

روش‌شناسی آزمایشگاهی و راهکارهای کاهش نویز در توربین‌های بادی محور عمودی با کاربرد شهری

حمیدرضا کاویانی^{*}، امیرمحمد سلیمانی^ا

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

^ب ایران، ملایر، دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک ۶۵۷۱۹-۹۵۳۴۳، کارشناسی

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

چکیده

در دهه‌های اخیر، توسعه و استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی در محیط‌های شهری باعث افزایش توجه به رفتار آکوستیکی آن‌ها شده است. ویژگی‌های خاص هندسی و عملکردی این توربین‌ها موجب ایجاد الگوهای صوتی متنوع می‌شود. در این پژوهش، تحلیل نسبتاً جامعی از رفتار آکوستیکی توربین‌های محور عمودی انجام شده است، با تمرکز بر شناسایی مکانیزم‌های تولید صدا و بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی مانند نسبت سرعت نوک پره، عدد رینولدز و ویژگی‌های هندسی پره بر آن. داده‌های حاصل از مطالعات تجربی انجام‌شده در تونل‌های باد غیرپژواکی و نیمه‌پژواکی مرور و ترکیب شده‌اند تا تصویری یکپارچه از منابع و ویژگی‌های نویز در این توربین‌ها ارائه شود. نتایج نشان می‌دهد که رفتار آکوستیکی توربین‌های محور عمودی به‌شدت وابسته به هندسه‌ی پره، شرایط مرزی لایه‌ی مرزی و روش همگام‌سازی چرخش با اندازه‌گیری صوتی است. همچنین، اعمال تحریک مصنوعی لایه‌ی مرزی با استفاده از نوارهای زبر باعث کاهش محسوس نویز تونال و افزایش پایداری جریان اطراف توربین می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به طراحی توربین‌های کم‌صدا برای کاربردهای شهری و محیط‌هایی با محدودیت صوتی کمک نماید.

کلمات کلیدی: آزمایش تجربی، توربین بادی محور عمودی، ایروآکوستیک، کاهش صوت.

۱- مقدمه

افزایش تقاضای جهانی برای انرژی‌های تجدیدپذیر موجب شده است که سامانه‌های بادی به یکی از محورهای اصلی توسعه‌ی پایدار تبدیل شوند. در این میان، توربین‌های بادی محور عمودی (Vertical Axis Wind Turbines – VAWTs) به دلیل مزایایی همچون سادگی ساخت، عدم نیاز به سیستم‌های جهت‌یابی باد و قابلیت نصب در محیط‌های شهری، توجه روزافزونی را به خود جلب

کرده‌اند. با این حال، رفتار آیرودینامیکی ناپایدار این توربین‌ها و تأثیر آن بر تولید نویز، یکی از چالش‌های اساسی در مسیر استفاده گسترده از این توربین‌ها به‌شمار می‌آید. [۱-۳]

در مقایسه با توربین‌های محور افقی، جریان عبوری از روی پره‌های توربین محور عمودی دارای ماهیت متناوب و وابسته به زاویه‌ی موقعیت پره است. این ناپیوستگی در شرایط جریان باعث ایجاد پدیده‌های آیرودینامیکی پیچیده‌ای مانند جدایش گردابه‌ای در لبه‌ی حمله (Leading Edge Separation) و بازپیوست جریان در لبه‌ی فرار (Trailing Edge Reattachment) می‌شود. چنین رفتارهایی منجر به تولید نویزهای متناوب با ساختار تونال (Tonal Noise) و پهن‌بند (Broadband Noise) در گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌ها می‌گردد [۴،۵]. با وجود پیشرفت‌های اخیر، هنوز چالش‌های متعددی در درک رفتار صوتی توربین‌های محور عمودی وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به تأثیر تلاطم جریان ورودی، موقعیت نصب، و هم‌زمانی اندازه‌گیری صوتی با چرخش پره اشاره کرد. بنابراین، هدف این پژوهش، بررسی نظام‌مند روش‌های آزمایشگاهی و عددی در مطالعات آکوستیکی توربین‌های محور عمودی، تحلیل پارامترهای کلیدی مؤثر بر تولید نویز، و ارائه‌ی چارچوبی جامع برای طراحی توربین‌های کم‌صدا است. در ادامه، روش‌شناسی‌های به‌کاررفته در آزمایش‌های آکوستیکی، ویژگی تجهیزات اندازه‌گیری و استانداردهای کنترل کیفیت داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- تحلیل مقایسه‌ای روش‌شناسی و تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱ روش‌های تحقیق تجربی در آکوستیک توربین‌های بادی محور عمودی

پژوهش‌های تجربی در حوزه‌ی آکوستیک توربین‌های بادی محور عمودی عمدتاً در سه محیط آزمایشگاهی اصلی انجام می‌شوند: تونل باد غیر پژواکی (Anechoic Wind Tunnel)، تونل باد آکوستیک (Acoustic Wind Tunnel)، و فضا‌های نیمه پژواکی [۱-۳] (Semi-Anechoic Chambers). انتخاب هر یک از این محیط‌ها تابعی از هدف آزمایش، محدوده‌ی فرکانسی مورد بررسی، و سطح نویز زمینه‌ی قابل قبول است.

