



Research Note

Numerical Study of the Effect of the Co-Flow Jet on the Aerodynamic Coefficients of a Kilowatt Horizontal Axis Wind Turbine Blade

Fatemeh Masoudi and Saeed Karimian Aliabadi *

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

* corresponding author: (Karimian@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 27 October 2024

Revised: 8 December 2024

Accepted: 29 January 2025

Keywords:

Kilowatt wind turbine,
 Jet flow coefficient,
 Co-Flow Jet (CFJ),
 dynamic stall,
 aerodynamic coefficients.

Abstract

In this study, numerical investigation is conducted on using Co-flow jets in the wind turbine blades. 3D steady simulations are performed using $k\text{-}\epsilon\text{-}\omega$ turbulence model. Different jet flow coefficients ranging from 0.00 to 0.03 are applied at wind speeds of 7, 10, 15, and 20 m/s to evaluate the influence of suction and blowing slots located near the trailing edge of the blade. The results indicate that CFJ has negligible impact at very low wind speeds (7 m/s), but it provides substantial performance improvements at moderate to high wind speeds. At 10 m/s, CFJ coefficients of 0.02 and 0.03 enhance the net power coefficient significantly. At 15 m/s, the use of CFJ with $C_{\mu} = 0.01$ results in a 33% increase in turbine performance and successfully delays the onset of dynamic stall. At 20 m/s, a further improvement of 8% is observed with $C_{\mu} = 0.03$. Overall, the study demonstrates that CFJ is a highly effective technique for improving aerodynamic efficiency and power generation in kilowatt-scale wind turbines, particularly in regions with medium to strong wind conditions.

Introduction

The efficiency of modern wind turbines is strongly limited by aerodynamic losses due to boundary layer separation, vortex shedding, and stall phenomena. To overcome these pitfalls, passive & active devices, are utilized. Passive methods generally increase drag, while active flow controls, provide more versatility and decrease penalty for targeted improvements in turbine performance. Co-flow jet (CFJ) actuator, has received considerable attention in last 2 decades. Introduced in the early 2000s [1–3], CFJ integrates suction and blowing slots near the trailing edge to form a tangential jet continuously energizes the boundary layer. This mechanism, delays flow separation, suppresses stall, and improves lift-to-drag ratio. Subsequent studies demonstrated CFJ's effectiveness in airfoils, compressors, and helicopter rotors [4–14]. Its application to wind turbines, examined by

Zhang et al. [15] and Ma et al. [16], yielded notable improvements in aerodynamic efficiency and power generation. In this research, the CFJ concept is applied to the NREL Phase VI wind turbine blade—a benchmark configuration frequently used for aerodynamic and CFD validation [18]. The actuator, positioned between 28% and 95% of the chord (Fig. 5), absorbs low-energy boundary layer flow through suction and re-injects high-momentum air via blowing. The study evaluates the effect of jet flow coefficient on turbine performance.

Methodology

The baseline configuration of the NREL Phase VI horizontal-axis wind turbine consists of a two-bladed rotor with a radius of 5.029 m and S809 airfoil along the span. The rotor operates within wind speeds ranging from 5 to 25 m/s, with a nominal speed of 15 m/s and a rated power of 19.8 KW. To incorporate

To Cite this article:

Masoudi, F. and Karimian Aliabadi, S. 2025. Numerical study of the effect of the co-flow jet on the aerodynamic coefficients of a kilowatt horizontal axis wind turbine blade, *Sharif Mechanical Engineering Journal*, 41(1), 125-135.
<https://doi.org/10.24200/ij40.2025.65443.1722>

CFJ, the blade is modified by embedding suction and blowing slots along 28–95% of the chord length near the trailing edge (Fig. 4). The suction slot removes low-energy boundary layer fluid from the suction surface, while the blowing slot injects high-energy flow tangentially, reattaching and energizing the boundary layer. Numerical simulations are carried out using ANSYS Fluent 2021 R2. The governing equations are based on the incompressible RANS, given in Eqs. 1-2, by $k\text{-kl-}\omega$ turbulence model [17]. The jet flow coefficient, C_{μ} , which quantifies jet intensity, is defined by Eq. (6) [20]. The power required for CFJ actuation and the net power coefficient are calculated using Eqs. 7–10. The computational domain consists of a semi-cylindrical region extending 30 m radially and 60 m axially, with velocity inlet and pressure outlet boundary conditions. To reduce computational cost, only half of the rotor was modeled with periodic boundary conditions. Mesh independence tests were conducted using 6.8–11.2 million elements; the 9-million-cell grid (Fig. 2) was chosen as optimal. Validation study showed good agreement (Fig. 3) and confirmed reliability of the numerical approach [18,19]. The simulations are conducted for wind speeds of 7, 10, 15, and 20 m/s, with jet flow coefficients of 0.00 (baseline, no CFJ), 0.01, 0.02, and 0.03.

Results and Discussion

Physics of using CFJ, were depicted in figs. 6–7. At 10 m/s, the power coefficient increases significantly for $C_{\mu} = 0.02$ & 0.03, compared with the baseline. At 15 m/s, the CFJ system demonstrates its greatest effectiveness. Without CFJ, the turbine suffers from significant separation and stall effects, leading to performance degradation. A 33% increase in net power coefficient is achieved at $C_{\mu} = 0.01$, and up to 65% improvement for $C_{\mu} = 0.03$ (Table 2). Flow visualization

indicates delayed stall onset and enhanced circulation around the blade, which increases torque (Fig. 8). At 20 m/s, CFJ continues to enhance performance with an 8% gain at $C_{\mu} = 0.03$; however, the marginal benefits decrease due to higher actuator energy consumption. The trends in actuator power, rotor power, and net power coefficients versus jet flow coefficient are presented in Figs. 9–11. The improvement rate of the net power coefficient with CFJ actuation is shown in Fig. 12, and its dependence on the tip-speed ratio is illustrated in Fig. 13. This highlights the importance of optimizing CFJ intensity to achieve the best balance between aerodynamic benefit and energy cost. Overall, the results confirm that CFJ is most effective at moderate to high wind speeds (10–20 m/s), where flow separation and stall phenomena strongly influence turbine efficiency. The ability of CFJ to maintain flow attachment and delay stall, significantly enhances net power generation.

Conclusion

A comprehensive numerical study was performed to analyze the aerodynamic performance of the NREL Phase VI wind turbine blade equipped with Co-Flow Jet (CFJ) actuators. The key achievements of the current study, can be classified as: 1- CFJ has negligible effect at 7 m/s, but becomes effective above 10 m/s. 2- At 10 m/s, $C_{\mu} = 0.02\text{--}0.03$ improves turbine power by up to 15%. 3- At 15 m/s, $C_{\mu} = 0.01$ yields a 33.74% improvement, while $C_{\mu} = 0.03$ enhances power by 64.83%. 4- At 20 m/s, an 8% performance gain is achieved. 5- Optimal CFJ operation requires balancing actuator power consumption and aerodynamic benefit. In overall, CFJ provides substantial aerodynamic enhancement by delaying flow separation and suppressing stall, making it a promising active flow control strategy for future wind turbine designs.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



مطالعه‌ی عددی تأثیر عملکرد کنترل جریان به شیوه‌ی دمش - مکش در ضرایب آیرودینامیکی پره‌ی توربین باد محور افقی کیلوواتی

فاطمه مسعودی و سعید کریمیان*

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

*نویسنده مسئول (Karimian@modares.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از عملکردهای دمشی - مکشی در عملکرد آیرودینامیکی پره‌ی توربین بادی ان-آر-ای-ال فاز ۶ با حل عددی سه‌بعدی بررسی شده است. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار آنسیس فلونت استفاده و تحلیل‌ها براساس تغییرات ضریب جریان جت در شرایط مختلف سرعت باد (۷، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ متر بر ثانیه) انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که در سرعت ۷ متر بر ثانیه، استفاده از عملکرد دمشی - مکشی تأثیر مطلوبی ندارد. اما با افزایش سرعت باد به ۱۰ متر بر ثانیه، ضریب جریان جت با شدت نسبی ۰.۲۰ و ۰.۳۰ بهبود قابل توجهی در عملکرد توربین ایجاد کرده است. در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، ضریب جریان ۰.۱۰ موجب افزایش ۳۳ درصدی در عملکرد توربین شده است. همچنین تأخیر در بروز واماندگی دینامیکی مشاهده شده است. در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه نیز با ضریب جریان ۰.۳۰، افزایش ۸ درصدی عملکرد مشاهده شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

واژگان کلیدی:

توربین بادی کیلوواتی،

ضریب جریان جت،

کو فلوجت،

واماندگی دینامیکی،

ضرایب آیرودینامیک.

