ماهنامه علمى يژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# اثر عملگر کنترل جریان پلاسما در بهبود عملکرد آیرودینامیکی روتور توربین باد مگاواتی

# $^{2}$ عداس ابر اهدمی $^{1^{*}}$ ، محمد ضیا مو حدی

1 - استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- كارشناسي ارشد، مهندسي هوافضا، دانشگاه صنعتي شريف، تهران

ebrahimi\_a@sharif.ir ،11155-1639 تهران، صندوق پستى

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این پژوهش، امکان استفاده از عملگر پلاسما بهعنوان ابزاری برای کنترل جریان روی پرهی روتور توربین باد محور افقی مگاواتی و افزایش	مقاله پژوهشی کامل
توان خروجی آن بررسی شده است. برای این کار، روتور توربین باد 5 مگاواتی مرجعِ ان.آر.ای.ال. انتخاب و عملگر پلاسمای دی.بی.دی. خطی در	دريافت: 11 مهر 1395 : ه : 13 آبار 1305
چند حالت مختلف، در نزدیکی ریشه و نوک پره، قرارداده شده است. توربین باد موردنظر، از روش کنترل گام پره در سرعتهای بادِ بالاتر از	پدیرس. ۱۶ آبان 1395 ارائه در سایت: 28 آذر 1395
سرعت نامی توربین برای ثابت نگهداشتن توان خروجی استفاده میکند و در سرعتهای باد پایین تر، این سامانه غیرفعال است. در این پژوهش	ر ر ي ر . کليد واژگان:
شرایط عملکردی بررسیشده برای توربین در سرعتی کمتر از سرعت نامی است که سامانه کنترل گام پره غیرفعال است. عملگر پلاسمای دی-	كنترل جريان
بی.دی از دو الکترود و ماده دیالکتریک مابین آنها تشکیل شده که با اعمال ولتاژی به اندازه کافی بزرگ به الکترودها، میدان الکتریکی در	توربين باد محور افقي
اطراف عملگر شکل میگیرد و با یونیزهکردن هوای اطراف، جتِ جریانی در نزدیک دیواره در اثر میدان الکتریکی القا میکند. اعتبارسنجی برای	عملگر پلاسما
شبیهسازی اثر عملگر پلاسما و جریان روی پره روتور انجامشده و با نتایج مراجع مقایسه شده است. نتایج نشان میدهد در تمامی حالتهای	مدل الكترواستاتيك
مختلف قراردادن عملگر پلاسما روی پره، الگوی جریان در قسمت کنترلشده بهبود یافته که منجربه بهبود توزیع فشار و درنتیجه افزایش	
گشتاور أیرودینامیکی و توان خروجی توربین شده است. بیشترین میزان افزایش توان خروجی در حالتی رخ داده است که عملگر در راستای دهانه	
پره در نزدیکی ریشه و در راستای وتر پره قبل از ناحیه کمسرعت روی سطح بالایی مقطع پره نصب شده است.	

# Power improvement of a large horizontal-axis wind turbine by DBD plasma actuator

## Abbas Ebrahimi<sup>\*</sup>, Mohammadreza Movahhedi

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran \* P.O.B. 11155-1639 Tehran, Iran, ebrahimi\_a@sharif.ir

#### **ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper Received 02 October 2016 Accepted 03 November 2016 Available Online 18 December 2016

#### Keywords: Flow control Horizontal axis wind turbine Plasma actuator Electrostatic model

#### ABSTRACT

In this paper, boundary layer control technique is investigated on the NREL-5MW offshore baseline wind turbine blade with numerical simulation of linear DBD plasma actuator in a three-dimensional manner. This wind turbine uses pitch control system to adjust its generated power above its rated speed; but below that the controller is inactive. In the current study, operating condition is set such that the control system is off. Plasma actuator consists of two electrode and dielectric materials. One of these electrodes is connected with the air and another one is encapsulated with the dielectric material. When the necessary high-level AC voltage is applied to electrodes, electric field forms around the actuator and an induced wall jet forms with the ionization of the air around the actuator. Electrostatic model is applied to simulate the effects of plasma actuator and the resulted body force is inserted into flow momentum equations. In the present study, three different control cases are studied. Results show that in all cases, using this actuator leads to improvement of the velocity profile in controlled section, which influences on pressure distribution and results in rotor torque increment. Finally, increasing in torque leads to growth in produced power of the wind turbine. The highest increment in output power occurs when the actuator is installed near the root of the blade in the spanwise direction and before low-speed region in the chordwise direction.