در آزمایش‌های غیر پژواکی، دیوارهای اتاق یا تونل باد با مواد جاذب صوت (Sound Absorbing Materials) پوشیده می‌شوند تا بازتاب امواج صوتی به حداقل برسد و تنها صداهای ناشی از منبع اصلی (توربین بادی) ثبت شوند [۴]. این روش برای اندازه‌گیری دقیق فشار صوتی (Sound Pressure Level - SPL) در محدوده‌ی فرکانس‌های پایین تا متوسط بسیار مؤثر است. در مقابل، محیط‌های نیمه پژواکی برای مطالعات کاربردی‌تر به‌ویژه در مقیاس بزرگتر به‌کار می‌روند، زیرا امکان نصب آسان‌تر تجهیزات شبیه‌سازی شرایط واقعی جریان را فراهم می‌کنند. [۵]

در پژوهش «بات و همکاران» [۶]، آزمایش‌ها در تونل باد نیمه پژواکی با ابعاد ۲٫۵ در ۲٫۵ متر انجام شد و از شبکه‌های توری یا همراستا ساز جریان (Flow Straighteners) برای کاهش تلاطم ورودی استفاده گردید. در مقابل، «گراهام و پیرسون» [۷] از تونل باد کاملاً غیر پژواکی با عایق کاری چندلایه و بازتاب کمتر از ۰٫۵٪ در دیوارها بهره گرفتند تا اثر نویز پس‌زمینه تقریباً حذف شود. مقایسه‌ی این دو نوع آزمایشگاه نشان می‌دهد که روش غیر پژواکی دقت بسیار بالاتری در تشخیص پیک‌های تونال دارد، در حالی که روش نیمه پژواکی برای بررسی نویزهای پهن‌بند در شرایط شبه‌واقعی مناسب‌تر است.

از نظر مقیاس آزمایش، پژوهش‌های دانشگاه کمبریج [۷] و دانشگاه بلگراد [۸] از مدل‌های کوچک مقیاس با قطر ۰٫۰۶ تا ۰٫۸ متر استفاده کرده‌اند. در مقابل، در مطالعات صنعتی [۹] از توربین‌های در مقیاس کامل با قطر بیش از ۲ متر بهره گرفته شده است. در هر حالت، استفاده از روابط تبدیل مقیاس (Scaling Laws) مبتنی بر عدد رینولدز و نسبت سرعت نوک پره (Tip Speed Ratio - TSR) برای هم‌ارزسازی و مقایسه داده‌ها ضروری است.

۲-۲ طبقه‌بندی و تحلیل تجهیزات پیشرفته اندازه‌گیری آکوستیک

اندازه‌گیری آکوستیکی در مطالعات توربین‌های محور عمودی به‌طور عمده با استفاده از سه دسته‌ی اصلی ابزار انجام می‌شود:

۱. میکروفن‌های میدان آزاد (Free-Field Microphones)،

۲. آرایه‌های میکروفونی (Microphone Arrays)،

۳. دوربین‌های آکوستیکی [۱۰-۱۲] (Acoustic Cameras)

میکروفن‌های میدان آزاد معمولاً برای اندازه‌گیری دقیق سطح فشار صوتی در یک نقطه استفاده می‌شوند. این میکروفن‌ها دارای پاسخ فرکانسی خطی در گستره‌ی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز بوده و اغلب از نوع خازنی (Condenser Type) هستند. در آزمایش «لی و همکاران» [۱۳]، از میکروفن مدل ۴۱۸۹ Brüel & Kjær Type با حساسیت ۵۰ میلی‌ولت بر پاسکال و قطر ۱/۲ اینچ استفاده شد. در مقابل، پژوهش «پیرسون» [۷] از میکروفن‌های کوچک‌تر با قطر ۱/۴ اینچ بهره گرفت تا قابلیت ثبت فرکانس‌های بالاتر تا ۴۰ کیلوهرتز فراهم شود.

آرایه‌های میکروفونی به دلیل امکان بازسازی میدان صوتی و تعیین موقعیت منبع نویز، در مطالعات جدیدتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در پژوهش «دینولویج و همکاران» [۸]، از آرایه‌ای شامل ۴۸ میکروفن به صورت مارپیچی (Spiral Array) استفاده شد تا تصویر توزیع شدت صوتی حول توربین بازسازی شود. در مطالعات صنعتی نیز، دوربین‌های آکوستیکی مجهز به حسگرهای MEMS و الگوریتم‌های پردازش پرتو (Beamforming) برای شناسایی سریع منابع صوتی به کار می‌روند [۱۴]. در جدول ۱ برخی مشخصات این سه روش تجربی برای مقایسه بهتر آرایه شده است.

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های فنی تجهیزات آکوستیکی مورد استفاده در پژوهش‌های مرور شده

نوع تجهیز	محدوده فرکانس (Hz)	دقت (dB)	تعداد حسگر	هزینه تقریبی (USD)	مثال پژوهشی
میکروفن میدان آزاد	۲۰-۲۰,۰۰۰	±۱.۰	تک حسگر	۱,۰۰۰-۲,۰۰۰	[۱۳]
آرایه میکروفونی	۵۰-۱۵,۰۰۰	±۲.۰	۱۶-۶۴	۵,۰۰۰-۱۵,۰۰۰	[۸]
دوربین آکوستیکی	۱۰۰-۱۰,۰۰۰	±۳.۰	۶۴-۱۲۸	۲۰,۰۰۰-۴۰,۰۰۰	[۱۴]

۳-۲. استانداردهای کالیبراسیون و کنترل کیفیت داده‌ها

دقت اندازه‌گیری در آزمایش‌های آکوستیکی وابسته به کالیبراسیون دقیق تجهیزات است. میکروفن‌ها معمولاً بر اساس استاندارد بین‌المللی IEC ۶۱۰۹۴ و پروتکل‌های خاص آزمایشگاه‌ها تنظیم می‌شوند. برای آزمون‌های مرتبط با توربین‌های بادی، استاندارد IEC ۶۱۴۰۰-۱۱ به عنوان مرجع اصلی ارزیابی سطح نویز به کار می‌رود [۱۵]. در پژوهش‌های اخیر، علاوه بر کالیبراسیون استاتیک، از روش‌های کالیبراسیون دینامیکی نیز استفاده شده است تا تأثیر جهت باد و ارتعاش سازه‌ای در اندازه‌گیری‌ها کاهش یابد [۱۶]. در این روش، پاسخ فرکانسی میکروفن‌ها در میدان جریان واقعی بررسی و تصحیح می‌شود. همچنین برای کنترل کیفیت داده‌ها، از میانگین‌گیری طیفی، فیلترهای حذف نویز محیطی (Noise Reduction Filters) و الگوریتم‌های همگام‌سازی سیگنال استفاده می‌شود [۱۷].

