



Research Article

Numerical Study of the Effect of Flow Control Using Plasma Actuator on the Aerodynamic Performance of a VAWT

Saeed Karimian Aliabadi* and Seyed Javad Gaskarinezhad

Dept. of Mechanical Engineering, Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran.

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

Article Info

Article history:

Received: 24 December 2024

Revised: 1 June 2025

Accepted: 20 July 2025

Keywords:

Wind energy,
wind turbine,
active flow control,
plasma actuator,
2D numerical method.

Abstract

In this study, a numerical approach is employed to examine the effects of active flow control using the SDBD (Surface Dielectric Barrier Discharge) plasma actuator model on the aerodynamic performance of a Darrieus vertical-axis wind turbine. The unsteady, pressure-based Navier-Stokes equations are solved in 2D computational domain, using the finite volume method. One of the common challenges for vertical-axis wind turbines is dynamic stall and flow separation. Therefore, before applying plasma control, the flow physics around the Darrieus wind turbine is analyzed, with a focus on the aerodynamic forces and torques affecting the instantaneous torque generated by the blades. Subsequently, plasma actuators are positioned at 3 distinct chord-wise locations on the airfoils, namely at 0.25, 0.5, and 0.75 chord lengths. The plasma dynamics are incorporated using user-defined functions (UDFs) according to the SDBD model. Results indicate that the 0.25 chord position yields the most improvement, increasing the overall power coefficient by up to 20%. Moreover, the plasma actuator mitigates dynamic stall, suppresses vortex formation, and enhances aerodynamic forces and torques. Overall, the primary effect of the plasma actuator is observed in the upstream flow region and during the blade's downward motion, which leads to improvements in local blade torque and output power.

Introduction

Many researchers are still studying and exploring wind turbine power enhancement using active or passive flow control schemes applied to rotor blades. Recently, researchers have addressed the improvement of vertical-axis wind turbine performance—whether of high or low stiffness—through flow separation control using plasma actuators, both experimentally and numerically. Most of these studies placed the plasma actuator near the leading edge, on the inner surface of the turbine blades. They have reported power enhancement in the range of 10-30 percent. Based on the work done, the study of the effect of plasma on the aerodynamic performance of wind turbine blades and the evaluation of the effectiveness of this actuator in controlling the flow during stall, still deserves further studies. The innovation of the present work is investigating the effect of the plasma actuator in a complete cycle of blade movement and more attention to the downward movement of the blade. The other contribution of this research is the simultaneous study of the qualitative and

quantitative characteristics of the flow. The study of vortices and changes in their pattern due to the plasma actuator, as well as the estimation of aerodynamic coefficients and performance parameters of the wind turbine blade, are being discussed here. Since the phenomena of dynamic stall is extremely complex and may encounter measurement difficulties in the wind tunnel tests, therefore, the numerical simulation can be assumed to be more useful for studying this issue as well as capturing significant physics in flow field around the wind turbine.

Methodology

The time-averaged Navier-Stokes equations, are selected in the numerical study by 2D incompressible unsteady flow assumptions. The domain is meshed by combination of regular and irregular structures, as shown in Figures (3) and (4). The entire domain is a rectangle with a length of 30 times the rotor diameter and a width of 20 times the rotor diameter. The geometry in the upstream area is 10 times the turbine

To Cite this article:

Karimian Aliabadi, S. and Gaskarinezhad, S.J. 2025. Numerical study of the effect of flow control using plasma actuator on the aerodynamic performance of a vawt, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(2), 63-75.

<https://doi.org/10.24200/ij40.2025.67068.1739>

diameter, in the downstream area 20 times the diameter, and the distance between the upper and lower walls is 20 times the turbine diameter. The computational domain is divided into two fixed and rotating parts, and the airfoils are drawn in the rotating part. In Figure (5), the mesh with a size of approximately 550K cells, is shown. The y-plus on the surface is about 1. For mesh independency, 3 coarse, medium and fine meshes with the number of cells of approximately 300K, 550K and 1M for the velocity profile averaged at a distance of 3 times the radius from the shaft, are compared and shown in Figure (6). Plasma actuators consist of two electrodes, one exposed to air and the other enclosed by a dielectric material. Figure (9) shows a schematic of a typical plasma actuator. An AC voltage is applied to the electrodes, which at high voltages ionizes the air on the enclosed electrode. The ionized air particles are accelerated by the electric field and exert a force on the neutral air near the actuator, which ultimately leads to the generation of an induced current. In the current study, the volume force associated with plasma formation is extracted from the phenomenological model proposed by Shai et al. This model offers a good balance between simplicity and accuracy, making it suitable for flow control studies based on plasma actuators [22]. Shay et al. [23] assumed that the plasma electric field intensity is linearly distributed in a triangular region downstream of the uncoated electrode as shown in Figure (10).

Results and Discussion

For the validation of the Darrieus vertical axis wind turbine, the results of the present study have been compared with the experimental and numerical data. After validation, the plasma actuator was placed at 3 different positions, respectively 0.25, 0.5 and 0.75 chord on the blade surface. The equations were solved in the plasma regions at these positions. The actuators were placed on the inner surface of the blade. The overall power coefficient of the turbine without the presence of the

plasma actuator was 0.3. While after the effect of the plasma actuator at the locations of 0.25, 0.5 and 0.75 chord, the power coefficient was changed to 0.36, 0.32 and 0.31 respectively, which indicates an increase of about 20% in the power factor in the plasma of the 0.25 chord region. To evaluate the effects of plasma on the blade torque output, Figure (15) compares the results of 3 actuator positions. It is clear that torque improvement has been greater in the 0.25 chord region and reaches 20% progress. Therefore, the 0.25 chord plasma actuator was selected in the following. The plasma actuator is able to control the dynamic stall, which ultimately increases the torque output of the blades. As shown in Figure (18), the plasma actuator located at the position of 0.25 of the chord, has reduced the drag force, which is due to the elimination or delay in the separation of the vortices. According to Figure (19), the plasma actuator caused the coupling torque in the blade down-stroke to be increased. However, in downstream region of the flow, as revealed, the plasma has revealed a negative effect on the coupling torque coefficient. Overall, the area change in torque-angle curve was positive.

Conclusion

Plasma actuators are considered at 3 different positions on the blades towards the turbine interior. The phenomenon of dynamic stall and the formation of vortices that affect the physics of wind turbine flow was investigated. As expected, by controlling stall and improving aerodynamic coefficients with the help of plasma, the turbine performance can be improved. The 0.25 chord was shown to be the best situation, leading to 20% power enhancement. Plasma actuators were shown to be most effective in the down-stroke motion of the blade. It was not found any significant effect on the upstroke motion of the blade except for the small flow angles.

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 کنترل جریان به شیوه‌ی عملگر پلاسما در عملکرد آئرو دینامیکی یک توربین باد محور عمودی

سعید کریمیان علی‌آبادی* و سیدجواد گسکری نژاد

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، گروه هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

چکیده

با افزایش ظرفیت انرژی باد و رشد تقاضای انرژی، به‌کارگیری روش‌های کنترل جریان برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی ضرورت یافته است. در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر محرک پلاسما به‌عنوان روش کنترل جریان فعال در عملکرد آئرو دینامیکی توربین بادی محور عمودی داریوس به‌صورت عددی بررسی شده است. معادله‌های ناپایای ناویر-استوکس در چارچوب حجم محدود و مدل فشار مینا حل شده‌اند. ابتدا، فیزیک جریان و گشتاورهای آئرو دینامیکی پیش از اعمال پلاسما تحلیل شده‌اند. سپس سه موقعیت طولی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ وتر برای نصب محرک پلاسما در نظر گرفته شده‌اند. برای پیاده‌سازی عملگر پلاسما با استفاده از مدل شای، رفتار دینامیکی عملگر به‌صورت یک تابع معین در کد عددی توصیف شده است. نتایج نشان داده است که موقعیت ۰/۲۵ وتر برای اعمال پلاسما، از بین انتخاب‌های دیگر مؤثرتر بوده و سبب بهبود ضریب توان توربین تا حدود ۲۰٪ شده است. همچنین، بر مبنای الگوی جریان می‌توان دریافت که اعمال پلاسما با کاهش آثار واماندگی دینامیکی و با افزایش زاویه‌ی رخداد واماندگی، ضمن به تأخیر افتادن پدیده‌ی اخیر، با حذف گردابه‌های ناخواسته، موجب بهبود پروفیل نیرو و گشتاور آئرو دینامیکی و در نهایت، سبب افزایش توان خروجی توربین شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

واژگان کلیدی:

انرژی باد،

توربین باد،

کنترل فعال جریان،

عملگر پلاسما،

حل عددی ۲D.

۱. مقدمه

تخلیه‌ی بار دی‌الکتریک (DBD)^۱ یک فناوری کنترل جریان فعال است، که در دهه‌ی ۱۹۶۰ توسعه یافته است.^[۱] عملگر مذکور، دستگاهی برای تولید پلاسماست، که از دو الکترود، یک دی‌الکتریک میان الکترودها، و یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا تشکیل شده است. فناوری DBD، عملکرد بسیار خوبی در کنترل جدایش لایه‌ی مرزی،^[۲] کنترل گردابه‌های واماندگی دینامیکی،^[۳] و موارد مشابه،^[۴] از خود نشان داده است. به توربین‌های بادی محور عمودی به‌دلیل طراحی ساده و توانایی عملکرد در تمامی جهت‌های باد، به‌ویژه در مناطق شهری با الگوهای باد نامنظم، توجه بسیاری شده است.^[۵] آن‌ها در دو نوع اصلی ساوینیوس^۲ و داریوس^۳ طراحی می‌شوند. توربین‌های داریوس بر مبنای نیروی برآ عمل می‌کنند، که با بهره‌گیری از قابلیت مذکور، راندمان بالاتری تولید می‌کنند؛ اما مشکلی که همواره با آن همراه هستند، واماندگی دینامیکی و جدایش جریان است.^[۶]

