



Power Improvement of a Commercial Large Scale Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators

H. Yazdani, M. Sefid*

Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

ABSTRACT: The present study numerically investigates the feasibility of using multiple dielectric barrier discharge plasma actuators inside the surface of geometry as a novel approach for active flow control over a large vertical axis wind turbine. For this reason, the plasma actuator is modeled based on Suzen model and the results are validated. Then, a computational study is carried out on a commercial large scale vertical -axis wind turbine to examine the effect of the presence of the plasma actuator. The 530 G vertical-axis wind turbine is used as the baseline case. The plasma actuator was applied inside the surface of the blades of turbine and on all their surfaces in a sequential and simultaneous way. It is revealed that the use of multiple dielectric barrier discharge actuators could enhance the induced velocity; this affects the pressure distribution and increases the aerodynamic torque. Consequently, an averaged power increase of 3 % was achieved. Possibility of increase in wind turbine power even in a commercial scale large turbine has been proved by flow separation control using the plasma actuation technology. In addition, the application of the plasma inside the surface of the blades will not effect on its performance.

Review History:

Received: Aug. 27, 2019
Revised: Nov. 25, 2019
Accepted: Dec. 29, 2019
Available Online: Jan. 23, 2020

Keywords:

Active control
Plasma actuator
Commercial large-scale wind turbine
Vertical axis wind turbine

1. Introduction

In recent years wind turbines have become the symbol of clean and green energy. In fact, unlike most other technologies for generating electricity, wind turbines do not utilize combustion processes that yield environmentally hazardous emissions [1]. As wind energy forces to reduce the cost of energy, manufacturers have sought to increase the size and capacity of wind turbines. Increasing the generated power of a wind turbine by low construction costs is an important goal in the recent renewable energy literature [2].

In the present study, the vertical-axis wind turbine of 530 G [3] that is a commercial large scale of vertical wind turbine is numerically simulated. Its blade is equipped with multiple Dielectric Barrier Discharge (multi-DBD) plasma actuators for active flow control to improve its aerodynamic performance. Multi-DBD plasma actuators are usually composed of several single DBD in series in order to cumulate the induced velocity produced by each actuator. According to the literature, most studies on the effects of plasma actuators on performance of wind turbine are based on horizontal-axis wind turbine blades e.g., [4-5] or experimentally on small scale of vertical-axis wind turbines [6]. The main contribution of this study is to considering the effects of the plasma actuator on performance of large scale of vertical-axis wind turbine numerically. In addition, application of the multi-DBD plasma actuator on Vertical Axis Wind Turbines (VAWT) numerically has not been studied before, and we will show here it is vital for turbine performance improvement.

2. Baseline Wind Turbine

The vertical axis wind turbine 530 G [3] was chosen as the reference model for this study. The specifications of this turbine are given in Table 1.

3. Numerical Solution

3.1. Vertical-axis wind turbine

For numerical simulation of the flow around the VAWT, the flow is simulated in 2 Dimensional (2D) and 3D. To solve the flow field and simulate rotor motion, Moving Reference Frame (MRF) method has been implemented. In fact, to apply the turbine rotation, the steady mode of MRF is used as the initial answer, and then the dynamic mesh model is used for unsteady mode. In this method, the numerical domain is divided to an inner cylinder sector having a diameter of

Table 1. Specifications

Specifications	
Number of blades/set	4
Rotor diameter	5.385816 m
Blade length	3 m
Blade cord	0.44704 m
Rotor RPM	80

*Corresponding author's email: mhsefid@yazd.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

about $1.05 R$ and the turbine sections are inside it, and the exterior boundary. The boundary between these two sectors is separated by the interface zone. The exterior boundary is stationary but interior boundary and inner mesh with blades that are inside it can rotate with respect to the non-moving area during numerical simulations. In other words, for all the simulations, two different grid levels have been adopted: a fixed sub-grid with the external dimensions of the flow domain, and a dynamic sub-grid that includes the VAWT geometry and allows a relative motion with respect to the fixed grid.

During a solution after a steady solution and a suitable initial solution, the problem is solved unsteady and after an initial time, the results are repeated for each blade during the rotation period, and integration can be done on it. Also, two of the most referenced turbulence models for cases including strong adverse pressure gradients, $k-\epsilon$ Realizable and $k-\omega$ SST are have been selected and adopted in the Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling approach. The 2D mesh adopted is a structured mesh and y^+ values of the near-wall is around 1 so that more accurate answers can be obtained. A structured grid with higher concentration has been established. Cells concentrations in the proximity of wall and blade surface are selected in a way that boundary layer and flow physics at these regions is captured with approvable accuracy. As you move away from airfoil, for simplicity, a triangular unstructured mesh has been used.

The pressure-velocity coupling scheme in the solver is chosen simple. Pressure discretization is presto. In addition, momentum discretization, turbulent kinetic energy discretization and specific dissipation rate discretization are chosen second order upwind.

3.2. Plasma actuator

3.2.1. Governing equation

$$\vec{f}_B = \rho_c \vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{E} = -\nabla \Phi \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot (\nabla \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} (\nabla P - \vec{f}_B) \quad (4)$$

Governing equations are:

where \vec{f}_B , ρ_c , \vec{E} , Φ , ϵ , \vec{U} and P are the body force vector, net charge density, electric field, total electric potential, permittivity, velocity vector and pressure respectively. In order to imply the plasma actuator, we develop a User-Defined Function (UDF) in Fluent software.

4. Discussion and Results

Fig. 1 shows total electric potential on blade surface. As it is obvious, 8 actuators have been placed on entire surface of the blade (inboard and outboard simultaneously). In current study multiple actuators based on Suzen et al. [7] model is used to increase the total induced body force. The width of all the electrodes is 10 mm and their thickness is 0.1 mm.

The $k-\epsilon$ Realizable method is used to solve flow field of the wind turbine. Fig. 2 illustrates the torque variation versus time with and without plasma actuator. Also, Fig. 3 shows the torque variation versus azimuthal angle with and without plasma actuator. As it is obvious from these figures, presence of the plasma actuators has increased the torque and if we integrate graphs against time, it shows the wind turbine output power increased by 3%.

5. Conclusions

In the current study, application of plasma actuator as device for active flow control over the commercial large-scale vertical-axis wind turbine 530 G has been considered.

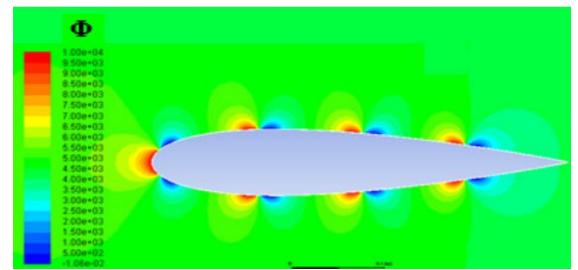


Fig. 1. Total electric potential

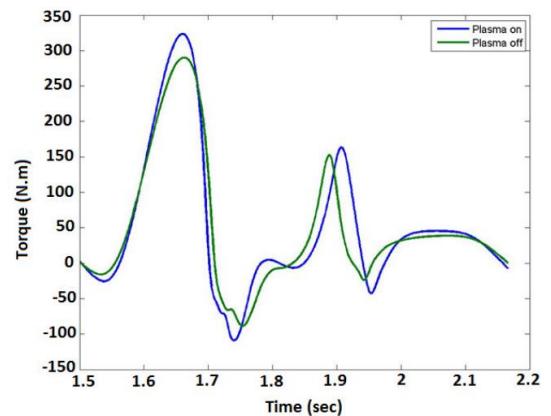


Fig. 2. Torque variation vs. time with and without plasma actuator

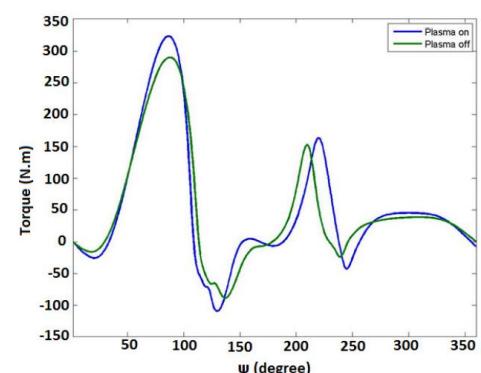


Fig. 3. Torque variation vs. azimuthal angle with and without plasma actuator

Also, its effect on the wind turbine power was examined. In this reason, multiple plasma actuators were located on the entire surface of the blade. The results revealed that this configuration could significantly increase plasma effects. Eventually, a power increase of 3% was obtained. Finally, Power enhancement even in a commercial large-scale vertical-axis wind turbine has been demonstrated by using the multiple plasma actuators.

References

- [1] W. Europe, The European offshore wind industry—Key trends and statistics 2016, Wind Europe: Brussels, Belgium, (2017) 37.
- [2] C. Van Dam, D.E. Berg, S.J. Johnson, Active load control techniques for wind turbines, Sandia National Laboratories, University of California, USA, (2008).
- [3] S. Naghib Zadeh, Mesh Requirement Investigation for 2D and 3D Aerodynamic Simulation of Vertical Axis Wind Turbines. M.Sc. Thesis, Concordia University, (2013).
- [4] A. Ebrahimi, M. Movahhedi, Wind turbine power improvement utilizing passive flow control with microtab, Energy (elsevier), 150 (2018) 575-582.
- [5] H. Matsuda, M. Tanaka, T. Osako, K. Yamazaki, N. Shimura, M. Asayama, Y. Oryu, Plasma Actuation Effect on a MW class Wind Turbine, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, 9(1) (2017).
- [6] D. Greenblatt, M. Schulman, A. Ben-Harav, Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators, Renewable Energy, Elsevier, 37(1) (2012) 345-354.
- [7] Y. Suzen, G. Huang, J. Jacob, D. Ashpis, Numerical simulations of plasma based flow control applications, in: 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, Canada, (2005) 4633.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Yazdani, M. Sefid, *Power Improvement of a Commercial Large Scale Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators*, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 355-358.

DOI: [10.22060/mej.2020.16968.6487](https://doi.org/10.22060/mej.2020.16968.6487)





بهبود عملکرد توربین باد محور عمودی با مقیاس واقعی با به کارگیری عملگر پلاسمایی

حمیدرضا یزدانی، محمد سفید*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳

خلاصه: هدف از این تحقیق شبیه‌سازی سه بعدی جریان حول توربین باد عمود محور در ابعاد واقعی تحت تأثیر نیروهای جرمی حاصل از عملگر پلاسمایی می‌باشد. بدین منظور، ابتدا عملگر پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت که در شرایط هوای ساکن قرار دارد، شبیه‌سازی شده و نتایج با مدل مرتع اعتبارسنجی گردید. سپس به منظور کاربرد عملگر بر روی توربین باد و به دلیل حساسیت جریان و تأثیر نامطلوب حضور عملگر بر روی سطح پره‌ها، ایده‌ی اعمال آن درون سطح پره‌های توربین اولین بار در این پژوهش به کار گرفته شد. بدین منظور ابتدا توربین باد ابعاد واقعی G ۵۳۰ بصورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردید. در آخر، عملگر پلاسمایی درون سطح پره‌های توربین عمود محور و بر روی تمام سطح آن‌ها بصورت متواالی و همزمان اعمال شد. نتایج نشان داد اعمال عملگر با این شرایط خاص، سبب تغییر الگوی جریان بر روی پره‌ی توربین باد واقعی شده و در نتیجه توان خروجی به میزان ۳ درصد افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت این است که توان در یک توربین بادی محور عمودی مقیاس واقعی با استفاده از تکنولوژی عملگر پلاسما می‌تواند افزایش یابد. همچنین اعمال عملگر درون سطح پره‌ها تأثیر در کارایی عملگر نخواهد داشت.