#### 1- مقدمه

است. از اواسط 1990، تحقيقاتي در زمينه كنترل جريان روى ايرفويل با ابتدایی ترین نوع عملگر پلاسما (عملگر کرونا<sup>2</sup>) آغاز شد [1]. راث و همکاران [2] اولین نتایج مربوط به عملگر پلاسمای دی بیدی را منتشر کردند. توسعهی یژوهشها و پیشرفت در زمینهی این عملگرها، انگیزه محققین

در دههی گذشته، کنترل فعال جریان سیال عبوری از سطوح آیرودینامیکی به کمک عملگرهای پلاسمای دیبیدی<sup>1</sup> بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تا قبل از سال 2000 میلادی، فعالیتهای اندکی در این زمینه منتشر شده

<sup>1</sup> Dielectric Barrier Discharge (DBD)

Please cite this article using: A. Ebrahimi, M. R. Movahhedi, Power improvement of a large horizontal-axis wind turbine by DBD plasma actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 509- *U* 517, 2016 (in Persian)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Corona Discharge

آیرودینامیک برای بررسی کاربرد و اثر این نوع عملگرها بر کنترل جریان و افزایش کارآیی آیرودینامیکی را بیشتر کرده است [3]. آخرین پیشرفتها و دستاوردها در زمینه کنترل لایه مرزی جریان با عملگرهای پلاسما و ویژگیهای آنها توسط [6-4] بهطور جامع مرور شده است.

براساس گزارش سال 2016 انجمن انرژی باد اروپا، ظرفیت توربینهای باد فراساحلی از سال 2010 تا 2015 میلادی بیش از 41 درصد رشد داشته است. همچنین در سال 2015 متوسط ظرفیت توربینهای جدید نصب شده حدود 4.2 مگاوات بوده است (این عدد نسبت به سال 2014 حدود 13 درصد افزایش داشته و در سال 2010 برابر 3 مگاوات بوده است) [7]. بنابراین سازندگان توربینهای بادی انگیزه زیادی برای افزایش اندازه توربین و کاهش هزینههای تولید این انرژی دارند. روشهای مختلفی برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی روتور و درنتیجه افزایش توان خروجی از طریق کنترل جریان ارایه شده است که هرکدام دارای مزایا، معایب و محدودیتهایی هستند. عملگرهای پلاسما به دلیل نداشتن قطعات مکانیکی و متحرک، پاسخ زمانی بالا، وزن کم، سادگی نصب، تعمیر و نگهداری پتانسیل بالایی نسبت به سایر روشها در آینده برای استفاده در توربینهای بادی تجاری دارند.

در زمینه یاستفاده از عملگر پلاسما برای کنترل جریان عبوری از پره روتور توربین باد، فعالیتهای اندکی انجام شده است. نلسون و همکارانش [8] پژوهشی را در راستای طراحی پرههای هوشمند<sup>1</sup> تورپین باد به کمک عملگر پلاسما برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی روتور انجام دادند. آنها به روش عددی، عملگر پلاسما روی ایرفویلهای S827 و S822 را با هدف کنترل جدایش از لبه حمله، برای افزایش ضریب برآی بیشینه بررسی کردند. نشان داده شد که تأثیر عملگر پلاسما در کنترل جدایش محلی جریان و بهبود ضریب برآی ایرفویل، معادل استفاده از سطوح متحرک برآزا در لبه فرار یا لبه حمله است.

گرین،بلت و همکارانش [9]به روش تجربی از عملگر پلاسما در لبه حمله پرههای یک توربین باد محور عمودی کوچک استفاده کردند تا به کمک کنترل جدایش دینامیکی جریان، عملکرد آن را بهبود ببخشند. نتایج آزمایش توربین باد در تونل باد سرعت-پایین، افزایش بیش از 38 درصدی توان توربین را نشان داد.

کوتسنیس و همکارانش [10]، در فعالیتی تجربی به مطالعه کنترل جریان روی ایرفویل متقارنی با لبه فرار منحنی شکل پرداختند. آنها با قراردادن عملگر پلاسمای دی بی دی در لبه فرار، نشان دادند که این روش ضمن کارآیی، نسبت به روش کنترل جریان با جت می تواند باعث حذف افزایش وزن و دیگر پیچیدگی ها شود. نتایج اولیه، افزایشی در حدود 1.0 برای ضریب برآ در اعداد رینولدز پایین را نشان داد. همچنین آنها اثر متغیرهای عملگر مانند موقعیت و طول الکترودها را بررسی کردند و برای کنترل بارگذاری روی پره توربین باد، استفاده از عملگر با تحریک ناپایا را پیشنهاد دادند.

آونو و همکارانش [11] در فعالیتی عددی و تجربی، آیرودینامیک پره یک مدل ساده از توربین باد محور افقی را در حضور عملگر پلاسما بررسی کردند. نتایج مشخص کرد که استفاده از عملگر پلاسما، موجب افزایش 14 درصدی گشتاور تولیدی میشود. اخیرا کنی و همکارانش [12] سه نوع عملگر پلاسما را برای کنترل جریان روی یک توربین باد 20 کیلوواتی و بهبود عملکرد آن توسعه دادند.

هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی امکان استفاده از عملگر پلاسما بهعنوان ابزاری برای کنترل جریان روی پره توربین باد محور افقی مگاواتی و افزایش توان خروجی آن است. برای این کار، روتور توربین باد محور افقی مرجعی انتخاب و جریان روی پره آن بهصورت سهبعدی شبیهسازی شده است. اعتبارسنجی شبیهسازیهای اثر عملگر پلاسما و جریان روی پره روتور با مقایسه نتایج با مراجع انجام شده است. با قراردادن عملگر پلاسما در چند حالت مختلف در نزدیکی ریشه و نوک پره، الگوی جریان عبوری از پره و درنتیجه توان خروجی توربین بررسی شده است.

#### 2- توربين باد مبنا

بهمنظور بررسی اثر کنترل جریان بهوسیله عملگر پلاسما، توربین باد محور افقی NREL-5MW بهعنوان توربین باد مبنا انتخاب شده است. مشخصات این توربین در [13] آمده است. این توربین برای استفادهی فراساحلی<sup>2</sup> طراحی شده و روتور آن دارای سه پره به طول 63 متر است که هر پره از شش ایرفویل متفاوت تشکیل شده است. سیستم کنترلی استفادهشده در این توربین از نوع کنترل گام<sup>3</sup> است که در سرعتهای باد بیشتر از 11.4 متربرثانیه (سرعت باد نامی توربین) فعال میشود و زاویه حملهی پرهها را طوری تنظیم می کند که توان خروجی ثابت بماند.

### 3- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنتم هستند که با رویکرد متوسط گیری زمانی (رنس<sup>4</sup>) برای شبیهسازی جریان سیال تراکمناپذیر عبوری از روتور توربین استفاده شدهاند که در معادله (1) ارائه شده است.

 $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \mathbf{0}$   $\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{bi} \qquad (1)$ So even by a construction of the second state of the

### 4- شبکه محاسباتی و اعتبارسنجی حل جریان روی روتور

از آنجاکه روتور توربین دارای سه پره است، بهمنظور کاهش هزینه محاسباتی، فقط یکی از پرههای روتور مدل شده است. این پره مطابق شکل 1 در مرکز قطاعی 120 درجه از استوانه بهعنوان مرز بیرونی دامنه محاسباتی قرارگرفته که وجوه آن دارای شرط مرزی پریودیک هستند. در شکل 1 ابعاد دامنهی حل، محور دوران شبکه و نیز شرایط مرزی آورده شده است (Rبیانگر طول پره است). اندازه دامنه در جلوی پره برابر R، در پشت پره برابر R و شعاع قطاع استوانه برابر **1.5** انتخاب شده است (مشابه مرجع [51]). شبکه از بلوکهای متعدد تشکیل شده و پره درون بلوکی به شکل مکعب مستطیل قرارگرفته و این بلوک نیز مطابق شکل 1 در قطاعی از سیلندر به عرض 1.0 طول پره واقع است. درون این قطاع، شبکه سازمانیافته با تراکم

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Offshore <sup>3</sup> Pitch Control

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

بیشتر، حول پره ایجاد شده است و در دو طرف این قطاع از شرط مرزی واسط<sup>1</sup> استفاده شده تا تعداد سلولهای شبکه، بدون دلیل در کل دامنهی حل افزدوه نشوند. شکل 2 کیفیت شبکه محاسباتی در نزدیکی مقطعی از پره در r/R = 0.64 را نشان میدهد. تراکم سلولها در نزدیکی لبه حمله و فرار و همچنین فشردگی سلولها در نزدیکی سطح به گونهای انتخاب شده است تا لایه مرزی و فیزیک جریان در این نواحی با دقت مناسب مدل شوند. در بلوک حاوى پره، 160 نقطه روى ايرفويل و 60 نقطه در دنبالهى پشت ايرفويل در راستای وتر و همچنین 60 نقطه درجهت عمود بر ایرفویل قرارداده شده است. در راستای دهانه پره نیز 169 نقطه لحاظ شده است. درنتیجه بلوک مکعب-مستطیلی حاوی پره از 2,839,200 سلول و کل دامنه نیز از 4,338,810 سلول تشكيل شدهاند.