۴-۲. چالش‌های محیط‌های آزمایشگاهی و راهکارهای فنی

محیط‌های آزمایشگاهی آکوستیکی با چالش‌های متعددی مواجه‌اند که دقت نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، بازتاب امواج صوتی از دیواره‌های تونل باد است که منجر به تداخل سازنده یا مخرب در داده‌های ثبت شده می‌شود. برای کاهش این اثر، از مواد جاذب با ضریب افت بالاتر از ۰.۹۵ و هندسه‌های دیواره‌ی ناموازی استفاده می‌گردد [۱۸]. در تونل‌های باد نیمه پژواکی، چالش اصلی تلاطم غیر یکنواخت جریان است. پژوهش «بات و همکاران» [۶] با نصب شبکه‌های منظم در ورودی تونل و استفاده از سامانه‌ی کنترل دمای هوای ورودی، موفق به تثبیت شدت تلاطم در محدوده‌ی کمتر از ۲٪ شد. در آزمایشگاه‌های بزرگ‌تر، سامانه‌های کنترل فعال نویز (Active Noise Control Systems) نیز برای حذف صدای فن‌های تونل مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۹]. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب نوع محیط آزمایشگاهی و تجهیزات آکوستیکی تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر

کیفیت داده‌های صوتی دارد. ترکیب روش‌های مختلف شامل میکروفن‌های دقیق، آرایه‌های چندحسگره و همگام‌سازی زمانی با حرکت روتور توربین، چارچوبی جامع برای مطالعه رفتار آکوستیکی توربین‌های محور عمودی فراهم می‌کند.

۳- واکاوی پارامترهای مؤثر در آزمایش‌های تجربی

۳-۱ پارامترهای کلیدی عملکردی و آکوستیکی

مطالعات تجربی و عددی نشان می‌دهند که رفتار آکوستیکی توربین‌های محور به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای بی‌بعدی است که مشخص‌کننده وضعیت دینامیکی جریان و ویژگی‌های هندسی روتور هستند. از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به نسبت سرعت نوک پره (Tip Speed Ratio - TSR)، عدد رینولدز (Reynolds Number - Re) و سختی پره (Solidity) اشاره کرد. [۱-۳] نسبت سرعت نوک پره (TSR) به‌صورت نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد آزاد تعریف می‌شود. افزایش TSR منجر به رشد بسامد گذر پره (Blade Passing Frequency - BPF) و جابه‌جایی پیک‌های تونال به محدوده‌های فرکانسی بالاتر می‌شود [۴]. در آزمایش‌های انجام‌شده توسط لی و همکاران [۵]، مشاهده شد که در محدوده‌ی TSR بین ۲ تا ۵، سطح فشار صوتی (Sound Pressure Level - SPL) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و طیف نویز دارای ساختار هارمونیکی منظم می‌شود. با این حال، افزایش بیشتر TSR باعث افت راندمان و بروز اغتشاش‌های جریان برگشتی می‌شود که به تولید نویز پهن‌بند منجر می‌گردد. [۶] عدد رینولدز که نسبت نیروهای لختی به نیروهای ویسکوز را نشان می‌دهد، نقش اساسی در تعیین نوع جریان روی پره دارد. در شرایط آزمایشگاهی که عدد رینولدز معمولاً کمتر از مقادیر عملیاتی توربین‌های بزرگ است، رفتار جریان تمایل بیشتری به حالت لایه‌ای دارد و احتمال بروز نوسانات تناوبی افزایش می‌یابد. به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران، از جمله دینولویچ و همکاران [۷]، برای تطبیق مقیاس آزمایشگاهی با مقیاس واقعی، از روش‌های اصلاحی مبتنی بر هم‌ارزی دینامیکی (Dynamic Similarity) استفاده کرده‌اند.

سختی پره (Solidity) که از نسبت مجموع مساحت مقطع پره‌ها به سطح مقطع دایره‌ی چرخش به‌دست می‌آید، تعیین‌کننده‌ی چگالی آیرودینامیکی روتور است. افزایش سختی، جریان را محدودتر کرده و موجب افزایش نیروهای برآیند روی پره‌ها می‌شود، اما در عوض موجب افزایش سطح نویز در فرکانس‌های پایین نیز می‌گردد [۸]. در آزمایش‌های بات و همکاران [۹]، مشاهده شد که افزایش سختی از ۰.۱ به ۰.۳ موجب رشد ۴ تا ۶ دسی‌بل در سطح فشار صوتی کلی (Overall SPL) می‌شود.

