



The University of Tehran Press

Investigation and Simulation of Micro-Electromechanical Sensors on Wind Turbine Performance

Kian Rafiei¹ | Javad Koohsorkhi^{2*}

1. Master Student of Mechatronic Engineering, Faculty of Mechanics, Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University; Advanced Micro and Nano devices Lab., Department of MEMS and NEMS, Faculty of Intelligent Systems, University of Tehran. Email: kianrafiee28@gmail.com

2. Corresponding Author, Associate Professor at Department of MEMS and NEMS, Faculty of Intelligent Systems, University of Tehran; Advanced Micro and Nano devices Lab., Department of MEMS and NEMS, Faculty of Intelligent Systems, University of Tehran. Email: koohsorkhi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 February 2025
Revised 15 March 2025
Accepted 05 April 2025
Published Online 22 June 2025

Keywords:
Wind turbine,
Yaw incoherence,
Microelectromechanical sensor,
Sensitivity,
Hot wire sensors.

ABSTRACT

Wind turbines play a crucial role in renewable energy systems and, with the global shift towards sustainable energy sources, the use of this technology is expanding. This study examines the effect of yaw misalignment on the power coefficient (C_p) of a 5 MW reference wind turbine. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were carried out for this purpose. Yaw misalignment, defined as the deviation of the rotor axis from the prevailing wind direction, impacts turbine performance by reducing power output and increasing mechanical stresses. The simulation results indicate that even a 2-degree yaw misalignment can result in a 1% reduction in the power coefficient. Furthermore, the performance of various sensors, including traditional anemometers and wind vanes, hot-wire sensors, acoustic sensors, LiDAR, and micro-electromechanical system (MEMS) sensors, were evaluated in terms of accuracy, working range, operational temperature, and response time. The findings reveal that hot-wire, acoustic, and MEMS sensors are superior in detecting yaw angle and wind speed due to their high accuracy, rapid response, and stability in varying environmental conditions. Additionally, MEMS sensors, with their compact design, low energy consumption, and reasonable cost, offer an ideal solution for improving wind turbine performance and reducing maintenance costs. This study highlights the significance of advanced sensors in optimizing wind turbine performance and enhancing wind energy efficiency.

Cite this article: Rafiei, K. & Koohsorkhi, J. (2025). Investigation and Simulation of Micro-Electromechanical Sensors on Wind Turbine Performance. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (3), 233-249. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.389998.1118>



© Kian Rafiei, Javad Koohsorkhi

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.389998.1118>

Publisher: University of Tehran Press.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

بررسی و شبیه‌سازی تأثیر حسگرهای میکروالکترومکانیکی روی عملکرد توربین‌های بادی

کیان رفیعی^۱ | جواد کوهسرخ^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی؛ آزمایشگاه ساخت ادوات پیشرفته میکرو نانو، گروه مهندسی سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیک، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران. رایانامه: kianrafiee28@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه ریزفناوری، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران؛ آزمایشگاه ساخت ادوات پیشرفته میکرو نانو، گروه مهندسی سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیک، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران. رایانامه: koohsorkhi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

توربین بادی،

ناهماهنگی یاو،

حسگر میکروالکترومکانیکی،

حساسیت،

حسگرهای سیم داغ.

توربین‌های بادی نقش کلیدی در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌کنند و با توجه به حرکت جهانی به سمت منابع انرژی پایدار، استفاده از این فناوری در حال گسترش است. این مقاله به بررسی تأثیر ناهماهنگی زاویه یاو بر ضریب توان (Cp) توربین بادی مرجع ۵ مگاواتی می‌پردازد. برای این منظور، شبیه‌سازی‌ها با استفاده دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شده است. ناهماهنگی یاو که به عنوان انحراف محور روتور از جهت باد غالب تعریف می‌شود، عملکرد توربین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش توان تولیدی و افزایش تنش‌های مکانیکی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد حتی ناهماهنگی زاویه‌ای به میزان ۲ درجه می‌تواند کاهش ۱۰ درصدی در ضریب توان را به همراه داشته باشد. در ادامه، عملکرد حسگرهای مختلف شامل بادسنج‌ها و جهت‌سنج‌های سنتی، سیم داغ، صوتی، لیدار (LiDAR) و حسگرهای میکروالکترومکانیکی (MEMS) از نظر دقت، محدوده کاری، دمای عملیاتی و زمان پاسخ‌دهی بررسی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد حسگرهای سیم داغ، صوتی و MEMS به دلیل دقت زیاد، پاسخ سریع و پایداری در شرایط محیطی متغیر، گزینه‌های برتری برای شناسایی زاویه یاو و سرعت باد هستند. همچنین، حسگرهای MEMS به دلیل طراحی فشرده، مصرف انرژی پایین و هزینه مناسب، راهکاری ایده‌آل برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی و کاهش هزینه‌های نگهداری ارائه می‌دهند. نتایج این مقاله اهمیت حسگرهای پیشرفته را در بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی و افزایش کارایی انرژی باد نشان می‌دهد.

استناد: رفیعی، کیان و کوهسرخ، جواد (۱۴۰۴). بررسی و شبیه‌سازی تأثیر حسگرهای میکروالکترومکانیکی روی عملکرد توربین‌های بادی. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۳) ۲۳۳-۲۴۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.389998.1118>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© کیان رفیعی، جواد کوهسرخ

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.389998.1118>



۱. مقدمه

انرژی بادی به عنوان یکی از منابع امیدوارکننده انرژی تجدیدپذیر پدیدار شده است و راه‌حلی پایدار برای پاسخ‌گویی به تقاضای رو به رشد جهانی انرژی و در عین حال کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی را برای کاهش آلودگی‌ها ارائه می‌دهد [۱]. از آنجا که هدف کشورها دستیابی به بی‌طرفی کربن است، استقرار توربین‌های بادی به طور قابل توجهی افزایش یافته، با پیشرفت‌های فناوری که مزارع بادی را کارآمدتر و به‌صرفه‌تر کرده است. به طور خاص، توربین‌های بادی محور افقی^۱ (HAWT) به دلیل راندمان بالای تبدیل انرژی به پیکربندی غالب تبدیل شده‌اند. با این حال، عملکرد بهینه این توربین‌ها به شدت به مکانیسم‌های کنترل دقیقی بستگی دارد که حداکثر جذب انرژی از باد را تضمین می‌کند.

ایران با توجه به شرایط جغرافیایی، منابع فراوان انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی بادی دارد. مطالعات بیانگر آن است که استان‌های ساحلی خلیج فارس و دریای عمان، از جمله هرمزگان، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی باد دارند. در برخی مناطق غربی هرمزگان، سرعت باد به ۶/۶۶ متر بر ثانیه و چگالی توان باد به طور میانگین به ۳۲۲ وات بر مترمربع می‌رسد، که این ویژگی‌ها آن مناطق را برای ساخت مزارع بادی دریایی مناسب می‌کند [۲]. استان سیستان و بلوچستان نیز با میانگین سرعت باد ۷ تا ۱۰ متر بر ثانیه و وزش بادهای غربی مداوم، از مستعدترین مناطق ایران برای راه‌اندازی نیروگاه‌های بادی به شمار می‌رود، چنین پتانسیل‌هایی، در کنار نیاز فزاینده به تأمین انرژی پاک و پایدار، بر اهمیت برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در توسعه فناوری‌های بادی در این مناطق تأکید می‌کند [۳].

ناهماهنگی یاو^۲، به انحراف محور روتور توربین بادی با جهت باد غالب می‌گویند، موضوعی حیاتی است که بر عملکرد توربین‌های بادی تأثیر می‌گذارد. حتی خطاهای کوچک انحراف می‌تواند به کاهش قابل توجه توان خروجی و افزایش تنش‌های مکانیکی روی اجزای توربین منجر شود و در نتیجه، سایش را تسریع کند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش دهد. مطالعات نشان می‌دهد یک ناهماهنگی انحراف ایستا $\pm 14^\circ$ درجه می‌تواند به تلفات انرژی بیش از ۸ درصد منجر شود [۴]. علاوه بر این، خطاهای انحراف دینامیکی ناشی از تلاطم باد یا عدم دقت کنترل، این مشکل را تشدید می‌کند و به تغییرات بار گذرا منجر می‌شود که می‌تواند طول عمر اجزای توربین را کاهش دهد. ناهماهنگی یاو نه تنها بر ضریب توان (Cp) توربین‌های بادی تأثیر می‌گذارد، بلکه الگوهای انتشار جدایش (Wake Deflection) را نیز تغییر می‌دهد، در نتیجه بر عملکرد توربین‌های پایین‌دست در مزارع بادی تأثیر می‌گذارد [۵]. با افزایش اندازه مزارع بادی، بهینه‌سازی کنترل انحراف برای به حداکثر رساندن بازده کلی انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است.