کلمات کلیدی:

کنترل فعال

عملگر پلاسمایی

توربین باد عمود-محور

توربین باد مقیاس- واقعی

اندک، سادگی ساختار، مصرف کم انرژی و کاهش هزینه‌های اجرایی

اشاره نمود. عملگر پلاسمایی به دلیل ویژگی‌های بیان شده پتانسیل

بالایی نسبت به سایر روش‌ها در آینده برای استفاده در توربین‌های

بادی تجاری دارد [۴].

میلک و همکاران^۱ [۵] نخستین کسانی بودند که از نیروی جت

حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم به منظور ایجاد یک ناحیه

پلاسما و در نهایت کاهش نیروی پسا بر روی صفحات تخت استفاده

کردند. پس از آن‌ها افراد دیگری از عمل تخلیه الکتریکی به منظور

به کارگیری تولید بردار نیروی حجمی و کنترل جدایش لایه مرزی

جريان و افزایش نیروی برآ بر روی اجسام مختلف اقدام نمودند.

گراندمون و همکاران^۲ [۶] تأثیر عملگر پلاسمایی را بر روی جریان

لایه مرزی بر روی صفحه تخت به صورت عددی و تجربی بررسی

کردند. آن‌ها در بررسی‌هایشان دریافتند که استفاده از این نوع عملگر

باعث می‌شود لایه مرزی بر روی صفحه تخت کاهش یافته و سبب

- مقدمه

بیش از ۴۰ درصد افزایش در استفاده از توربین‌های بادی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵، سبب شده است سازندگان توربین‌های باد انگیزه زیادی برای افزایش بازده توربین و کاهش هزینه‌های تولید داشته باشند [۱]. توانایی کنترل جریان، به منظور ایجاد تغییری دلخواه، دارای اهمیت تکنولوژیکی و کاربردی قابل ملاحظه‌ای است. روش‌های متفاوتی برای افزایش توان خروجی از طریق کنترل جریان وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایب مخصوص خود می‌باشند. در چند سال گذشته به منظور افزایش بازده، روش‌های متفاوتی مانند تولید کننده‌های گردابه، عملگر جت مصنوعی^۳ و عملگرها پلاسمایی به کار رفته است [۲ و ۳]. عملگر پلاسمایی به دلیل مزایای ارزشمند خود در زمینه کنترل جریان، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از ویژگی‌های مهم این عملگر پلاسمایی می‌توان به نداشتن قطعات متحرک، قابلیت پاسخگویی سریع و تاخیر زمانی

2 Malik et al.

3 Grundmann et al.

1 synthetic jets

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mhsefid@yazd.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسنده‌گان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



همکاران^۸ [۱۴] استفاده از عملگر پلاسمای بر روی توربین محور افقی تجاری در ابعاد بزرگ را به کار برداشتند. نتایج آنها نشان داد که عملگر می‌تواند افزایش ۴/۹ درصدی در توان توربین باد ایجاد کند. همانگونه که بیان شد عملگر پلاسمای تاکنون بر روی توربین باد عمود محور ابعاد واقعی پیاده‌سازی نشده است و گرین بلت تنها عملگر بر توربین باد مقیاس کوچک را مورد بررسی قرار داده است و تنها پژوهشی هم که به بررسی افزایش بازده توربین با استفاده از این روش پرداخته شده است، مربوط به توربین باد محور افقی است که افزایش بازده به میزان ۴/۹ درصدی را در پی داشته است.

هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از عملگر پلاسمای جهت کنترل جدایش جریان درون پره توربین باد محور عمودی مقیاس واقعی و افزایش گشتاور و توان خروجی آن است. برای این منظور، توربین باد محور عمودی مرجعی انتخاب و جریان بر روی آن به صورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی عملگر پلاسمای بر اساس مدل سوزن^۹ صورت گرفته و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عملگر پلاسمای توربین باد با مقایسه نتایج با مراجع انجام شده است. با چینش چندین عملگر درون سطح پره توربین برای اولین بار، الگوی جریان و در نتیجه افزایش گشتاور تولیدی توربین بررسی شده است.

۲- توربین باد مبنا

به منظور بررسی اثر کنترل جریان به وسیله عملگر پلاسمای توربین باد محور عمودی تجاری G ۵۳۰ به عنوان توربین باد مبنا انتخاب شده است. مشخصات این توربین در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات توربین باد مبنا

Table 1. Properties of baseline wind turbine

ابعاد	مشخصات
۴	تعداد پره‌ها
۵/۳۸۵۸۱۶ m	قطر روتور
۳ m	طول پره
۰/۴۴۷۰۴ m	وتر پره
۸۰	سرعت دورانی روتور

8 Matsuda et al.

9 Suzen

تا خیر در گذار شود. اولو و همکاران^۱ [۷] کنترل جدایش و پدیده واماندگی را بر روی لبه ایرفویل با عملگر بررسی کردند. سوسا و همکاران^۲ [۸] کاهش نیروی پسا حول یک استوانه در حال دوران را با قرار دادن عملگر پلاسمایی بر روی آن به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که که استفاده از این نوع عملگر باعث می‌شود نیروی پسا ایستوانه ۲۵ درصد کاهش یابد. در زمینه استفاده از عملگر پلاسمایی برای کنترل جریان عبوری از پره روتور توربین باد، فعالیت‌های اندکی صورت گرفته است. نلسون و همکاران^۳ [۹] پژوهشی را در راستای طراحی پره‌های هوشمند توربین باد به کمک عملگر پلاسمای روی ایرفویل‌های S۸۲۷ و S۸۲۲ را با هدف کنترل جدایش جریان از لبه حمله برای افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تاثیر عملگر پلاسمای در کنترل جدایش محلی جریان معادل به کارگیری سطوح متحرک برآزا در لبه فرار یا لبه حمله است.

گرین بلت و همکاران^۴ [۱۰] به روش تجربی از عملگر پلاسمای در لبه حمله پره‌های یک توربین باد محور عمودی کوچک استفاده کردند تا به کمک کنترل جدایش دینامیکی جریان، عملکرد آن را بهبود ببخشند. کوتسینیس و همکاران^۵ [۱۱] در فعالیتی تجربی به مطالعه کنترل جریان روی ایرفویل متقارنی با لبه فرار منحنی شکل پرداختند. آنها با قراردادن عملگر پلاسمای در لبه فرار، نشان دادند که این روش ضمن کارایی، نسبت به روش کنترل جریان با جت می‌تواند سبب حذف افزایش وزن و دیگر مسائل پیچیده شود. نتایج اولیه، افزایش در حدود ۱۰٪ برای ضریب برآ در اعداد رینولدز پایین را نشان داد.

آنو و همکاران^۶ [۱۲] در فعالیتی عددی و تجربی، آبرودینامیک پره یک مدل ساده از توربین باد محور افقی را در حضور عملگر پلاسمای بررسی کردند. نتایج مشخص کرد که استفاده از عملگر پلاسمای موجب افزایش ۱۴ درصدی گشتاور تولیدی می‌شود. همچنین کنی و همکاران^۷ [۱۳] سه نوع عملگر را برای کنترل جریان روی یک توربین باد ۲۰ کیلوواتی و بهبود عملکرد آن توسعه دادند. اخیراً ماتسودا و

1 Orlov et al.

2 Sosa et al.

3 R. C. Nelson

4 D. Greenblatt et al.

5 M. Kotsoniset al.

6 Aono et al.

7 Cooney et al.

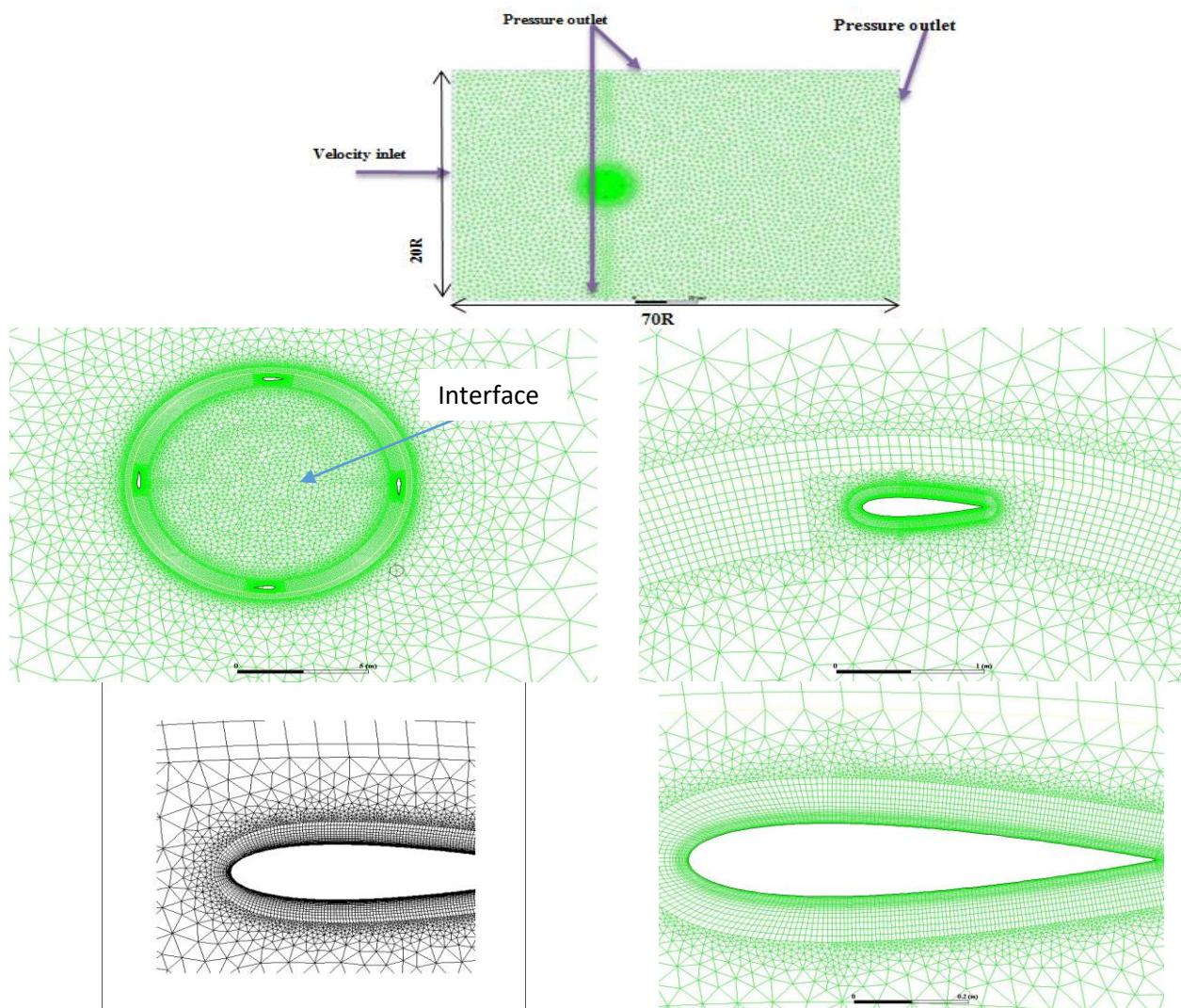


Fig. 1. Two Dimensional (2D) computational grid

شکل ۱: شبکه تولید شده دو بعدی

دارای قطری در حدود $1/0.5$ برابر قطر توربین است که مقاطع توربین در داخل آن قرار می‌گیرند و یک محدوده بیرونی تقسیم می‌گردد. مرز بین این دو محدوده با شرط مرزی واسطه^۵ جدا می‌گردد. محدوده خارجی ایستا^۶ است. ولی محدوده داخلی می‌تواند بر حسب زمان بچرخد و شبکه داخلی به همراه بال‌ها که در داخل آن قرار دارد نسبت به محدوده خارجی دوران می‌کند. در طول حل پس از یک حل پایا و جواب اولیه مناسب، مسئله به صورت غیرپایا حل می‌گردد و پس از گذشت یک زمان اولیه نتایج برای هر بال در طول پریود چرخشی جریان تکرار شده و می‌توان داده‌برداری و انتگرال‌گیری را از روی آن انجام داد. همچنین از دو مدل مغلوث شده^۷ و انتقال

