



## Accurate Analysis of Wind Turbine Aerodynamic Power Sensitivity to Yaw and Pitch Errors Using a Second-Order Response Surface Method with a Microsensor for Error Reduction

Kian Rafiei<sup>1</sup> | Javad Koohsorkhi<sup>1,2\*</sup>

1. Advanced Micro and Nano devices Lab., Department of MEMS and NEMS, School of Intelligent Systems, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [kianrafiee28@gmail.com](mailto:kianrafiee28@gmail.com)
2. Corresponding Author, Associate Professor at Department of MEMS and NEMS, School of Intelligent Systems, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [koohsorkhi@ut.ac.ir](mailto:koohsorkhi@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**

**Received:** 21 November 2025

**Revised:** 21 December 2025

**Accepted:** 20 January 2025

**Published Online:** 28 May 2026

**Keywords:**

Yaw Misalignment,  
Pitch misalignment,  
Blade Element Momentum,  
Response Surface Methodology,  
Sensor Effect.

### ABSTRACT

In this study, the effects of two frequent operational errors in wind turbines yaw misalignment and blade pitch offset were quantified and modeled for the turbine aerodynamic response in two operating regions: Region 2 (below-rated) and Region 3 (rated/above-rated). To obtain results that are generalizable and comparable across different scales, three reference turbines (3.4 MW, 5 MW, and 10 MW) were selected and time-domain simulations were performed using OpenFAST/AeroDyn (BEM) under steady wind conditions. Quasi-steady quantities, including the power coefficient  $C_p$  and aerodynamic power  $P_{aero}$  (and, in intermediate steps, aerodynamic torque), were extracted from the steady-state window. To systematically cover the parameter space ( $U, \gamma, \Delta\beta$ ), a design of experiments (DOE) approach was applied, and quasi-steady quadratic response-surface surrogate models (RSM/QS) were fitted separately for Regions 2 and 3. Validation was carried out by direct comparison between surrogate predictions and OpenFAST results (including parity plots). In addition to 2D sensitivity curves with respect to yaw and pitch, response maps and 3D surfaces were provided to visualize continuous variations of  $C_p$  and  $P_{aero}$  across the operating space. Finally, using the final quadratic equations and their coefficients as low-cost relations, the impact of different sensor uncertainties on turbine power output was evaluated via a Monte Carlo method, showing that LiDAR and MEMS sensors yield the smallest power losses. Specifically, for the MEMS sensor, the worst-case (P95) power loss is approximately 0.18–2.1 for yaw-only misalignment across all three turbines, and approximately 6–10 for the combined “wind-speed error + induced pitch miscommand” scenario.

**Cite this article:** Rafiei, K. & Koohsorkhi, J. (2026). Accurate Analysis of Wind Turbine Aerodynamic Power Sensitivity to Yaw and Pitch Errors Using a Second-Order Response Surface Method with a Microsensor for Error Reduction. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (2), 393-415. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.410044.1214>



© Kian Rafiei, Javad Koohsorkhi

**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.410044.1214>

### Introduction

Modern utility-scale wind turbines operate in two distinct aerodynamic–control regimes: Region 2 (below rated), where control aims to maximize energy capture, and Region 3 (above rated), where pitch control and power limiting dominate the response. This makes turbine performance highly sensitive to yaw misalignment ( $\gamma$ ) and, in above-rated conditions, to pitch command errors that can arise indirectly from wind-speed measurement uncertainty. To quantify these effects efficiently—without running high-fidelity aeroelastic simulations for every operating point—this study develops and validates compact surrogate models for three reference turbines (3.4 MW, 5 MW, and 10 MW),

and then uses them to assess how realistic sensor accuracies propagate into power deviations across Regions 2 and 3.

## Materials and Methods

### Turbine models and simulation dataset

Baseline aeroelastic simulations were performed in OpenFAST for three reference turbines (3.4 MW, 5 MW, and 10 MW) under steady wind inflow. For each operating case, steady responses were extracted as mean aerodynamic outputs over the stabilized time window. The input variables are wind speed  $U$ , yaw misalignment  $\gamma$ , and pitch offset  $\Delta\beta$  (defined relative to the base pitch schedule). The primary outputs are aerodynamic power  $P_{aero}$ , aerodynamic torque  $Q_{aero}$ , and power coefficient  $C_p$ . The operating space was separated into Region 2 and Region 3 using each turbine's rated wind speed  $U_{rated}$ , consistent with the reference turbine definitions used throughout the project.

### DOE and surrogate modeling (RSM/QS)

A design of experiments (DOE) strategy was used to sample the three-dimensional input space ( $U, \gamma, \Delta\beta$ ) efficiently. A quasi-steady quadratic surrogate model (RSM/QS) was then fitted for each turbine and each output. The surrogate takes the standard second-order polynomial form including main effects, squared terms, and pairwise interaction terms. To capture the regime change around rated operation, the surrogate was fitted separately for Region 2 and Region 3; in addition, Region 3 was treated with sub-regioning and/or blending around the transition to reduce discontinuity and improve stability near the rated boundary. Model adequacy was checked using verification points and parity/error plots to ensure the surrogate reproduces OpenFAST trends before applying it in sensitivity and sensor-uncertainty analyses.

## Results and discussion

### Validation against OpenFAST trends (Region 2 vs Region 3)

OpenFAST results show the expected regime shift at  $U_{rated}$ . In Region 2, the turbine operates near optimal energy capture, so  $P_{aero}$  increases strongly with  $U$  and  $C_p$  remains close to its maximum/optimal level. In Region 3, pitch regulation limits aerodynamic loading and power, leading to a flatter power trend while  $C_p$  decreases with increasing  $U$  due to intentional aerodynamic unloading. Verification results confirm that separating Region 2 and Region 3 surrogates is necessary to preserve the distinct physics and control behavior and to avoid systematic bias near the rated transition.

### Sensitivity to yaw misalignment

For all three turbines, yaw misalignment produces a clear power penalty that becomes more pronounced as wind speed approaches and exceeds rated conditions. This behavior is consistent with the reduction in effective inflow component normal to the rotor plane and with the fact that the turbine operates closer to power/loads constraints near and above rated. Comparing sensor classes shows that larger yaw uncertainty (e.g., "Traditional" direction sensing with wider yaw error bounds) leads to noticeably larger worst-case power losses, while higher-accuracy sensors (particularly LiDAR, and then MEMS/Sonic in this study) reduce the upper tail (worst-case) of power loss even if mean losses remain moderate.

### Wind-speed uncertainty coupled to pitch error in Region 3

Above rated operation is dominated by the wind-speed  $\rightarrow$  pitch pathway: an error in measured  $U$  not only perturbs the input to the surrogate, but also shifts the pitch command because the controller (or base pitch schedule used to define  $\Delta\beta$ ) is speed-dependent. As a result, the turbine may pitch too aggressively (reducing  $C_p$  and  $P_{aero}$ ) or too conservatively (in a real controller this may increase loads and risk overpower). This coupling explains the strong contrast between regions: below rated, pitch scheduling has relatively minor influence on power (making wind-speed error appear less critical), whereas above rated, the induced pitch miscommand can dominate the power deviation and strongly separate sensor classes in the worst-case metrics.



## محاسبه دقیق وابستگی توان آیرودینامیک توربین بادی به خطای ناهماهنگی یاو و پیچ با استفاده از روش پاسخ درجه ۲ و معرفی میکرو حسگر مناسب برای کاهش این خطا

کیان رفیعی<sup>۱</sup> | جواد کوهسرخ<sup>۲\*</sup>

۱. آزمایشگاه ساخت ادوات پیشرفته میکرو نانو، گروه ریز فناوری و فوتونیک، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه:

[kianrafiee28@gmail.com](mailto:kianrafiee28@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه ریز فناوری و فوتونیک، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [koohsorkhi@ut.ac.ir](mailto:koohsorkhi@ut.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## نوع مقاله:

پژوهشی

## تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

## کلیدواژه:

ناهماهنگی یاو،

ناهماهنگی پیچ،

مومنتوم المان پره،

روش سطح پاسخ،

حساسیت حسگرها.

در این مقاله، اثر دو خطای عملیاتی پرتکرار در توربین‌های بادی شامل ناهماهنگی یاو و افست پیچ پره بر پاسخ‌های آیرودینامیکی توربین در دو ناحیه عملکردی ناحیه ۲ (زیرنامی) و ناحیه ۳ (نامی/بالانامی) کمی‌سازی و مدل‌سازی شد. برای دستیابی به نتایج قابل تعمیم و مقایسه‌پذیر در مقیاس‌های مختلف، سه توربین مرجع ۳/۴، ۵ و ۱۰ مگاوات انتخاب و شبیه‌سازی‌های زمان‌دامنه با OpenFAST/AeroDyn مدل BEM در شرایط باد پایا انجام شد؛ سپس کمیت‌های شبه‌ایستا شامل ضریب توان  $C_p$  و توان آیرودینامیکی  $P_{aero}$  (و در مراحل میانی گشتاور) از پنجره پایدار استخراج شد. برای پوشش نظام‌مند فضای پارامترها  $(U, \gamma, \Delta\beta)$ ، از طراحی آزمایش (DOE) استفاده شد و مدل‌های جانشین شبه‌ایستا مبتنی بر سطح پاسخ درجه ۲ (RSM/QS) به صورت تفکیک‌شده برای ناحیه ۲ و ناحیه ۳ برازش شدند. اعتبارسنجی با مقایسه مستقیم پیش‌بینی‌های مدل جانشین و نتایج OpenFAST (از جمله با نمودار هم‌ارزی) انجام شد و علاوه بر منحنی‌های دوبعدی حساسیت نسبت به یاو/پیچ، نقشه‌ها و سطوح سه‌بعدی پاسخ برای نمایش پیوسته تغییرات  $C_p$  و  $P_{aero}$  ارائه شد. در نهایت، با استفاده از معادلات درجه ۲ نهایی و ضرایب متناظر به عنوان روابط کم‌هزینه، اثر خطای انواع حسگرها بر توان خروجی توربین بادی با روش مونت‌کارلو محاسبه شد و نتایج نشان داد حسگرهای لیدار و میکروالکترومکانیکی کمترین تلفات توان را ایجاد می‌کنند. به طور مشخص، حسگر میکروالکترومکانیکی در سناریوی «فقط یاو» برای هر سه توربین تلفات بدترین حالت را در بازه حدود ۰/۱۸ تا ۲/۱ و در سناریوی «خطای سرعت + فرمان پیچ ناشی از آن» در بازه حدود ۶ تا ۱۰ نشان می‌دهد.

**استناد:** رفیعی، کیان و کوهسرخ؛ جواد (۱۴۰۵). محاسبه دقیق وابستگی توان آیرودینامیک توربین بادی به خطای ناهماهنگی یاو و پیچ با استفاده از روش پاسخ درجه

۲ و معرفی میکرو حسگر مناسب برای کاهش این خطا. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۲) ۳۹۳-۴۱۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.410044.1214>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© کیان رفیعی، جواد کوهسرخ

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2026.410044.1214>



## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، تولید برق بادی به عنوان یکی از ارکان اصلی گذار انرژی گسترش یافت و هم‌زمان، افزایش مقیاس توربین‌ها (افزایش قطر روتور و توان نامی) موجب شد حساسیت عملکرد آیرودینامیکی به شرایط «خارج از طراحی» اهمیت بیشتری پیدا کند. در ادبیات کلاسیک صنعت بادی، عملکرد توربین‌ها با منحنی توان و شاخص‌هایی نظیر ضریب توان (C<sub>p</sub>) توصیف شده و نقش راهبردهای کنترل (سرعت متغیر و کنترل گام) در تمایز نواحی عملکردی به‌ویژه ناحیه ۲ (بار جزئی) و ناحیه ۳ (بار کامل/نامی) به صورت بنیادی تبیین شده است [۱]. چنین چارچوبی، انحراف از هم‌راستایی ایده‌آل جریان و روتور، نه فقط تولید انرژی بلکه بارگذاری آیرودینامیکی و در نتیجه پایداری و قابلیت اطمینان سازه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین کمی‌سازی اثرات این انحراف‌ها، به‌ویژه در توربین‌های مرجع و در دامنه گسترده شرایط کاری، به یک ضرورت پژوهشی و صنعتی تبدیل شد [۱].

در میان عوامل خارج از طراحی، «ناهماهنگی یاو» و «افست/ناهماهنگی پیچ» از پرتکرارترین خطاهای عملیاتی گزارش شده‌اند، زیرا می‌توانند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری جهت باد، محدودیت‌های عملگرهای کنترلی، سایش و کالیبراسیون و نیز خطاهای نصب باشند. به همین دلیل، علاوه بر مدل‌سازی آیرودینامیکی، کیفیت اندازه‌گیری و تصحیح سنسوری به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر مسئله مطرح شده است [۲]. به بیان دیگر، ارزیابی عملکرد و استخراج حساسیت‌ها در عمل همواره با این پرسش همراه است که «ناهماهنگی واقعی آیرودینامیکی» تا چه حد با «ناهماهنگی مشاهده‌شده مبتنی بر سنسور» منطبق است و این اختلاف چگونه به خطای برآورد توان و شاخص‌های عملکردی تبدیل می‌شود [۲ - ۴]. از همین رو در پژوهش حاضر چارچوبی دنبال شد که هم بتواند اثرات آیرودینامیکی یاو و افست پیچ را در فضای پارامترها با پوشش مناسب کمی‌سازی کند و هم زمینه اتصال این اثرات به مسئله مشاهده و تصحیح سنسوری را فراهم سازد.