کنترل دقیق انحراف یاو به شدت به اندازه‌گیری‌های جهت باد متکی است. حسگرهای بادگیر سنتی که معمولاً روی ناسل‌های توربین نصب می‌شوند، به دلیل اعوجاج جریان ناشی از روتور مستعد خطا هستند. این خطاها می‌تواند به اندازه‌گیری‌های نادرست زاویه انحراف منجر شود که به جهت‌گیری نابهینه توربین و کاهش جذب انرژی می‌انجامد. مطالعات نشان می‌دهد بادگیرهای سنتی می‌توانند زوایای انحراف را به دلیل اعوجاج جریان ناشی از روتور ۲۰ تا ۳۰ درصد بیش از حد تخمین بزنند [۶].

فناوری‌های نوظهور مانند LiDAR (تشخیص نور و محدوده) برای بهبود دقت اندازه‌گیری انحراف با ارائه اندازه‌گیری‌های مستقیم باد بالادست به کار گرفته شده‌اند. با این حال، این سیستم‌ها گران هستند و به تعمیر و نگهداری گسترده نیاز دارند، که باعث می‌شود برای استقرار گسترده کمتر قابل دوام باشند. در مقابل، حسگرهای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) یک جایگزین امیدوارکننده کم‌هزینه ارائه می‌دهند. حسگرهای MEMS، از نظر انرژی کارآمد هستند و قادر به ارائه اندازه‌گیری با وضوح بالای سرعت و جهت باد با حداقل تداخل عوامل محیطی هستند [۷].

مطالعات متعددی تأثیر ناهماهنگی انحراف را بر عملکرد توربین بادی و اثربخشی فناوری‌های حسگر مختلف برای کاهش این موضوع مورد بررسی قرار داده‌اند. کارل و همکاران طی پژوهشی سه نوع حسگر را مقایسه کردند و نشان دادند حسگرهای LiDAR دقیق‌ترین اندازه‌گیری‌های جریان ورودی را ارائه می‌دهند، اما نسبت به آن‌ها حساس هستند [۸]. پژوهش جئونگ و

همکاران نشان داد خطای یاو می‌تواند به کاهش میرایی آیرولاستیک و افزایش بارهای نامتقارن دینامیکی منجر شود [۹]. مطالعه ون و همکاران نشان می‌دهد خطای یاو چگونه می‌تواند بر گشتاور آیرودینامیکی، سرعت روتور و توان خروجی در مراحل مختلف کنترل تأثیر بگذارد [۱۰]. پیش‌نمایش خطاهای زمانی در پژوهش دیگری توسط تیان مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد زوایای انحراف به طور قابل توجهی بر توان خروجی و رانش در توربین‌های هیدروکینتیک تأثیر می‌گذارد و اهمیت کنترل دقیق انحراف را در به حداکثر رساندن جذب انرژی تقویت می‌کند [۱۱].

تحقیقات اخیر بر حسگرهای مبتنی بر MEMS برای کاربردهای توربین بادی متمرکز شده است. در یک گروه پژوهشی، حسگرهای جریان حرارتی انعطاف‌پذیر MEMS برای تشخیص جریان‌های لایه مرزی ناپایدار روی پره‌های توربین مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد این حسگرها می‌توانند به طور دقیق رویدادهای توقف دینامیکی و نقاط جداسازی جریان را تشخیص دهند. این قابلیت برای بهبود استراتژی‌های تراز انحرافی و بهینه‌سازی عملکرد توربین در شرایط مختلف باد بسیار مهم است [۱۲].

جینگ روشی مبتنی بر داده را برای تشخیص و کالیبره کردن ناهماهنگی انحراف با استفاده از داده‌های کنترل نظارتی و اکتساب داده^۱ (SCADA) پیشنهاد کرد. این پژوهش بر اثربخشی روش‌های تصحیح انحراف مبتنی بر SCADA در بهبود ضریب توان و تولید انرژی سالانه توربین‌های بادی تأکید کرد [۶]. به طور مشابه، روث نشان داد تصحیح خطاهای پره باد می‌تواند به طور قابل توجهی ناهماهنگی انحراف را کاهش دهد و عملکرد کلی توربین را بهبود بخشد [۴].

علاوه بر بهبود کنترل انحراف، حسگرهای MEMS پتانسیل بالایی در نظارت بر عملکرد آیرودینامیکی پره‌های توربین از خود نشان داده‌اند. یک گروه تحقیقاتی، نوعی سیستم نظارتی مبتنی بر MEMS غیر تهاجمی ایجاد کردند که داده‌های بلادرنگ را در مورد رفتار جریان هوا فراهم می‌کند و امکان کنترل بهتر تنظیمات انحراف و کاهش سایش مکانیکی اجزای توربین را فراهم می‌آورد [۱۳]. در گروه دیگری، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، تأثیر دقت حسگرها بر توان خروجی توربین بادی بررسی شده است و نشان می‌دهد خطاهای حسگر، به‌ویژه در حسگرهای سرعت ژنراتور و یاو، می‌تواند به کاهش قابل توجه توان تولیدی منجر شود. یافته‌ها بر اهمیت دقت حسگرها در بهبود کنترل زاویه یاو تأکید دارند [۱۴].

به طور کلی، ادبیات نقش حیاتی کنترل انحراف در راندمان توربین بادی و پتانسیل حسگرهای MEMS برای رسیدگی به چالش‌های فعلی در اندازه‌گیری انحراف را برجسته می‌کند، ادغام حسگرهای MEMS در توربین‌های بادی می‌تواند یک راه‌حل به‌صرفه برای افزایش دقت انحراف، بهبود جذب انرژی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری ارائه کند که در نهایت به پذیرش گسترده‌تر انرژی بادی در بخش انرژی جهانی کمک می‌کند.

جینگ و همکاران با تکیه بر داده‌های SCADA و بدون نیاز به سخت‌افزار اضافی، روشی برای تشخیص و کالیبره کردن ناهماهنگی یاو (پویا و استاتیک) ارائه دادند. آن‌ها از رویکرد شبیه‌سازی محور و الگوریتم حداکثر توان جذب^۲ (MPC) برای تخمین زاویه انحراف و اصلاح آن استفاده کردند و نشان دادند این روش راندمان تولید برق را بهبود می‌بخشد. با این حال، اتکا به داده‌های SCADA در شرایط محیطی متغیر یکی از محدودیت‌های کار آن‌هاست. در عین حال، طراحی بی‌سیم و ابعاد کوچک حسگرهای MEMS امکان نصب آسان بر دماغه روتور را فراهم کرده و عملکرد مطلوبی را تحت بارهای متغیر و جریان‌های آشفته، نشان می‌دهد [۱۵].

بائو و یانگ با تکیه بر داده‌های SCADA و بدون نیاز به سخت‌افزار اضافی، روشی ارائه کردند که در آن با تقسیم‌بندی داده‌های عملیاتی بر اساس خطای انحراف و اصلاح منحنی‌های توان در هر بخش، ناهماهنگی یاو را جبران می‌کنند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد این روش قادر است به طور مؤثر روتور را با جهت باد همسو کند و نیاز به سرمایه‌گذاری سخت‌افزاری اضافی را از بین ببرد. با این حال، تکیه بر تقسیم‌بندی داده‌های خطای انحراف ممکن است در شرایط عملیاتی و مدل‌های توربین بادی مختلف به‌خوبی تعمیم پیدا نکند. افزون بر آن، فرض یکسان بودن استراتژی جبران در زوایای متفاوت انحراف، ممکن است برای همه توربین‌ها معتبر نباشد [۱۶].

پاندیت و همکاران، روشی مبتنی بر مدل‌های فرایند گاوسی را برای تشخیص زود هنگام مسائل ناهماهنگی یاو پیشنهاد دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از متغیرهای عملیاتی اضافی (مانند سرعت روتور و زاویه گام) دقت تشخیص را افزایش داده و نشان دادند این روش با کاهش نرخ مثبت کاذب، از روش‌های سنتی پیشی می‌گیرد. با این حال، اتکا به مجموعه داده‌های SCADA حجیم برای آموزش مدل، استفاده از این روش را برای مزارع بادی جدید یا توربین‌هایی با سابقه عملیاتی محدود دشوار می‌کند [۱۷].

روت و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و داده‌های میدانی، بر تصحیح خطاهای اندازه‌گیری پره‌های باد طی ناهماهنگی انحراف تمرکز کرده. نویسندگان نشان دادند روش‌های تصحیح پره‌های باد معمولی کافی نبودند و یک تابع اصلاحی جدید برای بهبود دقت پیشنهاد کردند. روش آن‌ها از طریق آزمایش‌های میدان آزاد روی توربین‌های بادی تجاری تأیید شد و پیشرفت‌های قابل توجهی در عملکرد کنترل انحراف نشان داد [۴].

