‌گیری تا ۱۸۰ درجه انجام شده است. در هر دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش، سطح کلی نویز صدا به طور متوسط ۱ تا ۲ دسی بل افزایش می‌یابد. افزایش سرعت چرخش توربین بادی باعث افزایش شدت تلاطم جریان و در نتیجه افزایش نویز پهنای باند می‌شود. این افزایش نویز در نواحی پشت توربین محسوس است.



در شکل ۱۸، نمودار سطح فشار صدا از نظر فرکانس در جهت شعاعی (میکروفون موقعیت B) توربین بادی بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کاهش کلی در میزان نویز در تمامی فرکانس‌ها مشاهده می‌شود. در حالت پره استاندارد پیک در فرکانس پایین برابر با ۷۵ و همچنین پیک در فرکانس بالاتر در ۹۰۰ مشاهده می‌شود، در حالت بهینه‌شده پیک فرکانس پایین میرا شده و مقدار پیک فرکانس بالا کاهش می‌یابد. سطح نویز تولید شده برای تیغه بهینه کمتر از حالت استاندارد است.



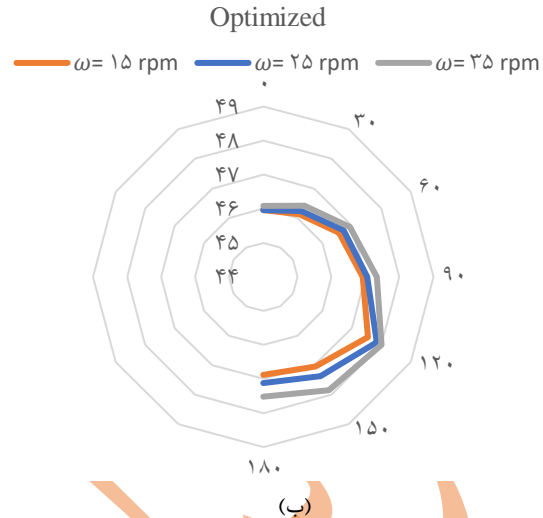
شکل ۱۸: مقایسه منحنی سطح فشار صدا بین پره استاندارد و پره بهینه‌شده در موقعیت اول.

در شکل ۱۹، نمودار سطح فشار صدا از نظر فرکانس در موقعیت دوم (میکروفون موقعیت A) بررسی شده است. مشابه نمودار قبل، کاهش کلی در میزان نویز در تمامی فرکانس‌ها مشاهده می‌شود. در فرکانس‌های زیر ۲۰۰۰ هرتز در هر دو مورد پیک‌های فرکانسی مشاهده می‌شود که تعداد این پیک‌ها در حالت بهینه‌شده کاهش یافته است. همچنین، انرژی ناشی از این پیک‌ها در حالت بهینه‌شده در سایر فرکانس‌ها توزیع شده است. در حالت پره استاندارد، در حدود فرکانس ۵۰۰۰ هرتز، یک پیک در نمودار سطح فشار صدا مشاهده می‌شود که در حالت بهینه‌شده نیز این مقدار انرژی موج صدا میرا شده است. به صورت کلی، تفاوت چندانی در فرکانس‌های خیلی بالا در کارایی آکوستیکی هر دو پره مشاهده نمی‌شود.

نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه اصلی، عملکرد آیرودینامیکی با پیکربندی پره‌های دندانه‌دار بهینه‌شده بهبود یافته است. با این وجود، کاهش سطح نویز در حوزه فرکانس قابل توجه بود و به کاهش کلی فشار صدا حدود ۱۰ دسی بل منجر شده است.

فهرست منابع

1. FUKANO, T. & JANG, C.-M. ۲۰۰۴. Tip clearance noise of axial flow fans operating at design and off-design condition. *Journal of sound and vibration*, ۲۷۵, ۱۰۲۷-۱۰۵۰. [https://doi.org/10.1016/S0022460X\(03\)00815-1](https://doi.org/10.1016/S0022460X(03)00815-1).
2. KELLEY, N. D., MCKENNA, H., HEMPHILL, R., ETTER, C., GARRELTS, R. & LINN, N. ۱۹۸۵. Acoustic noise associated with the MOD-۱ wind turbine: its source, impact, and control. Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
3. DRATVA, J., PHULERIA, H. C., FORASTER, M., GASPOZ, J.-M., KEIDEL, D., KÜNZLI, N., LIU, L.-J. S., PONS, M., ZEMP, E. & GERBASE, M. W. ۲۰۱۲. Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults. *Environmental health perspectives*, ۱۲۰, ۵۰-۵۵. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103448>.
4. WAGNER, S., BAREIB, R. & GUIDATI, G. ۱۹۹۶. Noise mechanisms of wind turbines. *Wind Turbine Noise*. Springer.
5. OERLEMANS, S., SIJTSMA, P. & LÓPEZ, B. M. ۲۰۰۷. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of sound and vibration*, ۲۹۹, ۸۶۹-۸۸۳. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.07.032>.
6. WAGNER, S., BAREISS, R. & GUIDATI, G. ۲۰۱۲. *Wind turbine noise*, Springer Science & Business Media.
7. DAVARI, A., HASHEMINEJAD, M. & BOORBOOR, A. ۲۰۱۳. Shape optimization of wind turbine airfoils by genetic algorithm. *International Journal of Engineering and Technology*, ۵, ۲۰۶. <https://doi.org/10.7763/IJET.2013.75.542>.
8. RAM, K. R., LAL, S. & RAFIUDDIN AHMED, M. ۲۰۱۳. Low Reynolds number airfoil optimization for wind turbine