۳-۲ نقش مورفولوژی و هندسه توربین در تولید نویز

هندسه‌ی پره‌ها، تعداد و زاویه‌ی نصب آن‌ها، و همچنین ابعاد اجزای نگهدارنده از جمله بازوها و شفت مرکزی، از عوامل مؤثر در الگوی تولید نویز هستند. در پژوهش پیرسون [۱۰]، مقایسه‌ی دو نوع توربین محور عمودی با پره‌ی مستقیم (H-Darrieus) و منحنی (Curved Darrieus) نشان داد که توربین منحنی به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر بار آیرودینامیکی، نویز تونال ضعیف‌تری تولید می‌کند. در مقابل، توربین‌های با پره‌ی مستقیم به‌واسطه‌ی تغییر ناگهانی زاویه‌ی حمله در هر نیم‌دور، نوسانات شدیدی در فشار سطحی و در نتیجه نویز با دامنه‌ی بیشتر ایجاد می‌کنند [۱۱]. افزون بر نوع پره، تعداد پره‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار طیف نویز دارد. افزایش تعداد پره‌ها از سه به چهار موجب افزایش بسامد گذر پره BPF و جابه‌جایی نویز تونال به محدوده‌های بالاتر می‌شود، در حالی که هم‌زمان، انرژی در فرکانس‌های پایین کاهش می‌یابد [۱۲]. این رفتار به‌ویژه در پژوهش‌های دینولویچ و همکاران [۷] در آزمایش‌های عددی و تجربی مشاهده شد. از سوی دیگر، زاویه‌ی گام پره‌ها (Pitch Angle) و انحنای مقطع نیز بر رفتار صوتی اثرگذارند. پره‌های با گام منفی (Negative Pitch) معمولاً تمایل به تولید گردابه‌های قوی‌تر در لبه‌ی حمله دارند که منجر به افزایش نویز پهن‌بند در فرکانس‌های بالا می‌شود [۱۳]. قطر شفت مرکزی نیز در توربین‌های کوچک مقیاس اهمیت دارد. قطر بزرگ‌تر شفت موجب افزایش تداخل آیرودینامیکی با پره‌های عبوری و در نتیجه افزایش نویز فرکانس پایین می‌شود. در پژوهش گراهام و پیرسون [۱۴]، کاهش قطر شفت از ۱۰٪ به ۶٪ قطر روتور موجب افت ۳ دسی‌بل در سطح نویز فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز گردید.

۳-۳ تأثیر شرایط جریان و لایه مرزی

شرایط جریان ورودی به تونل باد یا محیط آزمایش، به‌ویژه شدت تلاطم (Turbulence Intensity - TI)، یکی از عوامل کلیدی در تعیین الگوی نویز است. در جریان‌های با تلاطم پایین، نویز تونال به‌دلیل ساختار منظم گردابه‌ها غالب است، در حالی که در جریان‌های با تلاطم بالا، نویز پهن‌بند افزایش می‌یابد [۱۵]. در پژوهش بات و همکاران [۹]، افزایش شدت تلاطم از ۱٪ به ۵٪ باعث افزایش ۶ دسی‌بل در پهنای طیف نویز شد، در حالی که پیک‌های تونال تا حد زیادی تضعیف شدند. وضعیت رژیم جریان در لایه مرزی نیز تأثیر مستقیم بر انتشار صدا دارد. هنگامی که رژیم جریان آرام در لایه مرزی برقرار است، ناپایداری‌های تناوبی منجر به ایجاد پیک‌های متمرکز در طیف صوتی می‌شوند. اما با اعمال تریپ لایه مرزی (Boundary Layer Tripping) و تبدیل جریان آرام به آشفتگی، این پیک‌ها از بین رفته و نویز به شکل پهن‌بند توزیع می‌شود [۱۶]. در آزمایش‌های دانشگاه کمبریج [۱۴]، استفاده از نوار تریپ با ضخامت ۰.۳ میلی‌متر روی لبه‌ی حمله موجب کاهش حدود ۵ دسی‌بل در نویز تونال اصلی گردید. افزون بر آن، جهت و سرعت باد ورودی نیز بر رفتار آکوستیکی تأثیرگذار است. در آزمایش‌های لی و همکاران [۵]، مشخص شد که تغییر زاویه‌ی حمله‌ی متوسط باد ورودی تا ۱۰ درجه می‌تواند سبب تغییرات محسوسی در بسامد اصلی نویز شود. این موضوع اهمیت رعایت دقیق شرایط آزمون واقعی را هنگام اعتبارسنجی روش‌های عددی و شبیه‌سازی برجسته می‌کند.

۳-۴ روش‌های همگام‌سازی و نمونه‌برداری پیشرفته

یکی از چالش‌های اساسی در آزمایش آکوستیکی توربین بادی محور عمودی، همگام‌سازی (Synchronization) دقیق بین سیگنال‌های صوتی و وضعیت دورانی روتور است. در غیاب همگام‌سازی مناسب، استخراج مؤلفه‌های وابسته به بسامد گذر BPF با خطا همراه خواهد بود. برای رفع این مشکل، پژوهشگران از سامانه‌های انکودر چرخشی (Rotary Encoder Systems) استفاده می‌کنند که زاویه‌ی لحظه‌ای روتور را با دقت بالا اندازه‌گیری کرده و به سامانه‌ی ثبت داده ارسال می‌نماید [۱]. در پژوهش دینولویچ [۷]، از انکودری با دقت ۳۶۰۰ پالس بر دور استفاده شد و داده‌های آکوستیکی با نرخ نمونه‌برداری (Sampling Rate) معادل ۵۰ کیلوهرتز ثبت گردید. سپس، از روش‌های پردازش سیگنال مانند تبدیل فوریه هم‌زمان (Phase-Locked Fourier Transform) برای استخراج طیف‌های وابسته به موقعیت زاویه‌ای استفاده شد. این روش موجب جداسازی دقیق نویزهای تونال وابسته به موقعیت پره از نویزهای تصادفی محیطی گردید. در پژوهش‌های جدیدتر، ترکیب داده‌های آکوستیکی با داده‌های حسگرهای فشار سطحی (Surface Pressure Sensors) نیز به‌کار گرفته شده است تا رابطه‌ی میان میدان جریان و میدان صوتی آشکار گردد [۱۸]. به‌کارگیری سامانه‌های داده‌برداری هم‌زمان چندکاناله (Multi-Channel Data Acquisition Systems) امکان تحلیل‌های زمانی-فرکانسی پیچیده مانند تبدیل موجک پیوسته (Continuous Wavelet Transform - CWT) را نیز فراهم کرده است که برای بررسی نویزهای گذرا بسیار مفید است [۱۹]. در مجموع، استفاده از فناوری‌های همگام‌سازی دقیق و روش‌های پردازش پیشرفته‌ی داده، ابزار مؤثری برای تحلیل دقیق‌تر نویز در توربین‌های محور عمودی به‌شمار می‌آید. این فناوری‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا ارتباط مستقیم میان پدیده‌های آیرودینامیکی و رفتار صوتی را با وضوح زمانی و فرکانسی بالا مشاهده کنند.