در مقاله پیش رو، ابتدا شبیه‌سازی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر زاویه انحراف روی ضریب توان پرداخته می‌شود. سپس، تأثیر انواع حسگرهای بادسنج و جهت‌سنج و قیاس آن‌ها با متغیرهای دقت، خطا و کالیبراسیون روی عملکرد توربین بادی مقایسه می‌شود و در انتها برتری حسگرهای MEMS نسبت به دیگر حسگرها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

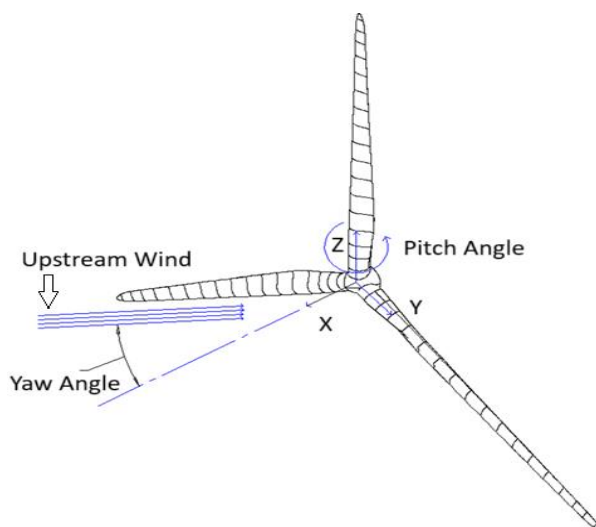
۲. روش کار

در این بخش، به شبیه‌سازی و بررسی حسگرهای مختلف روی عملکرد توربین پرداخته می‌شود. در بخش شبیه‌سازی، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در محیط ANSYS Fluent برای بررسی تأثیر عدم تطابق زاویه یاو بر ضریب توان توربین مرجع ۵ مگاواتی NREL استفاده شده است. هدف این بخش، تحلیل رفتار جریان باد و تأثیر آن بر عملکرد توربین در شرایط مختلف زاویه یاو است. در بخش دوم، با تحلیل و بررسی حسگرهای اندازه‌گیری جریان و جهت باد، انواع حسگرها از جمله حسگرهای جریان‌سنج و جهت‌سنج مقایسه شده و ویژگی‌های متغیرهای کلیدی آن‌ها ارزیابی می‌شود. نتایج این مقاله به انتخاب حسگر مناسب برای تشخیص لحظه‌ای عدم تطابق زاویه یاو کمک می‌کند.

۳. یافته‌ها

۳-۱. فرمول‌بندی مسئله

در اینجا به تعریف و تشریح عدم تطابق زاویه یاو پرداخته می‌شود و متغیرهای مرتبط با آن معرفی می‌شوند. عدم تطابق زاویه یاو به حالتی گفته می‌شود که جهت باد بالادست با صفحه روتور توربین بادی هم‌راستا نباشد. این زاویه انحراف که با (θ) نشان داده می‌شود (شکل ۱)، نشان‌دهنده زاویه بین جهت باد بالادست و محور عمود بر صفحه روتور است.



شکل ۱. زاویه باد بالادست با روتور

زمانی که زاویه یاو وجود داشته باشد، توان خروجی توربین کاهش می‌یابد، زیرا بخشی از انرژی باد به دلیل انحراف جریان قابل استخراج نیست. برای بررسی تأثیر این زاویه، از فرمول ضریب توان (C_p) استفاده می‌شود [۱۸] که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3} \quad (۱)$$

در این فرمول، P توان تولیدشده (وات) توسط توربین، ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب)، A مساحت سطح جاروب (متر مربع) شده توسط روتور، و U_{∞} سرعت باد بالادست (متر بر ثانیه) است. در این مقاله، ضریب توان (C_p) برای زاویه‌های مختلف یاو (θ) محاسبه می‌شود تا تأثیر عدم تطابق زاویه یاو بر عملکرد توربین بادی ارزیابی شود. برای هر زاویه یاو، سرعت‌های مختلف باد بالادست نیز در نظر گرفته می‌شود تا اثرات سرعت باد بر کاهش توان و عملکرد توربین تحلیل شود. این تحلیل به درک بهتر تغییرات توان خروجی در شرایط مختلف و طراحی بهینه سیستم کنترل یاو کمک می‌کند.

۳-۲. مدل توربین بادی

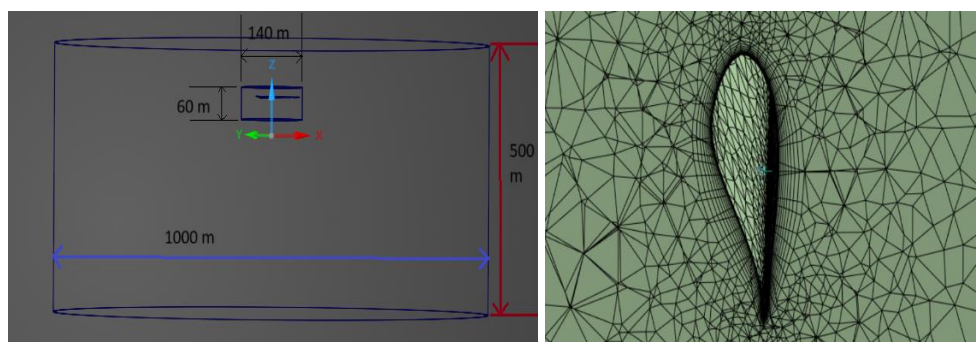
توربین بادی مرجع ۵ مگاواتی NREL که به عنوان یکی از مدل‌های استاندارد توربین‌های بادی برای مطالعات دریایی توسعه یافته است، ویژگی‌های زیر را دارد: این توربین دارای سه پره و ساختار روتور به سمت باد است که با سیستم کنترل سرعت متغیر و گام پره‌های جمعی تنظیم می‌شود. از جمله مزیت‌های این توربین می‌توان به کاهش وزن نازل و بهینه‌سازی ساختار روتور برای کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش طول عمر سازه اشاره کرد. طراحی این توربین بر اساس پروژه‌های تحقیقاتی مانند WindPACT و DOWEC و با الهام از مشخصات توربین‌های REpower 5M و Multibrid 5000M انجام شده است. این مدل به طور گسترده در پروژه‌های پژوهشی بین‌المللی به عنوان مرجع استاندارد برای تحلیل‌های عملکرد و بهینه‌سازی سیستم‌های توربین بادی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۱ مشخصات کلیدی این توربین بادی را خلاصه می‌کند [۱۹].

جدول ۱. مشخصات توربین NREL ۵ مگاواتی

توان تولیدی	۵ مگاوات
قطر روتور و هاب	۱۲۶ و ۳ متر
ارتفاع هاب	۹۰ متر
سرعت وصل	۳ متر بر ثانیه
سرعت نامی	۱۱/۴ متر بر ثانیه
سرعت قطع	۲۵ متر بر ثانیه
دور وصل و دور نامی	۶/۹ و ۱۲/۱ دور بر دقیقه

۳-۳. هندسه و شبکه‌سازی

برای شبیه‌سازی توربین بادی NREL 5MW، مدل هندسه سه‌بعدی روتور و ناسل در نرم‌افزار ANSYS Fluent ایجاد شد. هندسه روتور شامل سه پره با طول هر پره ۶۳ متر و قطر روتور ۱۲۶ متر است. ارتفاع ناسل نیز ۹۰ متر از سطح زمین در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی حوزه محاسباتی، دو استوانه یکی با شبکه‌سازی پویا با قطر برابر با روتور و ارتفاع ۱۰ برابر ناسل و هندسه بیرونی یک دامنه استوانه‌ای با قطر ۸ برابر قطر روتور و طول ۵ برابر قطر روتور ایجاد شد تا جریان باد ورودی و خروجی بدون تأثیر مرزها شبیه‌سازی شود. این ابعاد بر اساس مطالعات پیشین و استانداردهای موجود انتخاب شده‌اند تا از بروز بازتاب جریان در مرزهای محاسباتی جلوگیری شود [۲۰]. شکل ۲ محیط شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. دامنه محاسباتی و تنظیم مرز. (الف) ابعاد هندسه؛ (ب) شبکه‌سازی با لایه تورمی

در بخش شبکه‌سازی، برای افزایش دقت در مدل‌سازی جریان اطراف پره‌ها، از روش تورم (Inflation) در نزدیکی سطح پره‌ها استفاده شد. این روش به منظور مدل‌سازی دقیق لایه مرزی و شناسایی تغییرات ناگهانی در فشار و سرعت اعمال شد. همچنین، از شبکه‌سازی موضعی (Sizing) در نواحی با تغییرات هندسی زیاد مانند لبه حمله (Leading Edge) و لبه فرار (Trailing Edge) استفاده شد تا تعداد المان‌های محلی افزایش یابد و دقت محاسبات در این نواحی حساس بیشتر شود. استفاده از این روش‌های شبکه‌سازی به کاهش خطای محاسباتی و بهبود شبیه‌سازی جریان‌های توربولانس کمک کرده و نتایج دقیقی برای تحلیل‌های آیرودینامیکی فراهم می‌کند.