شکل ۲۰: مقایسه سطح کلی نویز صدا بین (الف) پره با ایرفویل معیار S۸۳۴ در مقابل (ب) پره با ایرفویل بهینه‌شده در سرعت‌های چرخشی مختلف.

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله، بهینه‌سازی ایرفویل همراه با دندانه در توربین‌های بادی محور افقی کوچک است که با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و به کمک روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگ انجام شده است. ابتدا به کمک ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی، آیرودینامیک محاسباتی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک هندسه‌ی ایرفویل به همراه دندانه‌ی بهینه استخراج شده است. ایرفویل S۸۳۴ به‌عنوان ایرفویل مبنا انتخاب شده است و در پیاده‌سازی روش‌های هوش مصنوعی دو معیار عملکرد آیرودینامیکی و سطح فشار صدا به‌عنوان اهداف در نظر گرفته شده‌اند. در بهینه‌سازی چند هدفه هر دو شکل ایرفویل و دندانه‌ها، ۵ تا ۷ درصد بهبود عملکرد آیرودینامیکی و به طور همزمان ۱-۴ درصد کاهش نویز در مقایسه با ایرفویل معیار نشان داده شده است. در گام دوم، مطالعه‌ی تجربی به‌منظور پیاده‌سازی هندسه‌های مستخرج بهینه‌شده در گام نخست بر روی توربین‌های بادی کوچک صورت گرفته است. یافته‌ها

- Wind Turbine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3947164>
17. SONG, X., WANG, L. & LUO, X. Airfoil optimization using a machine learning-based optimization algorithm. 19th Asian International Conference on Fluid Machinery, AICFM 2021, 2022. Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2211/1/012009>
18. ZHANG, X., ZHAO, L., LI, W., ZHANG, X. & BOCIAN, M. 2022. Optimal Design for the Blunt Trailing-Edge Profile of Wind Turbine Airfoils under Glaze Ice Conditions. *Journal of Engineering Mechanics*, 148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002086](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002086)
19. RODRIGUEZ, C. V. & CELIS, C. 2022. Design optimization methodology of small horizontal axis wind turbine blades using a hybrid CFD/BEM/GA approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-022-03561-4>
20. XU, B., LI, Z., ZHU, Z., CAI, X., WANG, T. & ZHAO, Z. 2021. The Parametric Modeling and Two-Objective Optimal Design of a Downwind Blade. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.708230>
21. SVORCAN, J., PEKOVIĆ, O., SIMONOVIĆ, A., TANOVIĆ, D. & HASAN, M. S. 2021. Design of optimal flow concentrator for vertical-axis wind turbines using computational fluid dynamics, artificial neural networks and genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1177/16878142211009009>
22. ROUL, R. & KUMAR, A. 2021. Optimized Design and Performance Testing of a 1.5 MW Wind Turbine Blade. *Springer Proceedings in Materials*. Springer Nature.
23. PHOLDEE, N., BUREERAT, S. & NUANTONG, W. 2021. Kriging surrogate-based genetic algorithm optimization for blade design of a horizontal axis wind turbine. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 126, 261-273. <https://doi.org/10.32360/cmcs.2021.12349>
24. MASHUD, M., JOTY, S. M. & AHMED, Z. U. 2021. optimization of low speed wind applications using genetic algorithm. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5, 052007. <https://doi.org/10.1038/s41422-021-00000-7>
9. SECCO, N. R. & DE MATTOS, B. S. 2017. Artificial neural networks to predict aerodynamic coefficients of transport airplanes. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. <https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2016-0069>
10. SUN, G., SUN, Y. & WANG, S. 2015. Artificial neural network based inverse design: Airfoils and wings. *Aerospace Science and Technology*, 42, 415-428. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.01.030>
11. BEDON, G., DE BETTA, S. & BENINI, E. 2016. Performance-optimized airfoil for Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 94, 328-340. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.071>
12. CHEN, J., WANG, Q., ZHANG, S., EECEN, P. & GRASSO, F. 2016. A new direct design method of wind turbine airfoils and wind tunnel experiment. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 2002-2014. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.051>
13. ZHANG, T.-T., HUANG, W., WANG, Z.-G. & YAN, L. 2016. A study of airfoil parameterization, modeling, and optimization based on the computational fluid dynamics method. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 17, 637-645. <http://orcid.org/0000-0001-9805-985X>
14. TANDIS, E. & ASSAREH, E. 2017. Inverse design of airfoils via an intelligent hybrid optimization technique. *Engineering with Computers*, 33, 361-374. <https://doi.org/10.1007/s00366-016-0478-6>
15. BOUTEMEDJET, A., SAMARDŽIĆ, M., REBHI, L., RAJIĆ, Z. & MOUADA, T. 2019. UAV aerodynamic design involving genetic algorithm and artificial neural network for wing preliminary computation. *Aerospace Science and Technology*, 84, 464-483. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.09.043>
16. YIN, R., XIE, J. B. & YAO, J. 2022. Optimal Design and Aerodynamic Performance Prediction of a Horizontal Axis Small-Scale