۴- تلفیق و تحلیل مقایسه‌ای نتایج تجربی

۴-۱ مکانیزم‌های اصلی تولید نویز در توربین‌های محور عمودی: شواهد تجربی

تحلیل داده‌های آکوستیکی حاصل از پژوهش‌های گوناگون نشان می‌دهد که مکانیزم‌های تولید نویز در توربین‌های بادی محور عمودی (Vertical Axis Wind Turbines - VAWTs) را می‌توان در چهار گروه عمده طبقه‌بندی کرد [۱-۳]:

۱- نویز تونال (Tonal Noise)،

۲. نویز ناشی از لبه‌ی فرار (Trailing Edge Noise)

۳. نویز ناپایداری لایه‌ی مرزی لایه‌ای (LBL-VS) (Laminar Boundary Layer-Vortex Shedding Noise)

۴. نویز ناشی از برهم‌کنش پره-گردابه (BVI) (Blade-Vortex Interaction Noise)

در مطالعات لی و همکاران [۴] و دینولویچ [۵] مشخص شد که نویز تونال غالباً در محدوده‌ی فرکانسی چند برابر بسامد گذر پره ظاهر می‌شود و با افزایش نسبت سرعت نوک پره به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد. این نویز، نتیجه‌ی نوسانات تناوبی فشار در نواحی لبه‌ی فرار پرها است. در مقابل، نویز ناشی از لبه‌ی فرار که از جدایش و بازپیوست گردابه‌ها حاصل می‌شود، ماهیت پهن‌بند دارد و معمولاً در محدوده‌ی فرکانسی ۵۰ تا ۵۰۰ هرتز متمرکز است [۶]. پژوهش گراهام و پیرسون [۷] در دانشگاه کمبریج نشان داد که با اعمال تریپ لایه‌ی مرزی روی لبه‌ی حمله، پدیده‌ی LBL-VS به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد و انرژی صوتی در محدوده‌ی فرکانس‌های پایین پراکنده‌تر می‌شود. در توربین‌های بدون تریپ، گذار ناپایدار جریان از حالت لایه‌ای به آشسته سبب تقویت رزونانس‌های موضعی می‌شود که در قالب نویز تونال شنیده می‌شود. نویز ناشی از برهم‌کنش پره-گردابه (BVI) زمانی رخ می‌دهد که پره‌های در حال چرخش با گردابه‌های حاصل از پره‌های قبلی برخورد کنند. این پدیده به‌ویژه در توربین‌هایی با سختی بالا ($Solidity > 0.25$) مشاهده شده است [۸]. داده‌های تجربی بات و همکاران [۹] نشان داد که در این شرایط، نویزهای تیز و ناپیوسته در طیف فرکانسی ظاهر می‌شوند که به‌صورت جهش‌های ناگهانی در دامنه‌ی SPL قابل مشاهده‌اند.

۴-۲ تحلیل طیف فرکانسی و سطوح نویز در شرایط کاری مختلف

یکی از ویژگی‌های مهم در مطالعات آکوستیکی توربین‌های محور عمودی، تغییر شکل طیف فرکانسی نویز با تغییر شرایط کاری است. در TSRهای پایین ($2 \leq TSR \leq 3$)، انرژی صوتی عمدتاً در محدوده‌ی فرکانس‌های زیر ۱ کیلوهرتز متمرکز بوده و نویز پهن‌بند غالب است. در این حالت، جریان روی پره ناپایدار و دارای جدایش‌های موضعی است [۱۰]. با افزایش TSR به محدوده‌ی ۴ تا ۶، ساختار جریان پایدارتر شده و پیک‌های تونال در بسامدهای مضرب BPF ظاهر می‌شوند [۱۱]. این رفتار در مطالعات لی [۴] و پیرسون [۱۲] تأیید شده و نشان می‌دهد که پدیده‌ی تونال با منظم‌تر شدن مسیر جریان تشدید می‌شود. در پژوهش دینولویچ [۵]، طیف فشار صوتی برای سه سرعت باد متفاوت (۸، ۱۰ و ۱۲ متر بر ثانیه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت باد، سطح نویز کلی (Overall SPL) تقریباً به‌صورت لگاریتمی افزایش یافته و در محدوده‌ی فرکانس‌های بالاتر از ۳ کیلوهرتز شیب طیف بیشتر می‌شود. این رفتار بیانگر افزایش انرژی گردابه‌های کوچک‌مقیاس است. نکته‌ی قابل‌توجه در بیشتر مطالعات، رابطه‌ی تقریباً خطی بین سطح نویز کلی و لگاریتم سرعت باد است که مشابه رفتار گزارش‌شده در توربین‌های محور افقی است [۱۳]. به‌عبارت دیگر، افزایش دو برابری سرعت باد، سطح نویز را به‌طور متوسط ۴ تا ۶ دسی‌بل افزایش می‌دهد. این قاعده‌ی تجربی می‌تواند برای برآورد اولیه‌ی سطوح نویز در شرایط کاری مختلف مفید باشد.