۳-۴. پارامترهای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل آشفتگی برای بهبود دقت در محاسبات لایه مرزی استفاده می‌شود. انتقال تنش برشی^۱ (SST) گذرا برای به تصویر کشیدن اثرات دینامیکی ناهم‌هنگی انحراف انجام شد. شبیه‌سازی حالت پایدار برای سرعت باد بین ۳/۵ متر بر ثانیه تا ۱۱ متر بر ثانیه با گام یک انجام شد که زوایای مختلف انحراف از ۰/۵ درجه تا ۱۴ درجه را پوشش می‌دهد. سرعت‌های باد بیش از ۱۲ متر بر ثانیه به دلیل اینکه شامل کنترل گام است در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است. جدول ۲ سرعت خطی و سرعت دورانی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. سرعت‌های باد بالادست و سرعت‌های دورانی شبیه‌سازی

سرعت (m/s)	3.5	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
سرعت دوران (rpm)	۶,۹۷۲	۷,۱۸۳	۷,۵۰۶	۷,۹۴۲	۸,۴۶۹	۹,۱۵۶	۱۰,۲۹۶	۱۱,۴۳۱	۱۱,۸۹۰

در این پژوهش، حداکثر سرعت باد در شبیه‌سازی ۱۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده که محدوده عملیاتی متداول توربین‌های بادی را پوشش می‌دهد. در مناطق بادخیز مانند منجیل (با سرعت‌های تا ۱۰۰ متر بر ثانیه)، عوامل کلیدی مانند کنترل گام پره، شدت تلاطم بالا، اثرات فشار دینامیکی، و عملکرد سیستم‌های حفاظتی باید در شبیه‌سازی لحاظ شوند. علاوه بر این، توربین‌های بادی معمولاً در سرعت‌های بالاتر از ۲۵-۳۰ متر بر ثانیه (Cut-off Speed) به طور خودکار متوقف می‌شوند تا از آسیب‌های ساختاری جلوگیری شود. در این مقاله، تمرکز اصلی بر سرعت‌های عملیاتی توربین بوده و بررسی دقیق‌تر شرایط سرعت‌های بالا برای تحقیقات آینده پیشنهاد شده است.

تأثیر زاویه یاو بر عملکرد توربین بادی از طریق شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. برای تعیین میزان این ناهم‌هنگی، از داده‌های حسگرهای مختلف از جمله MEMS، لیدار و بادسنج‌های سیم داغ استفاده شده است. این حسگرها قادرند سرعت و جهت باد بالادست را با دقت زیاد اندازه‌گیری کرده و تغییرات لحظه‌ای زاویه یاو را ثبت کنند. در فرایند مدل‌سازی عددی در ANSYS Fluent، زاویه یاو به عنوان متغیر اصلی در تنظیم جهت باد ورودی نسبت به محور روتور توربین اعمال شده است تا تأثیر تغییرات آن بر ضریب توان (Cp) و توان خروجی تحلیل شود.

مدل‌سازی CFD این پژوهش در محدوده سرعت‌های 3/5 تا ۱۲ متر بر ثانیه انجام شده است، زیرا در سرعت‌های بالاتر، کنترل گام پره در عملکرد تأثیرگذار است. با این حال، برخی داده‌های مربوط به سرعت‌های بالاتر (تا ۲۵ متر بر ثانیه) فقط برای صحت‌سنجی و مقایسه با داده‌های NREL ارائه شده‌اند.

۳-۵. انواع حسگرها

در این بخش، یک تحلیل مقایسه‌ای از حسگرهای پیشرفته شامل حسگرهای انتقال حرارت، حسگرهای اولتراسونیک، لیدار، حسگرهای MEMS، و حسگرهای سنتی فنجانی، و پروانه‌ای برای کاربرد خاص تشخیص ناهماهنگی یاو توربین‌های بادی انجام می‌شود. هدف اصلی این بررسی، ارزیابی عملکرد این حسگرها در شناسایی دقیق زاویه ناهماهنگی یاو و ارائه بهترین گزینه برای بهبود کارایی و قابلیت اطمینان توربین است [۲۱]. این حسگرها بر اساس معیارهایی مانند دقت، زمان پاسخ، پایداری در شرایط محیطی مختلف و هزینه بررسی و مقایسه شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند هر فناوری حسگر مزایا و معایب خاص خود را دارد؛ برای مثال، دقت اندازه‌گیری در برابر نویز محیطی و قابلیت شناسایی سریع تغییرات جهت باد، عوامل مهمی در انتخاب حسگر برتر هستند. در ادامه، بهترین گزینه حسگر را با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی و نیازمندی‌های عملکردی برای کنترل ناهماهنگی یاو پیشنهاد می‌شود.

۳-۵-۱. بادسنج‌های فنجانی و پره‌ای سنتی

این بادسنج شامل سه یا چهار فنجان نیم‌کره‌ای است که روی یک محور افقی نصب شده‌اند. باد باعث چرخش فنجان‌ها می‌شود و سرعت چرخش متناسب با سرعت باد است [۲۲]. در جدول ۳ مشخصات این حسگرها برای این کاربرد آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات بادسنج‌های فنجانی و پره‌ای سنتی

مزایا	معایب	متغیر	مقدار
طراحی مکانیکی ساده و قوی	آستانه شروع بالا (۱ متر بر ثانیه)	محدوده اندازه‌گیری (سرعت)	۱ تا ۵۰ متر بر ثانیه
		محدوده اندازه‌گیری (جهت)	۰ تا ۳۶۰ درجه
قابلیت اطمینان در پایش طولانی‌مدت سرعت و جهت باد	سایش قطعات مکانیکی	دقت (سرعت)	$\pm 2\%$
		دقت (جهت)	$\pm 10^\circ$
		زمان پاسخ	۱ تا ۳ ثانیه
هزینه کم و حداقل نیاز برق	حساس به یخ، که می‌تواند عملکرد در آب و هوای سرد را مختل کند.	دمای کارکرد	۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد
		توان برق مورد نیاز	حداقل/هیچ (مکانیکی)

۳-۵-۲. بادسنج‌های سیم داغ با فناوری MEMS

بادسنج سیم داغ بر اساس اصل انتقال حرارت همرفتی از یک سیم گرم‌شده الکتریکی در معرض جریان هوا کار می‌کند. سرعت اتلاف گرما به سرعت حرکت هوا در سیم بستگی دارد. با سرد شدن سیم، مقاومت الکتریکی آن تغییر می‌کند و امکان محاسبه سرعت جریان را فراهم می‌آورد. این دستگاه سرعت و جهت باد را اندازه‌گیری می‌کند و اغلب از سیم‌های ظریف ساخته شده از پلاتین یا تنگستن برای حساسیت و دوام استفاده می‌کند. این حسگرها نیز می‌توانند با استفاده از فناوری MEMS ساخته شوند [۲۳]. در جدول ۴ مشخصات این حسگرها با فناوری MEMS برای این کاربرد آورده شده است.

۳-۵-۳. بادسنج اولتراسونیک

بادسنج‌های اولتراسونیک سرعت و جهت باد را با استفاده از اصل زمان پرواز^۱ (TOF) اندازه‌گیری می‌کنند. این نوع حسگرها، پالس‌های اولتراسونیک را بین مبدل‌هایی که در موقعیت‌های ثابت قرار دارند منتشر می‌کنند. باد بر زمان حرکت امواج صوتی بین مبدل‌ها تأثیر می‌گذارد و از تفاوت‌های TOF برای محاسبه سرعت و جهت باد در دو یا سه بعدی استفاده می‌شود [۲۴ و ۲۵]. در جدول ۵ مشخصات این حسگرها برای این کاربرد آورده شده است.