یکی از روش‌های نوین و مؤثر در افزایش بهره‌وری توربین‌های بادی و بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف استفاده می‌شود.

در تابستان ۲۰۰۲، تیم پژوهشی مشترکی از دانشگاه میامی و گروه تحقیقاتی نیروهوایی، مفهوم جدیدی از کنترل جریان با استفاده از دمش و مکش را برای تیغه‌های کمپرسور موتور هواپیما معرفی کردند؛ که باعث افزایش قابل توجه راندمان کمپرسور شده بود.^{[۱] و [۲]} ژا و پکستون^۲ (۲۰۰۴)، از عملکرد دمشی - مکشی بر روی ایرفویل ناکا ۲۴۱۵ استفاده کردند و با شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تونل باد، بهبود قابل توجهی در نیروی برآ^۳ و کاهش نیروی پسا^۴ مشاهده و از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، افزایش عملکرد آیرودینامیکی و تأخیر در واماندگی را تأیید کردند.^[۳]

ژا و همکاران (۲۰۰۶)، با بررسی مقاطع آیرودینامیکی مختلف و استفاده از شکاف‌های مختلف دمش جریان، نشان دادند که ایرفویل با شکاف بزرگ‌تر، جریان بیشتری را عبور می‌دهد و نیروی پسا را کاهش می‌دهد؛ در حالی که شکاف کوچک‌تر واماندگی را به تأخیر می‌اندازد.^[۴] محمد مشاد و همکارش

۱. مقدمه

تأثیر کنترل جریان فعال با استفاده از عملکرد دمشی - مکشی^۱ در عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های بادی اهمیت زیادی دارد. این روش با افزودن مومنتم اضافی به لایه‌ی مرزی، از جدایش جریان جلوگیری می‌کند و عملکرد توربین را بهبود می‌بخشد. با استفاده از عملکرد دمشی - مکشی که به‌طور فعال جریان را دمش و مکش می‌کند، می‌توان به بهینه‌سازی کارایی آیرودینامیکی توربین‌های بادی و تأخیر در وقوع واماندگی دینامیکی دست یافت. پژوهش‌های اولیه در این زمینه به اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ بر می‌گردد؛ زمانی که تیم‌های مطالعاتی از دانشگاه‌ها و سازمان‌های مختلف، کارایی عملکرد دمشی - مکشی را برای بهبود عملکرد ایرفویل‌ها و کمپرسورهای موتور هواپیما بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از دمش و مکش هم‌زمان می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد آیرودینامیکی را بهبود بخشد و مشکلاتی مانند واماندگی دینامیکی را کاهش دهد. از آن زمان، مطالعات بیشتری در حوزه‌ی مذکور انجام شده است، که به بررسی دقیق‌تر آثار عملکرد دمشی - مکشی در توربین‌های بادی پرداخته و روش‌های مختلف بهینه‌سازی را بررسی کرده‌اند. فن‌آوری اخیر، اکنون به‌عنوان

³ lift

⁴ drag

¹ Co-Flow jet

² Zha & Paxston

که تاکنون در مطالعات پیشین به آن توجه نشده و در پژوهش حاضر به بررسی آن پرداخته شده است. برای مطالعه‌ی حاضر، روتور توربین باد محور افقی یک مرجع پژوهشی انتخاب و جریان روی پره‌ی آن به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. ابتدا، شبیه‌سازی عددی پره بدون عملکرد در نرم‌افزار فلونت^۹ انجام و اعتبارسنجی شده است. سپس، عملکرد دمشی - مکشی با ضریب جریان جت‌های مختلف بر روی پره، اعمال و تأثیر آن در سرعت‌ها و دبی‌های مختلف بررسی و تحلیل شده است.

۲. توربین باد مبنا

برای تحلیل تأثیر کنترل جریان با استفاده از عملکرد دمشی - مکشی، توربین بادی محور افقی کیلوواتی ان-آر-ای-ال (NREL) فاز شش^{۱۰} بررسی شده است. به طور کلی، توربین بادی مذکور، دو پره داشته و دارای قطر ۰.۵۸.۱۰ متر بوده است. در طراحی پره‌ی توربین فاز ۶ از ۲۸ مقطع مختلف، دو نوع سطح مقطع دایروی، دو نوع سطح مقطع بیضوی، و ۲۴ سطح مقطع ایرفویل اس ۸۰۹^{۱۱} استفاده شده است. طراحی توربین باد اخیر توسط هند^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۱) انجام شده است.^[۱۷] در جدول ۱، مشخصات عملکردی و طراحی توربین باد NREL فاز شش ارائه شده است. همچنین در شکل ۱ شماتیکی از پره توربین باد مبنا مشاهده شده است.

جدول ۱. مشخصات عملکردی و طراحی توربین باد NREL فاز شش.

Table 1. Performance and design specifications of NREL phase6 wind turbine.

Number of blade	2
Radius	5/029 m
Twist angle	3 deg
Angular velocity	71/63 rev/min
Range of velocity	5-25 m/s
Nominal wind speed	15 m/s
Maximum power coefficient	0/38
Power output	19/8 KW

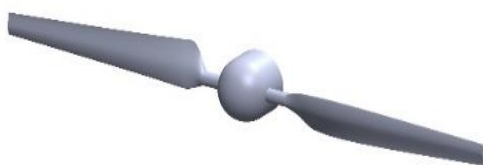


Fig 1. Schematic view of the baseline WT blade.

شکل ۱. نمای شماتیک پره‌ی توربین باد مبنا.

(۲۰۱۰)، ایرفویل ناکا ۴۲۱۵ را با استفاده از مکش و تزریق جریان در تونل باد مافوق صوت بررسی و بهبودهای قابل توجهی در ضریب برآ و کاهش نیروی پسا در زوایای حمله‌ی مختلف را مشاهده کردند.^[۵] وانگ^۱ و ژا^{۱۱} (۲۰۱۱)، به بررسی عددی مقاطع آیرودینامیکی با عملکرد دمشی - مکشی پرداختند و نشان دادند که مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^۲ به طور مؤثرتری جدایش جریان را پیش‌بینی می‌کند.^[۶]

لوفور^۳ و ژا^۳ (۲۰۱۳)، با شبیه‌سازی عملکرد ایرفویل نوسانی سی اس ۱۰۹۵ با عملکرد دمشی - مکشی، بهبودهای قابل توجهی در نیروی برآ و کاهش نیروی پسا مشاهده کردند، که منجر به حذف واماندگی دینامیکی شده است.^[۷] ایکسو^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، کنترل واماندگی دینامیکی ایرفویل اس ۸۰۹ مجهز به عملکرد دمشی - مکشی را به صورت عددی بررسی کردند و دریافتند که فن‌آوری مذکور به طور مؤثری نیروی برآ را افزایش و نیروی پسا را کاهش می‌دهد.^[۸] لوفور و همکاران (۲۰۱۶)، عملکرد ایرفویل ناکا ۶۴۱۵ را با عملکرد دمشی - مکشی بررسی و بهبودهای قابل توجهی در ضریب نیروی برآ و راندمان آیرودینامیکی در سرعت‌های مختلف ماک مشاهده کردند.^[۹]