۳- شبیه‌سازی توربین باد

برای شبیه‌سازی عددی جریان حول توربین باد محور عمودی، جریان در دو حالت دو و سه بعدی شبیه‌سازی می‌گردد. البته با توجه به اینکه طول مقطع بال نسبت به طول وتر عدد بزرگی است حتی فرض دو بعدی نیز فرض خوبی است. برای پیاده‌سازی دوران توربین، از مدل قاب مرجع چرخان^۱ در حالت پایا به عنوان جواب اولیه و سپس مدل شبکه متحرک^۲ برای حالت غیرپایا در نرم افزار فلئنت^۳ که نرم افزاری مهندسی برای مدل کردن جریان است، استفاده شده است. در این روش، محدوده حل عددی^۴ به یک استوانه داخلی که

5 Interface

6 Stationary

7 Realizable

1 Moving Reference Frame (MRF)

2 Dynamic Mesh

3 Fluent

4 Domain

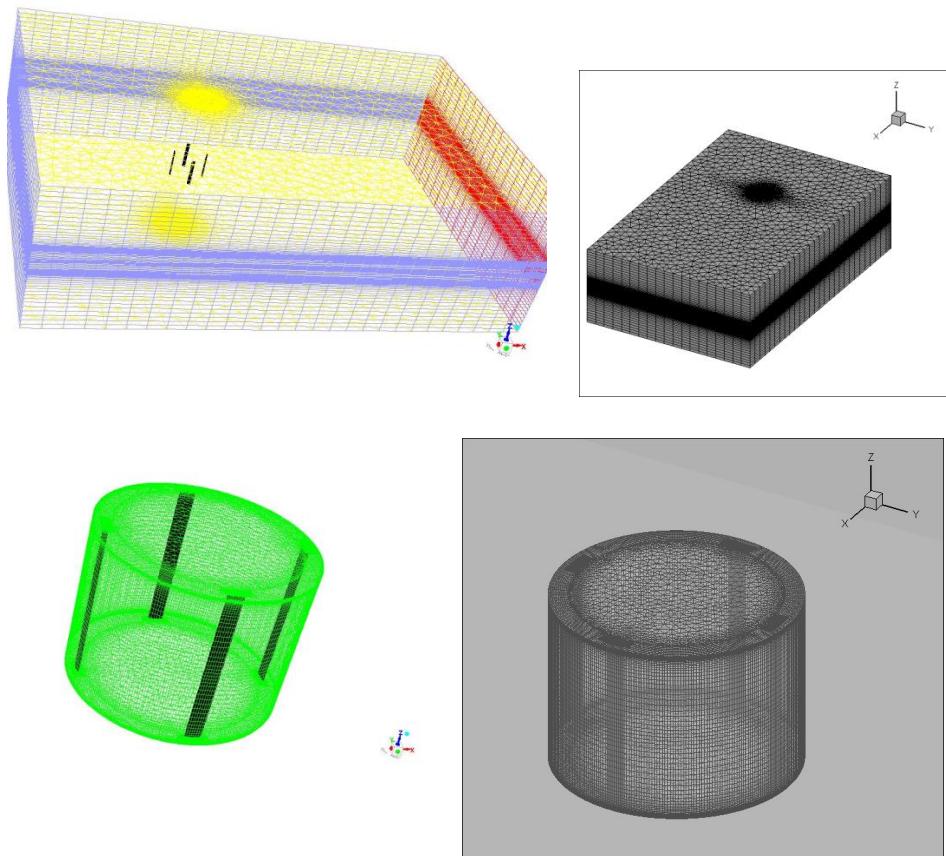


Fig. 2. Three dimensional computational grid

شکل ۲: شبکه تولید شده سه بعدی

مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی^۷ و گسسته سازی نرخ پراکندگی ویژه^۸ از نوع بالادست مرتبه دوم^۹ به کار گرفته شده است. به منظور مطالعه استقلال از شبکه، نمودار ضریب توان بر حسب ضریب سرعت نوک برای شبکه‌های تولید شده در حل سه بعدی در شکل ۳ به نمایش گذاشته شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، نتایج ضریب توان برای شبکه‌های تولیدی، پروفیل یکسانی دارند اما برای شبکه‌های ریز و بسیار ریز نتایج به داده‌های تجربی [۱۵] بسیار نزدیک می‌باشد. لذا برای ادامه کار و با عطف به تعداد شبکه‌های تولیدی که تاثیر به سزاگی در زمان حل دارند، شبکه ریز را ملاک قرار داده و مطالعات را بر اساس شبکه ریز ادامه داده‌ایم.

۱-۳- شبکه محاسباتی و اعتبار سنجی نتایج توربین باد:

برای شبیه‌سازی دو مدل مغشوش $k-\epsilon$ واقعی شده و انتقال

7 Turbulent Kinetic Energy Discretization

8 Specific Dissipation Rate Discretization

9 Second Order Upwind

تنش برشی^۱ به منظور شبیه‌سازی استفاده شده است. شبکه در حالت دو بعدی حدود ۶۸۰/۰۰۰ سلول است. شبکه‌بندی در نزدیک دیواره ایرفویل به صورت سازمان یافته^۲ انجام شده است و در نزدیک دیواره به اندازه کافی ریز شده است تا y^+ حدود ۱ را برای دقت حل به خصوص در مدل توربولانس $k-\omega$ ^۳ ایجاد نماید. با فاصله گرفتن از ایرفویل به منظور سادگی، از شبکه مثلثی بی‌سازمان^۴ استفاده گردیده است. با فاصله گرفتن از بدنه، شبکه نیز درشت می‌شود. شبکه تولید شده در نمای دو بعدی در شکل ۱ و شبکه تولید شده در مدل سه بعدی در شکل ۲ به ترتیب آورده شده است. به منظور شبیه‌سازی کوپلینگ فشار- سرعت^۵ در حلگر، از نوع ساده^۶ و گسسته‌سازی فشار از نوع پرستو^۷ انتخاب شده است. همچنین گسسته سازی

1 Shear Stress Transport (SST)

2 Structured Mesh

3 Triangular unstructured mesh

4 Pressure-Velocity Coupling Scheme

5 Simple

6 Presto

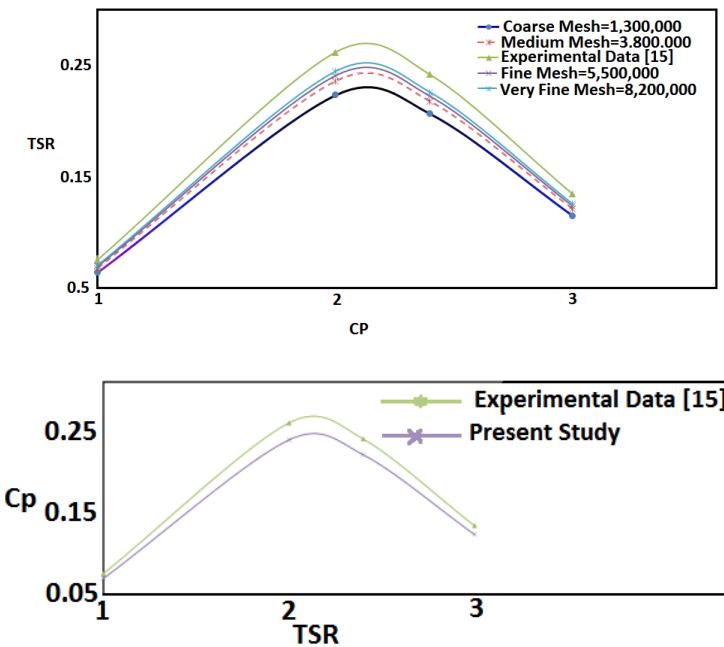


Fig. 3. Power coefficient vs. Tip Speed Ratio (TSR) for different Mesh

شکل ۳: ضریب توان بر حسب ضریب سرعت نوک برای شبکه‌های متفاوت

شکل ۷ مقایسه نتایج دو بعدی دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ را نشان می‌دهد. برای محاسبه مقادیر ضریب توان با به کارگیری نرم افزار متلب ، از نتایج ضریب توان بر حسب زمان در یک سیکل زمانی، انتگرال گیری صورت گرفته است. برای هر دو مدل مغشوش در حالت دو بعدی با استفاده از بی بعدسازی به ترتیب به مقادیر $0/31$ و $0/24$ در مدل‌های $k-\epsilon$ و $k-\omega$ برای C_p می‌رسیم. مقدار تجربی C_p برابر با $0/26$ است[۱۵]. شکل ۸ نتایج دو و سه بعدی برای مدل $k-\epsilon$ به صورت همزمان نشان می‌دهد.

تنش برشی $k-\omega$ به کار گرفته شده و همچنین برای بررسی دقیق از گام‌های زمانی مختلف استفاده شده است. در شکل ۴ نمودار گشتاور هر پره توربین (W) بر حسب زمان در حالت دو بعدی نشان داده شده است. آنچه از شکل نیز مشخص است پس از گذشت یک زمان اولیه، نمودارها در یک سیکل تکرار می‌گردند.

شکل ۵ نشان دهنده نمودار هر پره بر حسب زمان در یک چرخش 360 درجه‌ای و شکل ۶ بر حسب زاویه $\pi/4$ می‌باشد. همانگونه که انتظار می‌رود نمودار گشتاور برای هر چهار پره بر روی هم منطبق شده‌اند.