۲۰۰۲. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
۳۳. CEZE, M. HASHI, M. VOLPE, E. A study of the cst parameterization characteristics. *27th AIAA applied aerodynamics conference*, ۲۰۰۹, p. ۳۷۶۷. <https://doi.org/10.2514/6.2009-3767>
۳۴. Iranian national Standard, Acoustics-determination of sound power levels of noise sources- precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms. *Iranian national Standard*, ۱۹۹۳.
۳۵. VOLKMER, K. & CAROLUS, T. Aeroacoustic airfoil shape optimization utilizing semi-empirical models for trailing edge noise prediction. ۲۰۱۸ AIAA/CEAS aeroacoustics conference, ۲۰۱۸. ۳۱۳۰. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3130>
- turbine blade profile on the basic of lift coefficient. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, ۱۶, ۱۱۲-۱۲۰.
۲۵. CHEN, Y. Q. & FANG, Y. F. ۲۰۱۵. Research on Improved Method of Wind Turbine Airfoil S^h Based on Noise and Aerodynamic Performance. *Applied Mechanics and Materials*, ۷۴۴, ۲۵۳-۲۵۸. <https://doi.org/10.4۰۲۸/www.scientific.net/AMM.۷۴۴-۷۴۶,۲۵۳>
۲۶. BAKAR, A., LI, K., LIU, H., XU, Z., ALESSANDRINI, M. & WEN, D. ۲۰۲۲. Multi-objective optimization of low reynolds number airfoil using convolutional neural network and non-dominated sorting genetic algorithm. *Aerospace*, ۹, ۳۵. <https://doi.org/10.3390/aerospace9۰۱۰۰۳۵>
۲۷. LIU, R.-L., HUA, Y., ZHOU, Z.-F., LI, Y., WU, W.-T. & AUBRY, N. ۲۰۲۲. Prediction and optimization of airfoil aerodynamic performance using deep neural network coupled Bayesian method. *Physics of Fluids*, ۳۴. <https://doi.org/10.1۰۶۳/۵.۱۲۲۵۹۵>
۲۸. MOSHTAGHZADEH, M. & ALIGOODARZ, M. R. ۲۰۲۲. Prediction of Wind Turbine Airfoil Performance Using Artificial Neural Network and CFD Approaches. *International Journal of Engineering & Technology Innovation*, ۱۲. <https://doi.org/10.4۶۶۰۴/ijeti.۲۰۲۲.9۷۳۵>
۲۹. TYAN, M., CHOI, C.-K., NGUYEN, T. A. & LEE, J.-W. ۲۰۲۳. Rapid Airfoil Inverse Design Method with a Deep Neural Network and Hyperparameter Selection. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, ۲۴, ۳۳-۴۶. <https://doi.org/10.1۰۰۷/s۴۲۴۰۵-۰۲۲-۰۰۵۰۷-x>
۳۰. VOLKMER, K. KAUFMANN, N. CAROLUS, T.H. Mitigation of the aerodynamic noise of small axial wind turbines-methods and experimental validation. *Journal of Sound and Vibration*, vol. ۵۰۰, p. ۱۱۶۰۲۷, ۲۰۲۱. <https://doi.org/10.1۰۱۶/j.jsv.۲۰۲۱,۱۱۶۰۲۷>
۳۱. GERHARD, T. & CAROLUS, T. Investigation of Airfoil Trailing Edge Noise with Advanced Experimental and Numerical Methods. The ۲۱st International Congress on Sound and Vibration, ۲۰۱۴.
۳۲. SOMERS, D. M. ۲۰۰۵. S^h, S^h, and S^h Airfoils: November ۲۰۰۱--November

فهرستهای نشانه