۴-۳ راهکارهای کاهش نویز بر اساس شواهد تجربی

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که کاهش نویز در توربین‌های محور عمودی نیازمند رویکردی چندوجهی است که شامل بهینه‌سازی هندسی، کنترل شرایط جریان و استفاده از فناوری‌های جدید مواد است. یکی از مؤثرترین روش‌ها، اعمال تریپ لایه‌ی مرزی (Boundary Layer Tripping) است که باعث تسریع گذار جریان از حالت لایه‌ای به آشسته و در نتیجه حذف نوسانات تناوبی می‌شود. آزمایش‌های گراهام و پیرسون [۷] نشان داد که این روش سطح نویز تونال را تا ۵ دسی‌بل کاهش می‌دهد. افزایش تعداد پرها نیز یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش نویز فرکانس پایین است، زیرا موجب توزیع یکنواخت‌تر بار آیرودینامیکی و کاهش فواصل زمانی بین عبور پرها از مقابل یک نقطه‌ی ثابت می‌شود [۸]. از دیدگاه هندسی، بهینه‌سازی شکل بازوها (Struts) و کاهش قطر شفت اصلی نیز به کاهش تداخل آیرودینامیکی و نویز ناشی از گردابه‌های بزرگ کمک می‌کند [۱۴]. در حوزه‌ی مواد، استفاده از پره‌های کامپوزیتی با خاصیت جذب صوت (Sound-Absorbing Composites) نیز به‌عنوان راهکاری نوظهور مطرح شده است [۱۵]. این مواد می‌توانند تا ۳ دسی‌بل از شدت نویز در محدوده‌ی ۱ تا ۳ کیلوهرتز بکاهند، بدون آنکه بر عملکرد آیرودینامیکی تأثیر منفی داشته باشند.

۴-۴ مقایسه عملکرد آکوستیکی توربین‌های مختلف بر اساس داده‌های تجربی

تحلیل مقایسه‌ای داده‌های تجربی از پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که توربین‌های با پره‌های منحنی‌شکل (Curved-Blade VAWTs) به‌طور متوسط سطح نویز کمتری نسبت به توربین‌های پره‌ی مستقیم (H-Darrieus) دارند. میانگین سطح فشار صوتی در این نوع توربین‌ها حدود ۶ تا ۸ دسی‌بل پایین‌تر است [۱۲]. توربین‌های با سختی پایین‌تر ($Solidity < 0.2$) نیز نویز کمتری تولید می‌کنند، زیرا سطح برهم‌کنش جریان و پره کاهش یافته است. در مقابل، توربین‌های با سختی بالا گرچه توان مکانیکی بیشتری تولید می‌کنند، اما به دلیل افزایش اثرات متقابل بین پره‌ها، دارای نویز پهن‌بند قوی‌تری هستند [۹]. در شرایط هم‌تراز از نظر TSR و سرعت باد، توربین‌های دارای قطر کوچک‌تر تمایل به انتشار نویز در فرکانس‌های بالاتر دارند، در حالی که توربین‌های بزرگ‌تر عمدتاً در فرکانس‌های پایین‌تر نویز تولید می‌کنند [۱۶]. این یافته با مدل‌های مقیاس‌گذاری آکوستیکی مبتنی بر روابط توان-فرکانس (Power-Frequency Scaling) مطابقت دارد [۱۷]. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که طراحی بهینه‌ی توربین‌های محور عمودی از دیدگاه آکوستیکی نیازمند مصالحه‌ای بین راندمان، پایداری جریان و سطح نویز است. در بسیاری از موارد، کاهش نویز با اندکی افت در راندمان همراه است و یافتن نقطه‌ی بهینه مستلزم تحلیل و بهینه‌سازی چند-هدفه (Multi-objective) است [۱۸].

۵- جمع بندی و پیشنهادات

۵-۱ جمع بندی تحقیقات تجربی/انجام شده

مطالعات گسترده‌ای که در سال‌های اخیر پیرامون رفتار آکوستیکی توربین‌های بادی محور عمودی انجام شده است، بررسی‌ها نشان می‌دهد که این سامانه‌ها با وجود مزایای ساختاری و عملکردی، به دلیل ویژگی‌های دینامیکی جریان پیرامون روتور، دارای رفتار صوتی پیچیده‌ای هستند. تلفیق نتایج پژوهش‌های تجربی و عددی انجام‌شده توسط لی، گراهام، پیرسون، بات و دینولویج [۱۱-۵] بیانگر آن است که تولید نویز در این توربین‌ها تابعی از سه گروه پارامتر اصلی است: ویژگی‌های هندسی، شرایط جریان، و تنظیمات تجربی و عددی آزمایش‌ها.

ویژگی‌های هندسی توربین از جمله نوع پروفیل پره، قطر روتور، تعداد پره‌ها، ضخامت نسبی، انحنا و نسبت منطری پره‌ها (Aspect Ratio) نقش مستقیمی در میزان نویز منتشرشده دارند. در پژوهش‌های پیرسون [۷] و دینولویج و همکاران [۱۰] مشخص شد که توربین‌های دارای پره‌های منحنی‌شکل (Darrieus-Type) نسبت به مدل‌های پره‌ی مستقیم (H-Type) نویز کمتری تولید می‌کنند. این رفتار ناشی از توزیع متعادل‌تر بار آبرودینامیکی و کاهش نرخ تغییر فشار در طول دوران پره است. همچنین، افزایش تعداد پره‌ها موجب کاهش پیک‌های تونال در طیف فرکانسی و در عین حال افزایش شدت نویز پهن‌بند می‌شود که نتیجه‌ی افزایش هم‌پوشانی زمانی جدایش گردابه‌ها است. [۱۱] افزایش تعداد پره‌ها منجر به توزیع متعادل‌تر جریان و کاهش نویز در فرکانس‌های پایین می‌شود، هرچند که ممکن است باعث کاهش راندمان کلی توربین گردد. [7]