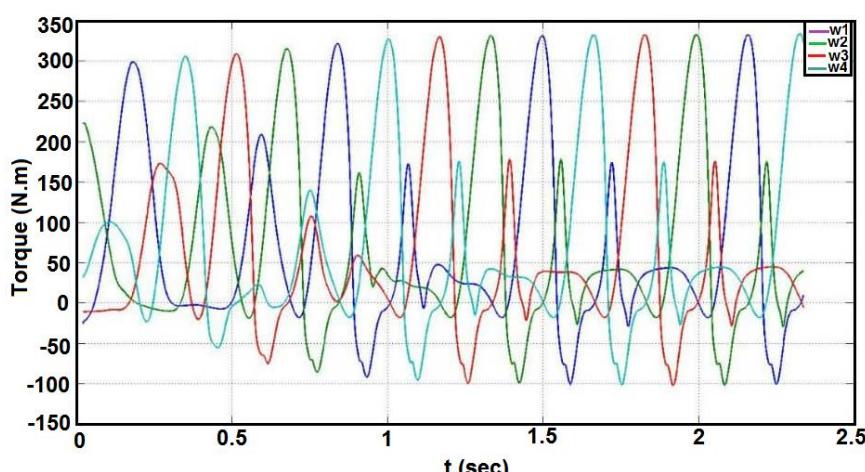


Fig. 4. The 2D torque variation of each turbine blade vs. time

شکل ۴: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زمان

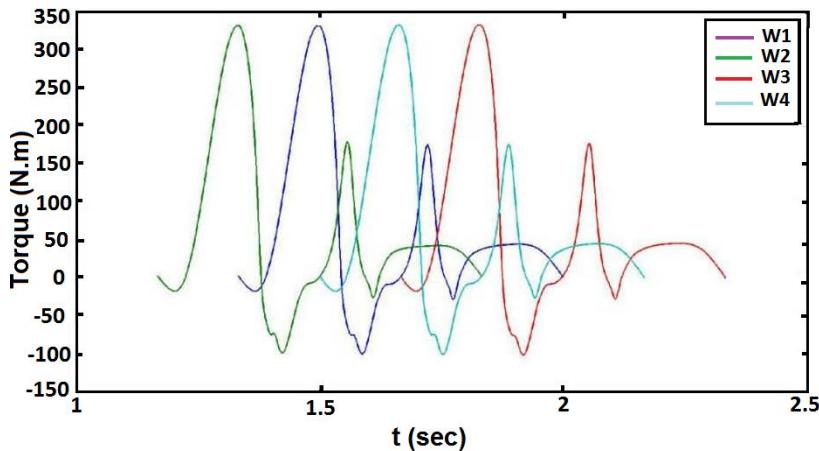


Fig. 5. Torque variation of each blade vs. time in a 360° rotation

شکل ۵: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زمان

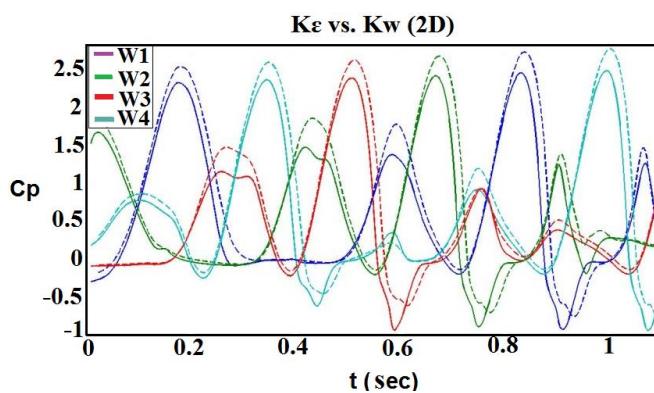


Fig. 7. The comparison of the results power coefficient vs. time between $k-\epsilon$ and $k-\omega$ for 2D

شکل ۷: مقایسه نتایج دو بعدی دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$

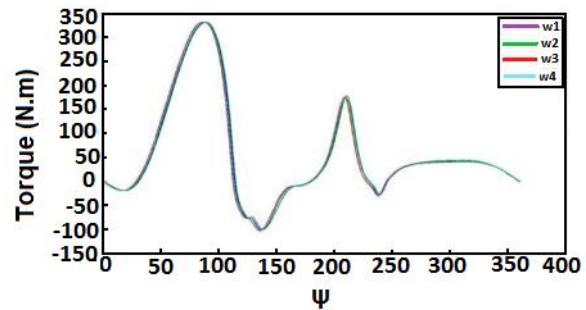


Fig. 6. Torque variation of each blade vs. azimuthal angle

شکل ۶: نمودار گشتاور هر پره بر حسب زاویه Ψ

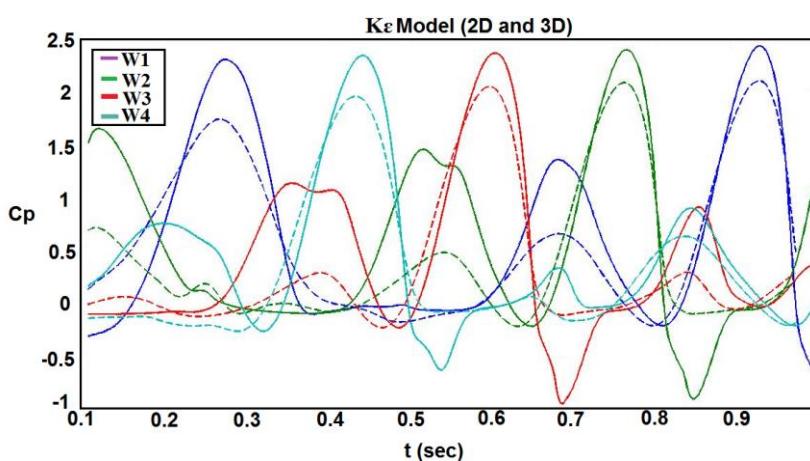


Fig. 8. The comparison of the results power coefficient vs. time between 2D and 3D for $k-\epsilon$ model

شکل ۸: مقایسه نتایج دو بعدی و سه بعدی در مدل $k-\epsilon$

در ادامه در شکل‌های ۹ تا ۱۲ کانتور سرعت و خط جریان در زمان‌های $0/5$ و 2 ثانیه برای شبیه‌سازی دو بعدی و در شکل‌های 13 و 14 کانتور سرعت و خط جریان برای شبیه‌سازی سه بعدی ارائه

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است اختلاف نتایج عددی با نتایج تجربی برای مدل $k-\epsilon$ کمتر از 8 درصد می‌باشد که نشان از دقیقیت مدل‌سازی انجام شده دارد.

جدول ۲. مقایسه حل عددی و نتایج تجربی
Table 2. Comparison of numerical and experimental results for C_p

نتایج تجربی [۱۵]	نتایج عددی ($k-\epsilon$)	نتایج عددی ($k-\omega$)	C_p مقدار	حل دو بعدی
۰/۲۶۱	۰/۲۴	۰/۳۱		
۰/۲۶۱	۰/۲۵	-	C_p مقدار	حل سه بعدی

تفعیلات ایجاد شده در پره دوم سبب ایجاد تاثیرات چشمگیر در پایین دست خود شده و سبب ساز جدایش و ایجاد گردابه بر روی پره سوم می‌گردد.
 شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب کانتور سرعت ناپایای سه بعدی و خط جریان گذرنده از صفحه میانی پره ها در حالت ناپایای بدون پلاسما را نشان می دهند. همانگونه که خط جریان به دست آمده نشان

شده است.

همانگونه که در شکل ۹ واضح است، پره های توربین نقاط جدایش را تجربه می کنند و با چرخش بیشتر و در ثانیه دوم این جدایش بر روی سطح ایروفیل پره ها مشخص تر و نمایان تر می باشد. همچنین در چرخش و دوران پره ها از زمان $0/5$ تا 2 ثانیه، گردابه های ایجاد شده در خطوط جریان را می توان مشاهده نمود. قابل ذکر است که

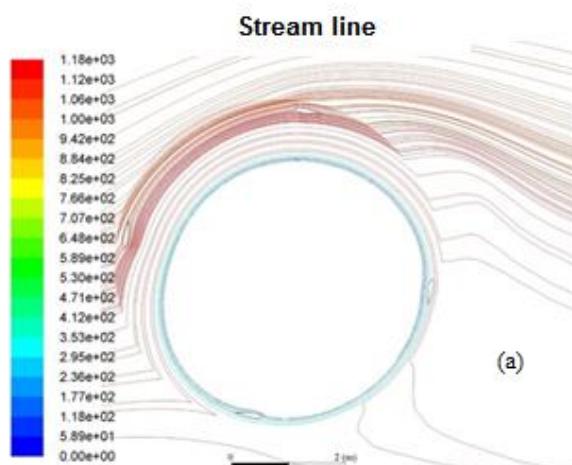


Fig. 11. 2D stream line around of turbine at $t=0.5$ s
 شکل ۱۱: خط جریان در زمان $0/5$ ثانیه

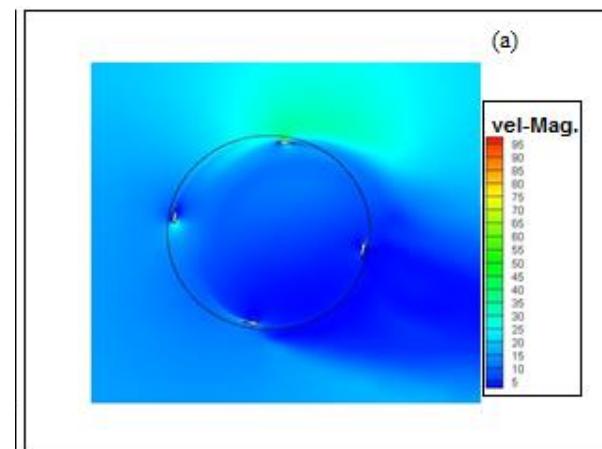


Fig. 9. 2D velocity magnitude around of turbine at $t=0.5$ s
 شکل ۹: کانتور سرعت حول توربین در زمان $0/5$ ثانیه در حالت غیر پایا

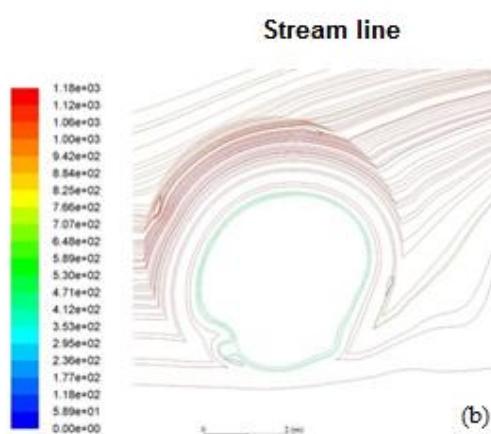


Fig. 12. 2D stream line around of turbine at $t=2$ s
 شکل ۱۲: خط جریان در زمان ۲ ثانیه

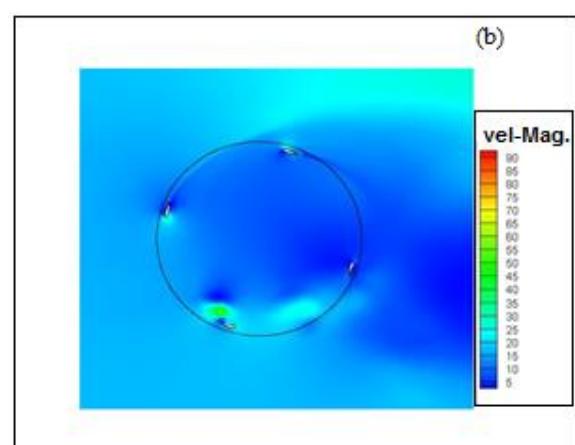


Fig. 10. 2D velocity magnitude around of turbine at $t=2$ s
 شکل ۱۰: کانتور سرعت حول توربین در زمان ۲ ثانیه