پدیده‌ی واماندگی دینامیکی را می‌توان از طریق کنترل زاویه‌ی پیچ پره و

کنترل جدایش لایه‌ی مرزی کاهش داد.^[۷] واماندگی دینامیکی، یک ویژگی ذاتی توربین‌های بادی محور عمودی است، زیرا زاویه‌ی حمله و سرعت نسبی پره‌ها در هر لحظه به‌شدت تغییر می‌کند. این امر منجر به جدایش جریان و تشکیل یک گردابه‌ی لبه حمله در سمت مکش می‌شود و پدیده‌ی واماندگی دینامیکی را به همراه دارد،^[۸] که باعث ارتعاش‌های سازه‌ای، آلودگی صوتی، و کاهش راندمان در توربین‌های بادی محور عمودی می‌شود.^[۹] بنابراین، با کنترل پدیده‌ی واماندگی دینامیکی می‌توان عملکرد آئرو دینامیکی توربین‌های محور عمودی را بهبود بخشید. با اینکه به روش‌های کنترل جریان برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی بسیار توجه شده است، اما مطالعات کمی به‌طور خاص بر روی پدیده‌ی واماندگی دینامیکی در توربین‌های محور عمودی متمرکز شده‌اند.^[۱۰] از بین روش‌های کنترل جریان، که به فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند، پلاسما یکی از روش‌های کنترل جریان فعال است، که از ویژگی‌های آن می‌توان به سادگی، پاسخ سریع، و سهولت در کاربرد اشاره کرد.^[۱۱] مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی کنترل واماندگی دینامیکی توسط پلاسما در ایرفویل‌های نوسانی،^[۱۲] یا صفحات تخت انجام شده است؛ اما این محرک در توربین‌های

³ Darrieus¹ Dielectric Barrier Discharge² Savonius

می‌یابد و سپس به توان الکتریکی تبدیل می‌شود، که در تولید انرژی برق مطرح است. به‌طور کلی، گشتاور لحظه‌ای (T) و توان تولیدی (P)، دو پارامتر آئرو دینامیکی مهم در عملکرد توربین بادی هستند و به کمک روابط ۱ و ۲، بی‌بعد می‌شوند:^[۱۸]

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho V^3 DH} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{0.5 \rho V^2 RDH} \quad (2)$$

که در آن‌ها، ρ چگالی هوا، V سرعت باد جریان آزاد، R شعاع توربین، D قطر توربین، و H ارتفاع پره‌های توربین هستند، که در حل عددی برابر ۱ متر در نظر گرفته می‌شود. یکی از مفاهیم مهم در طراحی و عملکرد توربین بادی، نسبت سرعت نوک پره است، که به‌صورت نسبت سرعت در نوک پره به سرعت باد تعریف می‌شود و مقادیر آن بستگی به طراحی و ابعاد توربین دارد و در شرایط و مکان‌های مختلف برای بهینه‌سازی عملکرد توربین باد استفاده می‌شود. ضریب اخیر همچنین به توان خروجی توربین بستگی دارد و مطابق رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:^[۱۹]

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

که در آن، ω سرعت دورانی توربین و λ نسبت سرعت نوک پره هستند. یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در مبانی آئرو دینامیک توربین‌ها، ضریب صلبیت توربین است، که در واقع میزان هم‌پوشانی از نظر هندسی است و مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود، که در آن، C طول وتر ایرفویل‌ها و B تعداد پره‌های توربین هستند:^[۱۹]

$$\sigma = \frac{BC}{2\pi R} \quad (4)$$

در شکل ۱، شماتیکی از مؤلفه‌های سرعت و نیروهای آئرو دینامیکی وارد بر مقطع توربین باد محور عمودی مشاهده می‌شود، که در آن، θ زاویه‌ی پره‌های توربین، W سرعت بادی که به ایرفویل می‌خورد (رابطه‌ی ۵) و α زاویه‌ی حمله

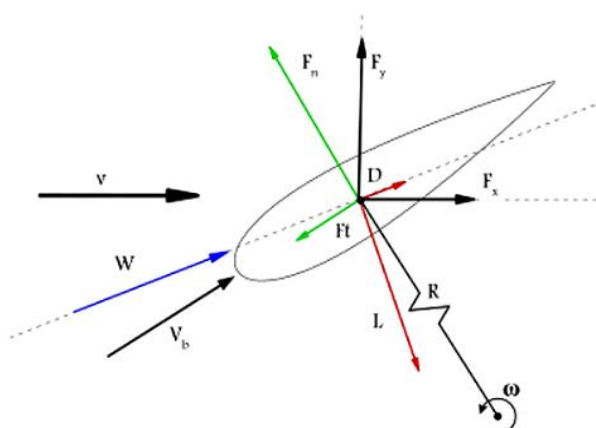


Fig.1. Schematic of velocity components and forces acting on a wind turbine blade section.

شکل ۱. شماتیکی از مؤلفه‌های سرعت و نیروهای وارد بر مقطع توربین بادی.

محور عمودی داریوس به‌صورت محدود استفاده شده است. لوما و همکاران^۴ و همکاران^[۱۳]، (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ی عددی به بررسی واماندگی دینامیکی در توربین محور عمودی پرداخته و دریافته‌اند که واماندگی در بازه‌ی زاویه‌ی ۶۰ تا ۸۰ درجه رخ می‌دهد و عملگر پلاسما با کنترل واماندگی اخیر توانسته است توان خروجی توربین را تا ۳۵٪ بهبود بخشد. همچنین بهترین عملکرد پلاسما در بازه‌ی زاویه‌ی ۶۰ تا ۱۲۰ درجه به‌دست آمده است. زارع چاووشی و ابراهیمی^[۱۴]، (۲۰۲۲)، در بررسی واماندگی دینامیکی و کنترل آن به کمک محرک پلاسمای مدل سوزان و هوانگ^۵ در یک توربین باد محور عمودی داریوس، محرک‌های پلاسما را به سمت داخل توربین، بیرون توربین، و دو سمت توربین قرار داده و دریافته‌اند که پلاسمای سطح داخلی تا ۱۰٪ می‌تواند توان خروجی توربین را بهبود بخشد و همچنین محرک‌های پلاسما توانسته‌اند جدایش جریان و واماندگی توربین را در طول چرخش پره کنترل کنند.

گرینبلت^۶ و همکاران^[۱۵]، (۲۰۱۲)، در بررسی بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی با ضریب صلبیت بالا از طریق کنترل جدایش جریان توسط محرک‌های پلاسما به روش تجربی، محرک پلاسما را در نزدیکی لبه‌ی حمله و به سمت داخل توربین قرار داده و در نهایت توانسته‌اند تا ۳۸٪ توان خروجی توربین را بهبود بخشند. ایشان در مطالعه‌ی دیگری^[۱۶]، (۲۰۱۴)، به کمک روش تصویربرداری ذرات (PIV)^۷ به بررسی فیزیک جریان و پدیده‌ی واماندگی دینامیکی اطراف پره‌ها پرداخته و نشان داده‌اند که با اعمال پلاسما می‌توان اندازه‌ی گردابه‌ها و آثار واماندگی دینامیکی را کاهش داد، که در نهایت منجر به بهبود توان خروجی توربین و کاهش نوسان‌ها می‌شود. گرینبلت و همکاران^[۱۶]، (۲۰۱۶)، در آزمایش دیگری با استفاده از یک سیستم کنترلی پیش رو^۸، که بر روی توربین باد داریوس نصب کرده بودند، توانستند محرک پلاسما را در زمان و زوایای پره‌ی خاص روشن و خاموش کنند، تا در مصرف برق صرفه‌جویی شود و همچنین جدایش جریان و آثار واماندگی دینامیکی را هم در سمت داخلی توربین و هم در سمت خارجی توربین کنترل کنند.^[۱۷] براساس کارهای انجام‌شده، همچنان مطالعه‌ی اثر پلاسما در عملکرد آئرو دینامیکی پره‌ی توربین بادی و ارزیابی میزان اثربخشی عملگر مذکور در کنترل جریان به هنگام واماندگی، جای مطالعات بیشتر دارد. نوآوری پژوهش حاضر، بررسی تأثیر عملگر پلاسما در یک سیکل کامل حرکت پره و توجه دقیق‌تر به حرکت رو به پایین پره است. بخش دیگری از نوآوری پژوهش حاضر، بررسی هم‌زمان مشخصه‌های کیفی و کمی جریان و نیز مطالعه‌ی گردابه‌ها و تغییرات الگوی آن‌ها در اثر عملگر پلاسما و نیز تخمین ضرایب آئرو دینامیکی و پارامترهای عملکردی پره‌ی توربین بادی بوده است. از آنجایی که پدیده‌ی واماندگی دینامیکی به‌شدت پیچیده و ناپایاست، شبیه‌سازی عددی برای بررسی این موضوع و ساختار جریان حول توربین باد می‌تواند مفیدتر باشد، چون ثبت فیزیک جریان در آزمایش‌های تونل باد دشوار است.