یانگ و ژا^۵ (۲۰۱۷)، ایرفویل ناکا ۶۴۲۱ را با استفاده از مدل اسپالارت آلماراس^۶ شبیه‌سازی کردند و افزایش قابل توجه ضریب نیروی برآ در زاویه‌ی حمله‌های بالا گزارش دادند.^[۱۰] ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)، با شبیه‌سازی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ مجهز به عملکرد دمشی - مکشی، بهبودهای قابل توجهی در ضریب نیروی برآ و کاهش نیروی پسا در زوایای مختلف حمله مشاهده کردند.^[۱۱] یانگ و ژا (۲۰۱۹)، فن‌آوری عملکرد دمشی - مکشی را به عنوان یک فن‌آوری امیدوارکننده برای بهبود عملکرد هواپیماهای پیشرفته‌ی الکتریکی هیبریدی معرفی کردند.^[۱۲]

لیو^۷ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی اثر عملکرد دمشی - مکشی در واماندگی دینامیکی ایرفویل روتور هلیکوپتر پرداختند و نشان دادند که فن‌آوری مذکور، در بهبود عملکرد و ثبات سیستم، تأثیر مثبتی دارد.^[۱۳] خوشنویس و همکاران (۲۰۲۰)، اثر عملکرد دمشی - مکشی در چهار ایرفویل متقارن ناکا را بررسی کردند و نشان دادند که ایرفویل‌های ضخیم‌تر از ایرفویل‌های نازک‌تر، بهبود بیشتری در عملکرد آیرودینامیکی با عملکرد دمشی - مکشی دارند.^[۱۴] ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)، بهبود عملکرد توربین باد محور افقی فاز شش با استفاده از عملکرد دمشی - مکشی را مدل‌سازی کردند و دریافتند که مکان دمش جریان تأثیر زیادی در بهبود عملکرد آیرودینامیکی دارد.^[۱۵] ما و ژو^۸ (۲۰۲۲)، با مدل‌سازی ایرفویل اس ۸۰۹ مجهز به عملکرد دمشی - مکشی نشان دادند که طراحی منسجم شکاف‌های دمش و مکش جریان به تأخیر در واماندگی و بهبود تولید برق در سرعت‌های پایین باد کمک می‌کند.^[۱۶]

با توجه به اهمیت کنترل جریان در بهبود عملکرد آیرودینامیکی و افزایش توان تولیدی توربین‌های بادی، پژوهش حاضر با تمرکز بر استفاده از روش نوین عملکرد دمشی - مکشی، به بررسی تأثیر آن در عملکرد توربین پرداخته است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که اعمال کنترل جریان به وسیله‌ی عملکرد دمشی - مکشی به پره، که در سه‌بعد اتفاق می‌افتد، یک ایده‌ی نوآورانه است،

⁷ Lio

⁸ Ma & Xu

⁹ ANSYS Fluent

¹⁰ NREL Phase VI

¹¹ S 809

¹² Hand

¹ wang

² Large Eddy Simulations

³ Lefebvre

⁴ Xu

⁵ Yang & Zha

⁶ Spalart Allmars

۳. معادله‌های حاکم

۳.۱. معادله‌های حاکم بر جریان

برای تحلیل رفتار جریان در تمامی حالت‌ها، معادله‌های پیوستگی و اندازه‌ی حرکت حل می‌شوند. شبیه‌سازی جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از توربین بادی با استفاده از مدل معادله‌های ناویر-استوکس میانگین‌گیری‌شده‌ی رینولدز (RANS) انجام می‌گیرد، که دقیقاً در معادله‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.^[۱۷]

- معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- معادله‌ی اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j')}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن‌ها، $\bar{u}_i$ مؤلفه‌های میدان سرعت، $\bar{p}$ فشار استاتیک بر حسب پاسکال، ρ چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، و μ ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال نامیده می‌شوند.

۳.۲. معادله‌های حاکم بر مدل توربولانسی کی-کی-ال-امگا^۲

در پژوهش حاضر، برای پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار آشفتگی و انتقال از رژیم آرام به مغشوش، از مدل آشفتگی توربولانسی کی-کی-ال-امگا استفاده شده است. مدل توربولانسی کی-کی-ال-امگا، در حال حاضر به‌عنوان یگانه مدل توربولانسی سه معادله‌ای انسیس فلونت معرفی شده است، که با استفاده از سه معادله‌ی انتقال، مواردی مثل رشد لایه‌ی مرزی و شروع گذار را پیش‌بینی می‌کند. مدل اخیر، توسط والتر و لیلیک^۳ (۲۰۰۴) ارائه شده است،^[۱۸] که در آن، سه معادله‌ی انتقال عبارت‌اند از: معادله‌ی انرژی جنبشی اغتشاشی (k)، معادله‌ی انرژی جنبشی آرام (kl)، و معکوس مقیاس زمانی اغتشاش‌ها (ω). به همین دلیل در نام‌گذاری این مدل توربولانسی به ترتیب از سه حرف k - kl - ω استفاده شده است، که هر سه بیانگر معادله‌های انتقال ذکر شده هستند. با توجه به وجود ترم انرژی اغتشاشی و انرژی آرام در مدل آشفتگی کی-کی-ال-امگا، مدل مذکور به‌خوبی می‌تواند مکان گذار از رژیم آرام به رژیم مغشوش را در لایه‌ی مرزی پیش‌بینی کند. در مدل k - kl ، که توسط عبدالحمید توسعه یافته است، ابتدا معادله‌های انتقال برای متغیرهای k و kl مطابق معادله‌های ۳ و ۴ ارائه شده است:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - C_{\mu}^{3/4} \frac{\rho k^{5/2}}{kL} - 2\mu \frac{k}{d^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho(kL))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j(kL))}{\partial x_j} = C_{\phi 1} \rho \frac{(kL)}{k} P - C_{\phi 2} \rho k^{3/2} - 6\mu \frac{(kL)}{d^2} f_{\phi} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\phi} \mu_t) \frac{\partial(kL)}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

که در آن‌ها، k انرژی جنبشی آشفتگی، t زمان، مؤلفه‌های سرعت جریان با u_j ، مختصات مکان با x_j تعیین می‌شوند. P به تولید انرژی آشفتگی، مانند اصطکاک اشاره دارد. معادله‌ی نرخ اتلاف آشفتگی نیز در رابطه‌ی ۵ ارائه شده است:

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_T} P_{k_T} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_w} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R + R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + \quad (5)$$

$C_{\omega 3} f_{\omega} a_T f_w^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d_w^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{a_T}{a_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$ که در آن، $C_{\omega 1}$ ، $C_{\omega 2}$ ، $C_{\omega 3}$ ، a_T و a_{ω} ضرایب ثابت هستند و d_w نیز معرف فاصله از دیوار و f_w تابع اصلاح برای ω است. R و R_{NAT} پارامترهای مرتبط با آشفتگی طبیعی و گذار و ω معکوس مقیاس زمانی آشفتگی هستند.

۳.۳. معادله‌های عملگر کو فلوجت

برای توصیف عملکرد دقیق توربین باد مجهز به عملگر دمشی-مکشی، چند پارامتر مهم در ادامه معرفی شده است؛ ضریب جریان جت، که پارامتر مهمی برای توصیف قدرت دمش است، در معادله‌ی ۶ ارائه شده است:^[۱۹]

$$C_{\mu} = \frac{\dot{m} V_j}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 A_{ref}} \quad (6)$$

که در آن، $\dot{m}$ دبی و V_j سرعت نسبی جریان تزریق شده هستند. ρ_{∞} چگالی و U_{∞} سرعت جریان آزاد هستند. A_{ref} مساحت دیسک چرخان، ناحیه‌ای که در آن توربین باد است. توان موردنیاز عملگر کو فلوجت، با میزان افزایش فشار و دبی جرمی و آنتالپی کل در ناحیه‌ی روتور توربین باد (آنتالپی در نقطه‌ی ورودی مجرای مکش عملگر)، متناسب است (معادله‌ی ۷):^[۱۹]

$$P = \frac{\dot{m} H_{t2}}{\eta} \left(\Gamma^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (7)$$