در ادبیات یاو، ناهماهنگی یاو به صورت زاویه بین راستای باد آزاد و محور روتور تعریف شده و نشان داده شده است که این انحراف می‌تواند هم توان و هم الگوی بارهای آیرودینامیکی را تغییر دهد. یک جمع‌بندی اثرگذار از پیامدهای یاو بر بارهای توربین و توان مزرعه بادی گزارش کرد که ناهماهنگی یاو علاوه بر کاهش تولید، می‌تواند باعث تغییرات مهم در بارگذاری سازه‌ای و نیز برهم‌کنش‌های مزرعه‌ای از مسیر تغییر ویک شود [۱]. در مدل‌سازی مهندسی، کاهش توان ناشی از یاو به عنوان تقریب اولیه اغلب با یک رابطه کسینوسی بیان شده و همچنین، گزارش شده است که حساسیت توان به یاو یک ثابت جهانی نیست و می‌تواند به شرایط جریان و به‌ویژه وضعیت ویک وابسته باشد [۵]. با این حال، بخش مهمی از مسئله یاو در عمل به مشاهده‌پذیری آن وابسته است: نشان داده شده است که بادگیر/بادسنج‌های نصب‌شده روی ناسل به علت اعوجاج میدان جریان ناشی از روتور و ناسل می‌توانند زاویه یاو را به صورت سیستماتیک خطا دار برآورد کنند؛ از این رو روش‌های تصحیح زاویه بادگیر در حضور ناهماهنگی یاو توسعه یافته و بهبود برآورد یاو و پیامدهای عملکردی آن گزارش شده است [۵]. اثر ناهماهنگی یاو بر ضریب توان توربین مرجع ۵ مگاواتی با استفاده از شبیه‌سازی CFD بررسی شده و نشان داده شد که حتی ناهماهنگی‌های کوچک مرتبه ۲ درجه می‌تواند به کاهش قابل ملاحظه‌ای در ضریب توان و بازده توربین منجر شود [۶]. علاوه بر این، روش‌های داده‌محور مبتنی بر داده‌های SCADA<sup>۳</sup> برای تشخیص و کالیبراسیون یاو ارائه شده و بهبود شاخص‌های عملکردی پس از تصحیح گزارش شده است [۷]. همچنین، متغیرهای عملیاتی مؤثر بر بهبود قابلیت تشخیص زود هنگام ناهماهنگی یاو در محیط صنعتی با رویکرد داده‌محور بررسی شده است [۵]. این بدنه پژوهشی نشان می‌دهد تحلیل یاو وقتی برای کاربرد صنعتی هدف‌گذاری می‌شود، ناگزیر باید پیوند بین «اثر آیرودینامیکی» و «خطای مشاهده‌شده سنسوری/داده‌ای» را در نظر بگیرد.

در ادبیات پیچ، نقش کنترل گام در توربین‌های مدرن به‌ویژه برای محدودسازی توان و بار در ناحیه نامی به عنوان یک سازوکار کلیدی شناخته شده است. در مطالعات کنترل گام، انتخاب سنسور و کیفیت اندازه‌گیری برای کنترل و کاهش بارها بررسی شده و نشان داده شده است که ویژگی‌های سنسورها (پاسخ زمانی، نویز، دقت) می‌تواند مستقیماً بر کیفیت کنترل اثرگذار باشد [۸]. هم‌زمان، برای مشاهده مستقیم پدیده‌های نزدیک‌سطحی و جریان ناپایا پیرامون پره در شرایط گام‌گذاری، حسگرهای

1. Yaw Misalignment

2. Pitch Offset/Misalignment

3. Supervisory Control and Data Acquisition

MEMS<sup>۱</sup> انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری جریان ناپایا بالای پره‌های در حال پیچ گزارش شده‌اند که اهمیت اندازه‌گیری موضعی و سریع را برجسته کرده است [۹]. در همین راستا، گزارش شده است که افست پیچ کوچک می‌تواند زاویه حمله مؤثر را تغییر دهد و توربین را به سمت شرایط نامطلوب مانند نزدیک شدن به واماندگی یا دور شدن از نقطه بهینه سوق دهد؛ بنابراین نیاز به مدل‌های کارآمد برای کمی‌سازی اثر افست پیچ بر توان، گشتاور و شاخص‌های کارایی، به‌ویژه در حالتی که اثرات یاو و پیچ هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد، مطرح شده است [۸ و ۹].

از منظر ابزارهای شبیه‌سازی، دو مسیر غالب در ادبیات برای تحلیل اثرات یاو و پیچ گزارش شده است: (الف) CFD<sup>۲</sup> مبتنی بر حل ناویر-استوکس با مدل‌های RANS/LES که امکان مشاهده میدان جریان و پدیده‌های موضعی را فراهم می‌کند، اما هزینه محاسباتی بالایی دارد، و (ب) مدل‌های مهندسی نظیر BEM<sup>۳</sup> در چارچوب‌های آیرولاستیک که با فرض‌های مهندسی امکان پیمایش گسترده فضای پارامترها را فراهم می‌سازد. در این میان، OpenFAST به عنوان ابزار فیزیک‌منا برای شبیه‌سازی پاسخ کوپل شده آیرودینامیکی - سازه‌ای - کنترلی معرفی شده و استفاده از AeroDyn برای مدل‌سازی بارهای آیرودینامیکی و اثرات ویک/القایی گزارش شده است؛ همچنین بهبودهای مشخص در فرمول‌بندی BEM برای شرایط جریان مایل (مرتبط با یاو) گزارش شده که مستقیم به مسئله ناهماهنگی یاو مربوط است [۱۰]. از سوی دیگر، به منظور پوشش هم‌زمان چند ورودی (سرعت باد، یاو، افست پیچ) و استخراج اثرات اصلی و اندرکنش‌ها، استفاده از طراحی آزمایش‌ها و روش سطح پاسخ در مطالعات مهندسی رایج بوده است؛ در سطح نظری، طراحی Box-Behnken به عنوان یک طراحی سه‌سطحی مناسب برای برازش مدل درجه دوم معرفی شده [۱۱] و منابع کلاسیک RSM<sup>۴</sup> نیز راهنمای ساختار و منطق این روش‌ها را ارائه کرده‌اند [۱۲]. در کاربردهای انرژی باد نیز استفاده از RSM برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی گزارش شده و اهمیت اثرات متقابل عوامل بر خروجی نهایی نشان داده شده است [۱۳ و ۱۴].

در نهایت، پیوند بین خطای اندازه‌گیری و مدل‌سازی حساسیت در مطالعات سنسوری نیز برجسته شده است: وابستگی دقت اندازه‌گیری باد به موقعیت نصب سنسورهای التراسونیک<sup>۵</sup> بررسی شده [۱۵]. مرورهایی از لیدار داپلر و کاربردهای آن ارائه شده است [۱۶] و مرورهای حوزه MEMS و کاربردهای مرتبط با تشخیص جدایش و پایش پرها گزارش شده است [۱۷]. علاوه بر این، نشان داده شده است که دقت سنسور می‌تواند اثر قابل توجهی بر توان خروجی برآورد شده داشته باشد و این موضوع جایگاه تحلیل حساسیت مبتنی بر داده را تقویت کرده است [۱۸]، همچنین سامانه‌های پایش غیرتهاجمی مبتنی بر MEMS برای ارائه داده بلادرنگ و کمک به کنترل/پایش گزارش شده‌اند [۱۹]. برآیند این ادبیات نشان می‌دهد با وجود مطالعات گسترده درباره یاو و پیچ، همچنان نیاز به یک چارچوب سیستماتیک که بتواند (۱) فضای پارامترها را به صورت گسترده با ابزار مهندسی قابل اتکا پیمایش کند، (۲) حساسیت‌های اصلی و اندرکنش‌ها را به صورت کمی و قابل استفاده استخراج کند، و (۳) زمینه اتصال نتایج به مسئله مشاهده و تصحیح سنسوری را فراهم سازد. در نتیجه، مسیر ترکیبی «شبیه‌سازی آیرولاستیک + RSM/QS + DOE<sup>۶</sup>» به عنوان رویکرد مناسب برای کمی‌سازی حساسیت‌ها و تولید روابط کاربردی در تحلیل‌های سنسوری و کنترلی صورت‌بندی شد، با تکیه بر توربین‌های مرجع که مشخصات و مستندات آن‌ها به طور گسترده در ادبیات گزارش شده است [۲۰ و ۲۱].

## ۰۲ روش‌شناسی

### ۰۱-۲ طراحی مطالعه و دامنه تحلیل

در این مقاله به منظور کمی‌سازی و مدل‌سازی پاسخ آیرودینامیکی حالت پایا<sup>۷</sup> توربین‌های بادی محور افقی تحت ناهماهنگی یاو و افست پیچ پره انجام شد. برای حصول نتایج قابل تعمیم، سه توربین مرجع در کلاس‌های توان متفاوت انتخاب شدند تا

1. Microelectromechanical System
2. Computational Fluid Dynamic
3. Blade Element Momentum
4. Response Surface Methodology
5. Ultrasonic
6. Design Of Experiment
7. Quasi-Steady

حساسیت پاسخ‌ها نسبت به مقیاس و ناحیه کنترلی (Region-2/Region-3) قابل مقایسه باشد. چارچوب تحلیل بر پایه شبیه‌سازی‌های زمان - دامنه و استخراج کمیت‌های میانگین‌گیری‌شده در پنجره پایا استوار شد و سپس با استفاده از طراحی آزمایش و برازش سطح پاسخ، مدل‌های جانشین شبه‌ایستا استخراج شد. OpenFAST به عنوان ابزار اصلی شبیه‌سازی چندفیزیکی آیرولاستیک به کار گرفته شد.

## ۲-۲. توربین‌های مرجع و ضرورت مقیاس‌پذیری نتایج

برای جلوگیری از وابستگی نتایج به یک طراحی خاص، استفاده از توربین‌های مرجع رایج شده است. در ادبیات، توربین مرجع ۵ مگاوات NREL به عنوان مرجع پرکاربرد برای توسعه و ارزیابی روش‌ها گزارش شده است [۲۰]. برای مقایسه مقیاسی، معرفی توربین‌های مرجع ۳/۴ مگاوات (خشکی) و ۱۰ مگاوات (خشکی) در چارچوب Task 37 IEA به صورت رسمی ارائه شده و مشخصات سطح بالای هر دو طراحی در جدول ۱ (توان نامی، قطر روتور، ارتفاع هاب، نوع درایوتورین) گزارش شده است [۲۱].

جدول ۱. مشخصات توربین‌های مرجع [۱۹ و ۲۰]

توربین مرجع	ارتفاع هاب (H)	قطر روتور (D)	توان نامی	سرعت وصل ( $U_{in}$ )	سرعت نامی ( $U_{rated}$ )	سرعت قطع ( $U_{out}$ )
IEA 3.4 MW Land-based RWT	110 m	130 m	3.37 MW	4 m/s	9.8 m/s	25 m/s
NREL 5 MW Baseline	90 m	126 m	5 MW	3 m/s	11.4 m/s	25 m/s
IEA 10 MW Offshore RWT	119 m	198 m	10 MW	4 m/s	11 m/s	25 m/s

## ۲-۳. چارچوب شبیه‌سازی آیرولاستیک با OpenFAST

برای شبیه‌سازی پاسخ توربین در برابر اغتشاش‌های یاو/پیچ، از OpenFAST به عنوان یک چارچوب کوپل‌شده آیرودینامیک - سازه - کنترل استفاده شد. OpenFAST با معماری ماژولار، بارهای آیرودینامیکی، پاسخ‌های سازه‌ای و کنش کنترل‌گر (گشتاور ژنراتور/پیچ پره‌ها/یاو) را در حوزه زمان به صورت هم‌بسته حل می‌کند [۲۲].

## ۲-۴. مدل آیرودینامیکی (AeroDyn/BEM)

محاسبه بارهای آیرودینامیکی روتور بر پایه نظریه مومنوم - المان پره (BEM) انجام شد. در پیاده‌سازی AeroDyn، اصلاحات متداول برای اثرات سه‌بعدی و ویژگی‌های بیداری<sup>۱</sup> و نیز گزینه‌های لازم برای لحاظ کردن پدیده‌هایی مانند تلفات نوک/هاب و بیداری مایل<sup>۲</sup> استفاده شد [۲۳]. جدول ۲ متغیرهای این شبیه‌سازی‌های را در این مقاله نمایش می‌دهد.

جدول ۲. متغیرهای شبیه‌ساز OpenFAST در این مطالعه

گروه	نماد / کلیدواژه (OpenFAST)	مقدار پیشنهادی/قابل کنترل	توضیح کاربردی (برای همه توربین‌ها)
زمان و اجرای شبیه‌سازی	مدت کل اجرا TMax	60-100 s	به اندازه کافی برای حذف گذرا و میانگین‌گیری شبه‌پایا ثابت نگه داشته شود تا همه کیس‌ها با یک دقت زمانی مقایسه شوند
باد ورودی (InflowWind)	نوع باد WindType	1 (Steady)	باد پایا برای مدل شبه‌استاتیک (QS) و نقشه‌سازی حساسیت
آیرودینامیک (AeroDyn/BEM)	مدل ویک/لقایی Wake_Mod	1 (BEMT)	پایه اصلی محاسبات آیرودینامیکی با روش BEM
	تصحیح ویک مایل Skew_Mod	فعال	برای مدل‌سازی اثر یاو/اجریان مایل ضروری
	حداکثر تکرار همگرایی MaxIter	100	تضمین همگرایی حل BEM در هر گام زمانی

1. wake

2. skewed wake

## ۲-۵. تعریف ناهماهنگی‌ها و اعمال آن‌ها در شبیه‌سازی

### ۲-۵-۱. ناهماهنگی یاو

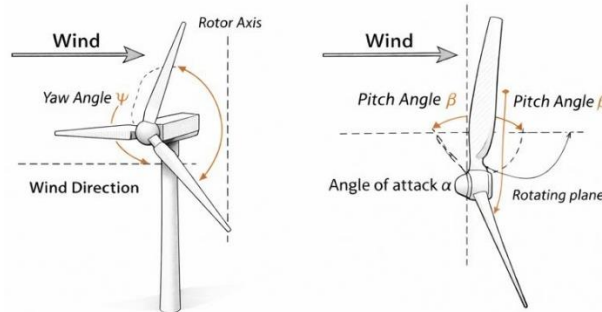
ناهماهنگی یاو به صورت زاویه بین راستای باد ورودی و محور نرمال صفحه روتور تعریف شد و با نماد  $(\gamma)$  نمایش داده شد. در سطح فیزیکی، یاو باعث می‌شود مؤلفه مؤثر سرعت باد عمود بر صفحه روتور کاهش یابد و به طور هم‌زمان الگوی القایی و بیداری نیز دچار میل شود؛ این موضوع هم بر توان و هم بر بارگذاری اثرگذار است [۲۴].