یکی از عوامل کلیدی در رفتار صوتی توربین‌های محور عمودی، وضعیت لایه‌ی مرزی بر روی پره‌ها است. اگر لایه‌ی مرزی در لبه حمله پره پایدار باقی بماند، ناپایداری‌های تناوبی جریان موجب تقویت مدهای آکوستیکی و در نتیجه افزایش نویز تونال می‌گردند. در مقابل، هنگامی که جریان با استفاده از تحریک مصنوعی یا نوارهای زیر (Trip Tape) به حالت آشفته (Turbulent) تبدیل می‌شود، انرژی صوتی در طیف گسترده‌تری توزیع یافته و نویز پهن‌بند غالب می‌گردد [۸]. نتایج آزمایش‌های تونل باد دانشگاه کمبریج [۹] و بلگراد [۱۰] نشان داد که کنترل گذار جریان با استفاده از تریپ لایه‌ی مرزی، تأثیر چشمگیری در کاهش نویز تونال و یکنواخت‌سازی میدان صوتی دارد. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که اعمال تریپ لایه‌ی مرزی روی لبه‌ی حمله، از شکل‌گیری پدیده‌ی ناپایداری لایه‌ی مرزی-گردابه (Laminar Boundary Layer-Vortex Shedding - LBL-VS) جلوگیری کرده و سطح نویز تونال را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر اهمیت کنترل گذار جریان از حالت لایه‌ای به آشفته در طراحی آکوستیکی توربین‌های محور عمودی هستند.

از دیدگاه جریان، نسبت سرعت نوک پره TSR و عدد رینولدز دو عامل کلیدی در تعیین ساختار طیف نویز هستند. نتایج نشان داده‌اند که با افزایش TSR پیک‌های تونال (Tonal Peaks) به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابند و نویز کلی افزایش

می‌یابد[۸]. با این حال، در محدوده‌ی TSR پایین‌تر (۲ تا ۴)، نویز پهن‌بند غالب بوده و شدت صدا به‌مراتب کمتر است. بنابراین، انتخاب TSR بهینه برای دستیابی به تعادل میان راندمان و نویز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در بُعد تجربی، انتخاب محیط آزمایشگاهی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت داده‌ها دارد. نتایج نشان داده‌اند که تونل‌های باد غیر پژواکی بالاترین دقت را برای تشخیص پیک‌های تونال ارائه می‌دهند، در حالی که تونل‌های نیمه پژواکی (Semi-Anechoic) شرایط واقع‌گرایانه‌تری برای بررسی رفتار آکوستیکی در محیط‌های باز فراهم می‌کنند [۱۱]. افزون بر این، استفاده از میکروفن‌های میدان آزاد با دقت بالا و آرایه‌های چندحسره امکان بازسازی میدان صوتی را با تفکیک مکانی مناسب مهیا می‌سازد. [۱۲]

پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های همگام‌سازی چرخش-صوت (Rotation-Sound Synchronization) بر پایه‌ی انکودرهای چرخشی و پردازش سیگنال هم‌زمان (Phase-Locked Analysis) دقت نتایج آکوستیکی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۳]. این روش‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا مؤلفه‌های صوتی وابسته به بسامد گذر پر را از نویزهای تصادفی محیطی تفکیک کنند. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی آکوستیکی توربین‌های محور عمودی باید بر پایه‌ی تعامل سه‌گانه‌ی هندسه-جریان-اندازه‌گیری بنا شود. این تعامل بیانگر آن است که هیچ‌یک از عوامل به‌صورت مستقل قابل تحلیل نیستند و تنها از طریق یک رویکرد جامع میان‌رشته‌ای می‌توان به طراحی بهینه دست یافت.

۲-۵ پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در درک رفتار آکوستیکی توربین‌های محور عمودی، هنوز مسیرهای تحقیقاتی مهمی برای آینده وجود دارد که می‌تواند به توسعه‌ی دانش و بهبود عملکرد آکوستیکی این توربین‌ها کمک کند:

مدل‌سازی کوپل‌شده‌ی جریان و صوت: (Coupled CFD-Acoustic Modeling) توسعه‌ی مدل‌هایی که بتوانند به‌صورت هم‌زمان میدان جریان و میدان صوتی را شبیه‌سازی کنند، برای پیش‌بینی دقیق رفتار آکوستیکی توربین‌ها ضروری است. ترکیب معادلات ناویر-استوکس (Navier-Stokes Equations) با مدل فاکس و بلیامز-هاوکینز (FW-H) می‌تواند شالوده‌ی این روش‌ها را تشکیل دهد. [۱۴]

کاربرد فناوری‌های نوین حسگری: استفاده از حسگرهای فشار سطحی مبتنی بر MEMS و دوربین‌های آکوستیکی با قابلیت تصویربرداری لحظه‌ای از میدان صوتی، می‌تواند اطلاعات چندبعدی ارزشمندی در اختیار پژوهشگران قرار دهد. [۱۵]

تحلیل داده با الگوریتم‌های یادگیری ماشین: (Machine Learning) با افزایش حجم داده‌های آکوستیکی، استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق (Deep Neural Networks) برای شناسایی الگوهای صوتی و پیش‌بینی رفتار نویز در شرایط متغیر باد پیشنهاد می‌شود. [۱۶]

بررسی اثر محیط نصب در مقیاس واقعی: بیشتر پژوهش‌های موجود در تونل باد انجام شده‌اند. در حالی که نصب توربین‌ها در محیط‌های شهری واقعی با بازتاب صدا، اثرات سطح زمین و ناهمگونی جریان همراه است. توسعه‌ی مدل‌های انتشار صوتی (Sound Propagation Models) برای این شرایط ضروری است.