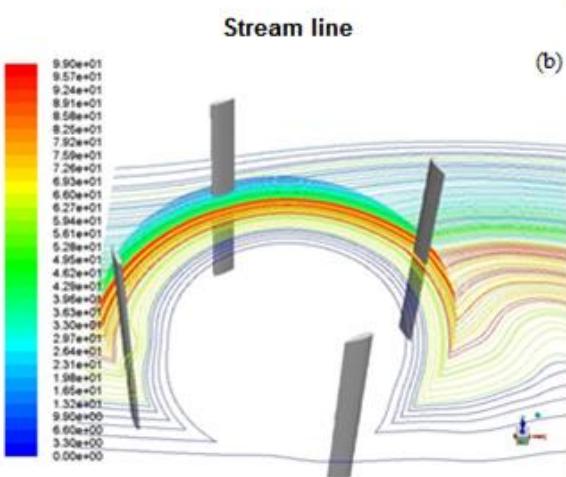


Fig. 14. 3D stream line around of turbine without plasma actuator

شکل ۱۴. خط جریان سه بعدی عبوری از صفحه میانی پره در حالت غیر پایا و بدون پلاسمایا

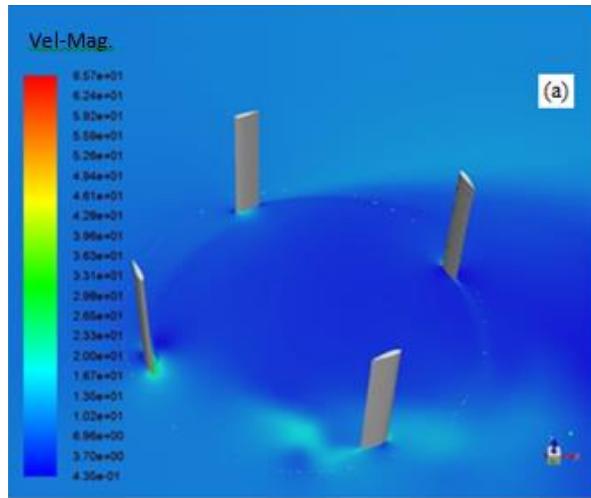


Fig. 13. 3D velocity contour around of turbine without plasma actuator

شکل ۱۳: کانتور سرعت غیر پایا سه بعدی در حالت بدون پلاسما

عملگر پلاسمایی استفاده می‌کنند که مقدار آن به اندازه الکترودها، فرکانس، ولتاژ ورودی عملگر و برخی خواص ثابت هوا بستگی دارد. اولو و همکاران^۲ [۱۸]، مدل دقیق دیگری جهت مدل‌سازی عملگر پلاسمایی ارائه کردند که وابستگی زمانی نیروی حجمی در طول چرخه را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کنند. برای این منظور آن‌ها ناحیه فوقانی سطح دی الکتریک را بر یک شبکه مدارهای الکتریکی تقسیم‌بندی نمودند تا بدین وسیله بتوانند توزیع پتانسیل الکتریکی در امتداد سطح فوقانی الکترود پوشیده شده را در هر گام زمانی چرخه محاسبه کنند. شایان ذکر است که هر اندازه پیچیدگی این مدل‌ها افزایش یابد، تاثیرات عملگر پلاسمایی بر روی جریان با دقت بیشتری مدل‌سازی می‌شود. سوزن و همکاران^۳ [۱۹] مدلی پیچیده‌تر و در سطحی بالاتر ارائه کردند که در آن به کمک حل توزیع فضایی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار در اطراف عملگر که به عنوان تابعی از مقدار ولتاژ ورودی عملگر، هندسه و خواص ماده دی الکتریک تعريف می‌شوند، توزیع نیروی حاصل از عملگر، به صورت واقع بینانه‌تری مدل‌سازی می‌شود. به این ترتیب دامنه لحظه‌ای بردارهای نیروی حجمی با توجه به نوع ولتاژ ورودی تغییر می‌کند تا تغییرات توزیع نیرو بر حسب زمان حاصل شود.

عملگرهای پلاسما به وسیله یک جفت الکترود که توسط یک ماده عایق الکتریکی از هم جدا می‌شوند، شکل می‌گیرند. در نوعی

می‌دهد، پره دوم جدایش را تجربه می‌کند. همچنین گردابهای ایجاد شده مابین پره‌های دوم و سوم را می‌توان به وضوح در شکل ۱۳ مشاهده کرد. لازم به ذکر است دلیل اصلی شکستگی خطوط جریان به علت شرط مرزی واسطه می‌باشد. علاوه بر آن علت دیگر را می‌توان جریان اصلی دانست که بیرون مرز دایره حرکت می‌کند و یک جریان ثانویه در همین ناحیه حول خود می‌چرخد. لذا نظر به اینکه شرط مرزی واسطه یک سری خطای عددی را تولید می‌کند و همچنین با توجه به لغزیدن شبکه‌ها نسبت به هم، چنین پدیده‌ای قابل انتظار می‌باشد. همانگونه که می‌توان انتظار داشت، پره‌های توربین باد به دلیل ماهیت و تجربه کردن زوایای حمله متفاوت در یک دور کامل، جدایش را تجربه خواهند کرد. جدایش بر روی هر پره سبب تاثیر بر روی میدان و الگوی جریان بر روی پره‌های دیگر می‌شود.

۴- معادلات حاکم بر عملگر پلاسما

چگونگی مدل‌سازی تاثیر عملگر پلاسمایی بر روی جریان عبوری کماکان یک چالش به شمار می‌رود. به همین دلیل تاکنون مدل‌های متفاوتی جهت شبیه‌سازی تاثیر عملگر بر جریان پیرامون آن مطرح شده است.

ساده‌ترین مدل، مدل شای و همکاران^۱ [۱۷] از یک توزیع خطی متوسط زمانی جهت شبیه‌سازی برداری نیروی حجمی حاصل از

2 Orlov et al.

3 Suzen et al

1 Shyy et al.

فضای آزاد مساوی با $C^{\epsilon} = 8/854 \times 10 - 12 N.m^2/C^{\epsilon}$ می‌باشد.
با این شرایط مکانیزم فیزیکی عملگر پلاسمای نحوه اثر آن بر روی جریان اطراف آن می‌باشد به طور کامل روشن شود. روشن است که نیروی بدنی توسعه داده شده به وسیله رابطه (۱) اثر زیادی بر روی میدان جریان دارد. اما اثر افزایش دمای موضعی و کاهش ویسکوزیته روی لایه مرزی روشن نیست. از آنجا که تنش ویسکوز باید ثابت بماند، این موارد منجر به افزایش سرعت در ناحیه پلاسمای از طریق کاهش تنش برشی می‌شود [۲۰]. اما اندازه گیری‌های آزمایشگاهی که اخیراً توسط محققان صورت گرفته، ثابت کرده است که چنین اتفاقی رخ نخواهد داد [۲۱]، بلکه ناحیه پلاسمای بیشتر شبیه یک ترم منبع در رابطه ممنتوом اثر می‌کند:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot (\nabla p \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} (\nabla p - \vec{f}_B) = -\frac{1}{\rho} (\nabla p + \rho_c \vec{\nabla} \Phi) \quad (5)$$

همانطور که از رابطه (۵) مشخص است نیروی الکترودینامیکی و گرادیان فشار هر دو به سان ترم‌های منبع در رابطه ممنتووم اثر می‌کنند.

۴- شبکه محاسباتی و اعتبار سنجی نتایج عملگر پلاسمای شبکه محاسباتی و شبکه در اطراف و نزدیک الکترودهای عملگر در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده است.

به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی عملگر پلاسمای مشخصات

از پیکربندی الکترودها، یکی از الکترودها در تماس با محیط و الکترود دیگر در زیر ماده عایق جای‌گذاری می‌شوند. در نوع دیگری از پیکربندی، هر دو الکترود در تماس با محیط قرار می‌گیرند (مانند فیلترهای الکترواستاتیک). وقتی که یک ولتاژ متناوب زیاد به الکترودها اعمال می‌شود، هوا در مجاورت آن‌ها (عموماً بالای الکترود متصل به زمین) یونیزه می‌شود. هوای یونیزه شده در حضور میدان الکتریکی تولید شده به وسیله الکترودها تحت اثر یک نیروی بدنی برداری قرار می‌گیرد که این نیرو در معادلات ممنتووم باعث ایجاد مؤلفه‌های سرعت پایا یا ناپایا می‌گردد. چنین نیرویی می‌تواند به صورت ترم‌های ولتاژ اعمال شده و چگالی بار تولیدی بیان شده و در معادلات ناویر-استوکس^۱ ادغام شود. با صرف‌نظر از نیروهای مغناطیسی، نیروی الکتروهیدرودینامیکی حاصل به صورت زیر قابل بیان است:

$$\vec{f}_B = \rho_c \vec{E} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، f_B نیروی بدنی در واحد حجم، p_c چگالی بار خالص و E میدان الکتریکی است. در محیط پلاسمای تغییرات زمانی میدان مغناطیسی اغلب قابل صرف‌نظر می‌باشد. این امر منجر به این می‌شود که رابطه ماکسول^۲ به صورت $\nabla \times E = \mu_0 \nabla \Phi$ ساده شود [۱۹]. درنتیجه می‌توان میدان الکتریکی را با استفاده از گرادیان پتانسیل اسکالار استخراج نمود:

$$\vec{E} = -\nabla \Phi \quad (7)$$

با استفاده از قانون گاوس می‌توان نوشت:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_c \text{ or } \nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = -\rho_c \quad (8)$$

در رابطه (۸)، ϵ ضریب نفوذپذیری الکتریکی می‌باشد که به صورت زیر قابل بیان است:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (9)$$

که ϵ_r ضریب نفوذپذیری نسبی محیط و ϵ_0 ضریب نفوذپذیری

-
- 1 Novier-Stokes
2 Maxwell

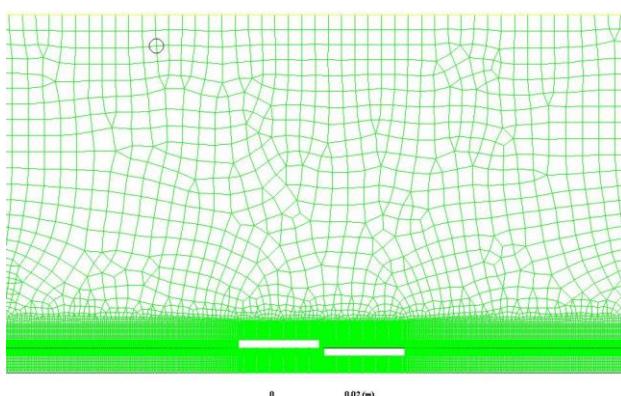


Fig. 15. Computational grid around of electrodes

شکل ۱۵: شبکه در اطراف الکترودها

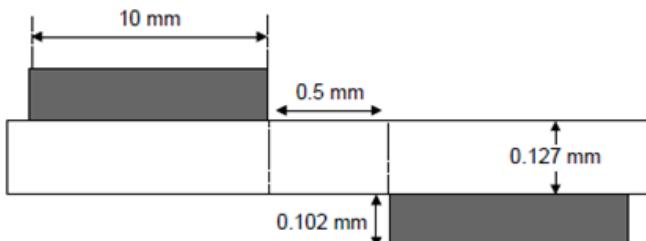


Fig. 17. Computational set up and details of the plasma actuator

شکل ۱۷: مشخصات و فواصل در حل پلاسمای

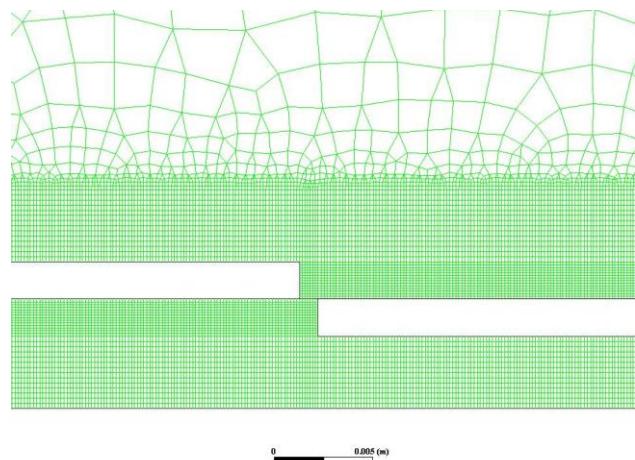


Fig. 16. Computational grid around of electrodes

شکل ۱۶: نمایی از شبکه نزدیک الکتروودها

همانطور که در شکل های ۱۸ تا ۲۰ مشاهده می شود خطوط چگالی بار، نیروی حجمی و خطوط پتانسیل الکتریکی مقادیر و روند مشابهی را طی می کنند. همچنین شکل ۲۱ جریان جت حاصل از عملگر در داخل جریان ساکن را نشان می دهد که حاکی از دقت بالای شبیه سازی است. برای به دست دادن معیاری کمی جهت