### ۲-۵-۲. افست پیچ پره

افست پیچ به صورت انحراف کوچک از فرمان پیچ مرجع کنترل‌گر تعریف شد. اگر  $(\theta_0(t))$  فرمان پیچ تولیدشده توسط کنترل‌گر باشد، زاویه اعمال شده به پره به صورت رابطه ۱ بیان شد:

$$\theta_b(t) = \theta_0(t) + \Delta\theta_b \quad (1)$$

در ساده‌ترین سناریوهای مطالعه،  $(\Delta\theta_b = \Delta\theta)$  (افست متقارن) در نظر گرفته شد تا حساسیت آبرودینامیکی نسبت به بایاس پیچ بررسی شود؛ در سناریوهای نامتقارن نیز  $(\Delta\theta_b)$  می‌تواند برای پره‌ها متفاوت باشد تا عدم تعادل پیچ شبیه‌سازی شود. اثرگذاری عدم هم‌راستایی پیچ بر تولید توان و پیامدهای بهره‌برداری در مطالعات تجربی/داده‌محور نیز گزارش شده است [۲۵]. شبیه‌سازی‌ها در شرایط بهره‌برداری واقع‌گرایانه انجام شد و کنترل‌گرها غیرفعال نگه داشته شدند تا رفتار حاصل از خوانش حسگر در ناحیه زیرنامی (ناحیه ۲) و بالانامی (ناحیه ۳) بازتاب داده شود. OpenFAST امکان مدل‌سازی زمان‌دامنه با کنترل‌گرهای گشتاور ژنراتور و پیچ را فراهم می‌کند و برای تحلیل‌های حساسیت و بارگذاری به طور گسترده استفاده می‌شود. برای هر نقطه طراحی، زمان اجرا به اندازه کافی در نظر گرفته شد تا اثرات گذرا حذف شوند و سپس، روی بازه‌ای که پاسخ‌ها پایا شده بودند، میانگین‌گیری زمانی انجام شد [۲۶]. شکل ۱ شماتیکی از ناهماهنگی یاو را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. ناهماهنگی یاو و افست پره‌های توربین

## ۲-۶. طراحی آزمایش (DOE) و پوشش فضای پارامترها

برای نمونه‌برداری نظام‌مند از فضای ورودی‌ها، از طراحی آزمایش استفاده شد تا اثرات مستقل و برهم‌کنش‌های یاو و افست پیچ در کنار تغییرات سرعت باد قابل استخراج باشد. در مطالعات مهندسی، طراحی‌های کلاسیک مانند Box-Behnken و نیز رویکردهای سطح پاسخ برای کاهش تعداد اجراها و افزایش قدرت استنباط آماری به کار می‌روند [۲۷].

- در ادبیات انرژی بادی نیز DOE برای بهینه‌سازی/تحلیل حساسیت چه در سطح داده‌های مزرعه و چه در مدل‌های (CFD/RSM) به کار رفته است.

برای این پژوهش، نقاط DOE به گونه‌ای انتخاب شدند که:

۱. سرعت باد (U) کل نواحی بهره‌برداری (زیرنامی و بالانامی) را پوشش دهد؛
۲. یاو در بازه‌ای دوطرفه (مثبت/منفی) اعمال شود تا تقارن پاسخ نسبت به علامت یاو ارزیابی شود؛
۳. افست پیچ در بازه‌ای کوچک اما معنادار حول نقطه کار کنترل‌گر اعمال شود تا اثرات غیرخطی و نامتقارن آشکار شود.

## ۲-۷. کمیت‌های عملکردی و پس‌پردازش خروجی‌ها

### ۲-۷-۱. کمیت‌های پایه

از خروجی‌های OpenFAST، کمیت‌های زیر استخراج و سپس میانگین‌گیری زمانی شدند:

- توان آیرودینامیکی ( $P_{aero}$ )
- گشتاور آیرودینامیکی ( $\tau_{aero}$ )
- ضریب توان ( $C_p$ )

رابطه استاندارد توان و گشتاور به صورت رابطه ۲ استفاده شد:

$$P_{aero} = \tau_{aero} \cdot \omega \quad (2)$$

### ۲-۷-۲. ضریب توان (Power coefficient)

برای سنجش بازده آیرودینامیکی مطلق، ضریب توان طبق تعریف استاندارد به صورت رابطه ۳ محاسبه شد:

$$C_p = \frac{P_{aero}}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (3)$$

که در آن ( $\rho$ ) چگالی هوا و ( $A = \pi R^2$ ) سطح جاروب روتور است.

نکته مهم آن بود که ( $C_p$ ) به صورت مطلق گزارش شد و از نرمال‌سازی نسبت به حالت ( $\gamma = 0$ ) اجتناب شد؛ زیرا در ناحیه بالانامی، کنترل گر پیچ/گشتاور می‌تواند باعث تحریف شاخص‌های نرمال شده شود و مقایسه‌های بین نقطه‌ای را مخدوش کند. همچنین، در مطالعات مرتبط با تشخیص/کالیبراسیون یاو، تمایز بین اثر آیرودینامیکی واقعی و اثرات ناشی از اندازه‌گیری/کنترل مورد تأکید قرار گرفته است.

## ۲-۸. مدل جانشین شبه‌ایستا (QS) و سطح پاسخ (RSM)

در این پژوهش، پاسخ‌ها به صورت نگاشت پایا بین ورودی‌ها و خروجی‌ها مدل شدند؛ بنابراین اثرات حافظه‌ای بیداری و دینامیک‌های گذرا به طور صریح مدل نشد. این تقریب، با هدف تحلیل حساسیت سریع و جایگزینی محاسبات پرهزینه با یک مدل کم‌هزینه آماری انجام شد.

جدول ۳. نقاط و سطوح DOE برای شبیه‌سازی

نوع توربین	ناحیه عملکرد	پارامتر	نماد	واحد	سطوح/مقادیر
۳/۴ مگاوات	ناحیه ۲ (زیرنامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([4, 6, 8, 9])
۳/۴ مگاوات	ناحیه ۳ (نامی/بالانامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([11, 14, 16, 18, 20, 22, 25])
۵ مگاوات	ناحیه ۲ (زیرنامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([6, 7, 8, 11])
۵ مگاوات	ناحیه ۳ (نامی/بالانامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([12, 14, 16, 18, 20, 22, 25])
۱۰ مگاوات	ناحیه ۲ (زیرنامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([6, 8, 10])
۱۰ مگاوات	ناحیه ۳ (نامی/بالانامی)	سرعت باد	(U)	m/s	([12, 14, 16, 18, 20, 22, 25])
۳/۴، ۵ و ۱۰ مگاوات	هر دو ناحیه	ناهماهنگی یاو	( $\gamma$ )	deg	([-20, -10, -7, -3, 0, 3, 7, 10, 20])
۳/۴، ۵ و ۱۰ مگاوات	هر دو ناحیه	آفست پیچ پره	( $\Delta\beta$ )	deg	([-3, -1.5, 0, 1.5, 3])

## ۲-۸-۱. فرم کلی مدل درجه دوم

مدل‌های سطح پاسخ معمولاً با چندجمله‌ای درجه دوم نمایش داده می‌شوند. فرم استاندارد درجه دوم برای (k) عامل به صورت رابطه ۴ است:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

که در آن (y) می‌تواند یکی از کمیت‌های (C<sub>p</sub>)، (P<sub>aero</sub>) یا (τ<sub>aero</sub>) باشد و (ε) خطای مدل است.

## ۲-۹. شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای ارزیابی اثر خطای سنسورها بر توان توربین

برای برآورد اثر خطای حسگرها بر توان خروجی توربین، از روش مونت‌کارلو برای انتشار عدم قطعیت استفاده شد. در این روش، برای هر سرعت باد مرجع U و هر نوع حسگر، خطای اندازه‌گیری سرعت باد ΔU و خطای هم‌راستایی/جهت Δγ به صورت تصادفی از بازه/توزیع تعریف‌شده حسگر نمونه‌برداری می‌شود و سپس خروجی توان با استفاده از مدل جانشین (معادله درجه ۲ Quadratic/یا مدل بهبودیافته) محاسبه می‌شود. برای اینکه نتایج با منطق کنترل توربین در ناحیه ۳ سازگار باشد، در سناریوی «خطای سرعت»، اثر خطای اندازه‌گیری سرعت روی فرمان پیچ نیز لحاظ می‌شود؛ ابتدا سرعت اندازه‌گیری شده  $U_{meas} = U + \Delta U$  تولید شده، سپس پیچ فرمانی از روی جدول پیچ-سرعت  $\beta_{base}(U)$  محاسبه می‌شود و اختلاف پیچ ناشی از خطا به صورت  $\Delta\beta = \beta_{base}(U_{meas}) - \beta_{base}(U)$  به مدل اعمال می‌شود. در سناریوی «خطای یاو»، تنها Δγ اعمال شده و  $\Delta\beta = 0$  در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، برای هر سرعت باد، مجموعه‌ای از خروجی‌ها از تکرارهای مونت‌کارلو به دست آمده و شاخص‌های آماری مانند میانگین اتلاف توان و صدک ۹۵ اتلاف توان (P95) گزارش می‌شود. معیار اتلاف توان به صورت روابط ۵ و ۶ تعریف شد (اتلاف‌ها مثبت و افزایش توان صفر در نظر گرفته می‌شود):

$$e_{p,max} = \max \left( 100 \times \frac{P_{ref} - P_{err}^{(i)}}{P_{ref}} \right) \quad (5)$$

$$P95 = L_{(0.95N)} \quad (6)$$

که در رابطه ۵  $P_{base}$  توان مرجع بدون خطا  $\gamma = 0$  و  $\Delta\beta = 0$  و توان محاسبه‌شده تحت خطاهای حسگر است. این چارچوب مطابق با توصیه‌های عمومی انتشار عدم قطعیت با مونت‌کارلو برای مدل‌های غیرخطی بوده و برای تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های عملکرد توان نیز با استانداردهای رایج اندازه‌گیری/عدم قطعیت هم‌راستا است. در رابطه ۶، مقدار  $L(k)$  - مقدار  $k$ ام پس از مرتب‌سازی صعودی N نمونه مونت‌کارلو  $L_1, \dots, L_N$  (مثلاً مقادیر افت توان یا خطای توان) است و [·] عملگر گرد کردن به بالا به نزدیک‌ترین عدد صحیح را نشان می‌دهد [۲۸]. در این پژوهش، برای هر حسگر و در هر نقطه عملکرد  $U_0$ ، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با  $N_{MC} = 3000$  تکرار انجام شد و صدک ۹۵ از روی نمونه‌های حاصل به صورت کوانتایل تجربی محاسبه و به عنوان P95 گزارش شد.

## ۲-۱۰. اعتبارسنجی (Validation)

اعتبارسنجی مدل QS با مقایسه مستقیم پیش‌بینی‌ها و خروجی‌های میانگین‌گیری شده OpenFAST انجام شد. معیارهای ارزیابی شامل موارد زیر بود:

- سازگاری روند<sup>۱</sup> و محل بیشینه‌ها در نزدیکی ( $\gamma \approx 0$ ).

برای کمی‌سازی «سازگاری روند»، در نقاط اعتبارسنجی شاخص‌های زیر بین خروجی مدل QS و OpenFAST محاسبه و گزارش شد:

$$MAPE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i^{QS} - y_i^{OF}|}{y_i^{OF}} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{OF} - y_i^{QS})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i^{OF} - y_i^{OF})^2} \quad (۸)$$

همچنین اختلاف «محل بیشینه» با  $(|\gamma_{\max} - \gamma_{\max} \neq \Delta\gamma_{\max}|)$  و در صورت نیاز  $\Delta U_{\max}$  به عنوان معیار مکمل ارائه شد.

- تقارن پاسخ نسبت به علامت یاو (در صورت نبود نامتقارنی کنترلی/عددی).
  - میزان انحنا و شدت افت عملکرد با افزایش  $(\gamma)$ .
  - بازتولید رفتار نامتقارن نسبت به  $(\Delta\theta)$  به‌ویژه در نزدیکی شرایط استال ناحیه ۳.
- برای تفسیر نتایج یاو و نقش اندازه‌گیری، به پژوهش‌های اخیر درباره خطای بادسنج/بادنما روی ناسل در شرایط یاو نیز ارجاع داده شد [۲۷].

### ۳. نتایج و بحث

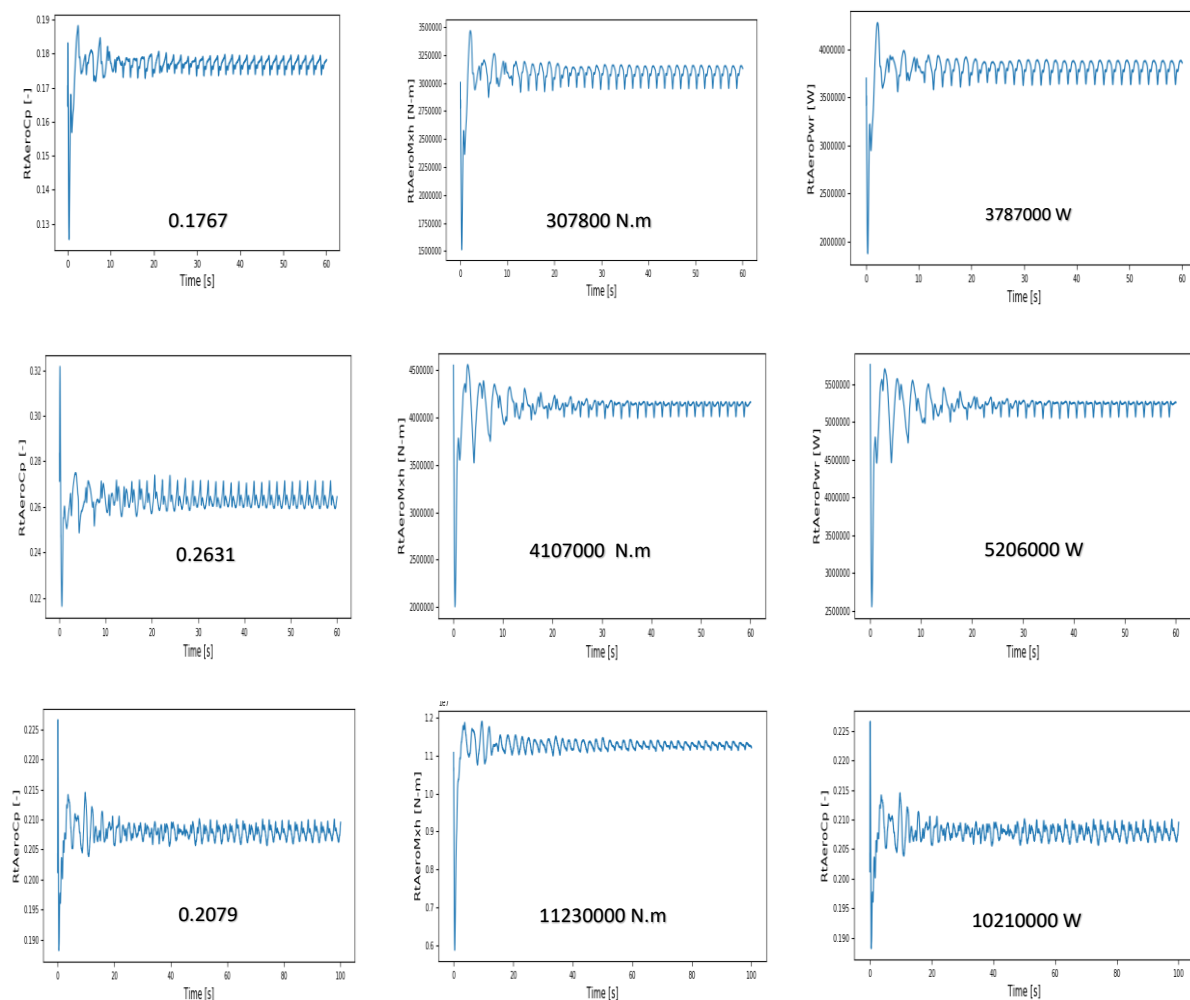
#### ۳-۱. عملکرد مبنا و نقطه کار<sup>۱</sup> نام برای سه توربین