1. Time of Flight

جدول ۴. مشخصات بادسنج و جهت‌سنج سیم داغ

مزایا	معایب	متغیر	مقدار
حساسیت بالا به سرعت باد کم (آستانه شروع ~۰٫۲ متر بر ثانیه).	آسیب‌پذیر نسبت به آلودگی محیطی (مانند گرد و غبار، ذرات).	محدوده اندازه‌گیری (سرعت)	۰٫۲ تا ۵۰ متر بر ثانیه
		محدوده اندازه‌گیری (جهت)	۰ تا ۳۶۰ درجه
قابلیت اندازه‌گیری سرعت و جهت باد به طور هم‌زمان		دقت (سرعت)	±۰٫۲ متر بر ثانیه
عملکرد عالی در تشخیص تلاطم در مقیاس ریز	نیاز به کالیبراسیون و منبع تغذیه ثابت	دقت (جهت)	±۱°
		زمان پاسخ	۵ میلی ثانیه
		دمای کارکرد	۴۰- تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد
		توان برق مورد نیاز	۳ V (معمولی)، ۵۰ V (گرمایش)

جدول ۵. مشخصات بادسنج و جهت‌سنج اولتراسونیک

مزایا	معایب	متغیر	مقدار
دقت و صحت بالا در اندازه‌گیری سرعت و جهت باد.	هزینه اولیه بالاتر در مقایسه با حسگرهای مکانیکی.	محدوده اندازه‌گیری (سرعت)	۰ تا ۶۰ متر بر ثانیه
بدون قطعات متحرک		محدوده اندازه‌گیری (جهت)	۰ تا ۳۶۰ درجه
مؤثر در سرعت باد کم، با آستانه شروع نزدیک به ۰ متر بر ثانیه.		دقت (سرعت)	۰٫۱ تا ۰٫۳ متر بر ثانیه
غیر حساس به یخ‌زدگی	مستعد تداخل سیگنال ناشی از باران، برف و نویزهای محیطی.	دقت (جهت)	±۲°
	نیاز به کالیبراسیون دقیق	زمان پاسخ	کمتر از ۰٫۱ ثانیه
		دمای کارکرد	۴۰- تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد
		توان برق مورد نیاز	بسته به مدل معمولاً کم است

۳-۵-۴. LiDAR

سیستم‌های LiDAR از پالس‌های لیزری برای اندازه‌گیری سرعت و جهت باد با تشخیص تغییر داپلر در نور پراکنده‌شده از ذرات متحرک اتمسفر مانند ذرات معلق در هوا استفاده می‌کنند. این سیستم سرعت شعاعی باد را با تجزیه و تحلیل تغییر فرکانس محاسبه می‌کند و میدان باد سه‌بعدی را با استفاده از پرتوهای متعدد بازسازی می‌کند. سیستم‌های پیشرفته LiDAR مبتنی بر ناسل، پروفایل‌های دقیق باد بالادست را ارائه می‌کنند و آن‌ها را برای تشخیص ناهماهنگی انحراف مؤثر می‌سازد [۲۶]. در جدول ۶ مشخصات این حسگرها برای این کاربرد آورده شده است.

جدول ۶. مشخصات بادسنج و جهت‌سنج LiDAR

مزایا	معایب	متغیر	مقدار
وضوح فضایی بالا	هزینه‌های اولیه و عملیاتی بالا	محدوده اندازه‌گیری (سرعت)	۰٫۱ تا ۶۰ متر بر ثانیه
اندازه‌گیری دقیق سرعت و جهت باد، حتی در زمین‌های پیچیده		محدوده اندازه‌گیری (مسافت)	۲۰۰ تا ۳۰۰ متر
قابلیت اندازه‌گیری باد بالادست	حساس به شرایط جوی مانند باران یا مه	دقت (سرعت)	۰٫۱ تا ۰٫۲ متر بر ثانیه
	نیاز به تراز و کالیبراسیون دقیق	دقت (جهت)	±۱°
		دمای کارکرد	۲۰- تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد
		توان برق مورد نیاز	بسته به مدل بالا

۳-۵-۶. حسگرهای MEMS

حسگرهای MEMS دستگاه‌های کوچکی هستند که سرعت و جهت باد را با استفاده از اصول مختلف مانند اتلاف حرارتی، اثرات پیزومقاومتی و تغییرات خازن تشخیص می‌دهند. این حسگرها اغلب از یک ساختار میکروماشین‌شده استفاده می‌کنند که با باد در تعامل است تا سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری تولید کند [۲۷]. برای مثال، حسگرهای MEMS حرارتی، میزان اتلاف حرارت از یک عنصر گرم‌شده را اندازه‌گیری می‌کنند، در حالی که حسگرهای MEMS پیزومقاومتی، تغییرات تنش یا کرنش ناشی از جریان هوا را تشخیص می‌دهند. در این بخش به بررسی حسگرهای MEMS پیزومقاومتی می‌پردازیم. در جدول ۷ مشخصات این حسگرها برای این کاربرد آورده شده است.

جدول ۷. مشخصات بادسنج و جهت‌سنج MEMS پزومقاومتی

مزایا	معایب	متغیر	مقدار
مناسب برای ادغام در ناسل‌های توربین	دوام محدود در شرایط محیطی سخت، مانند دما و رطوبت	محدوده اندازه‌گیری (سرعت)	۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه
		محدوده اندازه‌گیری (جهت)	۰ تا ۳۶۰ درجه
مصرف برق کم و حداقل نیاز به تعمیر و نگهداری	نیاز کالیبراسیون مکرر	دقت (سرعت)	۰/۲ متر بر ثانیه
		دقت (جهت)	$\pm 2^\circ$
		زمان پاسخ	کمتر از ۰/۰۵ ثانیه
به‌صرفه و مقیاس‌پذیر برای استقرار در مقیاس بزرگ.	حساسیت به نویز یا لرزش	دمای کارکرد	۲۰- تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد
		توان برق مورد نیاز	خیلی کم

در سال‌های اخیر، استفاده از حسگرهای MEMS در سیستم‌های توربین بادی به دلیل مزایایی نظیر اندازه کوچک، مصرف انرژی پایین و توانایی ارائه اندازه‌گیری‌های دقیق و زمان واقعی به‌سرعت گسترش یافته است. یکی از کاربردهای برجسته MEMS، مانیتورینگ وضعیت پره‌های توربین است. حسگرهای شتاب‌سنج MEMS با قابلیت شناسایی ارتعاشات و شناسایی ترک‌ها یا جدایش‌های ساختاری در پره‌ها، امکان نگهداری پیشگیرانه را فراهم می‌کنند و هزینه‌های تعمیرات را کاهش می‌دهند [۲۸]. همچنین، حسگرهای MEMS در اندازه‌گیری و پایش جریان باد به کمک تکنیک‌های نوین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) استفاده می‌شوند. این حسگرها می‌توانند دقت بالایی را در تشخیص سرعت و جهت باد حتی در شرایط متغیر محیطی ارائه دهند، که برای بهینه‌سازی تولید برق توربین‌ها بسیار مهم است [۲۹].

در زمینه کنترل و بهبود عملکرد آیرودینامیکی، حسگرهای MEMS در تشخیص جدایش جریان و شناسایی نقاط بحرانی در لایه مرزی به کار می‌روند. این حسگرها با ارائه وضوح مکانی و زمانی بالا، به طراحی بهتر پره‌ها و کاهش نیروی پسا کمک می‌کنند که منجر به افزایش بازدهی توربین می‌شود [۳۰]. این کاربردها نشان‌دهنده پتانسیل بالای MEMS در ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان توربین‌های بادی هستند.

۴. نتایج و بحث

یافته‌های حاصل از این مقاله در دو بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد: نتایج تحلیل شبیه‌سازی و تحلیل مقایسه‌ای فناوری‌های حسگر مختلف مورد استفاده برای تشخیص ناهماهنگی انحراف.

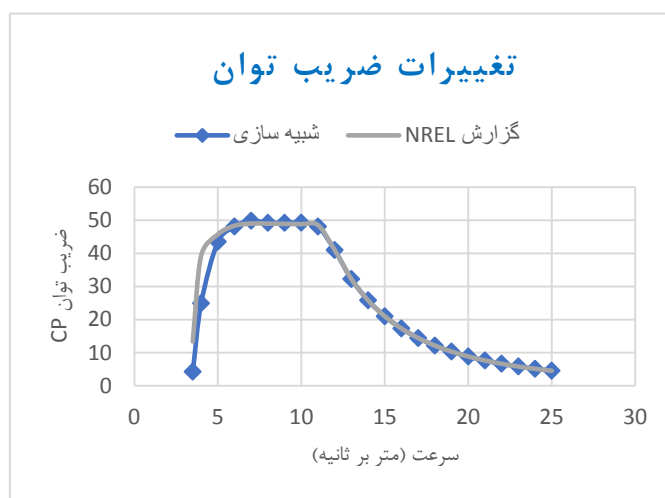
نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل تلاطم انتقال تنش برشی گذرا (SST) در ANSYS Fluent برای تجزیه و تحلیل عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی مرجع NREL 5MW تحت سرعت‌های مختلف باد و زوایای ناهماهنگی انحراف به دست آمد. سرعت باد از ۳/۵ متر بر ثانیه تا ۱۱ متر بر ثانیه متغیر در نظر گرفته شده و زوایای انحراف از ۰ تا ۱۲ درجه متغیر است. خروجی‌های شبیه‌سازی شامل گشتاور (T)، توان خروجی (P) و ضریب توان (Cp) برای هر سرعت باد و زاویه انحراف است.