و فواصل عملگر مطابق شکل ۱۷ مطابق مرجع [۱۹] انتخاب و مدل سازی انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی عملگر پلاسما و مقایسه آن با مدل سوزن و همکاران [۱۹] در شکل های ۱۸ تا ۲۱

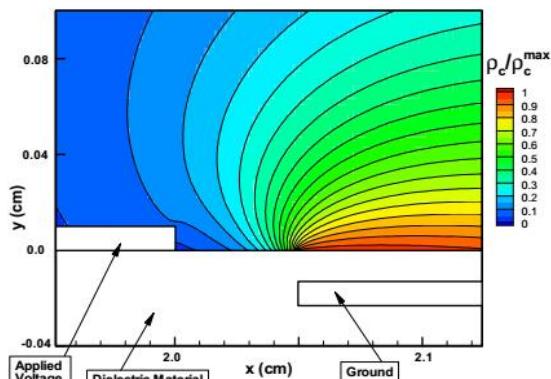
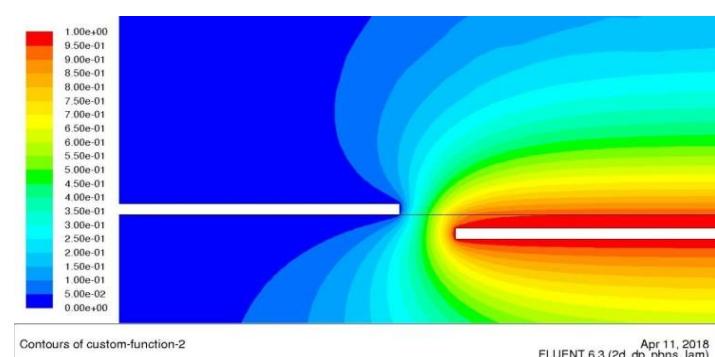


Fig. 18. The comparison of distributions of the net charge density around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۱۸: مقایسه کانتور چگالی بار شبیه سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)



Contours of custom-function-2 FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, lam) Apr 11, 2018

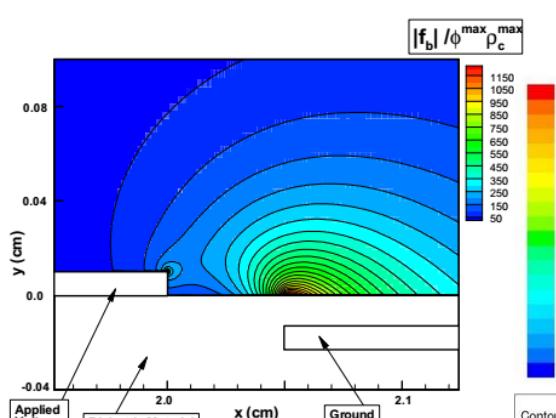


Fig. 19. The comparison of distributions of the body force around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۱۹: مقایسه کانتور اندازه نیروی حجمی شبیه سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

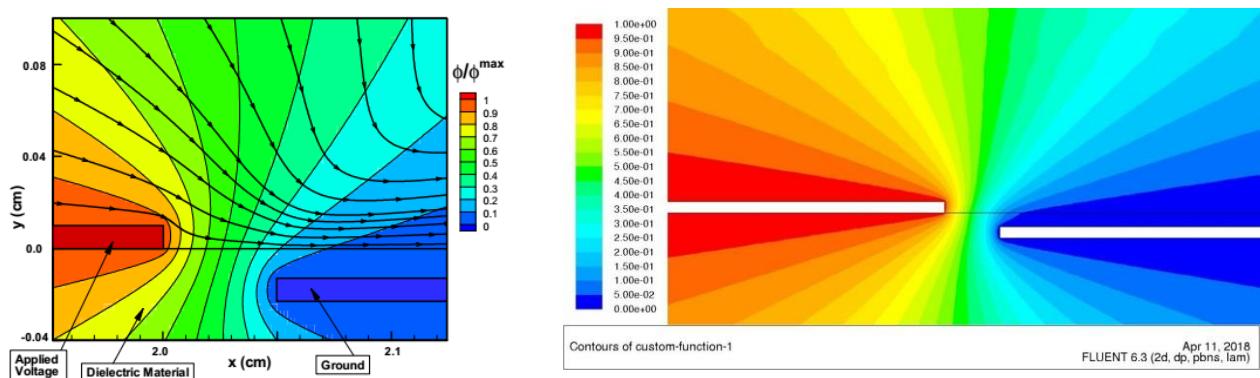


Fig. 20. The comparison of distributions of the electric potential around electrodes between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۲۰: مقایسه کانتور پتانسیل الکتریکی و خطوط جریان شبیه‌سازی صورت گرفته (سمت راست) با مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

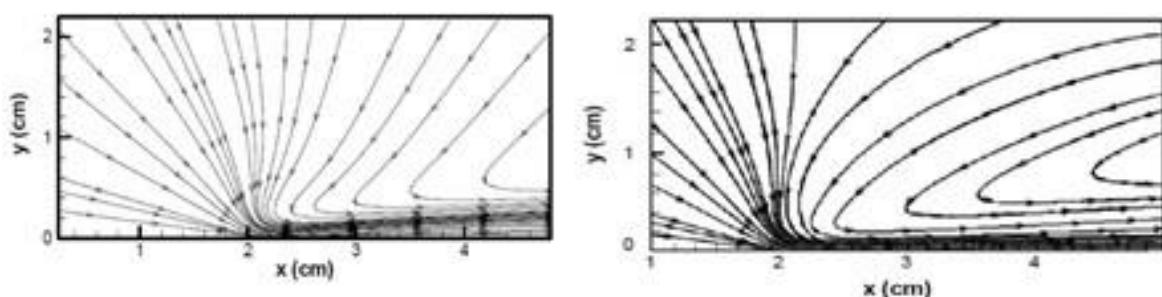


Fig. 21. The comparison of distributions of streamlines for the plasma actuator in quiescent flow between the current model (right side) and reference model [19] (left side)

شکل ۲۱: مقایسه خطوط جریان عملگر در جریان هوای ساکن شبیه سازی انجام گرفته (سمت راست) و مدل مرجع [۱۹] (سمت چپ)

بر روی ایرفویل به تنها ی مشاهده گردد و در صورت کنترل جدایش و موثر بودن، آن را بر روی توربین اعمال نماییم. سپس در بخش ۲-۵ اثرات عملگر پلاسمای را بر روی توربین باد به طور کلی مورد تدقیق دقیق قرار دادیم. همچنین جهت اعمال عملگر پلاسمای در نرم افزار کد یودیاف با قابلیت محاسبه اندازه میدان الکتریکی و جگالی بار که منتج به محاسبه نیروی حجمی القاء شده می‌باشد، نوشته و اعمال گردید.

اعتبارسنجی، باید ماکریم سرعت القایی توسط عملگر را با مقدار مرجع سنجید. ماکریم سرعت القایی به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر برابر با ۱ متر بر ثانیه می‌باشد که عیناً مطابق با نتیجه به دست آمده توسط مدل سوزن و همکاران [۱۹] می‌باشد.

۵- نتایج اعمال عملگر بر روی توربین باد:

به منظور بررسی دقیق، در بخش ۵-۱ ابتدا چندین عملگر پلاسمای بر روی ایرفویل نصب و مدل‌سازی جریان انجام گرفت تا نتایج عملگر

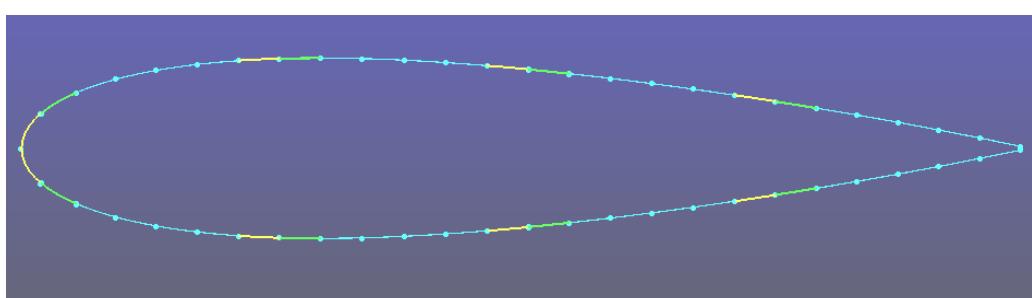


Fig. 22. Location of plasma actuators on blade

شکل ۲۲: شیوه چینش الکترودها بر روی ایرفویل

ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است.

همانگونه که پیشتر و در مقدمه بیان شد، نکته حائز اهمیت این است که تعدد عملگر سبب افزایش سرعت القایی و در نتیجه افزایش نیروی حجمی می‌شود. برای اثبات این مهم، شبیه‌سازی با چندین عملگر صورت پذیرفت و نتایج آن با نتایج تجربی فورت و همکارانش [۲۲] در شکل ۲۷ مقایسه گردید.

جهت مشاهده تاثیر عملگر به صورت مبرهن، اعمال آن بر روی ایرفویل در زاویه حمله ۲۰ درجه در شکل‌های ۲۸ و ۲۹ نشان داده شده است.

همانگونه که از مقایسه شکل‌های ۲۸ و ۲۹ مشهود است، عملگر بر روی کانتور سرعت و کنترل جدایش بر سطح ایرفویل تأثیر مثبت دارد. در ادامه به منظور اینکه بتوانیم مقیاس کمی جهت نتیجه‌گیری در اختیار داشته باشیم و اثرات عملگر را بهتر بررسی نماییم، نمودار ضریب برآ و پسا در شکل ۳۰ آورده شده است. همانگونه که از نمودارها کاملاً مشهود است، عملگرهای پلاسمایی زمانی که فعال می‌شوند سبب افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شوند.

آنچه در این شکل‌ها مبرهن است در زاویه حمله ۲۰ درجه که جدایش روی ایرفویل رخ می‌دهد، عملگرها تاثیر بسزایی در کنترل جدایش و در نتیجه افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا دارند.