در آغاز بخش نتایج، عملکرد مبنا برای هر سه توربین مرجع در حالت هم‌راستا با باد و بدون افست پیچ ارائه شد تا اطمینان حاصل شود که مدل‌های شبیه‌سازی در نقطه کار نامی، پاسخ پایدار و فیزیکی تولید کرده‌اند. به این منظور، برای هر توربین یک حالت مرجع با  $(\gamma = 0^\circ)$  و  $(\Delta\beta = 0^\circ)$  در سرعت/سرعت‌های باد متناظر با ناحیه ۳ نامی تعریف شد و پس از رسیدن پاسخ به حالت پایا، کمیت‌های آیرودینامیکی به صورت میانگین زمانی در پنجره پایا استخراج شدند. کمیت‌های گزارش شده شامل توان آیرودینامیکی میانگین  $(\bar{p}_{aero})$ ، گشتاور آیرودینامیکی میانگین  $(\bar{Q}_{aero})$  و ضریب توان مطلق  $(\bar{C}_p)$  بودند.

ارائه نتایج مبنا در نقطه نامی برای سه توربین با توان‌های ۳/۴، ۵ و ۱۰ مگاوات، امکان مقایسه مستقیم پاسخ‌ها در مقیاس‌های مختلف روتور و رژیم‌های کنترلی را فراهم کرد و به عنوان مرجعی برای تحلیل افت عملکرد تحت ناهماهنگی یاو و افست پیچ در بخش‌های بعدی به کار رفت. انتظار می‌رفت در این حالت مرجع، بیشینه کارایی آیرودینامیکی نسبت به سناریوهای ناهماهنگی مشاهده شود و روندهای بعدی به صورت افت یکنواخت توان/گشتاور/ضریب توان نسبت به همین مبنا تفسیر شوند. از شکل ۲ مشاهده می‌شود که توربین ۳/۴ مگاواتی توان آیرودینامیکی خروجی ۳/۷ مگاوات، توربین ۵ مگاواتی توان خروجی آیرودینامیکی ۵/۲ مگاوات و توربین ۱۰ مگاواتی توان خروجی ۱۰/۲ مگاوات خروجی آیرودینامیکی می‌دهد که اگر این خروجی در بازدهی مکانیکی و الکتریکی ضرب شود به ما خروجی نهایی گزارش شده مرجع را می‌دهد.

جدول ۴. نتایج نقطه مبنا برای سرعت ۱۴ متر بر ثانیه در  $\gamma = 0^\circ$  و  $\Delta\beta = 0^\circ$

توربین ۳/۴ مگاوات	توربین ۵ مگاوات	توربین ۱۰ مگاوات	
0.1767	0.2631	0.2079	ضریب توان
307,800	4,107,000	11,230,000	گشتاور (نیوتن متر)
3,787,000	5,206,000	10,210,000	توان خروجی آیرودینامیکی (وات)



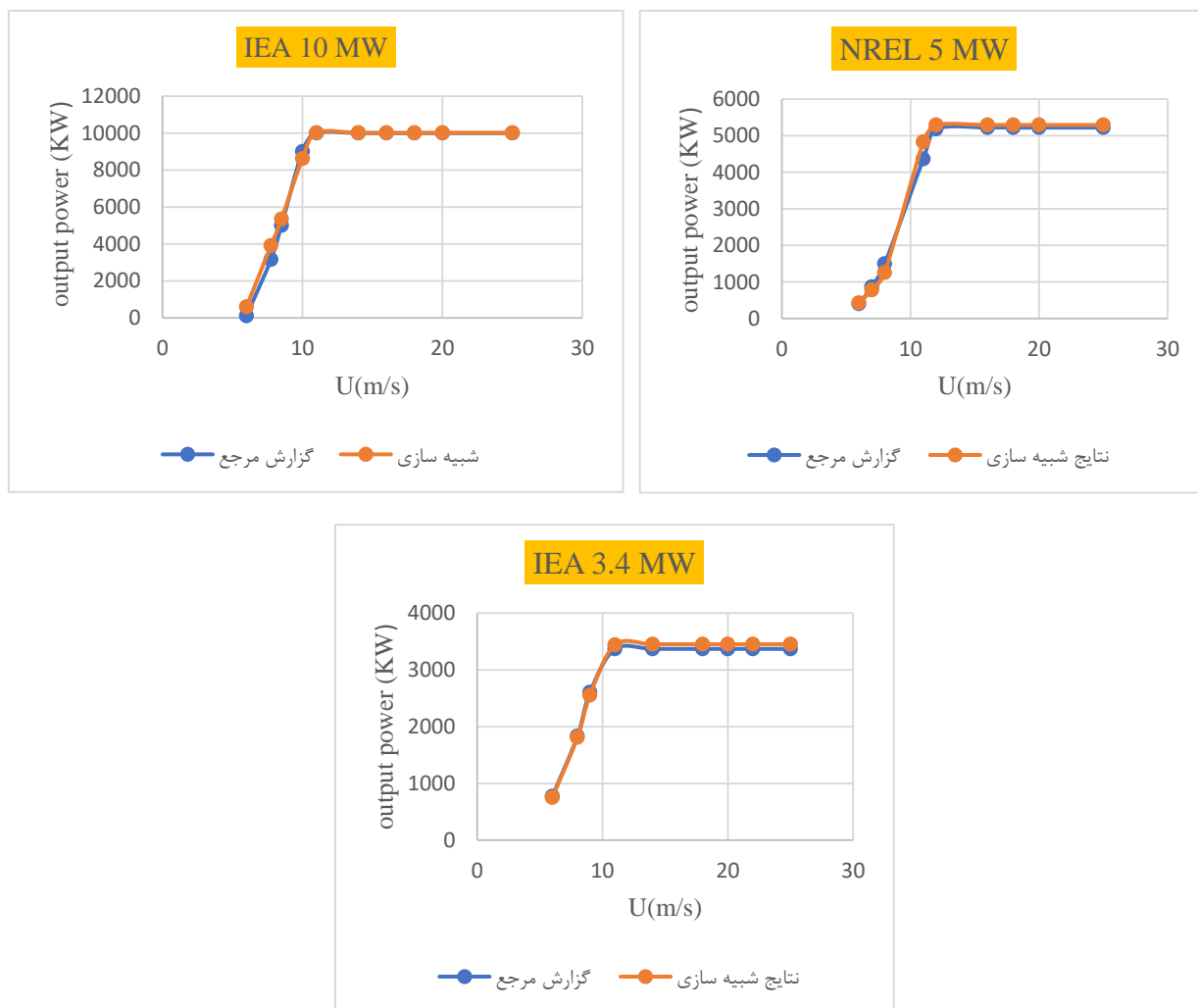
شکل ۲. تغییرات ضریب توان، گشتاور و توان برای هر سه توربین از بالا سمت چپ به ترتیب ضریب توان، گشتاور و توان. ردیف اول ۳/۴ مگاوات، ردیف دوم ۵ مگاوات و ردیف سوم ۱۰ مگاوات. برای هر ضریب میانگین آن در نمودار گذاشته شده است. تمامی توربین‌ها در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شده‌اند.

### ۳-۲. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در دو ناحیه عملکردی ۲ و ۳

اعتبارسنجی نتایج پیش از تحلیل DOE و برازش مدل‌های جانشین انجام شد تا اطمینان حاصل شود پاسخ‌های آبرودینامیکی استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌ها با رفتار مورد انتظار توربین‌های مرجع هم‌خوان است. با توجه به تفاوت بنیادی منطق آبرودینامیکی-کنترلی در دو ناحیه عملکردی، اعتبارسنجی به صورت تفکیک‌شده برای ناحیه ۲ (بار جزئی) و ناحیه ۳ (بار کامل/نامی) انجام شد. در هر دو ناحیه، حالت مینا با  $\gamma = 0^\circ$  و  $\Delta\beta = 0^\circ$  به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته شد و کمیت‌های میانگین  $\bar{P}_{aero}$ ،  $\bar{Q}_{aero}$  از خروجی‌های پایا استخراج شد؛ سپس روند تغییرات این کمیت‌ها برحسب سرعت باد برای هر سه توربین در شکل ۳ بررسی شد.

در ناحیه ۲ انتظار می‌رود کنترل عمدتاً بر بیشینه‌سازی برداشت توان متمرکز باشد؛ از این‌رو معیار اصلی سازگاری، هم‌خوانی شکل کلی منحنی‌های  $\bar{P}_{aero}(U)$  و  $\bar{Q}_{aero}(U)$  در حالت هم‌راستا است. در این ناحیه توان هنوز تحت محدودسازی نامی قرار نگرفته و بنابراین تغییرات  $\bar{P}_{aero}$  و  $\bar{Q}_{aero}$  عمدتاً از رفتار آبرودینامیکی ناشی می‌شود. بر این اساس، تطابق روندها و موقعیت نقاط کلیدی (به‌ویژه حوالی گذار به ناحیه ۳) در شکل‌های ناحیه ۲ به عنوان مبنای اعتبارسنجی استفاده شد؛ برای توربین ۵ مگاواتی این ارزیابی با اتکا به داده‌های مرجع منتشرشده و مطالعات عددی موجود انجام شد و برای توربین‌های ۳،۴ و ۱۰ مگاواتی نیز هم‌خوانی کلی با منحنی‌های مرجع ارائه‌شده در مستندات توربین‌های مرجع معیار قرار گرفت [۱۹ و ۲۰].

در ناحیه ۳، رفتار توربین به طور معنادار تحت اثر محدودسازی توان و کنترل پیچ است؛ بنابراین تکیه بر مقایسه‌های ساده یا نرمال‌سازی نسبت به حالت  $\gamma = 0^\circ$  می‌تواند نقش کنترل را پنهان کند. در این مطالعه  $\bar{C}_p$  به صورت مطلق و مطابق تعریف استاندارد گزارش شد تا اثر کنترل به‌ویژه حوالی توان نامی در شکل‌های ناحیه ۳ حفظ شود. اعتبارسنجی در این ناحیه بر سه محور متمرکز شد: (۱) پایداری سطح توان و گشتاور در بازه بالانامی مطابق رفتار نامی، (۲) سازگاری روند  $\bar{C}_p$  با افزایش  $U$  در حضور محدودسازی توان و تغییرات پیچ، و (۳) هم‌خوانی نسبی نقاط کلیدی (به‌خصوص حوالی سرعت/توان نامی) با داده‌های مرجع یا نتایج مطالعات عددی منتشرشده برای هر توربین مرجع.

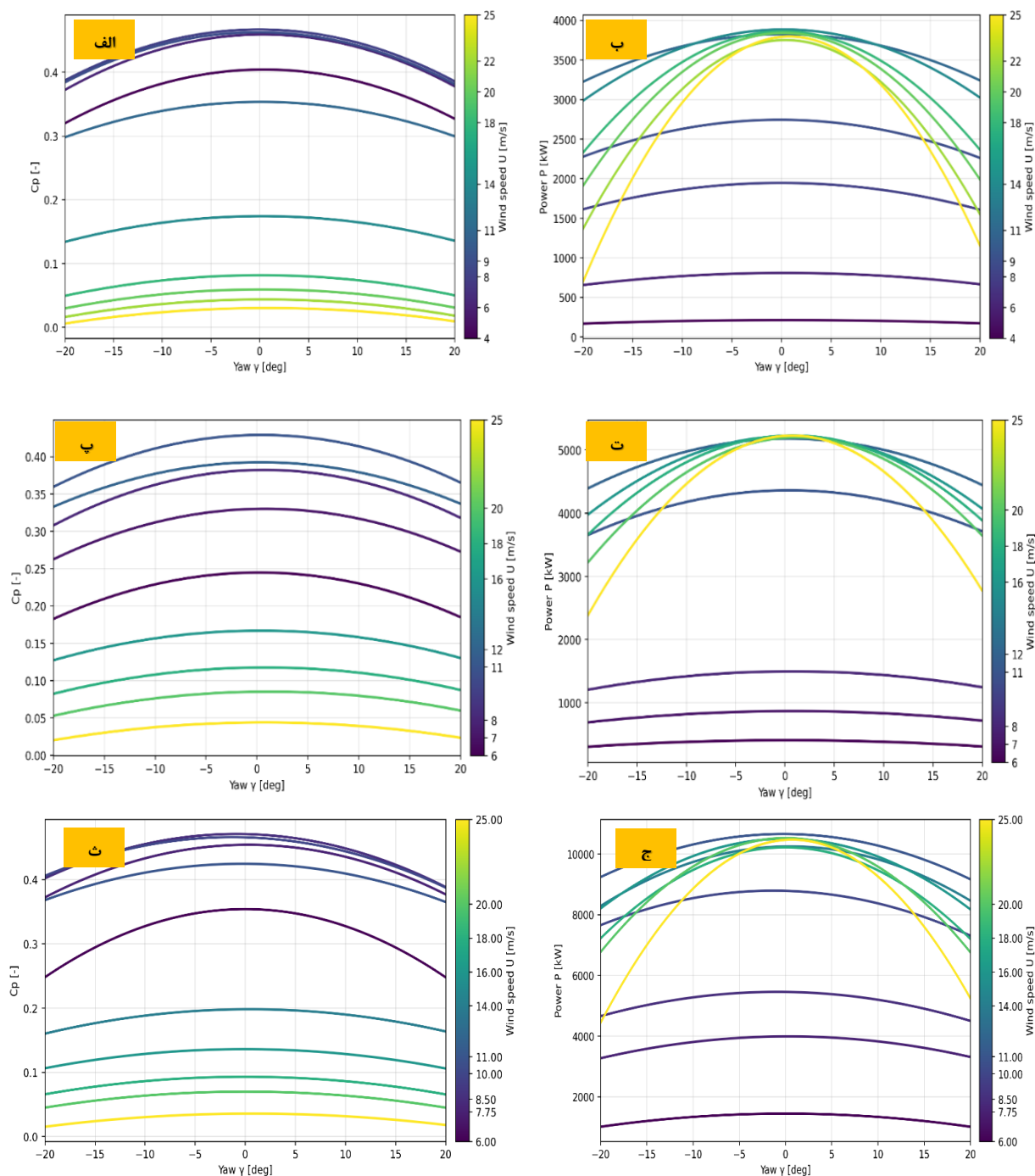


شکل ۳. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی BEM در OpenFAST با نتایج گزارش‌های توربین‌های مرجع