۲. مبانی و معادله‌ها

۲.۱. روابط حاکم بر توربین محور عمودی

گشتاور تولیدشده توسط پره‌های توربین بادی ناشی از تأثیر باد در آن‌هاست. وقتی باد به پره‌های توربین بادی برخورد می‌کند، نیرویی به پره وارد می‌شود، که باعث چرخش آن می‌شود. نیروی مذکور به شکل گشتاور به توربین انتقال

⁷ Particle Image Velocimetry

⁸ Feed-Forward

⁴ Ma

⁵ Suzen-Huang

⁶ Greenblatt

دو نیروی اخیر در واماندگی دینامیکی هم تأثیر بسزایی دارند، به‌طوری که وقتی سرعت باد و زاویه‌ی حمله افزایش پیدا کنند، باعث افت نیروی برآ و افزایش نیروی پسا می‌شوند، که در عملکرد توربین باد تأثیر منفی می‌گذارد. دو نیروی برآ و پسا را می‌توان به کمک روابط هندسی با نیروهای در جهت‌های محورهای مختصات طبق رابطه‌های ۹ و ۱۰ نشان داد:

$$F_L = F_x \sin(\theta - \alpha) - F_y \cos(\theta - \alpha) \quad (9)$$

$$F_D = F_x \cos(\theta - \alpha) + F_y \sin(\theta - \alpha) \quad (10)$$

پره‌های توربین بادی محور عمودی داریوس با توجه به موقعیتی که پره دارد، در هر لحظه گشتاور محلی تولید می‌کنند، که مقدار آن مطابق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$T = F_t R + M_{c.p.} \quad (11)$$

که در آن، T گشتاور لحظه‌ای، F_t نیروی مماسی که از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آید، و $M_{c.p.}$ گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به بدنه‌ی توربین است و در شکل ۱، با جهت مثبت فرض‌شده‌ی پادساعتگرد نشان داده شده است. گشتاور $M_{c.p.}$ در کنار گشتاوری که از نیروی مماسی به‌دست می‌آید، گشتاور تولیدی توسط پره‌ها را افزایش می‌دهد. اگر رابطه‌ی ۱۱ به نیروی برآ و پسا ربط داده شود، می‌توان گشتاور لحظه‌ای را مطابق با رابطه‌ی ۱۲ محاسبه کرد:

$$T = F_L R \sin(\alpha) - F_D R \cos(\alpha) + M_{c.p.} \quad (12)$$

که در آن، گشتاور محلی یا لحظه‌ای به ترتیب، شامل: نیروهای برآ و پسا، و گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به توربین است. پارامترهای آئرویدینامیکی معمولاً به‌صورت بی‌بعد در نوشتارها استفاده می‌شوند، که مزیت‌های مختلفی همانند ساده‌تر شدن مدل‌های محاسباتی، تحلیل و بررسی مدل‌های پیچیده با دقت بالا و امکان مقایسه‌ی نتایج با پژوهش‌های دیگر را دارد. نیروهای عمودی و مماسی، نیروهای برآ و پسا، و گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به بدنه‌ی توربین مطابق روابط ۱۳ الی ۱۷، بی‌بعد می‌شوند:

$$C_t = \frac{F_t}{0.5 \rho V^2 D H} \quad (13)$$

$$C_n = \frac{F_n}{0.5 \rho V^2 D H} \quad (14)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho W^2 C H} \quad (15)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho W^2 C H} \quad (16)$$

$$C_{M_{c.p.}} = \frac{M_{c.p.}}{0.5 \rho W^2 C^2 H} \quad (17)$$

که در آن‌ها، C_t ضریب نیروی مماسی، C_n ضریب نیروی عمودی، C_D ضریب نیروی پسا، C_L ضریب نیروی برآ، و $C_{M_{c.p.}}$ ضریب گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به توربین هستند.

۲.۲. روش حل عددی و معادله‌های جریان

در مطالعه‌ی حاضر از معادله‌های ناویراستوکس میانگین‌گیری‌شده‌ی زمانی رینولدز، که یک دیدگاه آماری است، استفاده شده است. معادله‌های مذکور با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و ناپایا، شامل معادله‌های پیوستگی و مومنتم در دو بُعد مطابق روابط ۱۸ و ۱۹ هستند:^[۲۰]

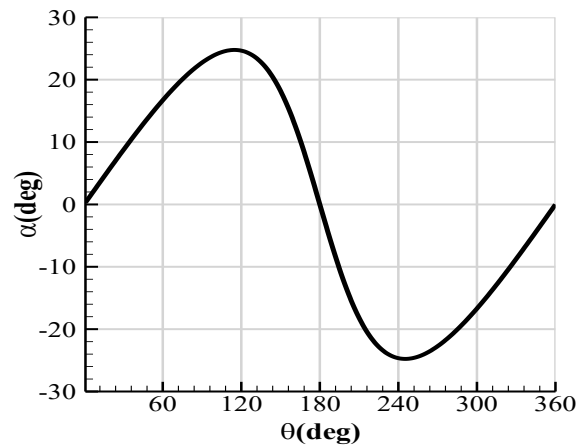


Fig. 2. Effective angle of attack as a function of blade azimuth angle for a tip speed ratio of 2.4.

شکل ۲. زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر بر حسب زاویه‌ی پره برای نسبت سرعت نوک پره ۲/۴.

(رابطه‌ی ۶) هستند. در توربین‌های محور عمودی داریوس، سرعت نسبی و زاویه‌ی حمله در طول چرخش پره‌ها ثابت نیستند و در زاویه‌هایی پره‌های مختلف دچار تغییر می‌شوند.

$$W = V \sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \cos \theta + 1} \quad (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \quad (6)$$

مطابق روابط ۵ و ۶، مشخص است که سرعت نسبی و زاویه‌ی حمله وابسته به زاویه‌ی پره و نسبت سرعت نوک پره هستند و با دو پارامتر مذکور تغییر می‌کنند. همچنین در شکل ۲، زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر بر حسب زاویه‌ی پره در نسبت سرعت نوک پره ۲/۴ مشخص شده است.

وقتی باد به پره‌های توربین باد محور عمودی برخورد می‌کند، نیروهای مماس و عمود بر پره‌ی توربین وارد می‌شوند، که در تولید انرژی برق نقش مهمی دارند. منشأ نیروهای عمودی که بر پره وارد می‌شوند، نیروی باد است، که به سمت محور چرخش توربین و عمود بر جریان باد است. نیروی باد باید توسط سازه‌ی توربین تحمل شود، چون از لحاظ پایداری و استحکام سازه‌ی موردتوجه است و توربین باید از دیدگاه مکانیکی طوری طراحی شود که بتواند نیروی عمودی مفید تولید کند. زمانی که توربین به‌سرعت دوران می‌کند، پره‌ها نیرویی در راستای جهت چرخش تولید می‌کنند، که مماس بر جهت جریان است و نیروی مماسی نام دارد. نیروی مماسی باعث انتقال انرژی باد به توربین و سپس به ژنراتور می‌شود، که باعث تولید گشتاور و توان خروجی می‌شود. نیروهای مماسی (F_t) و نیروهای عمودی (F_n) را می‌توان مطابق با روابط ۷ و ۸ در جهت‌های محورهای مختصات کارترین (x, y) نوشت و نیروهای در جهت‌های محورهای مختصات F_x و F_y را پدید آورد:

$$F_t = -F_x \cos \theta - F_y \sin \theta \quad (7)$$

$$F_n = -F_x \sin \theta + F_y \cos \theta \quad (8)$$

نیروی عمودی (F_n) و نیروی مماسی (F_t) در شکل ۱ با جهت‌های مثبت فرض‌شده مشاهده می‌شوند. حال اگر دو نیروی مذکور در جهت عمود و مماس بر سرعت نسبی تجزیه شوند، به ترتیب نیروی برآ (F_L) و نیروی پسا (F_D) به‌دست می‌آیند، که از نیروهای مهم آئرویدینامیکی محسوب می‌شوند. تغییرات

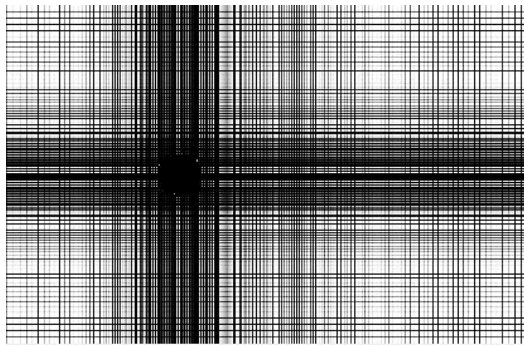


Fig.3. Overview of the computational domain.

شکل ۳. نمای کلی از فضای محاسباتی.

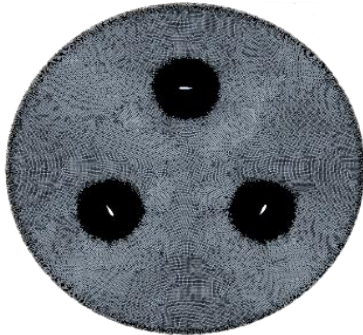


Fig. 4. View of the mesh for the stationary and rotating domain.

شکل ۴. نمایی از شبکه حول ناحیه‌ی ثابت و چرخان.

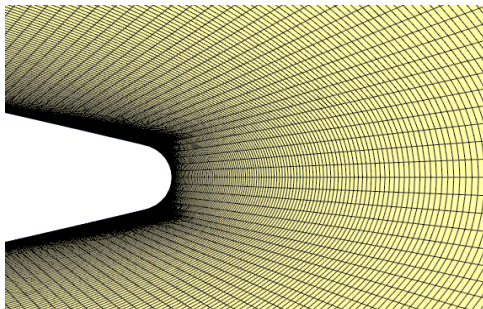


Fig. 5. View of the structured mesh around the airfoil wall.

شکل ۵. نمایی از شبکه‌بندی منظم حول دیواره‌ی ایرفویل.

به صورت سرعت ورودی و در پایین دست توربین، فشار خروجی، و دیواره‌های بالا و پایین میدان به صورت دیواره با شرط لغزش و دارای تقارن است. شبکه‌بندی نقش مهمی در حل عددی ایفا می‌کند، زیرا مستقیماً می‌تواند در همگرایی، دقت پاسخ، و زمان شبیه‌سازی تأثیر بگذارد. دامنه به صورت هیبریدی شبکه‌بندی شده است، یعنی بخش‌هایی از هندسه به حالت منظم و بخش‌های دیگر به حالت نامنظم شبکه‌بندی شده‌اند. در شکل ۵، شبکه‌ی ایجاد شده بر روی ایرفویل با اندازه‌ی تقریبی ۵۵۰ هزار سلول مشاهده می‌شود. همچنین، مقدار Y^+ بر روی سطح ایرفویل‌ها حدود ۱ است. یکی از مراحل مهم در روند حل عددی، استقلال حل از شبکه است. به همین جهت مقایسه‌ی سه شبکه‌ی درشت، متوسط، و ریز به ترتیب با تعداد سلول‌های تقریبی ۳۰۰ هزار، ۵۵۰

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] + \frac{f_b}{\rho} \quad (19)$$

که در آن‌ها، $\bar{u}_i$ و $\bar{u}_j$ مؤلفه‌های سرعت میانگین‌گیری شده، $\bar{p}$ فشار استاتیک میانگین‌گیری شده، ρ چگالی هوا، و ν لزجت سینماتیکی هستند. ν_t لزجت آشفتگی است، که با استفاده از مدل آشفتگی $K-\omega SST$ محاسبه می‌شود. نیروی حجمی ایجاد شده توسط محرک پلازما با استفاده از مدل پلاسمای شای^۹ محاسبه می‌شود، که با f_b مشخص شده است. همچنین از روش حل حجم محدود و فشار مبنا با استفاده از الگوریتم کوپل^{۱۰} استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادله‌ها از دید مکانی روش بالادستی مرتبه‌ی دوم^{۱۱} و برای گسسته‌سازی زمانی روش ضمنی مرتبه‌ی دوم محدود^{۱۲} و برای چرخش پره‌های توربین باد از روش شبکه‌ی لغزان^{۱۳} در نرم‌افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است.