۲-۵- نتایج حاصل از اعمال عملگر بر روی توربین باد با چیدمان چندین عملگر پلاسمایی:

به منظور حل سه بعدی توربین باد از روش $k-\epsilon$ واقعی شده استفاده شده است. اطلاعات و شرایط انتخاب شده برای حل در جدول ۵ آمده است.

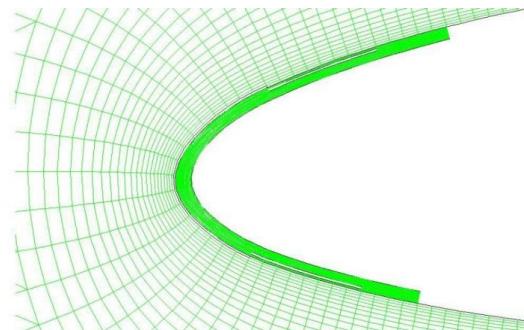


Fig. 23. Computational grid and location of plasma actuators on angle of attack

شکل ۲۳: شبکه محاسباتی و محل قرارگیری عملگرهای پلاسمایی بر روی لبه حمله ایرفویل

۵-۱- نتایج حاصل از اعمال عملگر بر روی ایرفویل با چیدمان چندین عملگر پلاسمایی:

۵-۱- نحوه جای‌گذاری عملگر بر روی ایرفویل توربین باد: در شکل ۲۲ نحوه قرارگیری عملگرهای پلاسمایی نشان داده شده است. در این شکل الکترودهای کاتد با رنگ زرد و الکترودهای آند با رنگ سبز مشخص شده است. همچنین شکل ۲۳ شبکه محاسباتی عملگر را نشان می‌دهد.

مشخصات عملگرهای پلاسمایی و جریان حول ایرفویل توربین به

جدول ۳. مشخصات عملگر پلاسمایی
Table 3. Properties of plasma actuators

مشخصات عملگر	مقدار	واحد
پتانسیل بیشینه	۱۰۰۰	Volt
چگالی بار بیشینه	۰/۰۲	C/m ³
طول دبای	۰/۰۰۱	m

جدول ۴. مشخصات جریان بر روی ایرفویل توربین باد
Table 4. Properties of flow on airfoil of wind turbine

مشخصات جریان ایرفویل	مشخصات جریان	مقدار	واحد
سرعت (U)		۱۲	m/s
طول کورد (C)		۰/۴۴۵۱۳	m
چگالی هوای (ρ)		۱/۲۲۵	kg/m ³
ویسکوزیته هوای (μ)		$۱/۷۸۹۴ \times 10^{-۵}$	kg/m.s
عدد رینولدز (Re)		$۳/۶۵۷ \times 10^{-۵}$	-

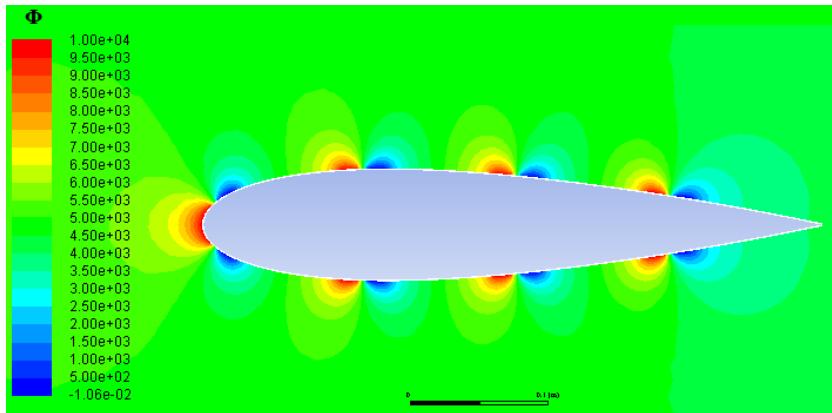


Fig. 24. Electric potential contours in the vicinity of the blades

شکل ۲۴: کانتور پتانسیل الکتریکی

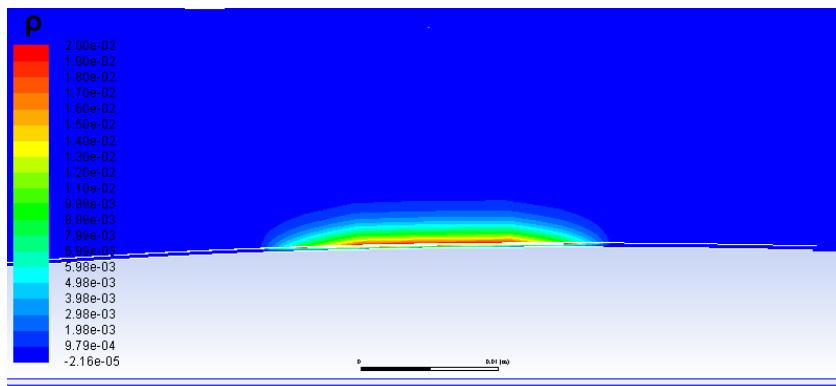


Fig. 25. The net charge density the vicinity of the airfoil

شکل ۲۵: کانتور چگالی بار الکتریکی نزدیک زدیک دیواره ایرفویل

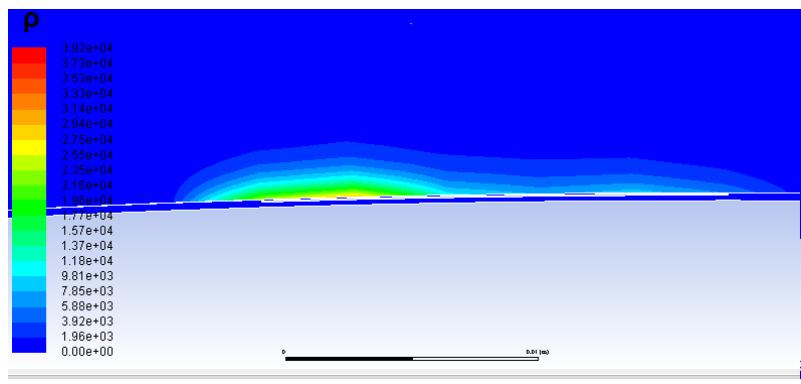


Fig. 26. The net charge density on the airfoil

شکل ۲۶: نیروی حجمی تولید شده بر روی ایرفویل از طریق پلاسمای

سبب افزایش گشتاور تولیدی توربین باد شده است. نکته‌ی حائز اهمیت در این شکل‌ها این است که نظر به چرخش 360° درجه‌ای پر، عملگر عملاً در نیمه بالایی یعنی از زاویه صفر تا 180° درجه تاثیر مطلوب و بیشینه اثر خود را دارد اما در نیمه دوم که زاویه پره تغییر می‌کند و عملگر اثر خود را از دست خواهد داد. با این وجود اگر از تمام نمودار نسبت به زمان انتگرالگیری نماییم، نشان میدهد توان

نتایج نهایی اعمال عملگر پلاسمای بر روی توربین باد و افزایش گشتاور تولیدی توربین در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نشان داده شده است. همانطورکه از این شکل‌ها مشخص است، حضور عملگر پلاسمای سبب افزایش گشتاور تولیدی و در نتیجه توان توربین باد به میزان ۳ درصد شده است.

همانطورکه از این شکل‌ها مشخص است، حضور عملگر پلاسمای

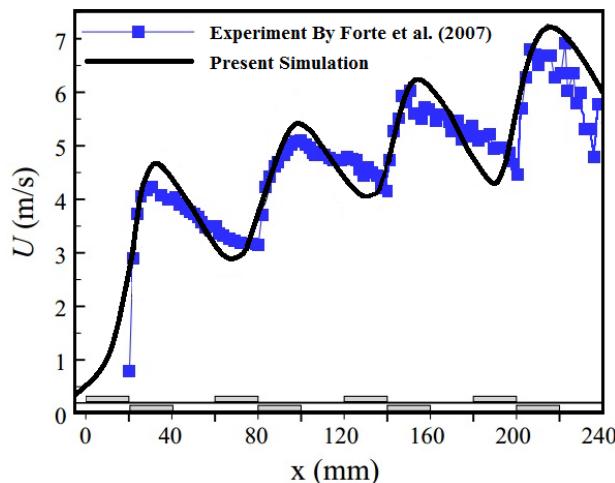


Fig. 27. The comparison between numerical solution and experimental result for multiple plasma actuator [22]

شکل ۲۷: مقایسه حل عددی و نتایج تجربی برای تعدد عملگر پلاسمایی [۲۲]

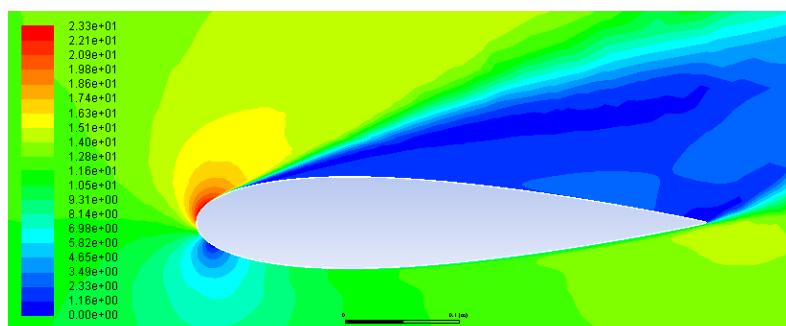


Fig. 28. Velocity contour at 20 degrees angle of attack without plasma actuator

شکل ۲۸: کانتور سرعت در زاویه حمله ۲۰ درجه بدون اعمال عملگر پلاسما

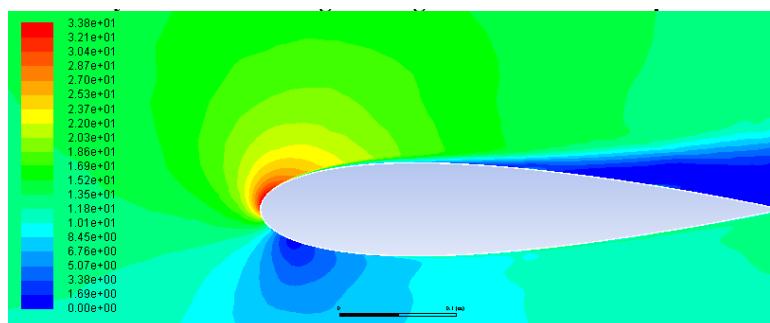


Fig. 29. Velocity contour at 20 degrees angle of attack with plasma actuator

شکل ۲۹: کانتور سرعت در زاویه حمله ۲۰ درجه با اعمال عملگر پلاسما

۶- نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، امکان استفاده از عملگر پلاسما به عنوان ابزاری جهت کنترل فعال جریان بر روی توربین باد محور عمودی با مقیاس واقعی مدل G ۵۳۰ و افزایش توان خروجی آن بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا عملگر پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت که در

خروجی توربین باد به میزان ۳ درصد افزایش یافته است که با نظر به ابعاد و شرایط واقعی کاری، نتیجه‌ی بسیار مطلوب و دارای اهمیتی می‌باشد.