که در آن، $\dot{m}$ نرخ دبی جریان کو فلوجت است. کمیت H_{t2} آنتالپی کل در ناحیه‌ی چرخان توربین باد و در محل شکاف مکش جریان و Γ نسبت فشار بین ناحیه‌ی دمش و مکش جریان هستند؛ و در نهایت، η بازده سیستم است. معادله‌ی ۷ نشان می‌دهد که توان موردنیاز کو فلوجت به‌صورت خطی توسط نرخ دبی جریان و به‌صورت نمایی با نسبت فشار تعیین می‌شود. مقدار کل توان موردنیاز عملگرها، مجموع توان مصرفی آن‌هاست. ضریب توان مصرفی عملگر به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:^[۱۹]

$$C_{p-CFJ} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^3 A_{ref}} \quad (8)$$

که در آن، پارامتر P از معادله‌ی ۷ و مجموع توان مصرفی عملگرهاست. ضریب توان خالص توربین بادی (C_{pw}) معمولاً برای تعیین بازده کل توربین بادی استفاده می‌شود. برای یک توربین بادی معمولی، ضریب توان خالص به‌صورت نسبت توان به‌دست‌آمده از روتور بر توان کل موجود در باد محاسبه می‌شود:^[۱۹]

³ Walters & Leylek

¹ Reynolds-Averaged Navier-Stokes

² k-kl-omega

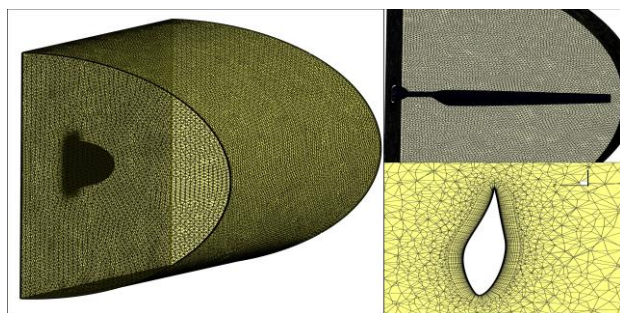


Fig2. Different views of the generated mesh, the overall domain at left, mesh around the blade at top right & boundary layer mesh at bottom right.

شکل ۲. نماهای مختلف از شبکه‌ی محاسباتی ایجاد شده: نمای کلی دامین محاسباتی (سمت چپ)، شبکه‌ی محاسباتی ایجاد شده روی پره و دامین کوچک حول آن (بالا سمت راست)، و شبکه‌ی محاسباتی لایه‌ی مرزی حول پره (پایین سمت راست).

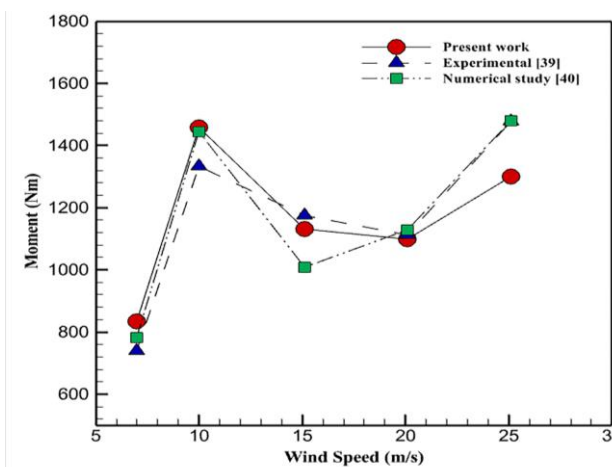


Fig 3. Validation of the moment result with experimental and numerical data.

شکل ۳. نمودار حاصل از اعتبارسنجی گشتاور با نتایج تجربی و عددی.

است، ناشی از خطای حل عددی بوده است. همواره سعی بر آن شده است تا با بهبود شبکه و انتخاب مدل محاسباتی مناسب با وجود محدودیت زمان و هزینه، خطای مذکور کاهش یابد.

۵. جانمایی عملگر کو فلوجت

عملکرد عملگر دمشی - مکشی براساس ترکیب دو جریان موازی است: مکش از لبه‌ی فرار و دم‌ش جت پُر فشار در جهت جریان آزاد. مکش لایه‌ی مرزی با حذف جریان‌های کم‌انرژی، از جدایش جریان جلوگیری می‌کند و پایداری جریان را افزایش می‌دهد. بلافاصله پس از مکش، دم‌ش جت با انرژی بالا به لایه‌ی مرزی، انرژی جنبشی آن را تقویت می‌کند و چسبندگی جریان به سطح را بهبود می‌بخشد. روش ذکر شده به توربین بادی اجازه می‌دهد که از زاویه‌ی حمله‌ی بزرگ‌تر استفاده کند، که در نتیجه توان آن بهبود می‌یابد. طرح شماتیک در شکل ۴ مشاهده می‌شود.^[۱۹]

$$C_{pR} = \frac{P_R}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^3 A_{\text{ref}}} \quad (9)$$

که در آن، P_R توان خروجی روتور توربین بادی و C_{pR} ضریب توان روتور توربین بادی هستند. C_{pw} و C_{pr} برای توربین‌های بادی معمولی یکسان هستند، اما برای توربین بادی مجهز به عملگر کو فلوجت، ضریب توان خالص (C_{pw}) حاصل تفاضل ضریب توان روتور و ضریب توان مصرفی عملگر است (رابطه‌ی ۱۰):

$$C_{pw} = C_{pR} - C_{p-CFJ} \quad (10)$$

رابطه‌ی اخیر نشان می‌دهد بین مزیت ایجاد شده توسط عملگر در بهبود توان کل مجموعه‌ی توربین بادی و توانی که خود توربین مصرف می‌کند، باید مصالحه‌ای صورت گیرد تا صرفه‌ی آن بیش از هزینه باشد.

۴. شبکه‌ی محاسباتی و اعتبارسنجی حل جریان

در پژوهش حاضر، دو دامنه‌ی محاسباتی در نظر گرفته شده است: (۱) دامنه‌ی بیرونی به صورت یک نیم‌استوانه با شعاع ۳۰ متر و ارتفاع ۶۰ متر و فاصله‌ی ۲۰ متر از ورودی و ۴۰ متر از خروجی پره‌ی توربین تعریف شده است؛ که به صورت ثابت است. (۲) برای دامنه‌ی داخلی، که شامل پره‌ی توربین در مرکز است، نیز یک نیم‌استوانه با شعاع قطاع ۵.۵ متر و به صورت چرخان در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار خروجی به ترتیب در ورودی و خروجی دامنه‌ی بیرونی اعمال شده است. به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، فقط نیمی از پره‌ی توربین مدل‌سازی و برای آن از شرط مرزی پریدیک استفاده شده است. هندسه‌ی پره‌ی توربین ان-آر-ای-ال فاز شش، ابتدا در نرم‌افزار سالی‌دورکس^۱ طراحی و سپس در دیزاین مدلر^۲ به همراه دامنه‌های محاسباتی وارد شده است.

دامنه‌ی محاسباتی به صورت بی‌سازمان و با سلول‌های هرمی در نرم‌افزار انسیس مشینگ^۳ شبکه‌بندی شده است. با توجه به گرادیان‌های شدید اطراف پره، شبکه‌بندی بر روی سطح آن بسیار متراکم بوده و اولین لایه در فاصله‌ی 5×10^{-6} متر از سطح پره قرار گرفته و سپس ۳۰ لایه با نرخ رشد ۲.۱ برای ایجاد شبکه‌ی لایه‌ی مرزی ایجاد شده است. برای اطمینان از درستی نتایج، بررسی استقلال از شبکه انجام شده است. چهار حالت با تعداد المان‌های ۸.۶، ۸، ۲.۹، و ۲.۱۱ میلیون بررسی و با مقایسه‌ی نتایج گشتاور در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، شبکه‌بندی ۹ میلیون به عنوان شبکه‌ی بهینه انتخاب شده است. در شکل ۲، شبکه‌ی محاسباتی حول پره مشاهده می‌شود.