### ۳-۳. اثر ناهماهنگی یاو ( $\gamma$ ) در ( $\Delta\beta = 0^\circ$ )

در این بخش اثر ناهماهنگی یاو  $\gamma$  در شرایطی بررسی شد که افست پیچ ثابت و برابر  $\Delta\beta = 0^\circ$  است تا تغییرات مشاهده‌شده فقط به زاویه یاو نسبت داده شود. نتایج در قالب شکل ۴ (الف تا ج) برای هر سه توربین مرجع ارائه شده است و کمیت‌های میانگین  $\bar{C}_p$  و  $\bar{P}_{aero}$  برحسب  $\gamma$  و برای چند سرعت باد مختلف نمایش داده می‌شوند. مطابق این نمودارها، حالت هم‌راستا ( $\gamma = 0^\circ$ ) به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته شده و انتظار می‌رود با افزایش  $\gamma$ ، به دلیل کاهش مؤلفه مؤثر سرعت باد عمود بر صفحه روتور و تغییر میدان القایی در جریان مایل، بازده آیرودینامیکی کاهش یابد؛ این رفتار در روند کلی نتایج نیز مشاهده می‌شود.

برای توربین ۳/۴ مگاوات، تغییرات  $\bar{C}_p$  نسبت به یاو در زیر شکل (الف) نمایش داده شده است که بیشینه مقدار در حوالی  $\gamma = 0^\circ$  رخ می‌دهد و با دور شدن از این حالت، افت تدریجی  $\bar{C}_p$  دیده می‌شود. پیامد مستقیم این افت در شکل ۴ (ب) به صورت کاهش  $\bar{P}_{aero}$  قابل مشاهده است. برای توربین ۵ مگاوات، همین الگو به ترتیب در شکل ۴ (پ) و (ت) دیده می‌شود؛ یعنی افت  $\bar{C}_p$  با افزایش  $\gamma$  با کاهش متناظر توان همراه است. برای توربین ۱۰ مگاوات نیز شکل ۴ (ث) و (ج) همین روند را نشان می‌دهند و بیانگر آن است که حساسیت کلی عملکرد به ناهماهنگی یاو در مقیاس‌های مختلف توربین وجود دارد و صرفاً شدت آن می‌تواند تابع سرعت باد و ناحیه عملکردی باشد.



شکل ۴. تغییرات ضریب توان و توان خروجی بر حسب زاویه یاو برای سرعت‌های مختلف. به ترتیب الف و ب توربین ۳/۴ مگاواتی، پ و ت توربین ۵ مگاواتی و ج و د توربین ۱۰ مگاواتی. ستون سمت چپ ضریب توان و ستون سمت راست توان خروجی

در ناحیه ۲ (بار جزئی) که هدف کنترل عمدتاً بیشینه‌سازی برداشت توان است، افت  $\bar{P}_{aero}$  عمدتاً از کاهش  $\bar{C}_p$  ناشی می‌شود؛ بنابراین هم‌خوانی روند  $\bar{C}_p(\gamma)$  با روند  $\bar{P}_{aero}(\gamma)$  در شکل ۴ (الف-ج) یک معیار کلیدی برای تفسیر اثر یاو در این ناحیه محسوب می‌شود. در مقابل، در ناحیه ۳ (بار کامل/نامی) نقش محدودسازی توان و کنترل پیچ پررنگ‌تر است و ممکن است تغییرات توان نسبت به ناحیه ۲ به صورت مستقیم و یکنواخت تفسیرپذیر نباشد. به همین دلیل در این مطالعه، برای جلوگیری از برداشت نادرست ناشی از نرمال‌سازی یا ساده‌سازی بیش از حد، تغییرات  $\bar{C}_p$  به صورت مطلق و هم‌زمان با  $\bar{P}_{aero}$  بررسی شد تا اثر واقعی ناهماهنگی یاو در کنار رفتار کنترلی سیستم در حوالی ناحیه نامی حفظ شود.

در مجموع، شکل ۴ (الف) تا (ج) نشان می‌دهند با افزایش  $\gamma$  افت  $\bar{C}_p$  به عنوان سازوکار اصلی کاهش عملکرد ظاهر می‌شود و این افت به طور مستقیم در کاهش توان و گشتاور آیرودینامیکی منعکس می‌شود. مشاهده می‌شود که ۲۰ درجه انحراف زاویه یاو در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه در هر سه توربین می‌تواند تا بیش از ۵۰ درصد باعث افت توان شود. همچنین در ناحیه ۳ حساسیت توربین به انحراف زاویه یاو بسیار بیشتر است. برای مثال، در توربین ۵ مگاواتی ۵ درجه زاویه یاو منجر به ۸ درصد افت توان می‌شود که معادل ۴۰۰ کیلووات است و ۷ درجه زاویه انحراف در توربین ۱۰ مگاواتی منجر به افت توان به مقدار ۷۰۰ کیلووات می‌شود.

### ۳-۴. اثر افست پیچ ( $\Delta\beta$ ) در ( $\gamma = 0^\circ$ )

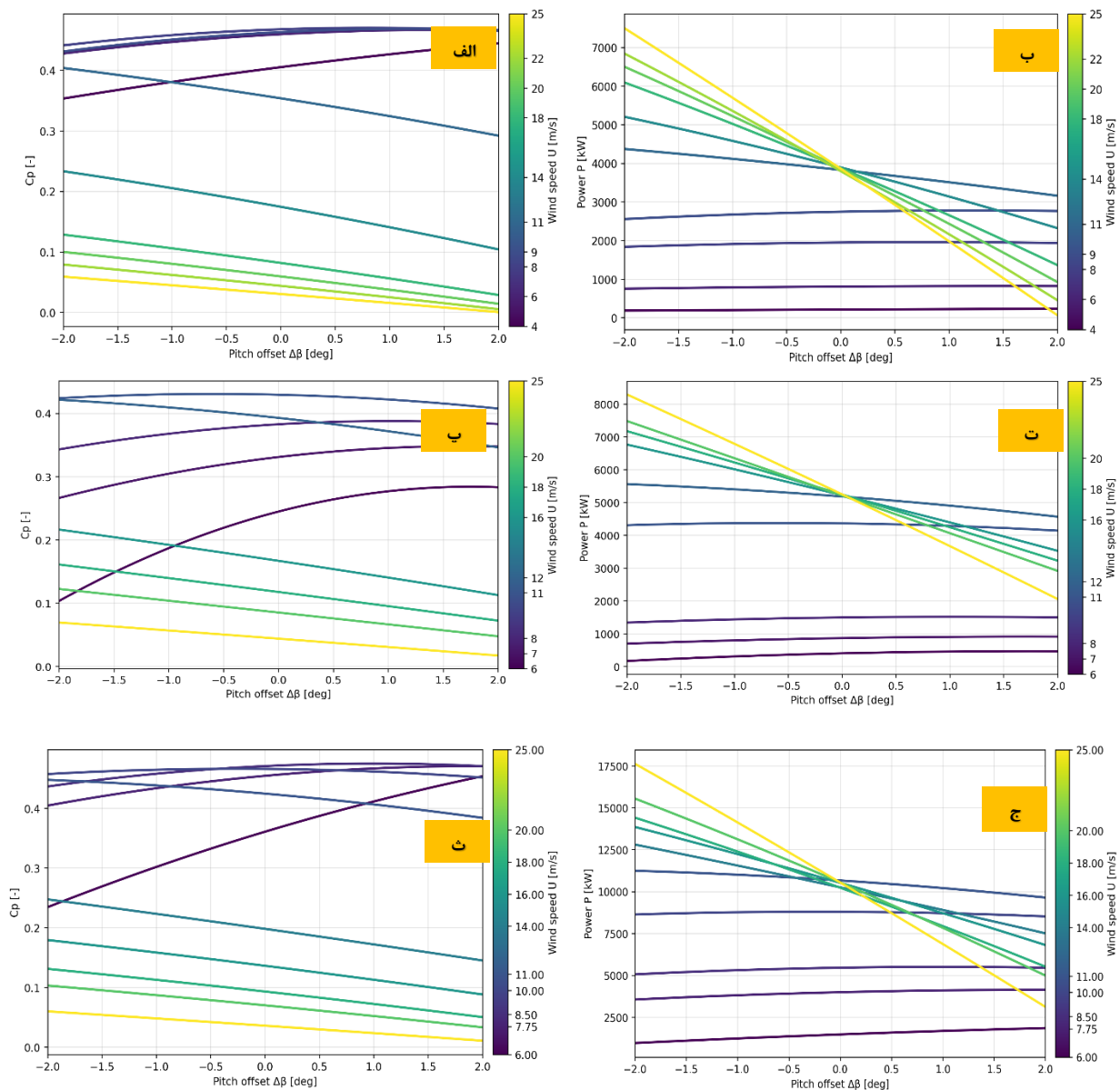
برای ارزیابی حساسیت عملکرد نسبت به افست پیچ، زاویه یاو در  $\gamma = 0^\circ$  ثابت نگه داشته شد تا اثر  $\Delta\beta$  به صورت مستقل بررسی شود. نتایج شکل ۵ (الف تا ج) تغییرات  $\bar{C}_p$  و  $\bar{P}_{aero}$  را برحسب  $\Delta\beta$  و برای سرعت‌های باد مختلف (در هر دو ناحیه عملکردی ۲ و ۳) نشان می‌دهند. در این شکل، زیرشکل‌های (الف)، (پ) و (ث) به ترتیب مربوط به تغییرات  $\bar{C}_p$  برای توربین‌های ۳، ۴ و ۵ مگاوات هستند و شکل ۵ (ب)، (ت) و (ج) تغییرات  $\bar{P}_{aero}$  را برای همان توربین‌ها نمایش می‌دهند.

بر اساس زیرشکل‌ها، پاسخ نسبت به افست پیچ در بسیاری از نقاط کاری نامتقارن است؛ به این معنا که اثر  $\Delta\beta < 0$  الزاماً هم‌ارز و قرینه  $\Delta\beta > 0$  نیست. از دیدگاه فیزیکی، افست‌های منفی (کاهش زاویه پیچ نسبت به مقدار مرجع کنترل‌گر) می‌توانند زاویه حمله مؤثر را افزایش داده و در برخی شرایط کاری باعث نزدیک شدن به نواحی حساس آیرودینامیکی (مانند ناحیه‌های مستعد جدایش/واماندگی) شوند؛ در نتیجه افت  $\bar{C}_p$  و به تبع آن افت  $\bar{P}_{aero}$  می‌تواند تندتر و غیرخطی‌تر ظاهر شود. در مقابل، افست‌های مثبت معمولاً با کاهش زاویه حمله و کاهش بار آیرودینامیکی همراه هستند و بنابراین کاهش عملکرد غالباً ملایم‌تر و یکنواخت‌تر مشاهده می‌شود. این نامتقارنی  $\bar{C}_p$  در شکل ۵ (الف، پ، ث) و بازتاب مستقیم توان آن در شکل ۵ (ب، ت، ج) قابل مشاهده است.

در ناحیه ۲ (بار جزئی)، توربین معمولاً نزدیک نقطه بهینه آیرودینامیکی کار می‌کند؛ بنابراین افست پیچ  $\Delta\beta$  حتی اگر کوچک باشد می‌تواند توربین را از نقطه بهینه دور کند و باعث کاهش  $C_p$  و در نتیجه کاهش  $P_{aero}$  شود. بر اساس نمونه عددی از توربین 5MW در  $U = 8 \text{ m/s}$  (ناحیه ۲)، اگر حالت مرجع را  $\Delta\beta = 0^\circ$  بگیریم، تغییر  $\Delta\beta = \pm 1.5^\circ$  باعث افت حدود ۲/۱ تا ۲/۴ درصد در  $C_p$  و حدود ۲ تا ۲/۴ درصد در  $P_{aero}$  می‌شود؛ همچنین در  $U = 8 \text{ m/s}$  و  $\Delta\beta = +3^\circ$  افت  $P_{aero}$  حدود ۹/۱ درصد و در  $\Delta\beta = -3^\circ$  افت حدود ۷/۲ درصد مشاهده شده است. این هم‌خوانی هم‌زمان کاهش  $C_p$  و  $P_{aero}$  نشان می‌دهد در ناحیه ۲، افت توان عمدتاً ریشه آیرودینامیکی دارد.

در ناحیه ۳ (بار کامل/نامی)، نقش پیچ پررنگ‌تر و حساسیت‌ها معمولاً نامتقارن‌تر می‌شوند؛ یعنی علامت افست (کم‌پیچ یا پرپیچ شدن) می‌تواند اثر کاملاً متفاوتی روی  $C_p$  و  $P_{aero}$  بگذارد. نمونه عددی برای توربین 5MW در  $U = 18 \text{ m/s}$  (ناحیه ۳)،  $\gamma = 0^\circ$  با در نظر گرفتن پیچ مرجع نزدیک به مقدار پایه در آن سرعت، یعنی حدود  $\beta \approx 14.32^\circ$  نشان می‌دهد اگر ۳ درجه پیچ کمتر اعمال شود ( $\Delta\beta = -3^\circ$ )، توان آیرودینامیکی نسبت به مرجع حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ اما اگر ۳ درجه پیچ بیشتر اعمال شود ( $\Delta\beta = +3^\circ$ )، توان حدود ۵/۸ درصد کاهش می‌یابد. این بزرگی و نامتقارنی دقیقاً توضیح می‌دهد چرا در ناحیه ۳ نمی‌توان فقط با یک روند خطی/قرینه درباره  $\Delta\beta$  نتیجه‌گیری کرد و باید  $C_p$  و  $P_{aero}$  را هم‌زمان دید. مشابه توربین ۳/۴

مگاواتی ۳ درجه پیچ کمتر نسبت به مرجع باعث افزایش ۲۶ درصد توان و ۳ درجه پیچ بیشتر باعث کاهش ۴/۵ درصد توان می‌شود. در توربین ۱۰ مگاواتی نیز به ترتیب باعث ۱۱/۵ درصد افزایش و ۳/۶ درصد کاهش می‌شود.