۴-۱. تغییرات توان توربین بادی

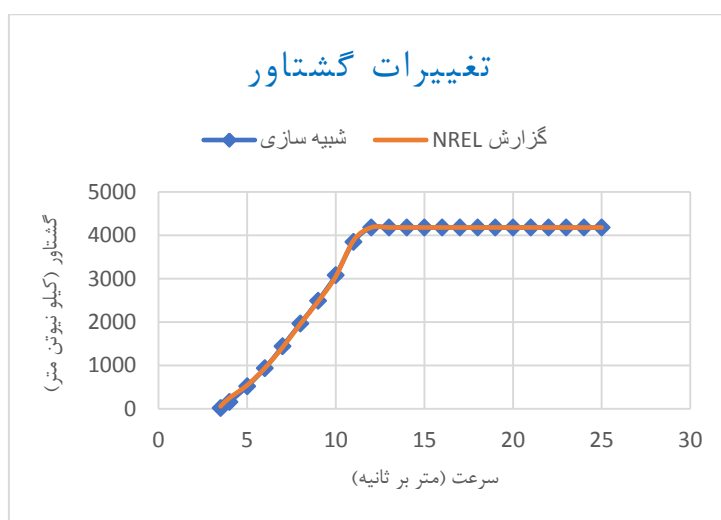
ضریب توان (Cp) به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی عملکرد توربین بادی محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد مقدار Cp در شرایط بدون یاو به ۰/۴۹ نزدیک است که به مقادیر گزارش شده در گزارش مرجع آزمایشگاهی NREL بسیار نزدیک است. همچنین، گشتاور آیرودینامیکی روتور در سرعت‌های مختلف باد محاسبه شد و مقادیر به‌دست‌آمده با نتایج گزارش‌های تجربی مطابقت خوبی داشتند. شکل ۳ نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

مطالعات پیشین نیز تأیید کرده‌اند که استفاده از مدل‌های CFD می‌تواند نتایج دقیقی در پیش‌بینی Cp و گشتاور تولیدی ارائه دهد. برای مثال، در مقاله [17] مقادیر ضریب توان و گشتاور برای این توربین شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی مقایسه شده است، که نشان می‌دهد مدل‌های شبیه‌سازی عددی می‌توانند به اعتبارسنجی عملکرد توربین کمک کنند (شکل ۴). به طور کلی،

تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد مدل‌سازی عددی این مقاله می‌تواند به عنوان یک پایه مرجع قابل اعتماد برای تحلیل‌های آیرودینامیکی و بررسی تأثیر عدم تطابق زاویه یاو بر عملکرد توربین‌های بادی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳. نمودار تغییرات C_p بر حسب سرعت

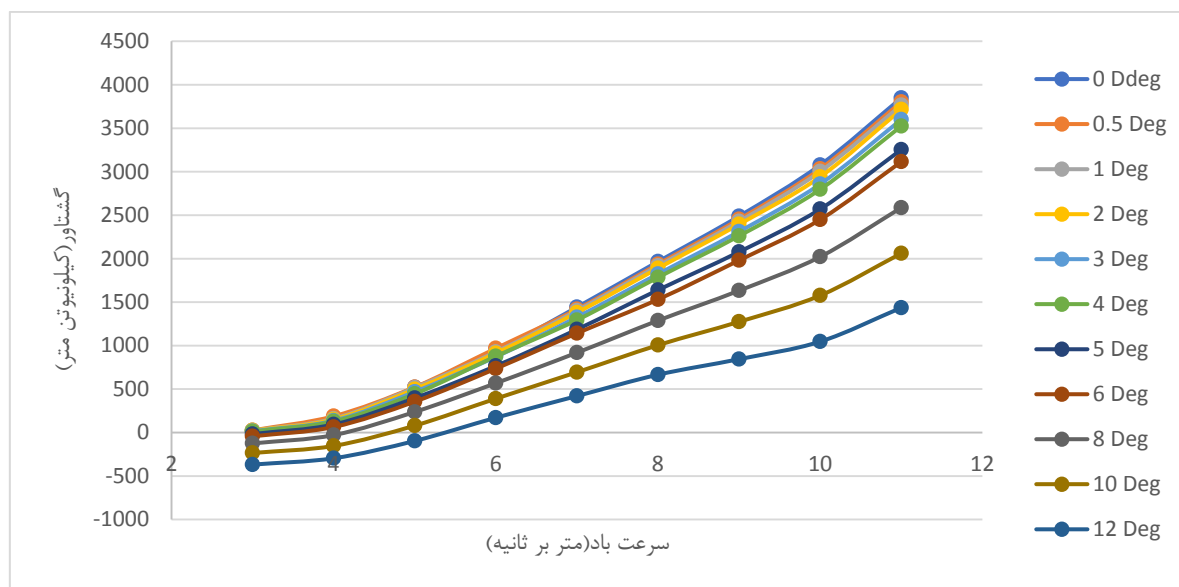


شکل ۴. نمودار تغییرات گشتاور بر حسب سرعت

۴-۲. تغییرات گشتاور در سرعت‌های مختلف و زوایای ناهماهنگی

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد مقدار گشتاور در زوایای ناهماهنگی پایین (۰ و ۰/۵ درجه) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. برای مثال، در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، گشتاور در زاویه صفر درجه ۴۹/۲ واحد و در زاویه ۰/۵ درجه به ۴۸/۵ واحد می‌رسد که عملکردی نزدیک به بهینه را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه ناهماهنگی به ۵، ۶ و ۱۲ درجه، گشتاور به شدت کاهش می‌یابد و حتی در برخی موارد به مقادیر منفی می‌رسد. این مسئله به‌ویژه در سرعت‌های باد پایین‌تر مشهود است. برای سرعت ۳ متر بر ثانیه، گشتاور در زاویه ۵ درجه به مقدار منفی ۱۶/۷۷ کیلو نیوتن متر می‌رسد که نشان‌دهنده غلبه نیروهای مقاومتی و ناکارآمدی توربین است. گشتاور در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه از ۴۹/۸ درصد در زاویه صفر درجه به ۳۹/۴ در زاویه ۵ درجه و سپس به ۱۴/۵ در زاویه ۱۲ درجه کاهش یافته است.

در سرعت‌های پایین، نیروی درگ به دلیل افزایش زاویه حمله و جدایش جریان از سطح پرها غالب می‌شود. این امر موجب ایجاد گشتاور منفی و کاهش ضریب توان (C_p) می‌شود، به طوری که توربین در این شرایط به جای تولید انرژی، در برابر جریان باد مقاومت می‌کند.



شکل ۵. تغییرات گشتاور خروجی بر حسب سرعت باد بالادست برای زوایای مختلف

۳-۴. تأثیر زاویه ناهماهنگی یاو بر ضریب توان (C_p)

ضریب توان، نشان‌دهنده کارایی توربین در تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی است. شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد که مقادیر C_p با افزایش زاویه ناهماهنگی یاو کاهش می‌یابد. در زاویه ناهماهنگی صفر درجه، توربین به حداکثر مقدار C_p (حدود ۰/۴۹) در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه دست یافت. در زاویه ناهماهنگی ۱۲ درجه، این مقدار به ۰/۱۹۵ کاهش یافت که نشان‌دهنده افت قابل توجه کارایی آیرودینامیکی است. کاهش C_p و توان خروجی ناشی از این است که با ناهماهنگی یاو، بخشی از جریان باد به صورت غیربهرینه به روتور برخورد می‌کند و از دسترس توربین خارج می‌شود.