برای اعتبارسنجی و مقایسه‌ی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و عددی، جریان حول پره‌ی توربین بادی با مدل اغتشاشی کی-کی-ال-امگا و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر بر ثانیه شبیه‌سازی و گشتاور آن خروجی گرفته شده است. گشتاورهای حاصل شده در سرعت‌های مختلف با داده‌های برخی نوشتارها،^{[۱۸] و [۲۰]} مقایسه شده است. نتایج به دست آمده با نتایج مرجع موردنظر در شکل ۳ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به شبیه‌سازی پژوهش با نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی دارد؛ لذا، نتایج حاصل از حل در ادامه‌ی مطالعات قابل اعتماد است. خطاهایی که به وجود آمده

³ Ansys Meshing

¹ SolidWorks

² Design Modeler

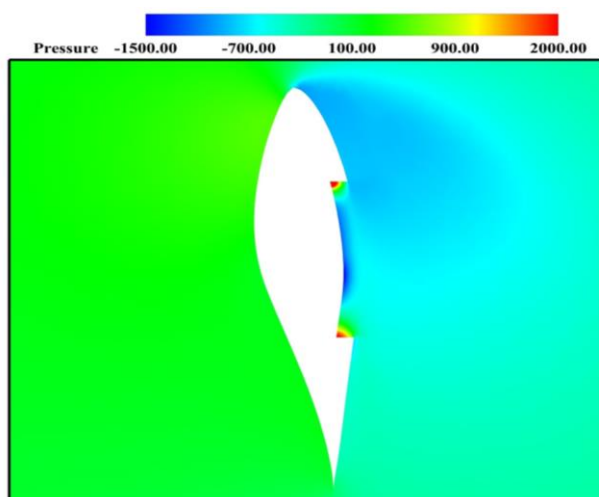


Fig 6. Pressure contour in the 60% of the blade for flow velocity 20 m.s with actuator on.

شکل ۶. کانتور فشار در مقطع ۶۰٪ پرهی توربین بادی مجهز به عملگر دمشی- مکشی و در سرعت جریان آزاد ۲۰ متر بر ثانیه.

۶. تحلیل نتایج

در تحلیل نتایج، عملکرد آیرودینامیکی توربین باد بدون و با وجود عملگر دمشی- مکشی بررسی و مقایسه شده است. عملکرد آیرودینامیکی توربین باد بدون عملگر در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ بررسی و نتایج برای مقایسه با عملکرد آیرودینامیکی توربین باد با عملگر کو فلوجت استخراج شده است. اصل پژوهش در بررسی عملکرد آیرودینامیکی توربین باد با عملگر دمشی- مکشی بوده است. در ضریب جریان جت ۰.۰۰، ۰.۱۰، ۰.۲۰ و ۰.۳۰ و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ با در نظر گرفتن جریان تراکم‌ناپذیر مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلونت^۱ انجام و نتایج ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به صورت نمودارها و کانتورهای مختلفی ارائه شده‌اند، که شامل: ضریب توان عملگر دمشی- مکشی، ضریب توان توربین باد، ضریب توان خالص توربین بادی، و نمودار درصد بهبود توان خالص توربین بادی هستند. به منظور انجام مقایسه‌های صحیح، نتایج مذکور در سرعت‌ها و ضریب جریان جت‌های مختلف بررسی و استخراج شده‌اند. این تحلیل‌ها بسیار دقیق تنظیم شده‌اند تا تفاوت‌ها و بهبودهای ممکن در عملکرد توربین‌های بادی به خوبی مشخص شوند و نتایج قابل اعتمادی برای بررسی‌های بیشتر ارائه دهند.

۱.۶. بررسی فشار

در کانتور شکل‌های ۶ و ۷، اختلاف فشار بین سطح پُر فشار و کم فشار پره‌ها، که اساس تولید نیروی برآ است، بررسی شده است. در شکل ۷، اختلاف فشار در سطح کم فشار نسبت به پُر فشار بیشتر است؛ که تغییرات فشار مذکور می‌تواند منجر به جدایش جریان در ناحیه‌ی لبه‌ی فرار پره شود. اما در شکل ۶، با فعال‌سازی عملگر دمشی- مکشی، جت‌های ثانویه به لایه‌ی مرزی دمیده می‌شوند؛ که سبب افزایش انرژی جنبشی لایه‌ی مرزی و تقویت چسبندگی جریان به سطح پره می‌شوند. این فرآیند موجب حفظ جریان در ناحیه‌ی نزدیک به سطح و جلوگیری از جدایش آن می‌شود. در نتیجه، جریان به طور یکنواخت‌تر روی سطح پره توزیع و جریان پایدارتری مشاهده می‌شود، که از جدایش در لبه‌ی فرار پره جلوگیری می‌کند.

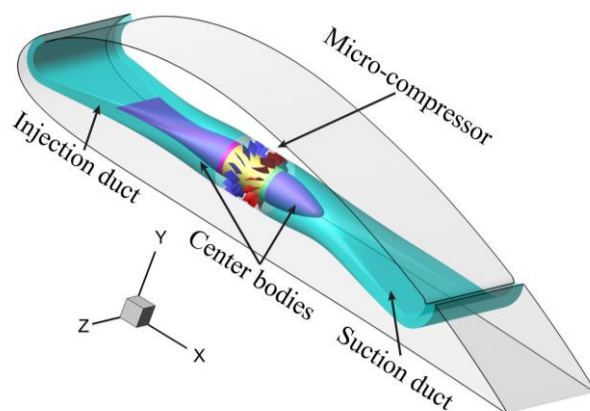


Fig 4. Schematic view of the co-flow jet actuator on the blade section.

شکل ۴. شماتیکی از اعمال کو فلوجت بر مقطع آیرودینامیکی.^[۱۹]

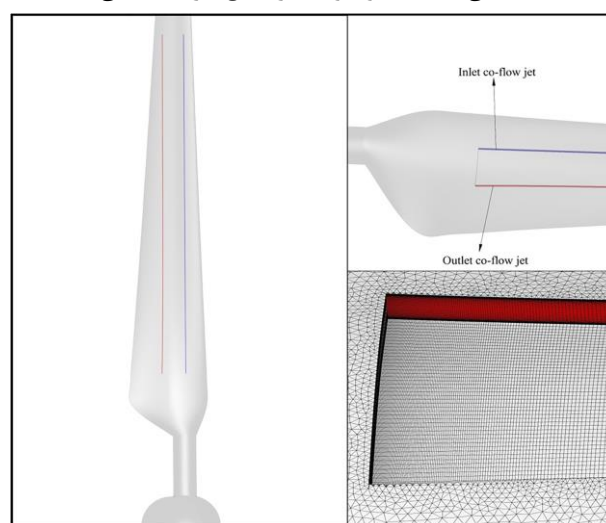


Fig 5. Blade equipped with co-flow jet actuator at left, boundary condition of the actuator at top right & the augmented mesh with the actuator at bottom right.

شکل ۵. شکل سمت چپ (هندسه‌ی پره‌ی توربین باد مجهز به عملگر کو فلوجت)، شکل سمت راست بالا (شرایط مرزی ورودی و خروجی عملگر کو فلوجت)، و شکل سمت راست پایین (شبکه‌بندی پره‌ی مجهز به عملگر کو فلوجت).

در پژوهش حاضر، هندسه‌ی پره‌ی توربین بادی مجهز به سیستم کنترل جریان دمشی- مکشی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. به منظور تولید جت مماسی مؤثر در سطح پره، دو شیار با فرورفتگی کم در ساختار آیرودینامیکی پره تعبیه شده‌اند؛ که از موقعیت ۲۸٪ طول وتر پره آغاز می‌شوند و تا حدود ۹۵٪ طول وتر امتداد می‌یابند. طراحی شیارهای مذکور به گونه‌ای است که با کمترین اختلال در پروفیل آیرودینامیکی، جریان هوا را بهینه‌سازی و از جدایش جریان جلوگیری می‌کند. همچنین، شرایط مرزی و شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود. برای شبیه‌سازی، در ورودی از شرط مرزی دمش و در خروجی از شرط مرزی مکش استفاده شده است، تا عملکرد سیستم کنترل جریان فعال دقیقاً بررسی شود.