۳. فضای محاسباتی و شبکه‌بندی

مشخصات توربین بادی محور عمودی داریوس، مطابق نوشتار بتیستی^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۸] در جدول ۱ ارائه شده است.

توربین محور عمودی داریوس موردنظر، سه پره‌ای نوع H است. برای شبیه‌سازی توربین مذکور در دو بُعد فضای محاسباتی مطابق شکل‌های ۳ و ۴ ایجاد شده است. کل دامنه‌ی محاسباتی در یک مستطیل به طول ۳۰ برابر قطر روتور و عرض ۲۰ برابر قطر روتور رسم شده است. هندسه در ناحیه‌ی بالادست، ۱۰ برابر قطر توربین؛ در قسمت پایین دست، ۲۰ برابر قطر؛ و فاصله‌ی دیواره‌های بالا و پایین از هم ۲۰ برابر قطر توربین در نظر گرفته شده است. ناحیه‌ی محاسباتی به دو قسمت ثابت و چرخشی تقسیم و در قسمت چرخان ایرفویل‌ها کشیده شده‌اند، که دوران می‌کنند. نوع شرط مرزی در ورودی دامنه

جدول ۱. مشخصات توربین بادی مطابق نوشتار باتیسی و همکاران^[۱۸] (۲۰۱۸).

Table 1. Details of benchmark turbine.^[18]

Value	Parameter
NACA0021	Airfoil
1/028	Rotor diameter, D(m)
0/085	Airfoil chord, C(m)
400	Rotational speed, ω (rpm)
9/02	Wind speed, V(m/s)
1	Blade height, H(m)
0/25	Solidity, σ
3	Number of blades (B)

¹² Bounded second order implicit

¹³ Sliding mesh

¹⁴ Battisti

⁹ Shyy

¹⁰ Coupled

¹¹ Second order upwind

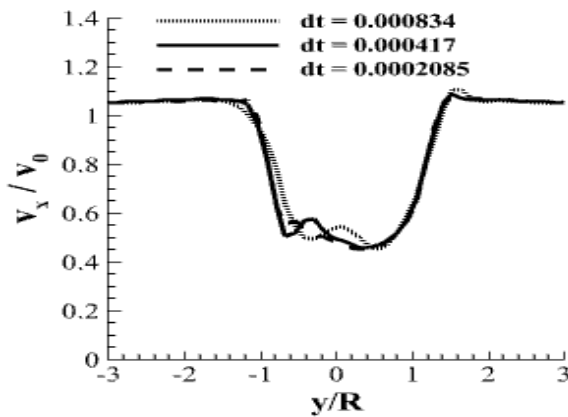


Fig. 7. Time step independence on the profile of the averaged velocity measured at a distance of three times the radius.

شکل ۷. استقلال حل از گام زمانی بر روی پروفیل سرعت متوسط گیری شده در فاصله‌ی ۳ برابر شعاع.

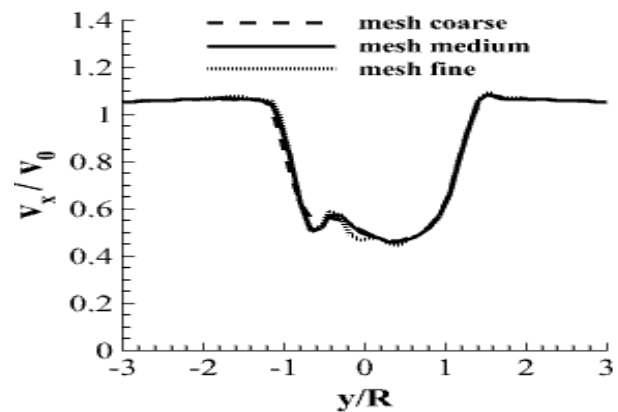


Fig. 6. Grid independence study on the profile of the averaged velocity measured at a distance of three times the radius.

شکل ۶. استقلال حل از شبکه بر روی پروفیل سرعت متوسط گیری شده در فاصله‌ی ۳ برابر شعاع.

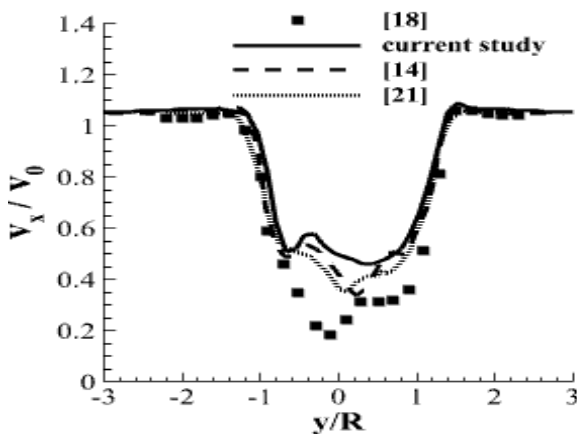


Fig. 8. Comparison of time-averaged x-velocity profiles at $\lambda = 2.4$.

شکل ۸. مقایسه‌ی پروفیل سرعت بی‌بعد میانگین گیری شده برای اعتبار سنجی توربین در $\lambda = 2/4$.

و همکارش (۲۰۲۱)^[۲۱] و زارع و ابراهیمی (۲۰۲۲)^[۱۴] مقایسه شده است. در شکل ۸، نسبت پروفیل سرعت میانگین گیری شده به سرعت باد در پایین دست توربین باد برای مطالعه‌ی حاضر و مراجع تجربی و عددی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن مشخص است که پروفیل سرعت در مطالعه‌ی حاضر، روندی یکسان و شبیه به مراجع عددی و تجربی و تطابق قابل قبولی از لحاظ اعتبارسنجی با دیگر مطالعات داشته است.

اختلافی که در پایین دست توربین با دیگر مطالعات عددی وجود دارد، ناشی از آن است که در مطالعه‌ی حاضر، اثر شفت روتور لحاظ نشده و به همین جهت نمودار پروفیل سرعت در مطالعه‌ی حاضر، مقادیر بیشتری از سرعت را تجربه کرده است. همچنین تمام مطالعات عددی، همان‌طور که در شکل اخیر نمایان است، با اینکه با روند مرجع تجربی هماهنگ بوده‌اند، ولی سرعت بیشتری نسبت به نتایج تجربی نشان داده‌اند؛ زیرا حل‌های عددی به صورت دو بُعدی بوده و آثار تیغه‌های پره و تلفات ناشی از آن و همچنین اجزاء توربین بادی لحاظ نشده است.

هزار، و ۱ میلیون بر روی دامنه و برای پروفیل سرعت میانگین گیری شده در فاصله‌ی سه برابر شعاع از شفت در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که منحنی‌های متناظر با شبکه‌های درشت، متوسط، و ریز بر هم انطباق دارند. به عبارت دیگر، اختلاف قابل ملاحظه‌ای با هم ندارند و این موضوع عدم وابستگی نتایج به شبکه را نشان می‌دهد. البته، برای ادامه‌ی فرآیند شبیه‌سازی با توجه به اضافه شدن محرک پلاسما و بررسی پدیده‌های ناشی از پلاسما ترجیح بر آن است که نزدیک سطح شبکه‌ی ریزتر باشد، به همین جهت از شبکه‌ی متوسط برای ادامه‌ی شبیه‌سازی استفاده شده است. شبکه‌ی مذکور در مراحل بعدی و به ویژه در مرحله‌ی افزوده شدن عملگر پلاسما مجدداً ارزیابی شده است.

در شبیه‌سازی‌های وابسته به زمان علاوه بر بررسی استقلال حل از شبکه، باید مطالعه بر روی گام زمانی و استقلال حل از گام زمانی انجام شود. با توجه به اینکه سرعت دورانی توربین ۴۰۰ دور بر دقیقه و نسبت سرعت نوک پره $2/4$ است، می‌توان دریافت که توربین در هر ثانیه، ۲۴۰۰ درجه چرخش می‌کند، یعنی هر ۱ درجه را در 0.0004 ثانیه طی می‌کند. به همین منظور، گام زمانی‌ای در نظر گرفته می‌شود که در هر گام زمانی روتور، ۱ درجه بچرخد، که این گام زمانی 0.0004 است و به عنوان معیار در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور استقلال حل از گام زمانی، گام زمانی ذکر شده نصف و دو برابر می‌شود. بنابراین، مقایسه‌ی سه گام زمانی 0.0002 ، 0.0004 ، و 0.0008 ثانیه با هم صورت گرفته و کمیت نسبت پروفیل سرعت میانگین گیری شده به سرعت باد، در شکل ۷ برای ۳ گام زمانی اخیر نشان داده شده است؛ که مطابق آن، واضح است که گام‌های زمانی درشت، متوسط، و ریز اختلاف ناچیزی دارند. در نتیجه، استقلال حل از گام زمانی به درستی انجام شده است. در شبیه‌سازی با توجه به پدیده‌های متنوع، شرط دوران ۱ درجه‌ای پره‌های توربین در هر گام زمانی رعایت شده است. به همین دلیل، گام زمانی، 0.0004 تنظیم شده است.