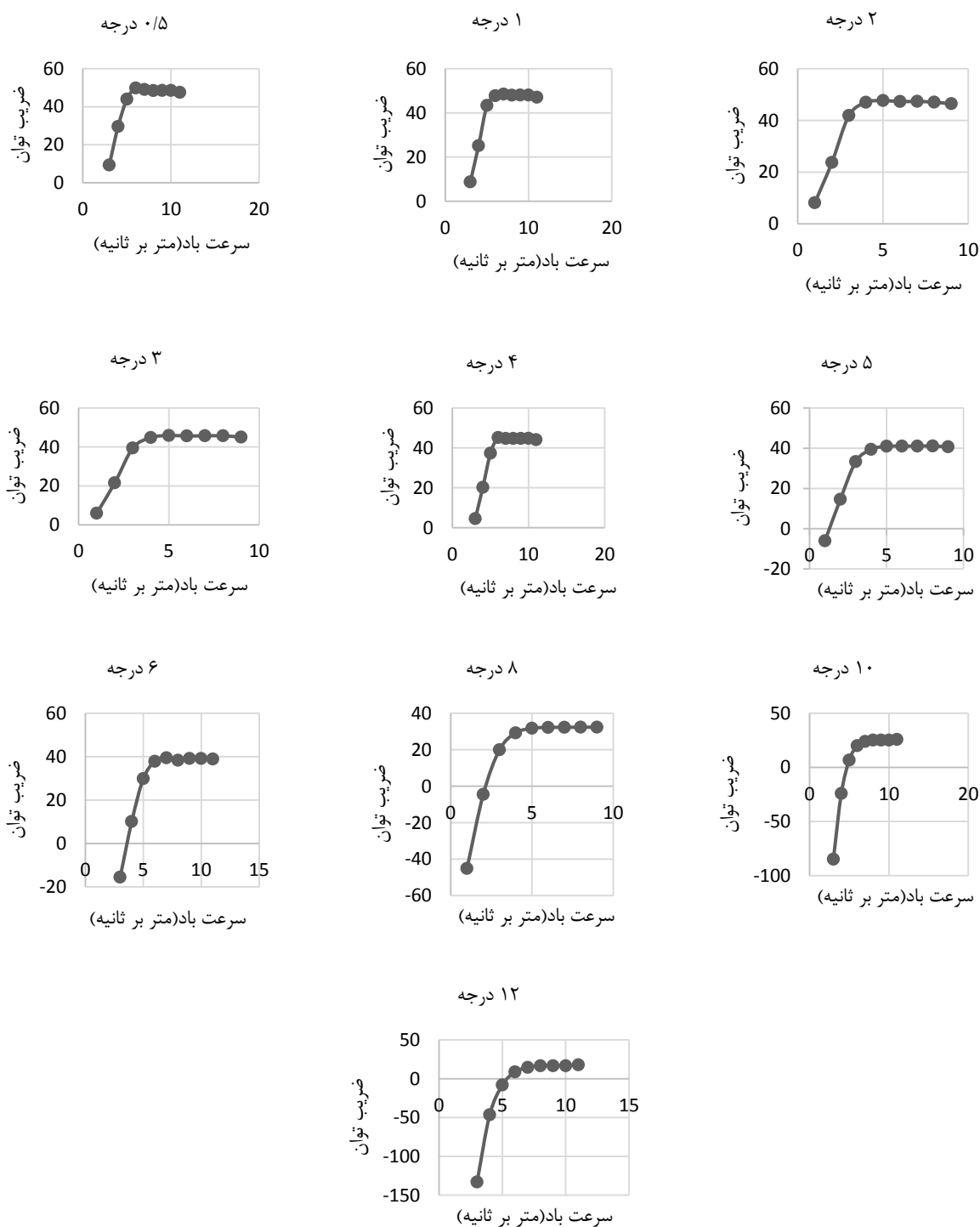
ضریب توان (C_p) نشان‌دهنده کارایی توربین در تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد مقادیر C_p با افزایش زوایای ناهماهنگی انحراف کاهش می‌یابد: در ناهمترازی ۰ درجه، توربین به ۰/۴۹ در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه دست یافت. در انحراف ۱۲ درجه، C_p در همان سرعت باد به ۰/۱۶۶ کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش قابل توجهی در راندمان آیرودینامیکی است.

۴-۵. پدیده بهبود عملکرد با ناهماهنگی‌های کوچک

در برخی شرایط، ناهماهنگی‌های کوچک مانند ۰/۵ درجه می‌توانند به طور موقت موجب افزایش ضریب توان و گشتاور شوند. این پدیده به دو دلیل اصلی رخ می‌دهد:

کاهش نقاط ایستا در جریان: در زاویه یاو صفر، جریان باد ممکن است به صورت متقارن به روتور برخورد کند و نقاط ایستای جریان روی تیغه‌ها ایجاد شود. یک ناهماهنگی جزئی می‌تواند این نقاط را از بین ببرد و جریان باد را پویاتر کند.

بهینه‌سازی پویا: تغییرات جزئی زاویه یاو می‌تواند توزیع بار آیرودینامیکی روی تیغه‌ها را بهینه‌تر کند و به طور موقت توان خروجی را افزایش دهد.



شکل ۶. نمودارهای تغییرات ضریب توان بر حسب سرعت باد برای زوایای مختلف

۴-۶. مقایسه نتایج برای حسگرهای مختلف

مقایسه حسگرهای مختلف برای تشخیص ناهماهنگی یاو، درک جامعی از قوت‌ها و ضعف‌های هر فناوری ارائه می‌دهد. حسگرهای سنتی، مانند بادسنج‌های فنجان‌ی و بادگیرها، علی‌رغم به‌صرفه بودن و سادگی مکانیکی، در شرایط آشفته باد و تلاطم، دقت کمتری از خود نشان می‌دهند و نیازمند نگهداری منظم به دلیل سایش مکانیکی هستند (شکل ۷). بادسنج‌های سیم داغ، با وجود دقت زیاد در سرعت‌های کم و حساسیت مناسب، به دلیل شکنندگی و نیاز به تأمین انرژی مداوم، در محیط‌های

عملیاتی سخت محدودیت دارند. از سوی دیگر، فناوری‌های مدرن مانند بادسنج‌های سیم داغ، صوتی و حسگرهای MEMS، مزایای چشمگیری ارائه می‌دهند. بادسنج‌های صوتی با دقت بسیار زیاد و بدون قطعات متحرک، عملکرد قابل اطمینانی در بلندمدت دارند؛ هرچند هزینه اولیه بالاتر و حساسیت به شرایط جوی نظیر باران و مه، چالش‌هایی در استفاده از آن‌ها ایجاد می‌کند. حسگرهای MEMS با طراحی فشرده، مصرف انرژی پایین، و قابلیت ارائه داده‌های بلادرنگ، به عنوان گزینه‌ای کم‌هزینه و دقیق برای توربین‌های بادی شناخته می‌شوند. این حسگرها، به‌ویژه در شرایط محیطی متغیر و برای تشخیص ناهماهنگی لحظه‌ای یاو، عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند.



شکل ۷. مقایسه محدوده اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری سرعت و جهت و زمان پاسخ حسگرهای مختلف

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد استفاده از حسگرهای پیشرفته، به‌ویژه MEMS و سیم داغ، می‌تواند به بهبود کنترل زاویه یاو، افزایش بازدهی توربین، کاهش تنش‌های مکانیکی و افزایش طول عمر اجزای توربین کمک کند. این حسگرها امکان اصلاح سریع و دقیق ناهماهنگی یاو را فراهم می‌کنند و موجب بهینه‌سازی عملکرد توربین در شرایط مختلف باد می‌شوند.

ناماهنگی زاویه یاو باعث کاهش ضریب توان (C_p) و بازده توربین می‌شود، به طوری که یک انحراف ۵ درجه‌ای می‌تواند تا ۱۰ درصد افت توان ایجاد کند. این کاهش راندمان سالانه باعث زیان مالی قابل توجهی می‌شود. برای تصحیح یاو، حسگرهای MEMS، لیدار و حسگرهای اولتراسونیک راه‌حلی با هزینه‌های متفاوت ارائه می‌دهند. حسگرهای MEMS کم‌هزینه (۵۰۰ دلار)، کم‌مصرف و کارآمد هستند، در حالی که لیدار (۵۰,۰۰۰ دلار) دقت بالایی دارد، اما برای مزارع بادی بزرگ به صرفه است. بررسی اقتصادی نشان می‌دهد نصب حسگرهای MEMS می‌تواند در کمتر از ۶ ماه هزینه خود را جبران کند، در حالی که استفاده از لیدار در مقیاس‌های بزرگ‌تر توجیه‌پذیر است.

۵. نتیجه‌گیری

ناهماهنگی یاو یکی از عوامل کلیدی است که به طور مستقیم بر بازده و عملکرد توربین‌های بادی تأثیر می‌گذارد. نتایج این مقاله نشان داد حتی انحراف‌های کوچک در زاویه یاو می‌تواند به کاهش قابل توجه توان خروجی، افت ضریب توان و افزایش تنش‌های مکانیکی روی اجزای توربین منجر شود. در شرایطی با ناهماهنگی زاویه‌ای بالا، گشتاور منفی و توقف توربین ممکن است رخ دهد که به معنای کاهش کامل توان خروجی است. از سوی دیگر، نتایج شبیه‌سازی نشان داد در برخی موارد خاص، یک ناهماهنگی کوچک مانند ۰/۵ درجه می‌تواند به طور موقت موجب افزایش ضریب توان و بهبود عملکرد توربین شود. این امر به بهینه‌سازی جریان هوا و توزیع بار آیرودینامیکی روی تیغه‌ها مرتبط است.