¹ Ansys Fluent R2 2021

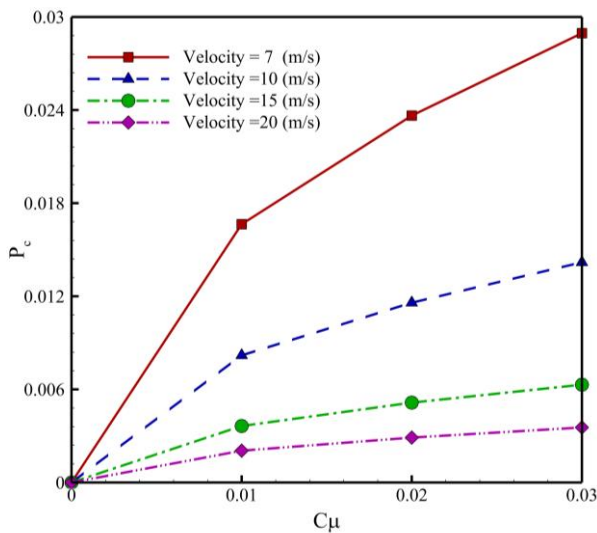


Fig 9. The actuator consumed power coefficient versus jet flow coefficient for velocities of 7, 10, 15 & 20 m/s.

شکل ۹. نمودار ضریب توان مصرفی عملکرد دمشی- مکشی بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه.

سیستم شود. بنابراین، بهینه‌سازی ضریب جریان جت باید با در نظر گرفتن تعادل میان افزایش گشتاور و محدودیت‌های عملیاتی انجام شود، تا عملکرد کلی توربین به میزان بیشینه برسد.

۳.۶. میزان بهبود ضریب توان

در شکل ۹، نمودار ضریب توان عملکرد دمشی- مکشی بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف استخراج شده است. در سرعت ۷ متر بر ثانیه، نمودار نشان می‌دهد که حتی مقادیر کمی از ضریب جریان جت منجر به افزایش چشمگیر توان مصرفی شده است. این موضوع برای طراحی توربین‌های بادی در مناطقی با بادهای ضعیف‌تر مهم است، زیرا نشان می‌دهد که استفاده از عملکرد دمشی- مکشی در این شرایط به مصرف انرژی بیشتری نیاز دارد. در سرعت‌های بالاتر (۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه)، مصرف توان به‌طور مداوم با افزایش ضریب جریان جت افزایش می‌یابد. اما در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، افزایش مصرف توان کمتر محسوس است، که نشان می‌دهد عملکرد دمشی- مکشی در این شرایط بهینه‌تر عمل می‌کند و نیازی به مصرف انرژی اضافی به همان اندازه نیست.

در شکل ۱۰، نمودار ضریب توان روتور توربین باد بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف استخراج و توان توربین باد با افزایش ضریب جریان جت افزایش یافته است. این امر به دلیل افزایش نیروی برآ بر روی پره‌ها و در نتیجه افزایش گشتاور اعمال‌شده به روتور است. با این حال، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های بالاتر باد (۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه)، افزایش ضریب جریان جت تأثیر کمتری در ضریب توان نسبت به سرعت‌های پایین‌تر داشته است. این کاهش تأثیر ممکن است به دلیل رسیدن پره‌ها به زاویه‌ی حمله‌ی بهینه و کاهش کارایی آیرودینامیکی آن‌ها در سرعت‌های بالاتر باشد. همچنین، ممکن است به دلیل محدودیت‌های مکانیکی توربین در تولید توان بیشتر باشد.

در شکل ۱۱، نمودار ضریب توان خالص توربین بادی نشان می‌دهد که با افزایش ضریب جریان جت، توان خالص تولیدی توربین در سرعت‌های بالاتر (۱۰، ۱۵،

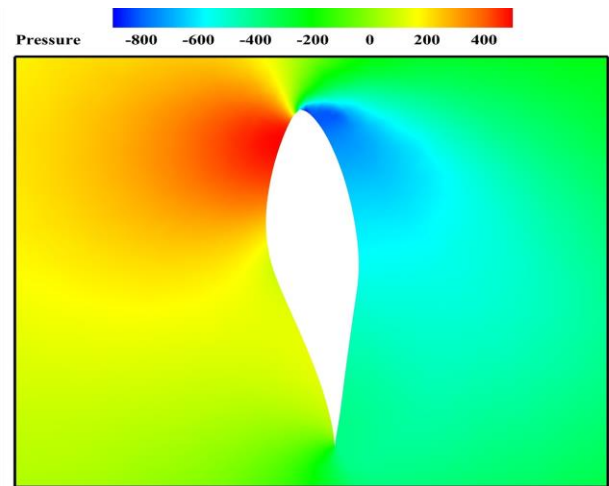


Fig 7. Pressure contour in the 60% of the blade for flow velocity 20 m/s with actuator off.

شکل ۷. کانتور فشار در مقطع ۶۰٪ توربین بادی بدون عملکرد دمشی- مکشی و در سرعت جریان آزاد ۲۰ متر بر ثانیه.

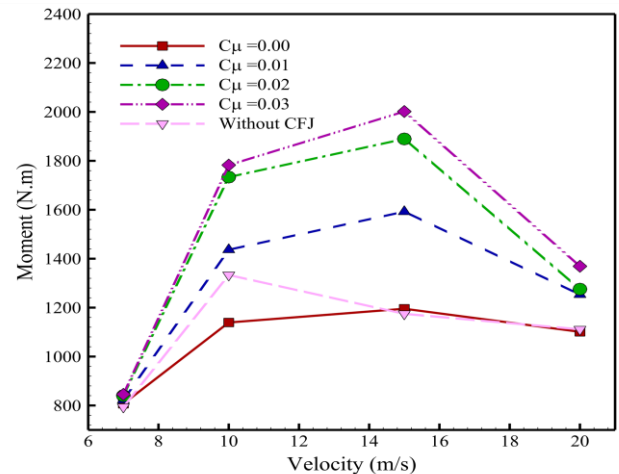


Fig 8. Aerodynamic moment versus the wind velocity for jet flow coefficients of 0.01, 0.02 & 0.03.

شکل ۸. نمودار گشتاور توربین بادی بر حسب سرعت در ضریب جریان جت‌های ۰/۰۰، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ و حالت پره‌ی بدون عملکرد دمشی- مکشی.

۲.۶. تغییرات گشتاور آیرودینامیکی

در شکل ۸، نمودار گشتاور توربین بادی بر حسب سرعت مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، در همه‌ی حالت‌های بررسی‌شده، افزایش سرعت باد منجر به افزایش گشتاور تا یک نقطه‌ی بیشینه می‌شود و سپس با افزایش بیشتر سرعت باد، گشتاور کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به دلیل آثار جریان جداشده و کاهش راندمان آیرودینامیکی باشد. توربین بادی مجهز به عملکرد دمشی- مکشی در ضریب جریان جت ۰.۳۰ بالاترین میزان گشتاور را تولید کرده است. با افزایش ضریب جریان جت، توان مصرفی عملکرد دمشی- مکشی نیز افزایش یافته است. هر چند افزایش ضریب جریان جت می‌تواند به بهبود گشتاور آیرودینامیکی و توان خروجی توربین منجر شود، اما همواره رابطه‌ی اخیر خطی و پایدار نیست. افزایش بیش از حد ضریب جریان جت، به دلیل محدودیت‌های توان مصرفی عملکرد و ظرفیت تجهیزات، ممکن است منجر به کاهش توان خالص تولیدی

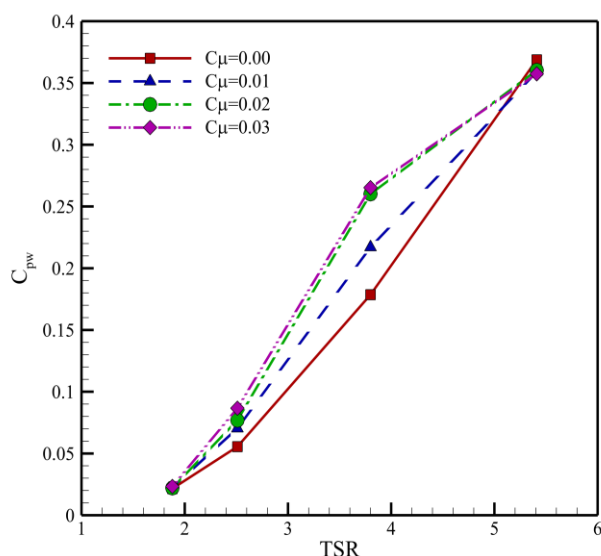


Fig 13. The net power coefficient of the actuator equipped wind turbine versus tip speed ratio for various jet flow coefficients.