۴. اعتبارسنجی توربین باد محور عمودی

برای اعتبارسنجی توربین بادی محور عمودی داریوس، نتایج مطالعه‌ی حاضر با نوشتار تجربی بتیستی و همکاران (۲۰۱۸)^[۱۸] مطالعات عددی سیلوا-لانس^{۱۵}

$$|E| = E_0 - K_1 x - K_2 y \quad (20)$$

که در آن، E_0 بیشینه‌ی شدت میدان الکتریکی در میان ناحیه‌ی مثلثی است و طبق رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید:

$$E_0 = \frac{V}{d} \quad (21)$$

ضرایب ثابت K_1 و K_2 طوری محاسبه می‌شوند که شدت میدان در مرز پلاسما و هوا (وتر مثلث) با مقدار شکست الکتریکی برابر شود.^[۲۳] فاصله‌ی طولی بین دو الکترود و V بیانگر ولتاژ اعمالی است. در شکل ۱۰، a و b دو پارامتر مهم و ابعاد ناحیه‌ی پلاسما در مدل شای هستند، که در ادامه، مقادیرشان بیان شده است. E_x و E_y مؤلفه‌های میدان الکتریکی هستند و به صورت رابطه‌های ۲۲ و ۲۳ محاسبه می‌شوند:

$$E_x = \frac{EK_2}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \quad (22)$$

$$E_y = \frac{EK_1}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \quad (23)$$

بنابراین، نیروی حجمی در ناحیه‌ی پلاسما به صورت روابط ۲۴ و ۲۵ بیان می‌شود:

$$f_x = \rho_c e_c \mathcal{G} \Delta T E_x \quad (24)$$

$$f_y = \rho_c e_c \mathcal{G} \Delta T E_y \quad (25)$$

که در آن‌ها، ρ_c چگالی بار الکترون‌ها، e_c بار اولیه، $\mathcal{G}$ ولتاژ اعمالی، ΔT زمان تخلیه‌ی پلاسما، و f_x و f_y به ترتیب نیروهای حجمی در راستای x و y هستند. الکترودهای آشکار و پنهان به ترتیب دارای: طول‌های ۰/۵ و ۳ میلی‌متر، ارتفاع الکترودها ۰/۱ میلی‌متر، و فاصله‌ی بین دو الکترود ۰/۲۵ میلی‌متر بوده‌اند. ولتاژ اعمال شده، ۴ کیلوولت و بسامد ولتاژ اعمالی ۳ کیلوهرتز بوده است. بنابراین، قبل از اعمال مدل پلاسما بر روی توربین، مدل پلاسمای شای بر روی صفحه‌ی تخت اعتبارسنجی شده و با مطالعه‌ی شای و همکاران^[۲۳] (۲۰۰۲)، مقایسه شده است.

برای انجام اعتبارسنجی مدل پلاسما، شبکه‌ای با طول و عرض به ترتیب ۲۴ و ۱۲ میلی‌متر با تعداد سلول ۵۷۰۰۰ در نظر گرفته شده است. دو پارامتر a و b همان‌طور که گفته شد، ارتفاع و طول ناحیه‌ی پلاسما هستند، که به ترتیب برابر ۱/۵ و ۳ میلی‌متر بوده‌اند. مدل‌سازی پلاسما طبق مطالعه‌ی شای و همکاران، در محدوده‌ی رینولدز پایین به صورت جریان آرام و تراکم‌ناپذیر و پایا بوده و اعتبارسنجی پلاسما برای سرعت جریان آزاد ۲ متر بر ثانیه، که به صورت شرط مرزی در ورودی میدان تعریف می‌شود، انجام شده است. بنابراین، مدل عددی محرک پلاسما با کار شای و همکاران، با استفاده از پروفیل سرعت طولی بی‌بعد بر روی یک صفحه‌ی تخت در فاصله‌ی ۳/۸ میلی‌متر پایین‌تر از الکترود بالایی اعتبارسنجی شده است، که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نمودار سرعت القاشده ناشی از پلاسما در جریان آزاد برای سرعت باد ۲ متر بر ثانیه بر روی صفحه‌ی تخت با مطالعه‌ی شای و همکاران، تطابق بسیار خوبی داشته و اعتبارسنجی به درستی انجام شده است.

شکل تغییر یافته‌ی تیغه‌های پره (که لزوماً با پروفیل ایده‌آل مقاطع، که در حالت عددی و تحلیلی فرض می‌شود، انطباق ندارد)، باعث کاهش انرژی و کاهش سرعت در شبیه‌سازی می‌شود. علاوه بر این، آثار سه‌بعدی پره‌ها، مانند گردابه‌های نوک تیغه باعث کاهش انرژی و افت سرعت در پایین دست توربین می‌شود.

۵. مدل پلاسما و اعتبارسنجی

یک روش نوین و عملی برای اعمال نیروهای تناوبی به جریان استفاده از محرک‌های پلاسماست. در دهه‌ی پیشین، تمرکز بر روی محرک‌های پلاسما به عنوان ابزاری مفید برای کنترل جریان افزایش یافته است. محرک‌های پلاسما از دو الکترود تشکیل شده‌اند، که یکی در معرض هوا و دیگری توسط یک ماده‌ی دی‌الکتریک محصور شده است. در شکل ۹، یک عملگر پلاسمای معمولی به صورت شماتیک مشاهده می‌شود. به الکترودها یک ولتاژ AC اعمال شده است، که در ولتاژهای بالا سبب یونیزه شدن هوا بر روی الکترود محصور شده شده است. ذرات هوای یونیزه شده به دلیل میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و نیرویی بر هوای خنثی نزدیک عملگر وارد می‌کنند، که در نهایت منجر به تولید جریان القایی می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر، نیروی حجمی مرتبط با تشکیل پلاسما از مدل پدیده‌ای پیشنهادی توسط جایارامان و همکاران (۲۰۰۸)،^[۲۳] استخراج شده است، که با ارائه‌ی تعادلی مناسب بین سادگی و دقت، آن را برای مطالعات کنترل جریان مبتنی بر عملگرهای پلاسما مناسب می‌سازد. ایشان فرض کرده‌اند که شدت میدان الکتریکی پلاسما در یک ناحیه‌ی مثلثی در پایین دست الکترود بدون پوشش، مطابق شکل ۱۰، به صورت خطی توزیع می‌شود. بر این اساس، تغییرات شدت میدان الکتریکی به صورت رابطه‌ی ۲۰ بیان می‌شود:

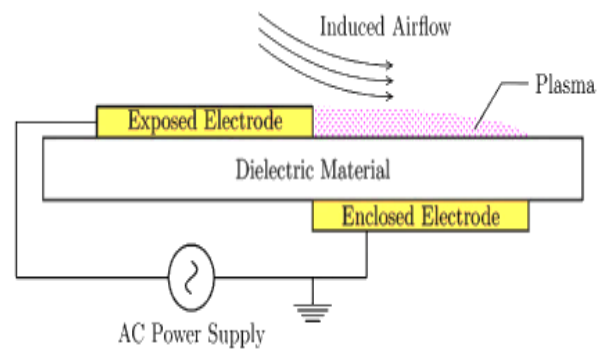


Fig. 9. Schematic of the plasma actuator.

شکل ۹. شماتیک از محرک پلاسما.

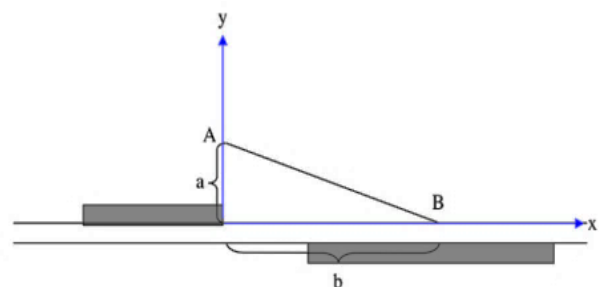


Fig. 10. Triangular region associated with the plasma zone modeled linearly.^[22]

شکل ۱۰. ناحیه‌ی مثلثی مرتبط با ناحیه‌ی پلاسما به صورت خطی.^[۲۳]

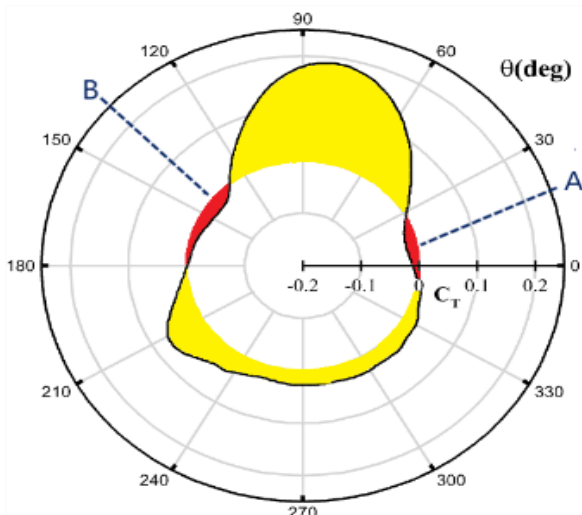


Fig. 13. Local torque generated by the blade with identification of positive and negative torque regions.

شکل ۱۳. گشتاور تولیدی محلی پره با مشخص بودن موقعیت گشتاور مثبت و منفی.

در شکل ۱۲، فازهای مختلف چرخش یک دور پره‌ی توربین مشاهده می‌شود. بخش‌های بالادست و پایین‌دست جریان به ترتیب مربوط به زوایای ۰ تا ۱۸۰ درجه و ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه هستند. با توجه به شکل اخیر، کل گشتاور تولیدشده توسط یک پره از سه پره‌ی توربین با رنگ مشکی، گشتاور ناشی از نیروی برآ با رنگ آبی، گشتاور ناشی از نیروی پسا با رنگ قرمز، و گشتاور ناشی از نقطه‌ی اتصال بدنه‌ی توربین با رنگ زرد نشان داده شده است. همچنین زاویه‌ی حمله‌ی ثانویه، که مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه شده است، در شکل ۱۲ مشخص شده است. بیشتر گشتاور تولیدشده در سمت بالادست چرخش توربین، یعنی زاویه‌ی ۰ درجه تا نزدیک به ۱۸۰ درجه، رخ داده است. مقدار بیشینه‌ی نیروهای برآ و پسا و همچنین بیشینه‌ی زاویه‌ی حمله‌ی مؤثر در ناحیه‌ی مذکور و در زاویه‌ی بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه رخ داده است.