برای حل جریان و شبیه سازی حرکت روتور از روش  $MRF^2$  [16] در نرمافزار فلوئنت<sup>3</sup> که نرمافزاری مهندسی برای مدل کردن جریان است، استفاده شده است. در این روش، معادلات حرکت با اضافه شدن جمله های شتاب که در اثر حرکت دستگاه مختصات از حالت ساکن به متحرک بهوجود



Fig. 1 Generated mesh around blade

**شکل 1** شبکه محاسباتی حول پره



**شکل 4** کانتور <sup>+</sup>y روی پره

Interface Moving Reference Frame

<sup>3</sup> Fluen

مرجع [17] استفاده شده است. برای مقایسه نتایج، توزیع ضریب فشار روی مقطع r/R = 0.50 مقطع r/R = 0.50 متربرثانیه با نتایج مشابه بررسی شده است. برای بهدست آوردن توزیع ضریب فشار، توزیع فشار با فشار دینامیکی همان مقطع بیبعد شده است. مقایسه نتایج توزیع ضریب فشار در این مقطع از پره با مرجع [17] که در شکل 3 آمده است، تطابق خوبی را نشان میدهد. اختلاف فشار سطوح بالا و پایین پره، باعث ایجاد نیروی برآ شده و بخش عمده گشتاور تولیدی روتور را بهوجود می آورد. باتوجه به شرایط عملکردی موردنظر، عدد رینولدز جریان روی پره در بازهی بین 3 تا حدود 11 میلیون قرار دارد و بنابراین جریان کاملاً آشفته است. در شکل 4، خطوط همتراز <sup>+</sup>y بر روی سطوح بالا و پایین پره ارائه شده است. مشاهده می شود، بیشینه مقدار <sup>+</sup>y در حدود 3 است که در نزدیکی لبه حمله میباشد. در این نواحی، سیال شتاب گرفته و سرعت آن افزایش پیدا می کند. در بیشتر نواحی سطح پره نيز اين مقدار كمتر از 1.0 مي باشد. باتوجه به مدل آشفتگي انتخاب شده در شبیهسازی حاضر، مقدار  $y^+\!\!<\!3.0$  مقداری قابل قبول است.

#### 5- عملگر پلاسمای دی ہےدی

عملگر پلاسمای دی بیدی از دو الکترود (بهطور معمول از جنس مس و



Fig. 3 Pressure coefficient distribution at r/R=0.5 r/R = 0.5 شکل 3 توزیع ضریب فشار برحسب طول بیبعد در



Fig. 4 Contour of y<sup>+</sup> on the rotor blade

4 Pressure-Based

 $\vec{f}_h = \rho_c \vec{E} = \rho_c (-\nabla \phi)$ 

بهصورت نوار) تشکیل شده است که توسط یک لایه دیالکتریک (معمولاً از جنس کاپتون) از یکدیگر جدا شدهاند. الکترود بیرونی (الکترود آزاد) در معرض جريان هوا بوده و منبع تأمين ولتاژ به آن وصل مي شود. الكترود درونی (الکترود محدود)، در درون لایه دیالکتریک پنهان است و با ولتاژ صفر نقش زمین را ایفا میکند [18]. در ولتاژهای به اندازه کافی بزرگ (بالاتر از یک ولتاژ بحرانی)، عملگر موجب یونیزه شدن مولکول های هوا شده و ذرات باردار حاصله در مجاورت میدان الکتریکی حاکم باعث القای باد الکتریکی یا یونی در نزدیکی سطح میشوند. بهدلیل برخورد این یونها با ذرات خنثی هوا و انتقال مومنتوم به آنها، جريان هوا از سمت الكترود بيروني بهسمت الكترود نهان شکل می گیرد و این جریان القایی که مانند نیروی حجمی عمل می کند، به شکل یک جت دیواره خود را نشان میدهد.

شبیهسازی این پدیده بهعلت ترکیب پدیده یونیزاسیون و اندرکنش جریان سیال و میدان الکتریکی حاکم، بسیار پیچیده و دشوار است. چرا که برای حل دقیق این پدیده باید دو معادله ماکسول و ناویر -استوکس با یکدیگر تركيب شوند كه اين تركيب غيرخطي بهدليل وجود مقياسهاى زماني متفاوت در پدیدههای فیزیکی، حلی بسیار پرهزینه خواهد داشت. در این راستا، طی ده سال اخیر مدل های مختلفی برای شبیه سازی اثر عملگر پلاسما ارائه شده که یکی از فیزیکیترین آنها [19] مدل الکترواستاتیک<sup>1</sup> است که توسط سوزن و هوانگ [20] ارائه شده است. در این مدل، از توزیع گوسی برای شبیهسازی توزیع غلظت شارژ بر روی دیالکتریک استفاده شده است. سوزن و هوانگ میدان الکتریکی کل را به دو ناحیه تقسیم کردند. ناحیه اول، ميدان الكتريكي ناشي از ذرات باردار و ناحيه دوم، ميدان الكتريكي ناشي از ولتاژ اعمالی به الکترودها است. با تفکیک میدان الکتریکی و اعمال آن بر معادلات ماکسول، دو معادله بیضوی حاصل می شود که با حل آن ها، میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ در دامنه حل، بهدست میآیند. با تعیین میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ، نیروی حجمی تولید شده به کمک معادله لورنتز محاسبه می شود و به صورت جمله چشمه به معادلات ناویر-استوکس اضافه می شود. از آن جا که معادلات مربوطبه پتانسیل الکتریکی و غلظت شارژ، بیضوی هستند بنابراین مستقل از زمان بوده و درنتیجه می توان در ابتدا این دو معادله را مستقل از معادلات جریان حل كرد.