شکل ۱۳. نمودار ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره برای توربین بادی با عملکرد دمشی - مکشی در ضریب جریان جت‌های مختلف.

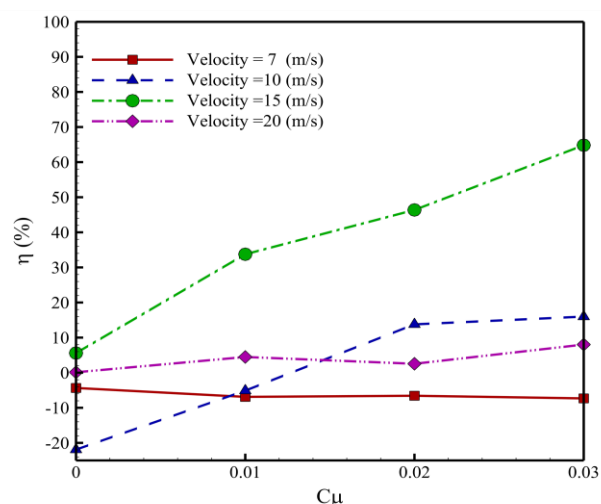


Fig 12. The percentage of the net power improvement in the actuator eqquped wind turbine versus jet flow coefficient for velocities of 7, 10, 15 & 20 m/s.

شکل ۱۲. نمودار درصد بهبود توان خالص توربین بادی مجهز به عملکرد دمشی - مکشی نسبت به توربین بادی بدون عملکرد بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ متر بر ثانیه.

افزایش ضریب جریان جت، عملکرد آیرودینامیکی توربین باد افزایش داده است.

در شکل ۱۳، ضریب توان توربین بادی مجهز به سیستم عملکرد دمشی - مکشی در ضریب‌های مختلف جریان جت و نسبت‌های مختلف سرعت نوک پره مشاهده می‌شود. در نسبت‌های پایین سرعت نوک پره، سیستم عملکرد دمشی - مکشی به‌طور چشمگیری ضریب توان را بهبود بخشیده است. این بهبود ناشی از تقویت چسبندگی جریان به سطح پره‌ها و کاهش جدایش جریان است، که منجر به

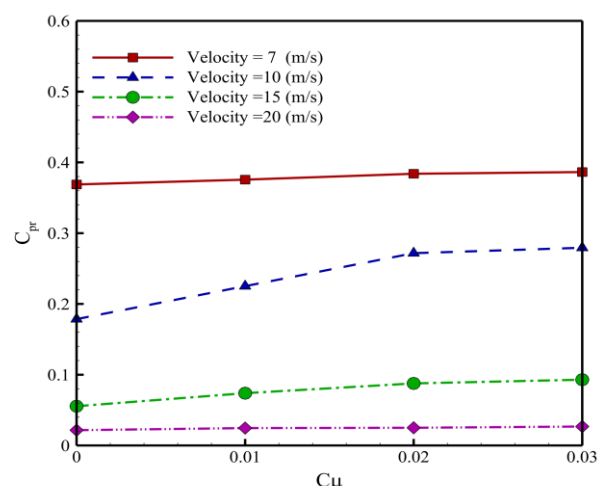


Fig 10. The wind turbine power coefficient versus jet flow coefficient for velocities of 7, 10, 15 & 20 m/s.

شکل ۱۰. نمودار ضریب توان توربین بادی بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ متر بر ثانیه.

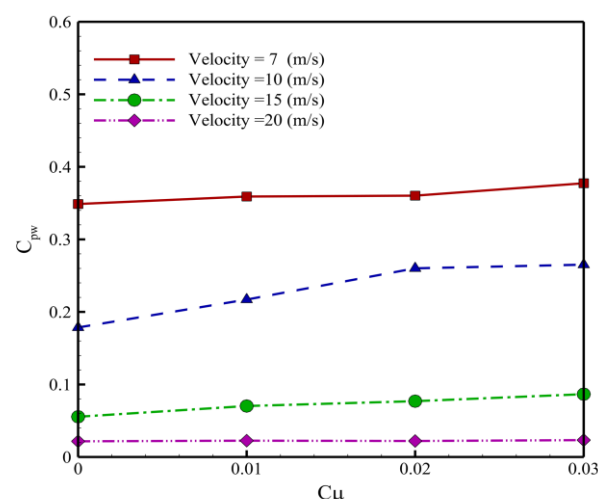


Fig 11. The net produced power coefficient versus jet flow coefficient for velocities of 7, 10, 15 & 20 m/s.

شکل ۱۱. نمودار ضریب توان خالص توربین بادی بر حسب ضریب جریان جت‌های مختلف و در سرعت‌های ۷، ۱۰، ۱۵، و ۲۰ متر بر ثانیه.

و ۲۰ متر بر ثانیه) به‌طور پیوسته افزایش یافته است. با این حال، در سرعت ۷ متر بر ثانیه، توان خالص کاهش یافته است، که می‌تواند ناشی از افزایش توان مصرفی سیستم عملکرد دمشی - مکشی باشد. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از عملکرد دمشی - مکشی در سرعت‌های پایین، تأثیر منفی در توان خالص دارد و بیشتر مناسب سرعت‌های بالاتر است.

در شکل ۱۲، نمودار درصد بهبود توان خالص درصد بهبود توان خالص توربین بادی، که مجهز به کو فلو جت است، نسبت به حالت معمول توربین باد مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در سرعت ۷ متر بر ثانیه تأثیر مثبت نداشته است. در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، بیشترین بهبود مشاهده می‌شود، به‌طوری که با افزایش ضریب جریان جت به ۰.۳۰ در حدود ۶۵٪، توربین بادی بهبود داشته و میزان توان بیشتری را از باد استخراج کرده است. در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه نیز با

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر عملکرد دمشی-مکشی در عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی در چهار سرعت ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در سرعت ۷ متر بر ثانیه، استفاده از عملکرد دمشی-مکشی عملکرد توربین را بهبود نمی‌بخشد و در ضریب جریان جت‌های مختلف، عملکرد توربین کاهش یافته یا بهبود بسیار کمی مشاهده شده است. این امر نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین‌تر، عملکرد دمشی-مکشی تأثیر کمتری در جریان و جلوگیری از واماندگی دارد. با افزایش سرعت به ۱۰ متر بر ثانیه، عملکرد توربین بهبود قابل توجهی داشته است، به‌ویژه در ضریب جریان جت ۰.۲۰ و ۰.۳۰ که به ترتیب ۱۳ و ۱۵ درصد عملکرد توربین افزایش یافته است. در سرعت‌های متوسط، عملکرد دمشی-مکشی با افزایش ضریب جریان جت تأثیر مثبتی در افزایش توان خروجی و کاهش افت ناشی از واماندگی دارد. در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، نتایج به وضوح نشان می‌دهند که کو فلوجت با ضریب جریان جت ۰.۱۰ توانسته است عملکرد توربین را تا ۳۳٪ بهبود دهد و با افزایش ضریب جریان جت، این میزان نیز بیشتر شده است؛ که نشانگر تأثیر قوی عملکرد دمشی-مکشی در جلوگیری از واماندگی دینامیکی و بهبود عملکرد در سرعت‌های بالاست. در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، نتایج نشان می‌دهند که ضریب جریان جت ۰.۳۰، بهبود ۸ درصدی در عملکرد توربین ایجاد شده است. تحلیل‌های اخیر نشان می‌دهند که در سرعت‌های بالاتر، کو فلوجت به‌ویژه در ضریب‌های جریان جت بالا، تأثیر مثبتی در توان توربین دارد و می‌تواند به تأخیر واماندگی و افزایش پایداری عملکرد کمک کند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
A_{ref}	مساحت دیسک چرخان (m^2)
C	طول وتر ایرفویل (m)
U	سرعت جریان آزاد (ms^{-1})
$\dot{m}$	دبی جریان (kgs^{-1})
H_{t2}	آنتالپی کل
P	توان خالص توربین بادی
C_{pw}	ضریب توان خالص
C_{pr}	ضریب توان روتور توربین بادی
p_w	توان خروجی روتور توربین باد
C_μ	ضریب جریان جت
V_j	سرعت نسبی جریان تزریق شده
g_x, g_y, g_z	ترم‌های بردار نیروی گرانشی
P	ترم تولید نیروی آشفته‌گی