در ناحیه‌ی مذکور، گشتاور نقطه‌ی اتصال، در تولید گشتاور لحظه‌ای تأثیر مثبت گذاشته است؛ اما در پایین‌دست جریان، تأثیر منفی و سهم بیشتری را شامل شده است. پس از زاویه‌ی پره حدود ۹۰ درجه، پره وارد ناحیه‌ی واماندگی شده و نیروی برآ کاهش یافته است. زاویه‌ی حمله‌ی واماندگی استاتیکی برای ایرفویل NACA ۰۰۲۱ در محدوده‌ی اعداد رینولدز از ۸۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰ حدود ۱۳ درجه است.^[۲۴] همان‌طور که در شکل اخیر مشاهده می‌شود، وقوع واماندگی دینامیکی در زاویه‌ی حمله‌ی حدود ۲۰ درجه رخ داده است، که خیلی بیشتر از زاویه‌ی حمله‌ی واماندگی استاتیکی است. در شکل ۱۳، ضریب گشتاور محلی یک پره در تمام زوایای پره مشاهده می‌شود. مناطق زرد و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تولید گشتاور مثبت و منفی هستند. در شکل مذکور، دو ناحیه، گشتاور منفی دارند: ناحیه‌ی A در محدوده‌ی ۱۰- تا ۳۰ درجه و ناحیه‌ی B، که در محدوده‌ی ۱۳۵ تا ۱۸۰ درجه است. گشتاور منفی ناشی از ناحیه‌ی A به دلیل غالب بودن نیروی پسا و در ناحیه‌ی B به دلیل واماندگی دینامیکی و پدیده‌ی جدایش جریان است، که باعث می‌شود نیروی برآ به شدت کاهش یابد.

برای فهم بهتر پدیده‌ی واماندگی دینامیکی در پره‌ی توربین بادی محور عمودی، کانتورهای ورتیسیتی بی‌بعدشده همراه با خطوط جریان نسبی برای چند زاویه‌ی پره در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در محدوده‌ی زاویه‌ی پره

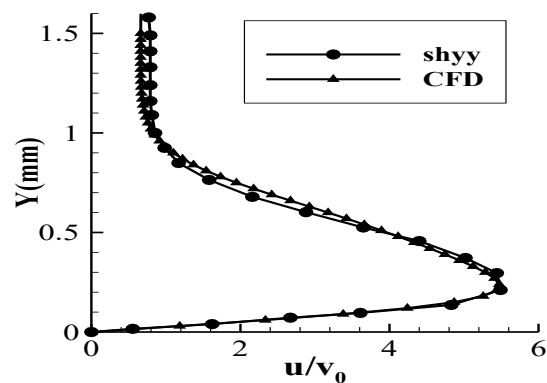


Fig. 11. Induced velocity by the plasma actuator in a free stream with a velocity of 2 m/s obtained from the present study and Shyy's work,^[۲۲].

شکل ۱۱. مقایسه پروفیل سرعت القایی توسط محرک پلاسما در جریان با سرعت ۲ متر بر ثانیه نتایج مطالعه‌ی حاضر با کار شای و همکاران.^[۲۲]

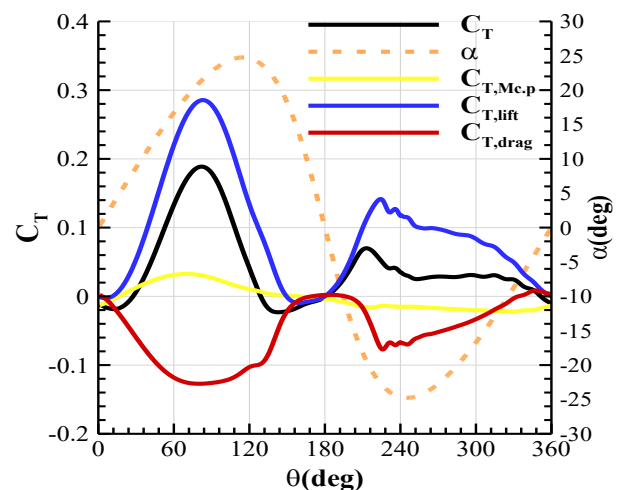


Fig. 12. Effect of lift and drag forces along with the moment at the connection point on the blade's local torque coefficient.

شکل ۱۲. سهم نیروهای برآ و پسا و گشتاور نقطه‌ی اتصال در تولید گشتاور تولیدی پره.

۶. نتایج و بحث

۱.۶. نتایج قبل از پلاسما

در بخش کنونی، به بررسی فیزیک جریان اطراف پره‌ی توربین مورد مطالعه در نسبت سرعت نوک پره‌ی ۲/۴ پرداخته شده است، که معادل بیشینه‌ی ضریب توان توربین بوده است.^[۱۸] همان‌طور که گفته شد، پره‌های توربین باد محور عمودی در هر لحظه، گشتاور تولید می‌کنند، که طبق رابطه‌ی ۱۲ ناشی از نیروهای برآ و پسا، و گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به بدنه‌ی توربین است. با متوسط‌گیری از رابطه‌ی اخیر در طول چرخش یک دور کامل پره‌ی توربین، ضریب گشتاور متوسطی برابر ۰/۰۴۱ به دست آمده است. سهم نیروهای برآ و پسا و گشتاور ناشی از نقطه‌ی اتصال در تولید ضریب گشتاور به ترتیب برابر با ۰/۰۹۴، ۰/۰۵۱-، و ۰/۰۰۱- بوده است. بنابراین، نیروی برآ بیشترین تأثیر را در تولید گشتاور تولیدی توسط پره‌ی توربین بادی دارد و عامل اصلی محسوب می‌شود. به‌طور کلی، نیروی پسا و گشتاور ناشی از نقطه‌ی اتصال، تأثیر منفی می‌گذارند و سعی در خنثی کردن نیروی برآ دارند (مطابق شکل ۱۲).

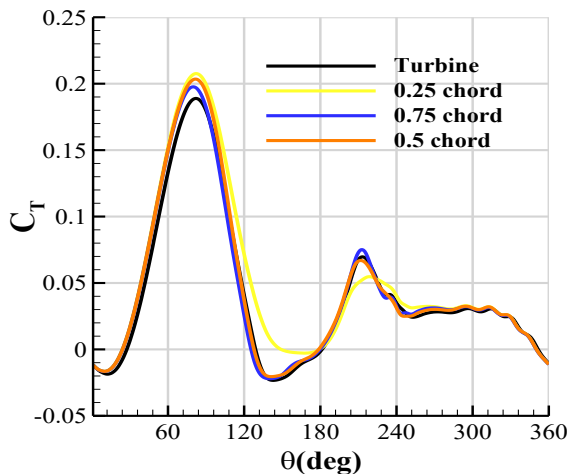


Fig. 15. Comparison of the effect of different plasma actuator positions on the torque coefficient generated by the blade.

شکل ۱۵. مقایسه‌ی تأثیر موقعیت‌های مختلف محرک‌های پلاسما در ضریب گشتاور تولیدی پره.

محرک‌های پلاسما بر روی سطح داخلی پره به سمت داخل توربین قرار گرفته و در سه موقعیت طولی در سطح پره‌ها جابجا شده‌اند. ضریب توان کلی توربین بدون حضور عملگر پلاسما ۰/۳ بوده است. در حالی که بعد از اثر محرک پلاسما در مکان‌های ۰/۲۵، وتر، نصف وتر، و ۰/۷۵، وتر، ضریب توان توربین به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۲، و ۰/۳۱ شده است، که نشانگر افزایش حدود ۲۰ درصدی ضریب توان در پلاسمای ناحیه‌ی ۰/۲۵، وتر نسبت به حالت بدون پلاسماست. برای ارزیابی آثار پلاسما در گشتاور تولیدی پره، در شکل ۱۵، نتایج قرار گرفتن سه موقعیت محرک پلاسما همراه با حالت بدون پلاسما در طول یک دور چرخش کامل توربین مقایسه شده است.

مطابق شکل ۱۵ مشخص است که هر سه ناحیه‌ی پلاسما، گشتاور محلی توربین را افزایش داده‌اند، اما میزان بهبود گشتاور، در ناحیه‌ی ۰/۲۵، وتر بیشتر بوده و به ۲۰٪ رسیده است. بنابراین، در ادامه از محرک پلاسمای ۰/۲۵، وتر استفاده شده است. مطابق شکل ۱۵، با توجه به اینکه عملگر پلاسما در سطح داخلی پره قرار گرفته و پدیده‌ی واماندگی دینامیکی و آثار آن هم در زاویه‌ی حدود ۰ تا ۱۸۰ درجه در سطح داخلی اتفاق افتاده است، محرک پلاسما توانسته است واماندگی دینامیکی و تشکیل گردابه‌ها را کنترل کند، که در نهایت گشتاور تولیدی پره‌ها افزایش یافته است.

در پایین‌دست جریان، یعنی زاویه‌ی پره حدود ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه، محرک تأثیر خاصی در گشتاور نداشته است؛ چون پدیده‌های واماندگی دینامیکی در زوایای مذکور در سطح خارجی پره‌ها اتفاق افتاده و در سطح خارجی، پلاسمایی وجود نداشته است که بتواند پدیده‌های واماندگی دینامیکی را کنترل کند. بنابراین، می‌توان محرک پلاسما را در پایین‌دست جریان خاموش کرد، تا در مصرف توان صرفه‌جویی شود.

همچنین در شکل ۱۶، مقایسه‌ی کانتورهای وورتیسیته برای زوایای ۱۴۰ تا ۱۶۰ درجه، قبل و بعد از پلاسما مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، لایه‌ی برشی لبه‌ی حمله به سمت لبه‌ی فرار حرکت کرده است، که باعث تشکیل گردابه‌ی کوچک‌تر و ضعیف‌تر در سطح مکش شده است. به‌طور کلی، تضعیف گردابه توسط محرک پلاسما موجب کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برآ، و بهبود

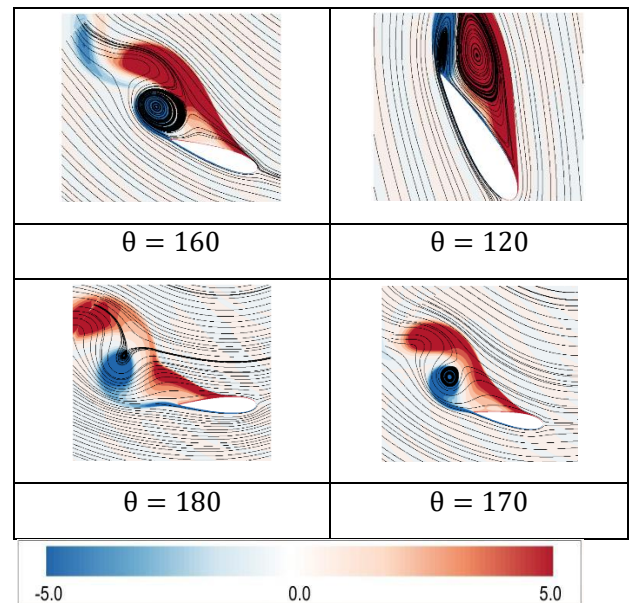


Fig. 14. Contours of dimensionless vorticity and relative streamlines at $\lambda=2.4$.