سوزن و همکاران [20] برای الگوی خود با اعمال فرضهای ساده کننده در مجموعه معادلات ماکسول، دو معادله (2) و (3) را برای توزیع میدان پتانسیل الکتریکی و توزیع غلظت شارژ ارائه کردند.

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \phi) = \mathbf{0} \tag{2}$$
$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \rho_r) = \frac{\rho_c}{r^2} \tag{3}$$

که در آن،  $\varepsilon_r$  ضریب نفوذپذیری نسبی $\lambda_a^2$  ،  $\lambda_a$  طَوْل دبای $\varepsilon_r$  توزیع , پتانسیل میدان الکتریکی و  $ho_c$  توزیع غلظت شارژ در میدان محاسباتی است. در حالت پلاسما، مرتبه زمانی تولید غلظت شارژ در حدود نانوثانیه است و تغییرات زمانی میدان مغناطیسی قابل صرفنظر است. در این شرایط، در دستگاه معادلات (چهارگانه) ماکسول، جریان الکتریکی، القای مغناطیسی، میدان مغناطیسی و مشتقات زمانی قابل صرفنظر هستند [21]. بنابراین از مجموعه معادلات ماكسول تنها دو معادله (2) و (3) باقی میمانند. از سوی دیگر اگر طول دبای کوچک باشد و غلظت شارژ روی دیواره در مجاورت

الكترود دروني زياد نباشد (ناحيه پلاسما كوچك باشد)، غلظت شارژ در ميدان

تنها تحت اثر پتانسیل الکتریکی حاصل از الکترودها است و از میدان

الكتريكي خارجي تأثير نمي گيرد [20]. باتوجه به اين موارد مي توان اين دو

نیروی حجمی لورنتز با صرفنظر کردن از اثر نیروهای مغناطیسی از

حل معادلات الكترواستاتيك نيز به وسيله نرمافزار فلوئنت انجام شده

است. در نرمافزار فلوئنت، قابلیت اضافه کردن معادلات انتقال اسکالر تعریف

شده بهوسیله کاربر (یو.دی.اس.)<sup>4</sup> و توابع تعریفشده بهوسیله کاربر

(يو.دى.اف.)<sup>6</sup>، وجود دارد. با توجه به قابليت يو.دى.اس.، دو معادله انتقال

اسکالر (2) و (3) برای  $\phi_c$  و  $\rho_c$  به نرمافزار افزوده می شوند. همچنین با اعمال

شرایط مرزی از طریق امکان یو.دی.اف.، در فرآیندی تکراری این دو معادله حل شده تا توزيع  $\phi$  و  $\rho_c$  در ميدان حل بهدست آيند [20]. درنهايت

به کمک معادله (4)، توزیع نیروی حجمی حاصل شده به صورت جمله چشمه

هندسی فعالیت موکوت و همکارانش [23,22] استفاده شده و نتایج حاصل با

این مرجع مقایسه شده است. در این مدل هندسی که در شکل 5 نشان داده شده، الكترودها در ابتداى يک صفحهى تخت به ضخامت 0.75 ميلىمتر

قراردارند و از کاپتون بهعنوان ماده دیالکتریک استفاده شده است. الکترود

أزاد بهصورت یک سیم به قطر 50 میلیمتر در لبه جلویی صفحه و الکترود

محدود به ضخامت 0.15 میلیمتر در وسط صفحه قرار گرفته است. از آنجاکه

در این چیدمان الکترودها، الکترود آزاد در دوطرف الکترود محدود قرارگرفته،

بنابراین در بالا و پایین صفحه بهصورت متقارن، جریان القایی تولید میشود.

است. ابعاد دامنه محاسباتی مطابق [23] به شکل مستطیلی بهطول 60

میلیمتر و عرض 40 میلیمتر درنظرگرفته شده است. باتوجه به اینکه

کوچکترین سلول شبکه نباید بزرگتر از طول دبای در مجاورت الکترودها

باشد، تراکم سلولها در این ناحیه بیشتر است. در کل میدان محاسباتی از

303 نقطه در راستای طولی و 200 نقطه در راستای عرضی استفاده شده

شده است. همچنین پارامترهای الکتریکی اعمالی به محرکها شامل ولتاژ 4

کیلوولت و فرکانس 5 کیلوهرتز با شکل موج مربعی میباشد. هرچند ولتاژ

اعمالی به صورت متناوب است، اما از آن جاکه نتایج آزمایشگاهی هم نشان

میدهد، جهت نیروی حجمی تولیدشده همواره از سمت الکترود آزاد به

الكترود محدود القا مى شود. همچنين مقياس زمانى پاسخ سيال به پلاسما از

مرتبه صدمثانیه است که بسیار کمتر از مقیاس زمانی ولتاژ اعمالی با

فركانسهاى از مرتبه كيلوهرتز مىباشد. بنابراين على رغم متناوب بودن ولتاژ

اعمالي به الكترودها، اثر عملگر پلاسما بهصورت جريان جت القايي پايا در

ميدان جريان ظاهر مي شود.