بهینه‌سازی چندهدفه‌ی هندسی: طراحی توربین‌هایی که هم‌زمان نویز پایین و راندمان بالا داشته باشند، نیازمند بهینه‌سازی چندهدفه (Multi-Objective Optimization) با استفاده از الگوریتم‌های فرامکاشفه‌ای مانند الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات است.

۶- نتیجه‌گیری

می‌توان گفت که پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون چارچوبی علمی و تجربی برای درک رفتار آکوستیکی توربین‌های بادی محور عمودی فراهم کرده‌اند. در این میان، یافته‌ها بر اهمیت کنترل لایه‌ی مرزی، بهینه‌سازی هندسی پره‌ها و هم‌زمان‌سازی دقیق داده‌ها تأکید دارند. مرور مطالعات تجربی و عددی نشان می‌دهد که رفتار آکوستیکی توربین‌های محور عمودی تابعی پیچیده از هندسه، شرایط جریان و روش‌های اندازه‌گیری است. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در درک مکانیزم‌های تولید نویز، هنوز برخی حوزه‌ها نیازمند پژوهش عمیق‌تر هستند. یکی از این حوزه‌ها، توسعه‌ی مدل‌های عددی کوپل‌شده است که بتوانند هم‌زمان میدان جریان و

میدان صوتی را با دقت بالا بازسازی کنند [۱۹]. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین حسگرهای MEMS و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی نویز در شرایط متغیر باد، از مسیرهای نویدبخش آینده است. افزون بر این، مطالعات آینده باید بر تحلیل اثرات نصب توربین در محیط‌های واقعی شهری متمرکز شوند، زیرا بازتاب صدا از ساختمان‌ها و موانع می‌تواند ویژگی‌های نویز را به شدت تغییر دهد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب روش‌های تجربی دقیق با مدل‌سازی عددی پیشرفته، مسیر اصلی برای طراحی توربین‌های بادی محور عمودی کم‌صدا در دهه‌ی آینده خواهد بود. آینده‌ی تحقیقات در این حوزه در گرو توسعه‌ی مدل‌های ترکیبی عددی-تجربی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین حسگری و هوش مصنوعی برای طراحی توربین‌های کم‌صدا و با راندمان بالا است. این مسیر پژوهشی، نه تنها به ارتقای کارایی آکوستیکی توربین‌ها منجر می‌شود، بلکه گامی اساسی در جهت توسعه‌ی پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش اثرات زیست‌محیطی فناوری باد در محیط‌های انسانی به شمار می‌آید.

مراجع

- [1] Butt, A. H., et al., "Experimental investigation of aerodynamic noise from a vertical axis wind turbine," *Fluids*, vol. 5, no. 2, 2020, pp. 123–138.
- [2] Li, S., et al., "Aerodynamic and aeroacoustic performance of small-scale vertical axis wind turbines," *Renewable Energy*, preprint, 2022, pp. 1–22.
- [3] Dinlovic, M. R., et al., "Hybrid numerical-experimental approach to acoustic field prediction in vertical axis turbines," *Thermal Science*, vol. 27, 2023, pp. 351–370.
- [4] Graham, W. R., and Pearson, C. E., "On tonal noise mechanisms in small Darrieus-type vertical axis wind turbines," *University of Cambridge Technical Report*, 2023, pp. 1–26.
- [5] Pearson, C. E., "Aerodynamic and acoustic measurements of H-Darrieus turbines," *AIAA Journal*, vol. 51, no. 6, 2013, pp. 1412–1428.
- [6] Li, S., et al., "Flow structure and noise characteristics of low-Reynolds vertical axis wind turbines," *Applied Acoustics*, vol. 191, 2022, 108725.
- [7] Graham, W. R., and Pearson, C. E., "Effect of boundary-layer tripping on tonal noise from vertical axis wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 214, 2023, 104789.
- [8] Dinlovic, M. R., and Vukoslavcevic, P., "Experimental and computational analysis of sound generation from rotating blades," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 118, 2023, 103121.
- [9] Butt, A. H., and Arif, M., "Flow-induced noise characteristics of vertical axis wind turbines under turbulent inflow," *Energy Reports*, vol. 7, 2021, pp. 3415–3432.
- [10] Pearson, C. E., "Influence of blade geometry on aerodynamic noise of Darrieus turbines," *AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2013.
- [11] Mirko, R. D., et al., "Parametric study of noise spectra in vertical axis turbines using acoustic arrays," *Thermal Science*, vol. 29, 2023, pp. 612–628.
- [12] Li, S., et al., "Wind tunnel experiments on noise generation of curved-blade turbines," *Renewable Energy*, 2022, pp. 115–132.
- [13] Graham, W. R., and Pearson, C. E., "Phase-locked measurements of aerodynamic noise in VAWTs," *Cambridge University Report Series*, 2023.
- [14] Dinlovic, M. R., et al., "Hybrid CFD/FW-H simulations of Darrieus turbine noise," *Thermal Science*, vol. 27, 2023, pp. 351–370.
- [15] IEC 61400-11, "Wind turbine generator systems — Part 11: Acoustic noise measurement techniques," *International Electrotechnical Commission Standard*, 2012.
- [16] Lighthill, M. J., "On sound generated aerodynamically. I. General theory," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 211, 1952, pp. 564–587.
- [17] Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 264, 1969, pp. 321–342.

- [18] Kim, J., and Lee, C., “Multi-objective optimization of vertical axis wind turbines for low-noise design,” *Energy Conversion and Management*, vol. 258, 2022, 115593.