شکل ۱۴. کانتورهای ورتیسیته‌ی بی‌بعد و خطوط نسبی جریان در $\lambda=2.4$.

حدود ۰ تا ۱۱۵ درجه، پره در حرکت بالا به پایین است، که با افزایش زاویه‌ی حمله مؤثر همراه است. با توجه به شکل اخیر، یک گردابه‌ی پادساعتگرد در سمت مکش ایرفویل تشکیل و با افزایش زاویه‌ی حمله تقویت شده است. زمانی که حرکت به سوی پایین پره در زاویه‌ی پره‌ی ۱۱۵ درجه آغاز شده است، یک گردابه‌ی دوم با جهت ساعتگرد ایجاد شده و همزمان نیروی پسا شروع به افزایش کرده است، که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. با کاهش زاویه‌ی حمله، هر دو گردابه‌ی ساعتگرد و پادساعتگرد تا زاویه‌ی پره‌ی ۱۵۰ درجه تقویت و با کاهش بیشتر زاویه‌ی حمله، جفت گردابه از سطح مکش جدا شده و نیروی پسا مشابه نیروی برآ کاهش یافته است.

در محدوده‌ی زاویه‌ی پره بین ۱۷۰ تا ۲۲۰ درجه، نیروی پسا به دلیل تشکیل ورتیسیته‌ی کارمن معکوس منفی شده است. ورتیسیته‌ی کارمن معکوس، یک ورتیسیته‌ی ساعتگرد بر روی سطح مکش ایرفویل است، که نیروی پسا منفی تولید می‌کند. وقتی ورتیسیته‌های ساعتگرد و پادساعتگرد از سطح جدا و از آن دور شده‌اند، ورتیسیته‌ی پادساعتگرد در زاویه‌ی ۱۷۰ درجه محو شده است، اما ورتیسیته‌ی ساعتگرد یعنی ورتیسیته‌ی کارمن معکوس در پایین‌دست پره بر روی سطح مکش باقی مانده است؛ که مطابق شکل ۱۴، در زوایای پره‌ی ۱۷۰ و ۱۸۰ درجه مشاهده می‌شود. پس از زاویه‌ی پره‌ی ۱۸۰ درجه، پره به حرکت رو به پایین خود با زاویه‌ی حمله‌ی منفی ادامه داده است، که به تولید نیروی برآ منفی منجر و افزایش زاویه‌ی حمله باعث افزایش مقدار مطلق نیروی برآ و گشتاور نقطه‌ی اتصال تا حدود زاویه‌ی پره‌ی ۲۱۰ درجه شده است.

۲.۶. اثر محرک پلاسما

برای بررسی اثر عملگر پلاسما، مدل پلاسما شای، که معرفی و اعتبارسنجی شده است، با همان مقادیر بر روی توربین محور عمودی داریوس استفاده شده است. به همین منظور، محرک پلاسما در سه موقعیت مختلف به ترتیب ۰/۲۵، وتر، نصف وتر، و ۰/۷۵، وتر بر روی سطح پره‌ها قرار داده شده است. سپس، معادله‌های پلاسما در موقعیت‌های اخیر در نواحی پلاسما حل شده‌اند.

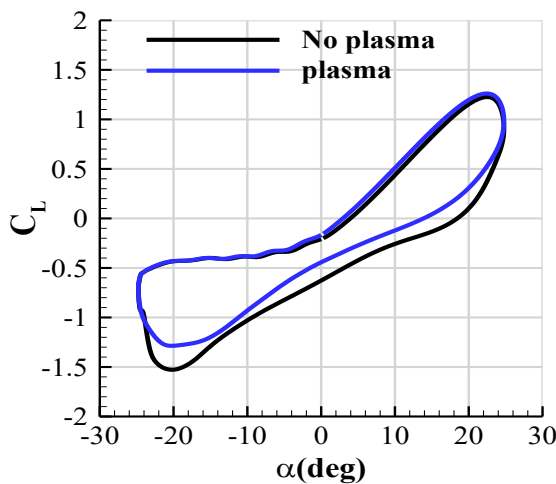


Fig. 17. Effect of the plasma actuator at 0.25 chord location on the lift coefficient of the blade.

شکل ۱۷. تأثیر عملکرد پلاسما ناحیه‌ی ۰/۲۵ وتر در ضریب برآ پره.

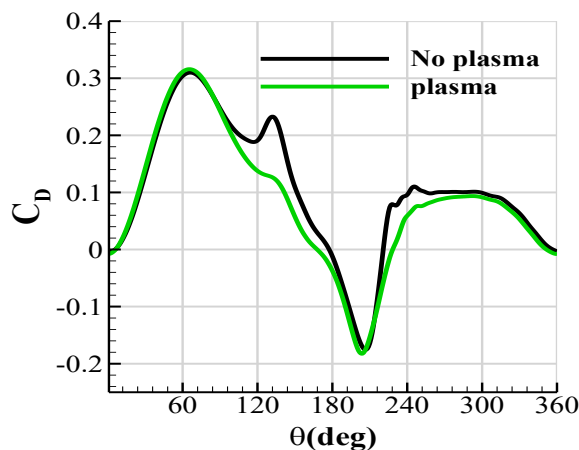


Fig. 18: Effect of the plasma actuator at 0.25 chord location on the drag coefficient of the blade.

شکل ۱۸. تأثیر عملکرد پلاسما ناحیه‌ی ۰/۲۵ وتر در ضریب پسا پره.

مطابق شکل ۱۸، محرک پلاسمای واقع در موقعیت ۰/۲۵ وتر، نیروی پسا را کاهش داده است، که به دلیل حذف یا تعویق در جدایش گردابه‌ها بوده است. همان‌طور که قبلاً بحث شده است، محرک پلاسما، گردابه‌ی وارون کارمن را که باعث افزایش نیروی پسا و کاهش نیروی برآ می‌شود، حذف کرده است. علاوه بر این، حذف گردابه‌ی وارون کارمن، نیروی پسا را کاهش داده است. همچنین در پایین‌دست جریان (مطابق شکل ۱۸)، محرک پلاسما در ضریب پسا تأثیر مطلوبی گذاشته است.

مطابق شکل ۱۹، محرک پلاسما، گشتاور نقطه‌ی اتصال را در حرکت پایین‌آمدن پره افزایش داده است. با این حال، همان‌طور که قبلاً در معادله‌های توربین باد گفته شد، افزایش گشتاور نقطه‌ی اتصال، گشتاور کل را در سرتاسر فاز چرخش پره‌ی توربین نیز بهبود می‌بخشد، که تأثیر مطلوبی در تولید توان در سیکل چرخش روتور دارد. البته در ناحیه‌ی پایین‌دست جریان همان‌طور که مشاهده می‌شود، پلاسما تأثیر منفی در ضریب گشتاور نقطه‌ی اتصال گذاشته است. در مجموع میزان سطح افزوده‌شده به منحنی گشتاور بر حسب زاویه‌ی دوران مثبت، مؤید بهبود کلی گشتاور و توان در حالت به‌کارگیری پلاسماست.

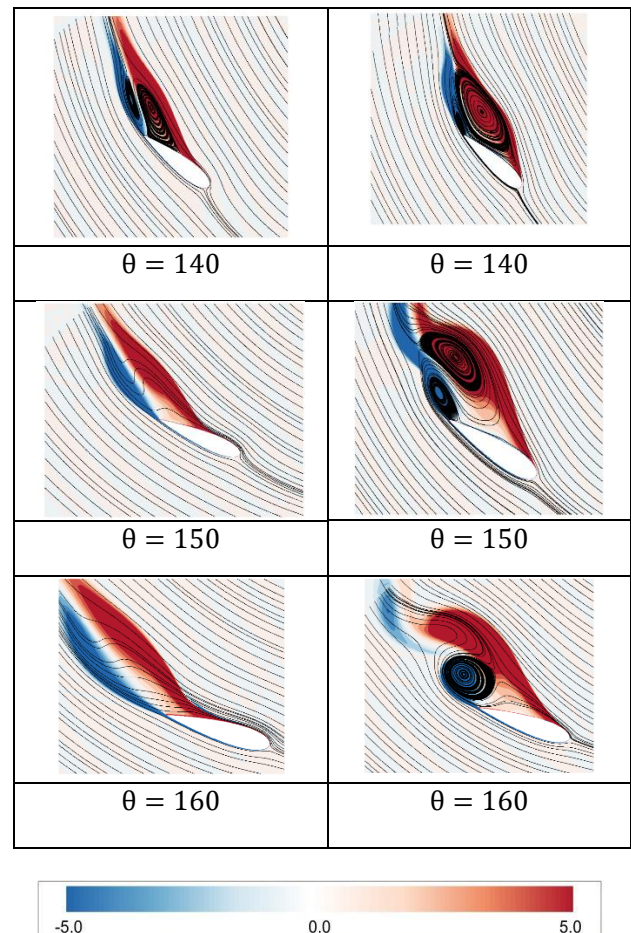


Fig. 16. Comparison of vorticity contours before plasma actuation (right) and after plasma actuation (left) on the turbine.

شکل ۱۶. مقایسه‌ی کانتورهای ورتیسیته قبل از پلاسما (سمت راست) و بعد از اعمال پلاسما (سمت چپ) روی توربین.