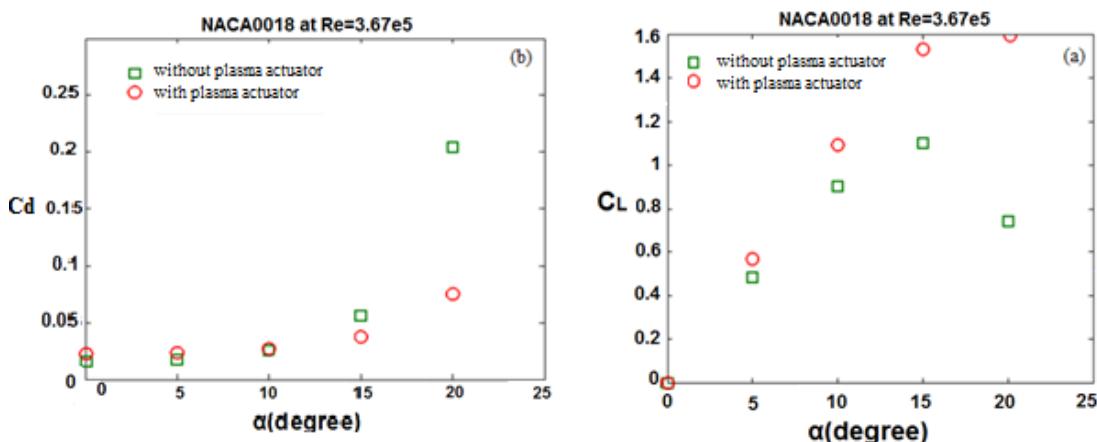


Fig. 30. Drag and lift coefficient vs. angles of attack with and without the plasma actuators

شکل ۳۰: تغییرات ضریب پسا و برآ با و بدون اعمال عملگر پلاسمایی

جدول ۵. شرایط انتخاب شده برای حل توربین باد

Table 5. Properties of flow

وحدة	مقدار	شرایط جریان
m/s	۱۲/۷۱۱۹	سرعت (U)
kg/m³	۱/۱۷۷۴	چگالی هوا (ρ)
kg/m.s	$۵/۷ \times 10^{-۵}$	ویسکوزیته هوا (μ)
rpm	۹۰	سرعت دورانی (ω)

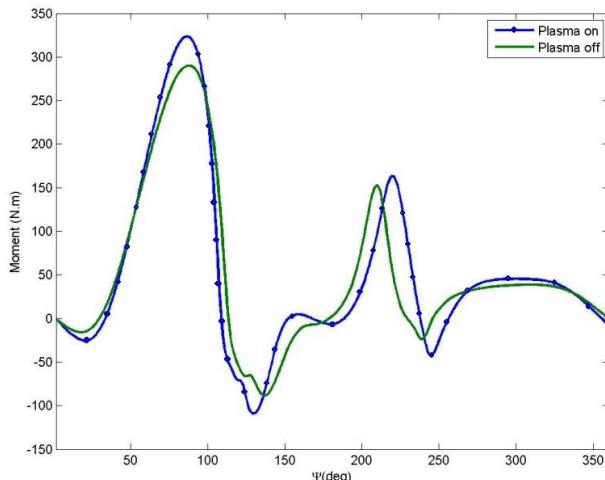


Fig. 32. Torque variation vs. azimuthal angle with and without plasma actuator

شکل ۳۲. مقایسه گشتاور تولید شده بر حسب زمان در حالت با و بدون عملگر پلاسمایی در یک بازه زمانی

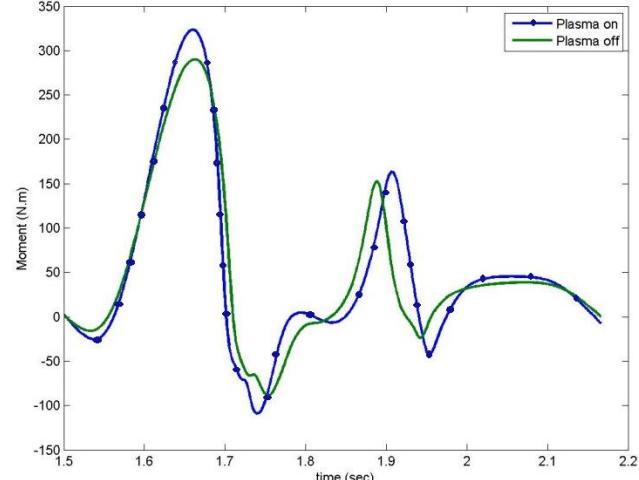


Fig. 31. Torque variation vs. time with and without plasma actuator

شکل ۳۱. مقایسه گشتاور تولید شده بر حسب زمان در حالت با و بدون عملگر پلاسمایی در یک بازه زمانی

درون سطح پره‌های توربین برای نخستین بار به کار گرفته شد و عملگر درون سطح پره قرار گرفت. توربین باد ابعاد واقعی G ۵۳۰ بصورت دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردید. برای حل دوبعدی توربین باد از دو روش $k-\epsilon$ واقعی شده و

شرایط هوای ساکن قرار دارد، شبیه‌سازی شده و اثر عملگر بر هوای ساکن با نتایج مدل مرجع مقایسه و اعتبارسنجی گردید. سپس به منظور کاربرد عملگر بر روی توربین باد و به دلیل حساسیت جریان و تاثیر نامطلوب حضور عملگر بر روی سطح پره‌ها، ایده‌ی اعمال آن

- [2] C. Van Dam, D.E. Berg, S.J. Johnson, Active load control techniques for wind turbines, Sandia National Laboratories, University of California, USA, (2008).
- [3] S.J. Johnson, J.P. Baker, C. VanDam, D. Berg, An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs, Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, 13(2-3) (2010) 239-253.
- [4] A. Ebrahimi, M. Movahhedi, Wind turbine power improvement utilizing passive flow control with microtab, Energy (elsevier), 150 (2018) 575-582.
- [5] M. Malik, L. Weinstein, M. Hussaini, Ion wind drag reduction, in: 21st Aerospace Sciences Meeting, Reno,NV,U.S.A.,)1983(231.
- [6] S. Grundmann, S. Klumpp, C. Tropea, Experimental and numerical investigations of boundary-layer influence using plasma-actuators, Active Flow Control, Springer,)2007(56-68.
- [7] D. Orlov, T. Apker, C. He, H. Othman, T. Corke, Modeling and experiment of leading edge separation control using SDBD plasma actuators, in: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno,NV,U.S.A.,)2007) 877.
- [8] R. Sosa, G. Artana, E. Moreau, G. Touchard, Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators, Exp Fluids, 42(1) (2007) 143-167.
- [9] R. Nelson, T. Corke, H. Othman, M. Patel, S. Vasudevan, T. Ng, A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance, in: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno,NV,U.S.A.,)2008(1312.
- [10] D. Greenblatt, M. Schulman, A. Ben-Harav, Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators, Renewable Energy, Elsevier, 37(1) (2012) 345-354.
- [11] M. Kotsonis, R. Pul, L.L. Veldhuis, Experimental study on airfoil circulation control using plasma actuators, in: 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference, San Diego, CA,)2013) 3164.
- [12] H. Aono, T. Nonomura, M. Sato, A. Yakeno, K. Okada, Y. Abe, K. Fujii, Flow control using a DBD plasma actuator for horizontal-axis wind turbine blades of simple experimental model, in: The 11th World Congress on

استفاده شد که پس از مقایسه با نتایج تجربی و با توجه به اینکه روش $k-\epsilon$ واقعی شده نتایج بهتری را به دست می‌داد، در حل سه بعدی از این روش استفاده شد. در ادامه به دلیل ابعاد واقعی توربین باد عملگرها به صورت متواالی شبیه‌سازی و درون سطح ایرفویل توربین قرار داده شدند. ابتدا نتایج بر روی ایرفویل توربین به تنها یابی و سپس بر روی تمام پره‌های توربین به صورت متواالی بررسی شد. نتایج نشان داد اعمال عملگر درون سطح هندسه‌ی مورد بررسی علاوه بر اینکه تاثیری در کارایی عملگر نخواهد داشت، سبب جلوگیری از اثرات منفی عملگر بر روی سطح خواهد شد. همچنین عملگر پلاسما سبب تغییر الگوی جریان بر روی پره‌ی توربین باد واقعی شده و در نتیجه گشتاور تولیدی و در نهایت توان خروجی به میزان ۳ درصد افزایش می‌یابد. آنچه حائز اهمیت می‌باشد این است که توان در یک توربین بادی محور عمودی مقیاس واقعی با کنترل جدایش جریان با استفاده از تکنولوژی عملگر پلاسما می‌تواند افزایش یابد.

فهرست علامت

علامت انگلیسی

N	تعداد پره توربین باد
D	قطر روتور،
P	فشار،
C	وترو به،
Re	عدد رینولدز
E	بردار میدان الکتریکی،
f_B	نیروی حجمی در واحد حجم،
Cl	ضریب برآ
CD	ضریب پسا

علامت یونانی

ρ	چگالی هو،
ρ_C	چگالی بار الکتریکی،
ϕ	پتانسیل الکتریکی،
λ_d	طول دیای،
ε	ضریب نفوذپذیری الکتریکی،
ε_r	ضریب نفوذپذیری نسبی محیط،
ε_0	ضریب نفوذپذیری فضای آزاد،
ω	سرعت دورانی توربین،
μ	ویسکوزیته هو،

مراجع:

- [1] W. Europe, The European offshore wind industry—Key trends and statistics 2016, Wind Europe: Brussels, Belgium, (2017) 37.

- [18] D. Orlov, T. Corke, M. Patel, Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator, in: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, (2006) 1206.
- [19] Y. Suzen, G. Huang, J. Jacob, D. Ashpis, Numerical simulations of plasma based flow control applications, in: 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario, Canada, (2005) 4633.
- [20] S. Leonov, V. Bityurin, N. Savischenko, A. Yuriev, V. Gromov, Influence of surface electrical discharge on friction of plate in subsonic and transonic airflow, in: 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, U.S.A., (2001) 640.
- [21] J. Jacob, R. Rivir, C. Carter, J. Estevadeordal, Boundary layer flow control using AC discharge plasma actuators, in: 2nd AIAA Flow Control Conference, Portland, Oregon, (2004) 2128.
- [22] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, M. Cazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control. *Exp Fluids*, (2007) 917-28.
- Computational Mechanics (WCCM XI). Paper Ref, (2014).
- [13] J.A. Cooney, C. Szlatenyi, N.E. Fine, The development and demonstration of a plasma flow control system on a 20 kW wind turbine, in: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA,)2016(1302.
- [14] H. Matsuda, M. Tanaka, T. Osako, K. Yamazaki, N. Shimura, M. Asayama, Y. Oryu, Plasma Actuation Effect on a MW class Wind Turbine, *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*, 9(1) (2017).
- [15] S. Naghib Zadeh, Mesh Requirement Investigation for 2D and 3D Aerodynamic Simulation of Vertical Axis Wind Turbines, M.Sc. Thesis, Concordia University,)2013(.
- [16] S. Lemire, H.D. Vo, M.W. Benner, Performance improvement of axial compressors and fans with plasma actuation, *International Journal of Rotating Machinery*, 2009 (2009).
- [17] W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson, Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, *Journal of applied physics*, 92(11) (2002) 6434-6443.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Yazdani, M. Sefid, *Power Improvement of a Commercial Large Scale Vertical-Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators*, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 1487-1504.

DOI: [10.22060/mej.2020.16968.6487](https://doi.org/10.22060/mej.2020.16968.6487)