علائم یونانی

P	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
k	انرژی جنبشی اغتشاشی
kl	انرژی جنبشی آرام
ω	معکوس مقیاس زمانی اغتشاشات
τ_{ij}	تنش رینولدز
S_{ij}	ترم نرخ کرنش

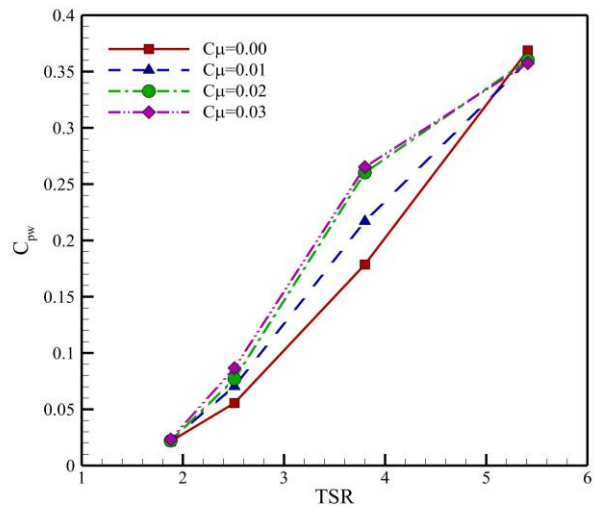


Fig. 13. The net power coefficient of the actuator equipped wind turbine versus tip speed ratio for various jet flow coefficients.

شکل ۱۳. نمودار ضریب توان بر حسب سرعت نوک پره برای توربین بادی با عملکرد دمشی-مکشی در ضریب جریان جت‌های مختلف.

جدول ۲. میزان افزایش توان بر حسب نسبت سرعت‌های مختلف.

Table 2. The power improvement index in terms of TSR.

Percentage improvement in power	Net power coefficient	Jet flow coefficient	Tip Speed Ratio
-4.3	0.368	0.00	5.41
-6.8	0.359	0.01	
-6.5	0.360	0.02	
-7.3	0.357	0.03	
-21.90	0.178	0.00	3.8
-5.09	0.216	0.01	
13.77	0.260	0.02	
15.97	0.265	0.03	
5.60	0.055	0.00	2.51
33.74	0.070	0.01	
46.37	0.076	0.02	
64.83	0.086	0.03	
0.11	0.021	0.00	1.88
4.47	0.022	0.01	
7.54	0.022	0.02	
8.01	0.023	0.03	

افزایش نیروی برآ و توان تولیدی توربین می‌شود. این ویژگی در شرایط باد با سرعت‌های پایین و متوسط بهینه است. با افزایش نسبت سرعت نوک پره، تأثیر سیستم عملکرد دمشی-مکشی کاهش می‌یابد. در این شرایط، پره‌ها به زاویه‌ی حمله‌ی بهینه نزدیک و تأثیر جت‌های ثانویه در عملکرد آیرودینامیکی کمتر می‌شود. همچنین، سرعت بالاتر نوک پره باعث ایجاد تنش‌های ساختاری بیشتر می‌شود، که می‌تواند به کاهش کارایی و عمر توربین منجر شود. در جدول ۲، میزان افزایش توان در نسبت سرعت‌های مختلف ارائه شده است.

منابع - References

1. Zha, G. and Carroll, B., 2005. High-Performance Airfoil Using Coflow Jet Flow Control. *AIAA journal*, 45 (8), DOI:10.2514/1.20926.
2. Car, D., Kuprowicz, N. J. and Estevadeordal, J., 2004. Stator diffusion enhancement using a recirculating co-flowing steady jet. *ASME Turbo Expo 2004 conference (GT-2004-5386)*, DOI:10.1115/GT2004-53086.
3. Zha, G. and Paxton, C., 2004. A novel airfoil circulation augment flow control method using co-flow jet. *Journal of Aircraft*, 41 (4), pp. 926-934. <https://doi.org/10.2514/6.2004-2208>.
4. Zha, G., Paxton, C. D. and Conley, C. A., 2006. Effect of injection slot size on the performance of coflow jet airfoil. *Journal of Aircraft*, 43 (1), pp. 120-126. <https://doi.org/10.2514/1.16999>.
5. Mashud, M. and Hossain, F., 2010. Experimental study of flow separation control of an airfoil by suction and injection. *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*.
6. Wang, B. and Zha, G., 2011. Detached-eddy simulation of a coflow jet airfoil at high angle of attack. *Journal of Aircraft*, 48 (4), pp. 1290-1296. <https://doi.org/10.2514/1.C000282>.
7. Lefebvre, A. and Zha, G., 2013. Numerical simulation of pitching airfoil performance enhancement using co-flow jet flow control. *AIAA Journal*, 51 (6), pp. 1343-1351. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2517>.
8. Xu, H., Qiao, C. and Ye, Z., 2016. Dynamic stall control on the wind turbine airfoil via a co-flow jet. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 156, pp. 44-51. <https://doi.org/10.3390/en9060429>.
9. Lefebvre, A., Dano, B., Bartow, W. and Fronzo, M., 2016. Performance and energy expenditure of coflow jet airfoil with variation of Mach number. *AIAA Journal*, 54 (8), pp. 2338-2348. <https://doi.org/10.2514/1.C033113>.
10. Yang, Y. and Zha, G., 2017. Super lift coefficient of active flow control airfoil: What is the limit?. *AIAA Journal*, 55 (11), pp. 3781-3791. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1693>.
11. Zhang, J., Xu, K., Yang, Y. and Ren, Y., 2018. Aircraft control surfaces using co-flow jet active flow control airfoil. *Journal of Aircraft*, 55 (2), pp. 482-491. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3067>.
12. Yang, Y. and Zha, G., 2019. Conceptual design of a co-flow jet hybrid electric regional airliner. *AIAA Journal*, 57 (3), pp. 1230-1240. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1584>.
13. Liu, J., Chen, R., Qiu, R. and Zhang, W., 2020. Study on dynamic stall control of rotor airfoil based on coflow jet. *Aerospace Science and Technology*, 96, <https://doi.org/10.1155/2020/8845924>.
14. Khoshnevis, A. B., Yazdani, S. and Salimipour, E., 2020. Effects of CFJ flow control on aerodynamic performance of symmetric NACA airfoils. *Journal of Fluids Engineering*, 142 (2). <https://doi.org/10.1080/14685248.2020.1845911>.
15. Zhang, S., Yang, X., and Song, B., 2021. Numerical investigation of performance enhancement of the S809 airfoil and Phase VI wind turbine blade using co-flow jet technology. *Renewable Energy*, 163, pp. 416-428. <https://doi.org/10.3390/en14216933>.
16. Ma, C. Y. and Xu, H. Y., 2022. Parameter-based design and analysis of wind turbine airfoils with conformal slot co-flow jet. *Journal of Fluids Engineering*, 144 (2). <https://doi.org/10.1115/1.4051243>.
17. Hand, M., Simms, D., Fingersh, L. and Jager, D., 2001. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns. *National Renewable Energy Laboratory technical report*, NREL/TP-500-29955.
18. Walters, D. K. and Leylek, J. H., 2004. A new model for boundary layer transition using a single point RANS approach. *Journal of Turbomachinery*, 126, pp. 193-202. <https://doi.org/10.1115/1.1622709>.
19. Ren, Y. and Xu, K., 2022. Wind turbine efficiency enhancement by coflow jet airfoil. *AIAA SCITECH 2022 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2022-1787>.
20. Lee, S. G., Park, S. J. and Lee, K. S., 2012. Performance prediction of NREL phase VI blade adopting blunt trailing edge airfoil. *Renewable Energy*, 44, pp. 116-123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.007>.