شکل ۵. تغییرات ضریب توان و توان خروجی بر حسب ناهماهنگی زاویه گام برای سرعت‌های مختلف. به ترتیب الف و ب توربین ۳/۴ مگاواتی، پ و ت توربین ۱۰ مگاواتی و ج و ث توربین ۱۷ مگاواتی. ستون چپ ضریب توان و ستون سمت راست توان خروجی

در مجموع، شکل ۵ نشان می‌دهد در حالی که ناهماهنگی یاو عمدتاً آفتی نسبتاً یکنواخت و نزدیک به متقارن ایجاد می‌کند، افست پیچ می‌تواند پاسخ نامتقارن‌تر و در برخی نقاط کاری حساس‌تر تولید کند. این ویژگی دقیقاً همان چیزی است که ضرورت استفاده از مدل‌های درجه ۲ (RSM/QS) را برای بازتولید انحنا و نامتقارنی پاسخ‌ها در بخش‌های بعدی تحلیل DOE و برازش مدل جانشین توجیه می‌کند.

### ۳-۵. اعتبارسنجی مدل‌های RSM/QS در برابر نتایج OpenFAST

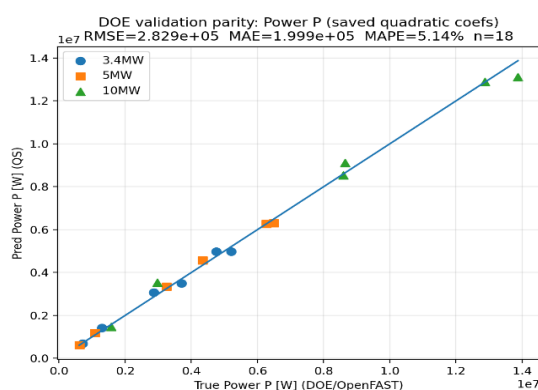
اعتبارسنجی مدل‌های شبه‌ایستا/سطح پاسخ (RSM/QS) با مقایسه مستقیم پیش‌بینی‌های مدل جانشین و مقادیر مرجع

استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌های OpenFAST انجام شد. این ارزیابی به صورت تفکیک‌شده برای هر سه توربین و برای هر دو ناحیه عملکردی ۲ و ۳ صورت گرفت و برای سه خروجی اصلی شامل  $\bar{C}_p$ ،  $\bar{P}_{aero}$  و  $\bar{Q}_{aero}$  گزارش شد. برای نمایش بصری هم‌خوانی، از نمودار هم‌ارزی<sup>۱</sup> استفاده شد (شکل ۶) تا میزان نزدیکی نقاط به خط  $y = x$  و همچنین توان مدل در بازتولید روندها و رفتارهای غیرخطی (از جمله انحنا و در صورت وجود، نامتقارنی) مشخص شود (جدول ۴).

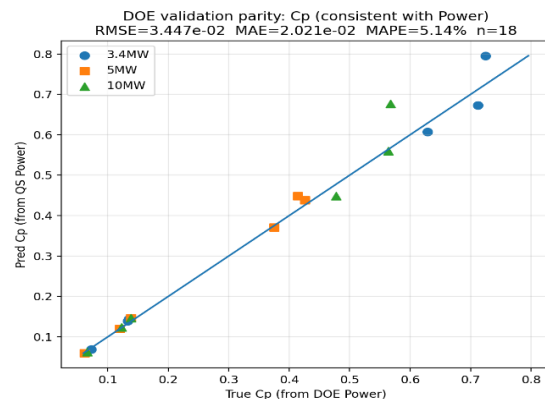
جدول ۵. نقاط انتخاب‌شده برای اعتبارسنجی مدل

Case 1	U(m/s)	6	Case 4	U(m/s)	16
	Yaw	15		Yaw	4
	Pitch	-0.5		Pitch	1
Case 2	U(m/s)	7	Case 5	U(m/s)	19
	Yaw	-2		Yaw	-15
	Pitch	2		Pitch	-2
Case 3	U(m/s)	10	Case 6	U(m/s)	24
	Yaw	2		Yaw	-4
	Pitch	0.5		Pitch	-1

ارزیابی کمی دقت نیز با معیارهای متداول (مانند MAE/MAPE) و بر مبنای نقاط اعتبارسنجی انجام شد. انتظار می‌رود در ناحیه ۲ به دلیل غالب بودن رفتار آیرودینامیکی، هم‌خوانی بالاتری حاصل شود، در حالی که در ناحیه ۳ به علت حضور محدودسازی توان و نقش کنترل پیچ، بخشی از تغییرات خروجی‌ها تابع رژیم بهره‌برداری بوده و اختلاف‌ها می‌تواند در حوالی شرایط نامی یا لبه مرز نواحی بیشتر ظاهر شود. بر همین اساس، نتایج اعتبارسنجی به صورت مطلق و بدون نرمال‌سازی نسبت به  $\gamma = 0^\circ$  ارائه شد تا اثرات کنترلی واقعی در ناحیه ۳ حفظ شده و از برداشته‌های نادرست ناشی از نرمال‌سازی جلوگیری شود. در نهایت، میانگین خطای مدل RSM/QS برابر ۵/۱۴ درصد به دست آمد. هرچند در برخی مطالعات مبتنی بر یادگیری ماشین، مقادیر خطا در همین مرتبه یا کمتر گزارش شده است [۲۹]، اما مزیت اصلی روش RSM/QS سادگی روابط، تفسیرپذیری و سرعت محاسباتی بالا است که آن را برای تحلیل‌های سریع و مطالعات پارامتری مناسب می‌سازد.



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمودارهای هم‌ارزی برای الف: ضریب توان و ب: توان

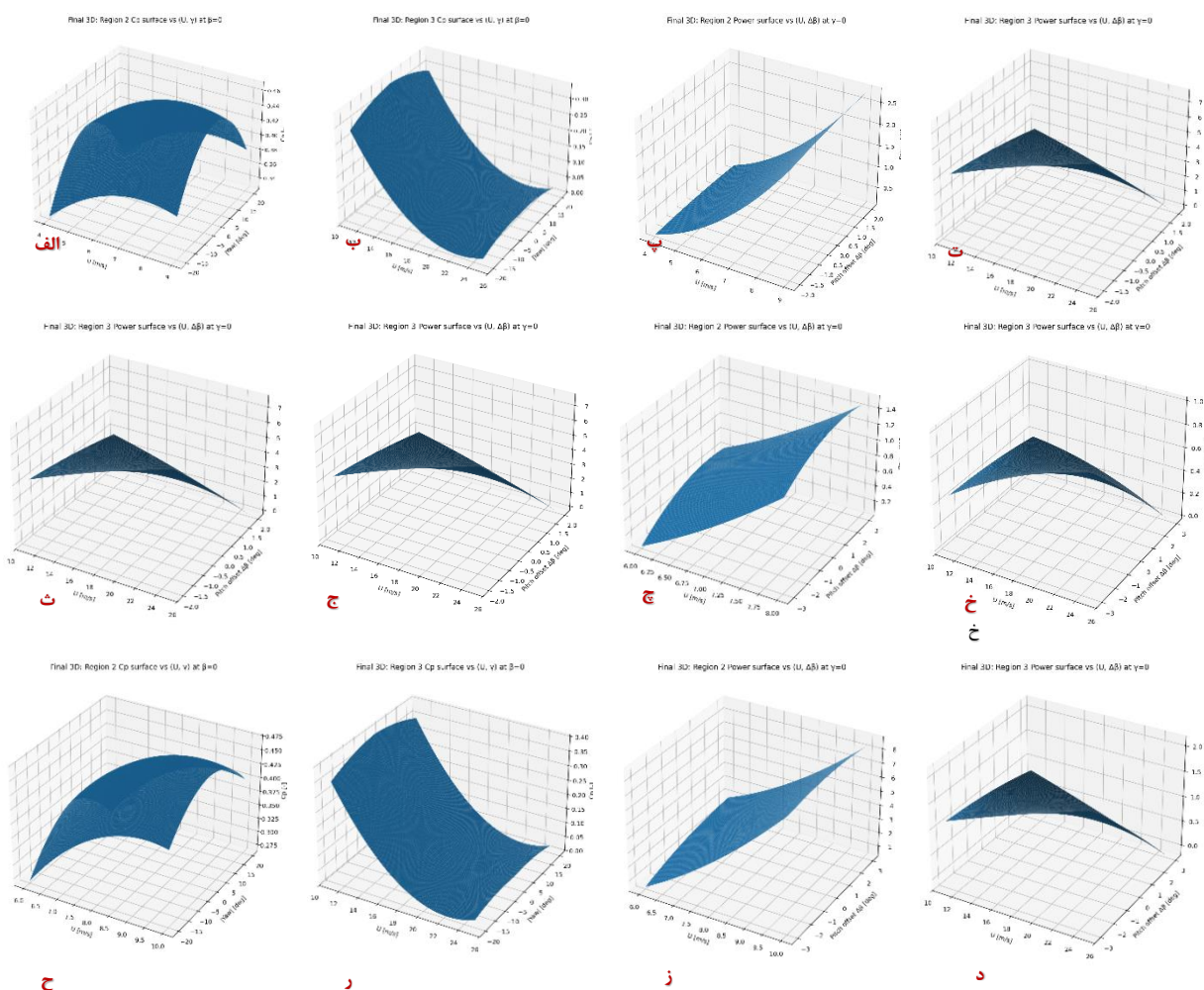
### ۳-۶. سطوح سه‌بعدی پاسخ نهایی

در این بخش، سطوح سه‌بعدی پاسخ بر پایه مدل‌های جانشین RSM/QS ارائه شده‌اند تا تغییرات پیوسته عملکرد توربین‌ها در فضای پارامترها به صورت یکپارچه و قابل مشاهده باشد. از آنجا که هدف این قسمت نمایش «نقشه‌های عملکرد» در کل دامنه

نقاط کاری است، فقط دو خروجی اصلی ضریب توان  $\bar{C}_P$  و توان آیرودینامیکی  $\bar{P}_{aero}$  نمایش داده شده‌اند و نتایج برای هر سه توربین و به صورت تفکیک شده در ناحیه ۲ و ناحیه ۳ ارائه شده است (شکل ۷).

سطوح ناحیه ۲ (بار جزئی) در شکل ۷ (الف تا ج) و سطوح ناحیه ۳ (بار کامل/نامی) در زیرشکل‌های (چ تا ر) گزارش شده‌اند. در ناحیه ۲، شکل ۷ (پ، ب، ر) به ترتیب سطح  $\bar{C}_P$  برای توربین‌های ۳، ۴، ۵ و ۱۰ مگاوات را نشان می‌دهند و زیرشکل‌های (ج، ث، ت) سطح  $\bar{P}_{aero}$  برای همان توربین‌ها را ارائه می‌کنند. در ناحیه ۳ نیز شکل ۷ (خ، ح، چ) ترتیب سطح  $\bar{C}_P$  و شکل ۷ (ز، د، ذ) سطح  $\bar{P}_{aero}$  را برای سه توربین نمایش می‌دهند.

از منظر تفسیر فیزیکی، سطوح ناحیه ۲ معمولاً روندی یکنواخت‌تر دارند و تغییرات  $\bar{P}_{aero}$  در این ناحیه عمدتاً بازتاب مستقیم تغییرات  $\bar{C}_P$  است؛ بنابراین همخوانی شکل سطح توان با سطح  $\bar{C}_P$  در شکل ۷ متناظر (برای هر توربین) یک معیار کیفی مهم از سازگاری مدل جانشین با رفتار آیرودینامیکی به شمار می‌آید. در مقابل، در ناحیه ۳ به دلیل حضور محدودسازی توان و نقش پررنگ کنترل پیچ در حوالی شرایط نامی، شکل سطوح می‌تواند نسبت به ناحیه ۲ متفاوت باشد و حساسیت به ورودی‌ها در برخی نواحی از فضای پارامترها تغییر کند؛ به همین علت، ارائه سطوح سه‌بعدی به تفکیک ناحیه ۲ و ۳ کمک می‌کند تفاوت رفتار «زیرنامی» و «بالانامی/نامی» در هر سه توربین به صورت روشن و قابل مقایسه دیده شود.



شکل ۷. سطوح پاسخ نهایی به ترتیب از چپ اول ضریب توان برحسب سرعت و زاویه یاو برای ناحیه ۲ و چپ دوم ناحیه ۳. چپ سوم توان برحسب زاویه گام و سرعت ناحیه ۳ و چپ چهارم ناحیه ۲. ردیف اول توربین ۳/۴ مگاوات، ردیف دوم توربین ۵ مگاوات و ردیف سوم توربین ۱۰ مگاوات

## ۳-۷. معادلات درجه ۲ نهایی و پارامترهای آنها

در گام نهایی، روابط بسته و کم‌هزینه‌ای ارائه شد که بتوانند پاسخ شبه‌ایستای توربین را نسبت به ناهماهنگی یاو و افست پیچ در دامنه‌های مطالعه شده بازتولید کنند. برای هر توربین و به تفکیک ناحیه ۲ و ناحیه ۳، معادلات درجه ۲ برای کمیت‌های (CP)، (Paero) و (Qaero) گزارش شد تا امکان استفاده مستقیم در تحلیل حساسیت، کالیبراسیون سنسوری و کاربردهای کنترلی/بهینه‌سازی فراهم شود. دامنه اعتبار هر معادله به صورت صریح محدود به فضای DOE تعریف شده در این مطالعه بود:

$$\gamma \in [-20^\circ, 20^\circ], \quad \Delta\beta \in [-3, 3^\circ], \quad U \in [6, 25]$$

فرم کلی مدل درجه ۲ برای هر خروجی (y) مطابق ساختار استاندارد روش سطح پاسخ در سه متغیر ورودی (U)، (γ) و (Δβ) به صورت رابطه ۷ ارائه شد:

$$\hat{y}(U, \gamma, \Delta\beta) = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 \gamma + \beta_3 \Delta\beta + \beta_{11} U^2 + \beta_{22} \gamma^2 + \beta_{33} (\Delta\beta)^2 + \beta_{12} U \gamma + \beta_{13} U \Delta\beta + \beta_{23} \gamma \Delta\beta \quad (7)$$

که در آن (ŷ) پیش‌بینی مدل جانشین و ضرایب (β) از برازش به داده‌های DOE به دست آمده‌اند. در صورت استفاده از برازش‌های برشی (برای سرعت‌های گسسته)، فرم‌های یک‌بعدی درجه ۲ نیز برای هر برش سرعت ارائه شد تا کاربرد عملی در نگاشت‌های شبه‌ایستا تسهیل شود (جدول ۵). برای هر توربین و هر ناحیه عملکردی به صورت جداگانه در جدول ضرایب گزارش شده‌اند. به این ترتیب با قرار دادن مقادیر U، γ و Δβ در رابطه فوق، مقدار  $\bar{C}_P$  یا  $\bar{P}_{aero}$  در همان ناحیه عملکردی محاسبه می‌شود.