گشتاور خروجی می‌شود. در زاویه‌ی پره‌ی ۱۴۰ درجه، محرک پلاسما جریان را در لبه‌ی حمله‌ی پره به سطح مکش متصل کرده است، که منجر به شتاب جریان و کاهش فشار شده است. محرک پلاسما در زاویه‌ی ۱۵۰ درجه، هر دو گردابه‌ی ساعتگرد و پادساعتگرد را پاک کرده است، که به افزایش نیروی برآ و بهبود گشتاور کمک کرده و در زاویه‌ی ۱۵۰ درجه، بهترین عملکرد را داشته است. در زاویه‌ی ۱۶۰ درجه، نیروی برآ منفی شده است، که ناشی از گردابه‌ی ساعتگرد وارون کارمن بوده است. محرک پلاسما، گردابه‌ی وارون کارمن را از بین برده و جدایش جریان را ضعیف‌تر کرده است. برای بررسی بهتر آثار محرک پلاسما در پدیده‌ی واماندگی دینامیکی، نیروهای برآ و پسا و گشتاور نقطه‌ی اتصال در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۱۷، حضور محرک پلاسما در ناحیه‌ی ۰/۲۵ وتر منجر به افزایش نیروی برآ در طول فاز پایین‌آمدن پره شده است. نیروی برآ منفی در قسمت بالادست جریان تأثیر منفی در تولید گشتاور توربین داشته است. محرک پلاسما به‌طور قابل‌توجهی نیروی برآ منفی را در بالادست جریان کاهش داده است. همان‌طور که در منحنی ضریب پسا در شکل ۱۸ برای توربین مشاهده می‌شود، نیروی پسا با شروع حرکت رو به پایین پره، یعنی زاویه‌ی پره حدود ۱۱۵ تا ۱۸۰ درجه، به دلیل واماندگی و جدایش گردابه‌های ساعتگرد و پادساعتگرد افزایش یافته است.

تأثیر می‌گذارند، بررسی شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با کنترل واماندگی و بهبود ضرایب آئرو دینامیکی به کمک پلاسما می‌توان عملکرد توربین را بهبود بخشید. در نتیجه:

- محرک پلاسمای ناحیه‌ی ۰/۲۵ وتر، بهترین عملکرد را نسبت به نواحی دیگر داشته است، که منجر به افزایش ۲۰ درصدی ضریب توان شده و عمده‌ی تأثیرش در ناحیه‌ی بالادست جریان بوده است.
- محرک پلاسما در ناحیه‌ی پایین‌دست جریان، تأثیر کمی گذاشته است.
- محرک‌های پلاسما بیشتر در حرکت پایین‌آمدن پره مؤثر بوده‌اند. با این حال، در حرکت بالارفتن پره جز در زوایایی اندک، آثار قابل توجهی نداشته‌اند. بنابراین، می‌توان محرک کنترل جریان را در فاز بالارفتن برای صرفه‌جویی بیشتر در مصرف برق غیرفعال کرد.
- محرک پلاسما، گردابه‌ی وارون کارمن تشکیل شده در حرکت پایین‌آمدن پره را حذف کرده است. علاوه بر این، گردابه‌ی پاد ساعتگرد را از بین برده است، که به کنترل واماندگی و جدایش جریان کمک کرده است.
- محرک پلاسمایی نیروی برآ را در حرکت پایین‌آمدن پره افزایش داده است.
- محرک پلاسما نیروی پسا را در حرکت پایین‌آمدن پره در بالادست جریان کاهش داده و در پایین‌دست جریان هم آثار مثبتی گذاشته است. علاوه بر این، اندازه‌ی نیروی پسامنفی را کاهش داده است.
- محرک پلاسما، گشتاور نقطه‌ی اتصال را در بالادست جریان افزایش داده است، که تأثیر مثبت در تولید گشتاور پره داشته است.

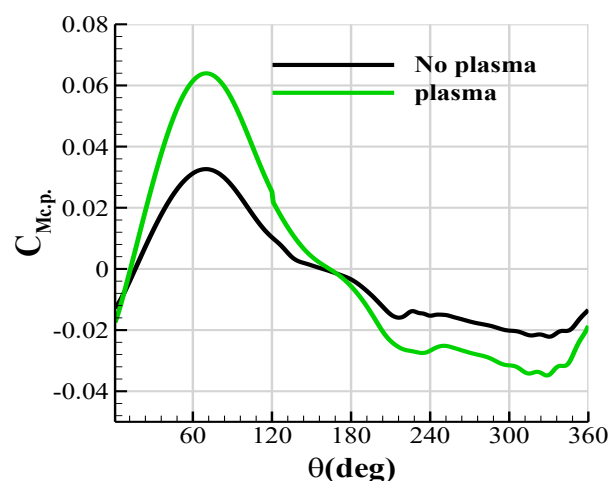


Fig. 19. Effect of the plasma actuator at 0.25 chord location on the moment coefficient at the blade turbine junction.

شکل ۱۹. تأثیر عملگر پلاسما ناحیه‌ی ۰/۲۵ وتر در ضریب گشتاور نقطه‌ی اتصال پره به توربین.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی عددی تأثیر کنترل جریان به شیوه‌ی محرک پلاسما مدل شای در عملکرد آئرو دینامیکی یک توربین باد محور عمودی پرداخته شده است. محرک‌های پلاسما در سه موقعیت مختلف بر روی پره‌ها به سمت داخل توربین در نظر گرفته شده‌اند. پدیده‌ی واماندگی دینامیکی و تشکیل گردابه‌های ساعتگرد و پاد ساعتگرد که در فیزیک جریان توربین باد

References – منابع

1. Kantrowitz, A.R., 1955, January. A survey of physical phenomena occurring in flight at extreme speeds. In *Proceedings of the conference on high-speed aeronautics* (Vol. 1955, pp. 335-339). Polytechnic Institute of Brooklyn, New York.
2. Roth, J., Sherman, D. and Wilkinson, S., 1998, January. Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma. In *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 328). <https://doi.org/10.2514/6.1998-328>
3. Post, M.L. and Corke, T.C., 2006. Separation control using plasma actuators: dynamic stall vortex control on oscillating airfoil. *AIAA journal*, 44(12), pp.3125-3135 <https://doi.org/10.2514/1.22716>.
4. Liu, Y., Kolbakir, C., Hu, H., Meng, X. and Hu, H., 2019. An experimental study on the thermal effects of duty-cycled plasma actuation pertinent to aircraft icing mitigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 136, pp.864-876 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.068>.
5. Rezaeiha, A., Kalkman, I. and Blocken, B., 2017. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied energy*, 197, pp.132-150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>
6. Zhong, J., Li, J., Guo, P. and Wang, Y., 2019. Dynamic stall control on a vertical axis wind turbine aerofoil using leading-edge rod. *Energy*, 174, pp.246-260. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.176>
7. McCroskey, W. 1981. The phenomenon of dynamic stall. NASA Technical Memorandum 81264 National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center Moffett Field CA USA .
8. Araya, D.B. and Dabiri, J.O., 2015. Vertical axis wind turbine in a falling soap film. *Physics of Fluids*, 27(9). <https://doi.org/10.1063/1.4930912>
9. Rezaeiha, A., Montazeri, H. and Blocken, B., 2019. CFD analysis of dynamic stall on vertical axis wind turbines using Scale-Adaptive Simulation (SAS): Comparison against URANS and hybrid RANS/LES. *Energy Conversion and*

- Management*, 196, pp.1282-1298.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.081>
10. Zhu, H., Hao, W., Li, C. and Ding, Q., 2019. Numerical investigation on the effects of different wind directions, solidity, airfoils, and building configurations on the aerodynamic performance of building augmented vertical axis wind turbines. *International Journal of Green Energy*, 16(15), pp.1624-1636
<https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1681427>
11. Zuo, Z. and Zhang, X., 2025. Flow Control over a Two-Element Airfoil Using a Dielectric-Barrier-Discharge Plasma Actuator. *AIAA Journal*, pp.1-11.
<https://doi.org/10.2514/1.J064919>
12. Zhang, H., Yu, H., Zhang, A. and Zheng, J., 2023. Large eddy simulation of dynamic stall over an airfoil and its control with plasma actuator. *AIP Advances*, 13(2). <https://doi.org/10.1063/5.0133577>
13. Ma, L., Wang, X., Zhu, J. and Kang, S., 2019. Dynamic stall of a vertical-axis wind turbine and its control using plasma actuation. *Energies*, 12(19), p.3738. <https://doi.org/10.3390/en12193738>
14. Zare Chavoshi, M. and Ebrahimi, A., 2022. Plasma actuator effects on the flow physics of dynamic stall for a vertical axis wind turbine. *Physics of Fluids*, 34(7). <https://doi.org/10.1063/5.0099993>
15. Greenblatt, D., Schulman, M. and Ben-Harav, A., 2012. Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators. *Renewable Energy*, 37(1), pp.345-354.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.040>
16. Greenblatt, D., Ben-Harav, A. and Mueller-Vahl, H., 2014. Dynamic stall control on a vertical-axis wind turbine using plasma actuators. *AIAA journal*, 52(2), pp.456-462. <https://doi.org/10.2514/1.J052776>
17. Ben-Harav, A. and Greenblatt, D., 2016. Plasma-based feed-forward dynamic stall control on a vertical axis wind turbine. *Wind Energy*, 19(1), pp.3-16. <https://doi.org/10.1002/we.1814>
18. Battisti, L., Persico, G., Dossena, V., Paradiso, B., Castelli, M.R., Brighenti, A. and Benini, E., 2018. Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures. *Renewable energy*, 125, pp.425-444
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.098>.
19. Rezaeiha, A., Montazeri, H. and Blocken, B., 2018. Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy conversion and management*, 156, pp.301-316.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.026>
20. Ebrahimi, A. and Movahhedi, M., 2017. Power improvement of NREL 5-MW wind turbine using multi-DBD plasma actuators. *Energy Conversion and Management*, 146, pp.96-106
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.019>
21. Silva-Llanca, L. and Inostroza-Lagos, S., 2021. Optimum power generation assessment in an H-Darrieus vertical axis wind turbine via Exergy Destruction Minimization. *Energy Conversion and Management*, 243, p.114312.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114312>
22. Jayaraman, B. and Shyy, W., 2008. Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer. *Progress in Aerospace Sciences*, 44(3), pp.139-191.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2007.10.004>
23. Shyy, W., Jayaraman, B. and Andersson, A., 2002. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics. *Journal of applied physics*, 92(11), pp.6434-6443. <https://doi.org/10.1063/1.1515103>
24. Roth, J., Sherman, D. and Wilkinson, S., 1998, January. Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma. In *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 328). <https://doi.org/10.2514/6.1998-328>

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.