باتوجه به [23]، طول دباي 0.001 متر، بيشينه غلظت شارژ 0.00085كولمب بر مترمكعب و پارامتر گوسى غلظت شارژ برابر با 0.3 لحاظ

در شکل 6، شبکه محاسباتی و قسمتی از الکترودها نشان داده شده

در پژوهش حاضر از مدل فوق برای شبیهسازی اثر عملگر پلاسما استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیهسازی پلاسما از مدل

معادله را مستقل از رژیم و ساختارهای جریان درنظر گرفت.

که در آن،  $ar{E}$  بردار میدان الکتریکی است.

رابطه (4) محاسبه می شود.

به معادلات مومنتم افزوده میشود.

(4)

2018

 $\lambda_d$ 

www.S5D.ir

Electrostatic Model

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Relative Permittivity <sup>3</sup> Debye Length

 <sup>&</sup>lt;sup>4</sup> User Defined Scalar (UDS)
 <sup>5</sup> User Defined Function (UDF)

20 Numerical Experiment Present simulation 10 у(ШШ) -10 0.5 Velocity (m/s)

Fig. 8 Comparison between velocity profiles in x = 45 mmشكل 8 مقايسه پروفيل سرعت در مقطع x=45 mm

سرعت بیشینه القایی همراه خواهد بود. در این شکل، علت اختلاف اندک میان نتایج تجربی و عددی میتواند ظاهرشدن اثرات سهبعدی در میدان جريان باشد.

### 6- موقعیتهای عملگر پلاسما روی پره

بهمنظور بررسی اثر عملگر پلاسما بر الگوی جریان روی پره روتور توربین باد و عملکرد آن، از قراردادن عملگر در چند وضعیت مختلف روی یره استفاده شده است. در تمامی این حالتها، هندسه عملگر مشابه است. طول هر دو الكترود 8.2 متر، عرض الكترود آزاد 0.35 متر، عرض الكترود محدود 0.5 متر و ضخامت الكترودها 0.01 متر مىباشد. در اين مقاله باتوجه به فعاليتهاى شابه انجامشده، ولتار اعمالي به الكترودها برابر 8.6 كيلوولت درنظر گرفته شده است. با مشخص بودن ولتاژ اعمالی و استفاده از روابط خطی براساس دادههای تجربی [24] برای پارامترهای عملگر پلاسما، طول دبای برابر 0.0001 متر، بيشينه غلظت شارژ برابر 0.0925 كولمب بر مترمكعب و پارامتر گوسی غلظت شارژ برابر با 0.66 محاسبه شده است.

در جدول 1، جزئیات سه حالت مختلف قرارگیری عملگر پلاسما روی پره شامل دو حالت در نزدیکی ریشه پره (در دو موقعیت مختلف در جهت وتر پره) و یک حالت در نزدیکی نوک پره آمدهاست. در این جدول، محل قرار گرفتن الکترودها در راستای دهانه پره، محل شروع الکترودها در راستای وتر و به صورت ضریبی از وتر همان مقطع برای هر سه حالت کنترلی آمده است. سرعت باد و سرعت دورانی روتور بهترتیب برابر 9 متربرثانیه و 1.08 رادیان بر ثانیه هستند. شکل 9 نیز مکان قرارگیری عملگرها (در نزدیکی ریشه و نوک پره) را نشان می دهد.

برای بررسی استقلال نتایج شبیهسازی اثر عملگر پلاسما از شبکه محاسباتی، مطالعه بر روی سه شبکه با تعداد سلول متفاوت انجام شده است. برای این سه شبکه، تعداد سلولهای درون بلوک حاوی عملگر پلاسما بەترتىب برابر 364,800، 1,004,000 و 2,040,000 هستند. ازآنجاكە بیشترین گرادیان پروفیل سرعت القایی در حالت فعال بودن عملگر در هوای ساکن وجود دارد، بررسی استقلال حل از شبکه در این شرایط انجام می شود. پروفیل سرعت در مقطع r/R = 0.22 و به فاصله 0.75 طول وتر از لبه حمله بهعنوان معیار مقایسهی نتیجه شبکههای مختلف انتخاب شده است. شکل 10، پروفیل سرعت برای هر سه شبکه روی سطح بالای ایرفویل را نشان شرایط مرزی مربوط به معادلات پلاسما در شکل 7 آمده است. در مورد معادلات جریان نیز، برای مرزهای بیرونی میدان، شرط فشار خارجی و مرز بین سیال و دیالکتریک نیز شرط دیواره قرارداده شده است. جریان به صورت آرام و تراکمناپذیر فرض شده و الگوریتم سیمپل<sup>2</sup> با دقت مرتبه دوم برای حل میدان سرعت و فشار به کار رفته است.