جدول ۶. تعریف ضرایب مدل درجه ۲ (QS/RSM)

نماد ضریب	ترم متناظر در مدل	تعریف متغیر / واحد
(β <sub>0</sub> )	(1)	جمله ثابت
(β <sub>1</sub> )	(U)	سرعت باد [m/s]
(β <sub>2</sub> )	(yaw fit)	یاو مؤثر (yaw)
(β <sub>3</sub> )	(beta Offset deg) یا (Δβ)	افست پیچ (deg) (Δβ)
(β <sub>11</sub> )	(U <sup>2</sup> )	جمله درجه ۲ سرعت باد ([m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ])
(β <sub>12</sub> )	(yaw fit <sup>2</sup> )	جمله درجه ۲ یاو ([deg <sup>2</sup> ])
(β <sub>13</sub> )	((Δβ) <sup>2</sup> )	جمله درجه ۲ افست پیچ ([deg <sup>2</sup> ])
(β <sub>22</sub> )	(U · yaw fit)	اثر متقابل سرعت باد و یاو ([m/s · deg])
(β <sub>23</sub> )	(yaw fit · Δβ)	اثر متقابل یاو و افست پیچ ([deg <sup>2</sup> ])
(β <sub>33</sub> )	(U · Δβ)	اثر متقابل سرعت باد و افست پیچ ([m/s · deg])

در نهایت، برای استفاده عملی از مدل، ابتدا ناحیه عملکردی بر اساس U تعیین شده (ناحیه ۲ برای زیرنامی و ناحیه ۳ برای بالانامی/نامی برای افزایش دقت توربین ناحیه ۳ در دو ریز بخش محاسبه می‌شود تا اثرات نزدیک به مرز ۲ ناحیه بهتر تقریب زده شود) و سپس ضرایب متناظر با همان توربین و همان ناحیه در معادله جای‌گذاری می‌شود.

در این پژوهش، مدل جانشین درجه ۲ (QS/RSM) به صورت چندجمله‌ای مرتبه دوم برحسب U، yaw fit و افست پیچ Δβ توسعه داده شد تا علاوه بر اثرات خطی، انحناها و برهم‌کنش‌های دوه‌دو نیز بازتولید شوند (جدول ۶). برای افزایش دقت در ناحیه ۳ (بالای نامی)، این ناحیه به دو زیرناحیه ۱-۳ و ۲-۳ تفکیک شد و برای هر زیرناحیه ضرایب مستقل برازش شد؛ سپس در مرحله پیش‌بینی، بسته به بازه سرعت باد، از ضرایب زیرناحیه متناظر (با هموارسازی در مرزها برای حذف گسست) استفاده می‌شود. خروجی مستقیم QS در این کار گشتاور آیرودینامیکی Qaero است؛ سپس توان آیرودینامیکی به کمک رابطه ۲ (معادله توان) محاسبه می‌شود و در ادامه ضریب توان نیز از رابطه استاندارد (۳) (معادله Cp) به دست می‌آید. بنابراین، با یک مدل تحلیلی و کم‌هزینه، هر سه خروجی Qaero، Paero و Cp به صورت سازگار و قابل تفسیر تولید می‌شوند و همین موضوع پایه انجام تحلیل حساسیت و ارزیابی اثر خطای سنسورها در بخش بعدی است.

جدول ۷. ضرایب معادله درجه ۲ برای گشتاور در دو ناحیه برای سه توربین

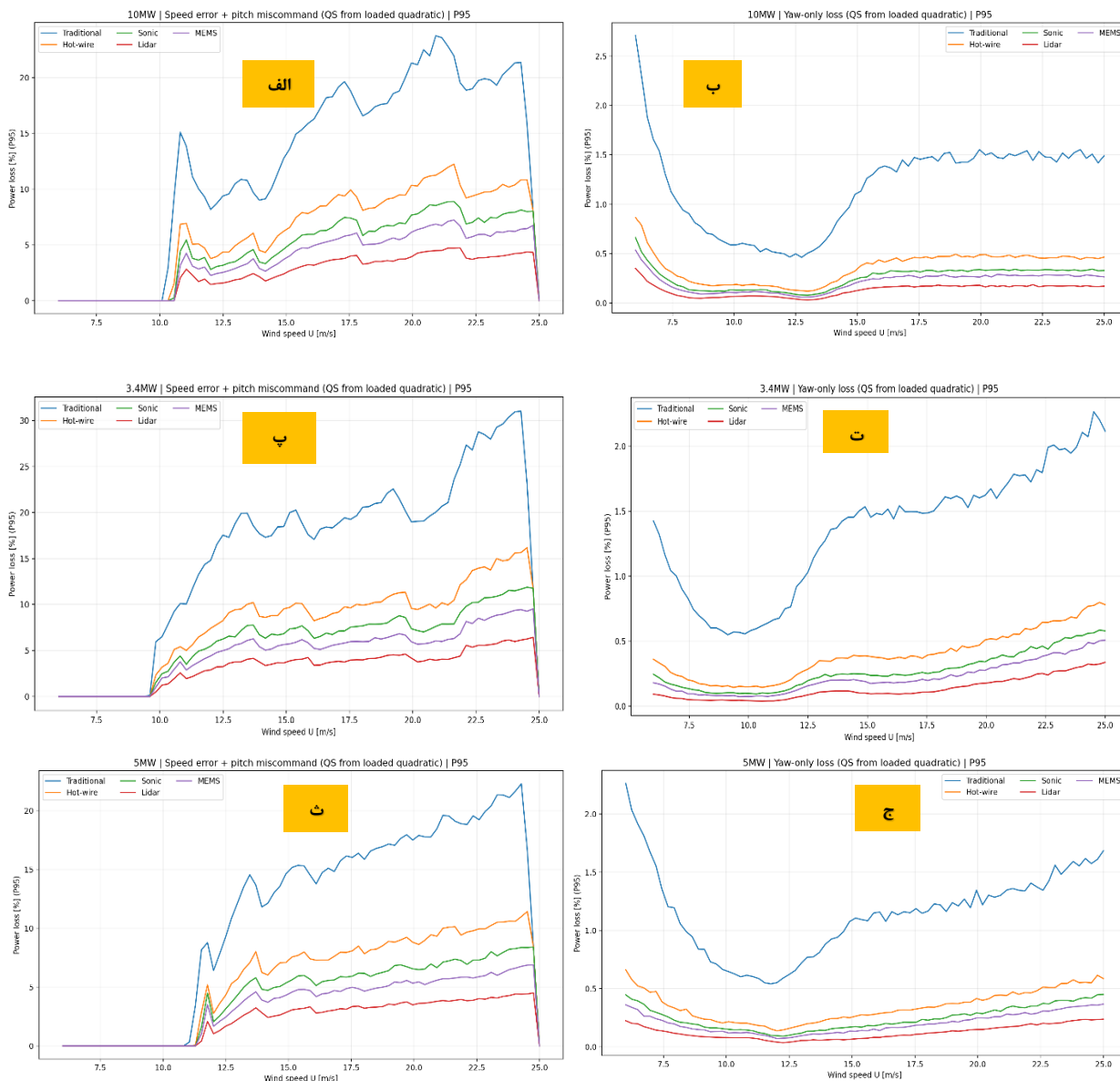
ضرایب	3.4 MW			5 MW			10 MW		
	ناحیه ۲	ناحیه ۱-۳ [9.5,12] (m/s)	ناحیه ۲-۳ [12,25] (m/s)	ناحیه ۲	ناحیه ۱-۳ [11.4,13] (m/s)	ناحیه ۲-۳ [13,25] (m/s)	ناحیه ۲	ناحیه ۱-۳ [12,14] (m/s)	ناحیه ۲-۳ [14,25] (m/s)
$(\beta_0)$	-781513	10749297	2967974	743895.1	21822170	4273706	-8745218	-965.514	16572407
$(\beta_1)$	278942.3	-1988732	38688.41	-206807	-3874476	19995.47	2314430	11046.92	-439731
$(\beta_2)$	234.829	-12571.7	-16778.9	915.5671	37468.34	-11560.8	21560.93	-5835.46	19225.45
$(\beta_3)$	-11620.1	1844935	429901.8	32009.55	1430994	456481.7	679060.2	-4673.37	1231558
$(\beta_{11})$	6168.548	119997.9	-1601.75	40959.71	201375.4	-1440.08	-39742.5	92840.54	8637.635
$(\beta_{12})$	-760.998	-1141.23	-3074.1	-1030.21	-1544.46	-3052.95	-3622.99	-4395.58	-9769.03
$(\beta_{13})$	-10350.6	-10047.3	-13867.9	-14426	-24759.2	-12596.8	-50868.9	-48042.7	-74521
$(\beta_{22})$	-21.0892	1202.853	1043.369	35.8157	-3044.47	826.172	-2664.94	401.7351	-175.294
$(\beta_{23})$	6579.171	-188944	-66619.3	-3980.53	-129098	-66687.3	-89109.4	-57760.3	-204835
$(\beta_{33})$	13.10811	243.8393	1375.345	-321.773	-78.1059	-43.916	1690.004	640.6836	8396.863

### ۳-۸. اثر حساسیت حسگرها

در بخش «اعتبارسنجی حسگرها»، تلفات توان بدترین سناریو با شاخص صدک ۹۵ (P95) از روی شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شده است: برای هر سرعت باد  $U$ ، ابتدا توان مرجع با مدل جانشین QS معادله درجه ۲ و ورودی‌های بدون خطا (مثلاً  $yaw = 0$  و  $\Delta\beta$  مبنا) محاسبه می‌شود؛ سپس با اعمال عدم قطعیت هر حسگر (نمونه‌برداری خطا در اندازه‌گیری  $U$  و/یا  $yaw$ ) ورودی‌های خطادار ساخته شده و دوباره توان با QS محاسبه می‌شود. «تلفات توان» به صورت درصدی از اختلاف توان مرجع و توان تحت خطا استخراج می‌شود و در نهایت، مقدار P95 از توزیع تلفات به عنوان بدترین حالت گزارش می‌شود. مطابق شکل‌ها، سناریوی «Speed error pitch miscommand +» به طور سیستماتیک تلفات بزرگ‌تری نسبت به «Yaw-only» ایجاد می‌کند، چون خطای سرعت علاوه بر اثر مستقیم روی تخمین توان، به طور غیرمستقیم باعث فرمان پیچ نامناسب و دور شدن از نقطه کاری مناسب (به‌خصوص در ناحیه ۳) می‌شود؛ در حالی که در «Yaw-only» تنها مؤلفه کاهش برداشت توان ناشی از انحراف یاو است و دامنه تلفات محدودتر می‌ماند.

از نظر مقایسه عملکرد حسگرها، رتبه‌بندی تلفات بدترین حالت (P95) در هر سه توربین و در هر دو سناریو پایدار است؛ به طور کلی حسگر سنتی بیشترین تلفات را ایجاد می‌کند و حسگرهای دقیق‌تر تلفات را کاهش می‌دهند. برای جلوگیری از استخراج عددی فقط از روی شکل، مقادیر کلیدی P95 به صورت صریح در متن گزارش می‌شود. در سناریوی «خطای سرعت + فرمان پیچ اشتباه»، بیشینه تلفات مربوط به سنتی است و مقدار  $P95_{max}$  آن برای توربین‌های 3.4MW، 5 MW و 10 MW به ترتیب ۳۳/۵۴ درصد در  $U = 6$ ، ۲۷/۱۶ درصد در  $U = 7.74$  و ۲۷/۹۷ درصد در  $U = 7.22$  به دست می‌آید. در همین سناریو، تلفات حسگرهای دقیق‌تر به طور معناداری کمتر است؛ برای نمونه، MEMS به ترتیب ۷/۵۸ درصد در  $U = 6$ ، ۶/۱۸ درصد در  $U = 7.22$  و ۶/۳۸ درصد در  $U = 6.87$  و Lidar به ترتیب ۷/۶۹ درصد در  $U = 6$ ، ۶/۱۹ درصد در  $U = 6.87$  و ۶/۴۴ درصد در  $U = 6.52$  را نشان می‌دهد؛ بنابراین در این سناریو، کاهش تلفات بدترین حالت با انتخاب حسگر دقیق‌تر کاملاً محسوس است.

در سناریوی «فقط یاو» دامنه تلفات برای حسگرهای دقیق‌تر بسیار کوچک‌تر است، هرچند سنتی همچنان تلفات بالایی دارد. مقدار  $P95_{max}$  برای سنتی در توربین‌های 3.4MW، 5 MW و 10 MW به ترتیب ۸/۹۸ درصد، ۱۲/۱۵ درصد و ۱۱/۱۶ درصد همگی در  $U = 6$  است. در مقابل، Lidar به ترتیب ۰/۹۸۵ درصد در  $U = 10.36$ ، ۰/۱۳۶۸ درصد در  $U = 6.17$  و ۰/۱۳۹۲ درصد در  $U = 6$  و MEMS به ترتیب ۰/۳۵۴۹ درصد، ۰/۴۷۸۶ و ۰/۴۶۵۸ همگی عمدتاً در  $U = 6$  را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد سهم غالب تلفات بدترین حالت عمدتاً از مسیر خطای سرعت و فرمان پیچ اشتباه ایجاد می‌شود و استفاده از حسگرهای دقیق‌تر به‌ویژه MEMS و Lidar می‌تواند دم بالایی تلفات (P95) را در هر سه توربین به طور معناداری کاهش دهد (شکل ۸).