برای تشخیص و اصلاح به موقع ناهماهنگی یاو، استفاده از حسگرهای دقیق و پیشرفته ضروری است. بررسی مقایسه‌ای حسگرهای مختلف نشان داد حسگرهای سنتی مانند بادسنج‌های فنجان‌ی و پره‌ای به دلیل سادگی طراحی و هزینه پایین، گزینه‌هایی اقتصادی هستند، اما در شرایط تلاطم و آشفتگی عملکرد مطلوبی ندارند. در مقابل، حسگرهای مدرن مانند سیم داغ و MEMS با دقت زیاد، زمان پاسخ سریع و پایداری در شرایط محیطی دشوار، بهترین گزینه‌ها برای کنترل ناهماهنگی یاو به شمار می‌روند.

به‌ویژه، حسگرهای MEMS با طراحی فشرده، مصرف انرژی پایین و قابلیت ارائه داده‌های بلادرنگ، به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی و کاهش هزینه‌های عملیاتی مطرح شده‌اند. ادغام این حسگرها با سیستم‌های کنترلی هوشمند می‌تواند به بهبود قابل توجهی در بهره‌وری انرژی، کاهش تنش‌های مکانیکی و افزایش طول عمر تجهیزات منجر شود.

در نهایت، تحقیقات آینده باید بر توسعه سیستم‌های کنترلی تطبیقی مبتنی بر داده‌های بلادرنگ این حسگرها متمرکز شود تا به بهبود پایداری و کارایی انرژی بادی در مقیاس جهانی کمک کند.

منابع

- [1] Selim Molla, Omar Farrok, Mohammad Jahangir Alam. Electrical energy and the environment: Prospects and upcoming challenges of the World's top leading countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024 March ; 191.
- [2] Maedeh Maher, Afshin Danehkar, Hossein Yousefi. Assessing Wind Energy Potential In The Territorial Waters Of Hormozgan Province. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2024 May ; 2(3): 2980-8693.
- [3] Sepideh Abedi, Danial Ebrahiminia. Assessment of Renewable Energy Potential in Sistan and Baluchistan Province: Solar, Wind, Geothermal, and Bioenergy Sources. *Journal of Sustainable Energy Systems*. 2024 June; 2(4): 2980-8693.
- [4] Andreas Rott, Leo Höning, Paul Hulsman, Laura J. Lukassen, Christof Moldenhauer, Martin Kühn. Wind vane correction during yaw misalignment for horizontal-axis wind turbines. *Wind Energy Science*. 2023;; 1755–1770.
- [5] Mike T. van Dijk, Jan-Willem van Wingerden, Turaj Ashuri, Yaoyu Li, Mario A. Rotea. Yaw-Misalignment and its Impact on Wind Turbine Loads and Wind Farm Power Output. In ; 2016.
- [6] Bo Jing, Zheng Qian, Yan Pei, Lizhong Zhang, Tingyi Yang. Improving wind turbine efficiency through detection and calibration of yaw misalignment. *Renewable Energy*. 2020; 160: 1217e1227.
- [7] Chia-Yen Lee, Chih-Yung Wen, Hui-Hsiung Hou, Ruey-Jen Yang, Chien-Hsiung Tsai, Lung-Ming Fu. Design and characterization of MEMS-based flow-rate and flow-direction microsensor. *Microfluid Nanofluid*. 2009;; 363–371.
- [8] Knud A. Kragh, Morten H. Hansen, Lars C. Henriksen. Sensor comparison study for load alleviating wind turbine pitch control. *WIND ENERGY*. 2013; 17: 1891–1904.
- [9] Min-Soo Jeong, Sang-Woo Kim, In Lee, Seung-Jae Yoo, K.C. Park. The impact of yaw error on aeroelastic characteristics of a horizontal. *Renewable Energy*. 2013; 60: 256e268.
- [10] Shuting Wan, Lifeng Cheng, Xiaoling Sheng. Effects of Yaw Error on Wind Turbine Running Characteristics Based on the Equivalent Wind Speed Model. *Energies*. 2015; 8: 6286-6301.
- [11] Wenlong Tian, James H. VanZwieten, Parakram Pyakurel, Yanjun Li. Influences of yaw angle and turbulence intensity on the performance of a 20 kW in-stream hydrokinetic turbine. *Energy*. 2016; 111: 104-116.
- [12] T.S. Leu, J.M. Yu, J.J. Miao, S.J. Chen. MEMS flexible thermal flow sensors for measurement of unsteady flow above a pitching wind turbine blade. *perimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 77: 167–178.
- [13] Nicolas Schärer, Denis Mikhaylov, Cédric Sievi, Badoui Hanna, Caroline Braud, Julien Deparday, et al. Aerodynamic Performance and Impact Analysis of a MEMS-Based Non-Invasive Monitoring System for Wind Turbine Blades. *Signal Processing*. 2024.
- [14] Moein Sarbandi ,Hamid Khaloozadeh. Quantifying the impact of sensor precision on power output of a wind turbine: A sensitivity analysis via Monte Carlo simulation study. *Wind Engineering*. 2024; 48: 497–517.
- [15] A. Belali Oskooei, J. Koohsorkhi, M. Mehrpooya. Simulation of plasma-assisted catalytic reduction of NO_x, CO, and HC from diesel engine exhaust with COMSOL. *Chemical Engineering Science*. 2019; 197: 135-149.
- [16] Yunong Bao, Qinmin Yang. A Data-Mining Compensation Approach for Yaw Misalignment on Wind Turbine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021; 17: 8154 - 8164.
- [17] Ravi Pandit, David Infield, Tim Dodwel. Operational Variables for Improving Industrial Wind Operational Variables for Improving Industrial Wind Capabilities Using Data-Driven Techniques. *TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*. 2021; 70.
- [18] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi. *WIND ENERGY HANDBOOK* West Sussex: John Wiley & Sons; 2001.
- [19] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. ; February 2009.
- [20] Qiqing Zhang ,Xiuling Wang. Numerical Investigation of Aerodynamic Performances for NREL 5-MW Offshore Wind Turbine. *Wind*. 2023; 3: 191–212.

- [21] Fraden Jacob. Handbook of Modern Sensors New York Heidelberg Dordrecht London: Springer ; 2010.
- [22] Miodrag Zlatanovic, Ivan Popovic, Zoran Grsic. FIELD TEST COMPARISON OF DIFFERENT WIND SENSORS. 2008.
- [23] Fatemeh Ejeian, Shohreh Azadi, Amir Razmjou, Yasin Orooji, Ajay Kottapalli, Majid Ebrahimi Warkiani, et al. Design and applications of MEMS flow sensors: A review. *sensors and Actuators A: Physical*. 2019;: 483-502.
- [24] Brent M. Bowen. Improved Wind and Turbulence Measurements Using a Low-Cost 3-D Sonic Anemometer at a Low-Wind Site. *The Open Atmospheric Science Journal*. 2008; 2: 131-138.
- [25] Tomasz Lipecki, Paulina Jamińska-Gadomska, Andrzej Sumorek. Influence of Ultrasonic Wind Sensor Position on Measurement Accuracy under Full-Scale Conditions. *sensors*. 2020; 20.
- [26] Mingjia Shangguan, Jiawei Qiu, Jinlong Yuan, Zhifeng Shu, Lingfeng Zhou, Haiyun Xia. Doppler Wind Lidar From UV to NIR: A Review With Case Study Examples. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022; 2.
- [27] Ebrahim Taiedi Nejad, Amir Ghasemi kordlar, Javad Koohsorkhi.. A four-wire micro anemometer in double cross shape with high mechanical stability for high sensitive air flow. *Microelectronic Engineering*. 2022; 262(1): 111831.
- [28] Ozak O. Esu, James A. Flint, imon J. Watson. Condition Monitoring of Wind Turbine Blades Using MEMS Accelerometers. *Renewable Energy World Europe*. 2019.
- [29] B. Idjeri, M. Laghrouche, J.Boussey. Wind Measurement Based on MEMS Micro-Anemometer With High Accuracy Using ANN Technique. *Sensors Journal*. 2017.
- [30] Zaheer Abbas, Mohtashim Mansoor, Muzaffar Habib, Zahid Mehmood. Review: MEMS sensors for flow separation detection. *Microsystem Technologies*. 2023; 29: 1253–1280.