در شكل 8 توزيع سرعت القايي بهوسيله عملگر در يک مقطع طولي نشان داده شده و با نتایج تجربی و عددی مرجع [23] مقایسه شده که تطابق نسبتا خوبی را نشان میدهد. در این نمودار، محور افقی نشاندهنده سرعت برحسب متربرثانیه و محور عمودی نشاندهنده مختصات عرضی برحسب میلیمتر است. طبق انتظار، سرعت در نزدیک صفحه و در ناحیه نزدیک الكترود محدود افزایش داشته است. البته با حركت در جهت مثبت طولى میدان، ضخامت ناحیهی اثر سرعت القایی افزایش پیدا می کند که این افزایش ضخامت ناشی از باز شدن خطوط جریان از یکدیگر است و با کاهش در مقدار



Fig. 5 Geometry of simulated plasma actuator [23]







 $[23] \, 
ho_c \, \, \phi_c \, \, \phi_c$  شکل 7 شرایط مرزی برای  $\phi_c$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Pressure Outlet 2 Simple

میدهد. مشاهده می شود اختلاف چندانی بین نتایج استفاده از شبکه 2 و 3 وجود ندارد.

#### 7- نتايج و بحث

بهمنظور بررسی دقیقتر فیزیک جریان و تأثیر عملگر بر جریان در هر یک از سه حالت معرفی شده در جدول 1 و مقایسه بین این حالتها، نتایج در سه مقطع از پره که مشخصات آنها در جدول 2 آمده، ارائه شده است.

در شكل 11، خطوط هم تراز پتانسيل الكتريكي و غلظت شارژ الكتريكي به صورت بی بعد در دو مقطع نمایش داده شده است. مطابق انتظار و باتوجه به شرایط مرزی، مقدار پتانسیل الکتریکی بی بعد روی الکترود آزاد و محدود بهترتیب 0 و 1 است (شکل بالا-چپ). همچنین مقدار غلظت شارژ بیبعد روی صفحه بالای الکترود محدود، (با حرکت از سمت چپ به راست) از مقدار بیشینه 1 به مقدار 0 رسیده است (شکل پایین-چپ) که بیانگر توزیع نيم گوسي ميباشد.

<b>دول ا</b> مشخصات حالتهای دنترلی ا	كنترلى	حالتهای	ا مشخصات	دول ا
--------------------------------------	--------	---------	----------	-------

<b>Cable 1</b> Properties of different controlled cases					
% افزايش	محل شروع	محل شروع	محل پلاسما	حالت	مکان
توان خروجي	الكترود محدود در	الکترود آزاد در	در راستای		پلاسما
	راستای وتر (متر)	راستای وتر (متر)	دهانه پره (متر)		
1.180	0.43c	0.34c	11.75-19.95	1	ريشه
1.101	0.63c	0.54c	11.75-19.95	2	ريشه
0.466	0.43c	0.34c	44.55-52.75	3	نوک



Fig. 9 Different cases location of plasma actuators **شکل 9** مکان های مختلف نصب عملگر پلاسما



در شکل 12، خطوط همتراز سرعت در دو حالت غیرفعال و فعال عملگر در مقطع 1 و 2 نشان داده شده است. مشاهده می شود که عملگر توانسته است با القای جریان، ناحیه کمسرعت نزدیک لبه فرار در سطح بالا را از بین ببرد.