شکل ۸. نتایج مونت کارلو از تلفات توان بدترین حالت (P95) برحسب سرعت باد برای حسگرهای مختلف (الف، ب) توربین 3.4 MW، (پ، ت) توربین 5 MW، (ث، ج) توربین 10 MW؛ در هر توربین، (الف/پ/ث) سناریوی Speed error + pitch miscommand و (ب/ت/ج) سناریوی Yaw-only را نشان می‌دهد. تلفات به صورت اختلاف درصدی توان مرجع و توان تحت خطا محاسبه شده با مدل QS درجه ۲ و سپس استخراج صدک ۹۵ گزارش شده است

نتایج مونت کارلو در صدک ۹۵ نشان می‌دهد «رتبه‌بندی حسگرها» در هر سه توربین و در هر دو سناریو پایدار است و همین پایداری، ارزش عملی تفکیک ناحیه‌ای و مدل QS را تقویت می‌کند: در سناریوی «خطای سرعت + فرمان پیچ اشتباه» بدترین حالت تلفات برای حسگر سنتی به ترتیب برای توربین‌های 3.4MW، 5 MW و 10 MW برابر با ۳۳/۵۴ درصد، ۲۷/۱۶ درصد و ۲۷/۹۷ درصد، در حالی که لیدار کمترین تلفات را حدود ۶-۷ درصد، ۴-۵ درصد و ۴-۵ درصد نشان می‌دهد و MEMS با وجود ساده بودن و قابلیت پیاده‌سازی تراشه‌ای، عملکردی نزدیک به گزینه‌های دقیق‌تر ارائه می‌کند حدود ۹-۱۰ درصد، ۶-۷ درصد و ۶-۷ درصد. در سناریوی «فقط یاو» نیز دامنه‌ها کوچک‌ترند تقریباً ۱/۲ درصد → ۰/۳۳ درصد برای ۳/۴ MW، ۱/۷ درصد → ۰/۲۴ درصد برای 5 MW و ۱/۵ درصد → ۰/۱۸ درصد برای 10 MW از سنتی به لیدار، و MEMS حدود ۷/۵۸ درصد، ۶/۱۸ درصد و ۶/۳۸ درصد قرار می‌گیرد. بنابراین اگرچه لیدار از نظر کمینه کردن تلفات بدترین حالت بهترین است، اما

MEMS بهترین مصالحه «کارایی-هزینه-یکپارچه‌سازی» محسوب می‌شود و می‌تواند کاهش معناداری در دم بالایی تلفات ایجاد کند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

تفکیک عملکرد توربین به ناحیه ۲ (زیر سرعت نامی) و ناحیه ۳ (اطراف/بالای سرعت نامی) در این مقاله فقط یک ساده‌سازی مدل‌سازی نیست، بلکه برای بازتولید رفتار واقعی آبرودینامیک-کنترلی نزدیک سرعت نامی ضروری دانسته می‌شود. در ناحیه ۲ توربین عمده‌تاً در حالت پیشینه‌سازی برداشت انرژی است و توان با سرعت باد رشد می‌کند؛ اما در ناحیه ۳ کنترل گام‌پره توان را محدود می‌کند و شکل منحنی توان تخت‌تر می‌شود، بنابراین یک برازش واحد (مثلاً یک مدل درجه دوم) روی کل بازه می‌تواند نزدیک نقطه گذار دچار سوگیری شود.

از دید خطاهای عملیاتی، مقاله تأکید می‌کند که ناهم‌راستایی یاو راندمان آبرودینامیکی را کم کرده و باعث افت توان می‌شود و این افت، به‌ویژه وقتی توربین به محدودیت‌های نزدیک/بالای نامی می‌رسد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مکانیزم مهم دیگر این است که خطای اندازه‌گیری سرعت باد در ناحیه ۳ می‌تواند غیرمستقیم به خطای پیچ تبدیل شود؛ چون برنامه/جدول فرمان گام‌پره به سرعت باد اندازه‌گیری شده وابسته است و یک بایاس در اندازه‌گیری، فرمان پیچ را جابه‌جا می‌کند و عدم قطعیت توان را در شرایط بالای نامی افزایش می‌دهد.

در نهایت، نتایج مونت‌کارلو با معیار بدترین حالت P95 نشان می‌دهد رتبه‌بندی سنسورها در توربین‌های مرجع و سناریوهای بررسی شده پایدار است؛ لایدار کمترین زیان بدترین حالت را دارد و MEMS به عنوان یک مصالحه عملی خوب (کارایی-هزینه-یکپارچه‌سازی) مطرح می‌شود که زیان‌های انتهایی را نسبت به گزینه‌های کم‌دقت‌تر به طور محسوسی کاهش می‌دهد. محدودیت اصلی هم این است که داده‌ها و مدل‌های جانشین بر مبنای شرایط پایا/شبه‌پایا ساخته شده‌اند؛ بنابراین اثرات گذرا، آشفتگی و برهم‌کنش کامل کنترلر جریان به طور کامل پوشش داده نشده به عنوان گام بعدی، چارچوب DOE مدل جانشین به شرایط آشفته‌تعمیم داده می‌شود؛ به طور مشخص با افزودن شدت آشفتگی (TI) و برش باد به عنوان ورودی‌های DOE و همچنین ادغام داده‌های واقعی SCADA برای کالیبراسیون/به‌روزرسانی آنلاین پارامترهای مدل، به منظور اعتبارسنجی میدانی و افزایش قابلیت کاربرد صنعتی.

جدول ۸. ضرایب کلیدی مدل RSM/QS (۵ ترم غالب) برای گشتاور، به تفکیک توربین و ناحیه

توربین مگاوات	ناحیه	بازه U (m/s)	ترم ۱	ضریب ۱	ترم ۲	ضریب ۲	ترم ۳	ضریب ۳	ترم ۴	ضریب ۴	ترم ۵	ضریب ۵
۳.۴	ناحیه ۲	[۹,۴]	U	۲.۷۸۹e+۰۵	۲ <sup>۲</sup>	۷.۶۱۰-e+۰۲	ثابت	۷.۸۱۵-e+۰۵	(Δβ) <sup>۲</sup>	۱.۰۳۵-e+۰۴	U·Δβ	۶.۵۷۹e+۰۳
۳.۴	ناحیه ۱-۳	[۱۲,۹.۵]	Δβ	۱.۸۴۵e+۰۶	ثابت	۱.۰۷۵e+۰۷	U	۱.۹۸۹-e+۰۶	U·Δβ	۱.۸۸۹-e+۰۵	۲ <sup>۲</sup>	۱.۱۴۱-e+۰۳
۳.۴	ناحیه ۲-۳	[۲۵,۱۲]	U·Δβ	۶.۶۶۲-e+۰۴	۲ <sup>۲</sup>	۳.۰۷۴-e+۰۳	ثابت	۲.۹۶۸e+۰۶	Δβ	۴.۲۹۹e+۰۵	γ	۱.۶۷۸-e+۰۴
۵	ناحیه ۲	[۱۱,۶]	۲ <sup>۲</sup>	۱.۰۳۰-e+۰۳	U	۲.۰۶۸-e+۰۵	U <sup>۲</sup>	۴.۰۹۶e+۰۴	ثابت	۷.۴۳۹e+۰۵	(Δβ) <sup>۲</sup>	۱.۴۴۳-e+۰۴
۵	ناحیه ۱-۳	[۱۳,۱۱.۴]	Δβ	۱.۴۳۱e+۰۶	ثابت	۲.۱۸۲e+۰۷	U	۳.۸۷۴-e+۰۶	U·Δβ	۱.۲۹۱-e+۰۵	۲ <sup>۲</sup>	۱.۵۴۴-e+۰۳
۵	ناحیه ۲-۳	[۲۵,۱۳]	U·Δβ	۶.۶۶۲-e+۰۴	۲ <sup>۲</sup>	۳.۰۵۳-e+۰۳	ثابت	۴.۲۷۴e+۰۶	Δβ	۴.۵۶۵e+۰۵	γ	۱.۱۵۶-e+۰۴
۱۰	ناحیه ۲	[۱۰,۶]	۲ <sup>۲</sup>	۳.۶۳۳-e+۰۳	Δβ	۶.۷۹۱e+۰۵	ثابت	۸.۷۴۵-e+۰۶	U	۲.۳۱۴e+۰۶	U·Δβ	۸.۹۱۱-e+۰۴
۱۰	ناحیه ۱-۳	[۱۴,۱۲]	U·Δβ	۵.۷۷۶-e+۰۴	۲ <sup>۲</sup>	۴.۳۹۶-e+۰۳	(Δβ) <sup>۲</sup>	۴.۸۰۴-e+۰۴	ثابت	۹.۶۶۰-e+۰۲	U	۱.۱۰۵e+۰۴
۱۰	ناحیه ۲-۳	[۲۵,۱۴]	۲ <sup>۲</sup>	۹.۷۶۹-e+۰۳	ثابت	۱.۶۵۷e+۰۷	Δβ	۱.۲۳۳e+۰۶	U	۴.۳۷۷-e+۰۵	U·Δβ	۲.۰۴۸-e+۰۵

## منابع

- [1] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins and Ervin Bossanyi. WIND ENERGY HANDBOOK Chichester • New York • Weinheim • Brisbane • Singapore • Toronto: JOHN WILEY & SONS, LTD; 2001.
- [2] Mike T. van Dijk, Jan-Willem van Wingerden, Turaj Ashuri, Yaoyu Li and Mario A. Rotea. Yaw-Misalignment and its Impact on Wind Turbine Loads and Wind Farm Power Output. In *The Science of Making Torque from Wind*; 2016: IOP Publishing.
- [3] Andreas Rott, Leo Höning, Paul Hulsman, Laura J. Lukassen, Christof Moldenhauer, and Martin Kühn. Wind vane correction during yaw misalignment for horizontal-axis wind turbines. *Wind Energy*. 2023;: 1755–1770.
- [4] Ravi Pandit, David Infield, and Tim Dodwel. Operational Variables for Improving Industrial Wind Turbine Yaw Misalignment Early Fault Detection Capabilities Using Data-Driven Techniques. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*. 2021.
- [5] Jaime Liew, Albert M. Urbán, and Søren Juhl Andersen. Analytical model for the power–yaw sensitivity of wind turbines operating in full wake. *Wind Energy*. 427–437;: 2020.
- [6] 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.
- [7] Bo Jing, Zheng Qian, Yan Pei, Lizhong Zhang, Tingyi Yang. Improving wind turbine efficiency through detection and calibration of yaw misalignment. *Renewable Energy*. 2020;: 1217-1227.
- [8] Knud A. Kragh, Morten H. Hansen and Lars C. Henriksen. Sensor comparison study for load alleviating wind turbine pitch control. *WIND ENERGY*. 2014;: 1891–1904.
- [9] 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. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;: 167–178.
- [10] E. Branlard, J. Jonkman, B. Lee, B. Jonkman, M. Singh, E. Mayda and K. Dixon. Improvements to the Blade Element Momentum Formulation of OpenFAST for Skewed Inflows. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024; 2767(2).
- [11] G. E. P. Box, D. W. Behnken DWB. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *G. E. P. Box, D. W. Behnken*. 1960; 4: 455-475.
- [12] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*: John Wiley & Sons, ; 2013.
- [13] Yasemin Ayaz Atalan, Mete Tayanç, Kamil Erkan and Abdulkadir Atalan MTKEaAA. Development of Nonlinear Optimization Models for Wind Power Plants Using Box-Behnken Design of Experiment: A Case Study for Turkey. *Sustainability*. 2020.
- [14] Ngwarai Shambira, Golden Makaka and Patrick Mukumba. Velocity Augmentation Model for an Empty Concentrator-Diffuser-Augmented Wind Turbine and Optimisation of Geometrical Parameters Using Surface Response Methodology. *Sustainability*. 2024.
- [15] Tomasz Lipecki, Paulina Jamińska-Gadomska and Andrzej Sumorek. Influence of Ultrasonic Wind Sensor Position on Measurement Accuracy under Full-Scale Conditions. *sensors*. 2020.
- [16] Mingjia Shangguan, Jiawei Qiu, Jinlong Yuan, Zhifeng Shu, Lingfeng Zhou and Haiyun Xia. Doppler Wind Lidar From UV to NIR: A Review With Case Study Examples. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022.
- [17] Fatemeh Ejeian, Shohreh Azadi, Amir Razmjou, Yasin Orooji, Ajay Kottapalli, Majid Ebrahimi Warkiani and et al. Design and applications of MEMS flow sensors: A review. *sensors and Actuators A: Physical*. 2019;: 483-502.
- [18] Moein Sarbandi and 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;: 497–517.
- [19] 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. *arXiv*. 2024.
- [20] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report. Golden, Colorado;: 2009.

- [21] Pietro Bortolotti, Helena Canet Tarrés, Katherine Dykes, Karl Merz, Latha Sethuraman, David Verelst, et al. IEA Wind Task 37 on Systems Engineering in Wind Energy IEA Wind Task 37 on Systems Engineering in Wind Energy. Technical Report. ; 2019.
- [22] Ganander H. The Use of a Code-generating System for the Derivation of the Equations for Wind Turbine Dynamics. WIND ENERGY. 2003;: 333-345.
- [23] PERDANA A. Dynamic Models of Wind Turbines: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY; 2008.
- [24] Min-Soo Jeong, Sang-Woo Kim, In Lee, Seung-Jae Yoo and K.C. Park. The impact of yaw error on aeroelastic characteristics of a horizontal axis wind turbine blade. Renewable Energy. 2013;: 256-268.
- [25] Astolfi D. A Study of the Impact of Pitch Misalignment on Wind Turbine Performance. machines. 2019.
- [26] Pedro A. Galvani, Fei Sun and Kamran Turkoglu. Aerodynamic Modeling of NREL 5-MW Wind Turbine for Nonlinear Control System Design: A Case Study Based on Real-Time Nonlinear Receding Horizon Control. aerospace. 2016.
- [27] Tian-tian Zhang, Mohamed Elsakka, Wei Huang, Zhen-guo Wang, Derek B. Ingham, Lin Ma and et al. Winglet design for vertical axis wind turbines based on a design of experiment and CFD approach. Energy Conversion and Management. 2019;: 712-726.
- [28] Possolo A. Simple Guide for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Technical. National Institute of Standards and Technology, Statistical Engineering Division Information Technology Laboratory; 2015.
- [29] Liu B, Zhao S, Yu X, Zhang L, Wang Q. A Novel Deep Learning Approach for Wind Power Forecasting Based on WD-LSTM Model. *Energies*. 2020; 13(18)