در شکل 13، بردارهای سرعت در مقطع 1، برای سه حالت عملگر غیرفعال، عملگر فعال در حالت 1 و 2 ارائه شده است. در شکل 13- الف که عملگر غیرفعال است، ناحیهای که سرعت روی سطح بالایی ایرفویل شروع به كاهش مى كند، نشان داده شده است. مطابق اين شكل، از نقطه 0.53 طول وتر از لبه حمله به بعد، روی سطح بالایی ایرفویل، شیب پروفیل سرعت طولی كاهش يافته و شرايط لايه مرزى مستعد جدايش مى شود. عملگر حالت 1 (شکل 13- ب) در مرز شروع این ناحیه قرار گرفته است و توانسته با القای جريان، پروفيل سرعت را بهبود بخشد؛ اما عملگر حالت 2 (شکل 13-ج) که در ناحیه کمسرعت قرار گرفته است، نتوانسته تغییر چندانی در پروفیل سرعت ایجاد کند. در شکل 14 نیز پروفیل سرعت برای عملگر فعال در حالت 1 و 2 در مقطع 1 و برای دو فاصلهی متفاوت از لبه حمله باهم مقایسه شده است. مقادیر مثبت محور عمودی، مشخص کننده سطح بالا و مقادیر منفی، مشخص کننده سطح پایین ایرفویل میباشند. مشاهده می شود که عملکرد عملگر در حالت 1 ازنظر القای مومنتم به جریان و بهبود پروفیل سرعت در نزدیکی سطح بالایی پره، خیلی بهـتر از عملکرد عملگر در حالت 2 بوده است. همان گونه که گفته شد، دلیل این موضوع قرار گیری عملگر حالت 1 قبل از ناحیه افت سرعت روی سطح بالایی بوده است ولی عملگر حالت 2 که در محل شروع افت سرعت قرار گرفته است، نتوانسته بهطور مناسب پروفیل سرعت را بهبود ببخشد.

شکل 15 بردارهای سرعت را در مقطع 2 برای حالتهای مختلف نشان میدهد. در این مقطع، هر دو عملگر حالت1 و 2 قبل از ناحیه کمسرعت قرار می گیرند و توانستهاند سرعت این ناحیه را افزایش دهند. بنابراین برای اینکه عملگر پلاسما بتواند نقش خود را به خوبی ایفا کند باید قبل از ناحیه کمسرعت قرارداشته باشد. علت اینکه عملگر حالت 2 در مقطع 1 در محل شروع افت سرعت قرار گرفته ولی همین عملگر در مقطع 2 قبل از ناحیه کم سرعت قرار دارد، فاصله بیشتر مقطع 2 از هاب پره و درنتیجه سرعت جریان نسبی بیشتر نسبت به مقطع 1 است. به عبارتی، با حرکت به سمت نوک پره، ناحیه کم سرعتی که در نزدیکی لبه فرار روی سطح بالای پره وجود دارد، کوچکتر میشود.

در شکل 16، پروفیل سرعت برای دو حالت عملگر غیرفعال و عملگر فعال حالت 1 در مقطع 2 و برای دو فاصله یمتفاوت از لبه حمله باهم مقایسه شده است. مشاهده می شود که در حالت عملگر فعال، سرعت روی سطح بالا در نزدیکی سطح افزایش داشته و با افزایش فاصله از لبه حمله، این افزایش سرعت بیشتر میباشد. روی سطح پایین ایرفویل، فعال بودن عملگر موجب كاهش سرعت شده است.

در شکل 17، توزیع ضریب فشار در مقطع 2 برای سه حالت عملگر غیرفعال، عملگر فعال در حالت 1 و 2 را نشان میدهد. مشاهده می شود هنگامی که عملگر فعال است، پرشی در توزیع فشار سطح بالای ایرفویل این

جدول 2 مشخصات مقاطع مشخص شده روى پره

Table 2 Properties of specified sections on blade				
فاصله (متر)	%دهانه	شماره مقطع		
14.0	22	مقطع 1		
18.0	29	مقطع 2		
48.6	77	مقطع 3		



بهوسیله عملگر بهوجود آمده است و مکان آنها در نزدیکی محل آغاز الکترود محدود است. بعد از ناحیه پرش، مقدار فشار به صورت پیوسته کاهش یافته است درحالی که در حالت عملگر غیرفعال، گرادیان فشار نامطلوب دیده می شود. همچنین مشاهده می شود مقدار فشار در سطح بالای ایرفویل در حالت عملگر فعال، مقدار منفىترى نسبتبه حالت غيرفعال دارد (كه بيانگر افت فشار است). همچنین، افزایش فشار در سطح پایین ایرفویل دیده می شود. سطح زیر نمودار ضریب فشار برای عملگر فعال حالت 1 حدود 15 درصد و برای حالت 2 حدود 13 درصد بیشتر از حالت غیرفعال عملگر است؛ درنتیجه نیروی تولیدی مقطع در اثر فعالیت عملگر پلاسما، افزایش مییابد. در شکل 18، مقایسهای بین پروفیل سرعت در حالت غیرفعال با فعال عملگر در حالت 1 (مقطع 2) و حالت 3 (مقطع 3) در فاصله 0.95 برابر طول وتر از لبه حمله انجام شده است. مشاهده می شود که عملگر فعال حالت 3 نسبت به غیرفعال بودن عملگر در مقطع 3، تغییر چندانی در پروفیل سرعت ایجاد نکرده است، درحالی که افزایش سرعت توسط عملگر فعال حالت 1 در مقطع 2 محسوس است. با دقت در اندازه مقادیر سرعت در این دو مقطع، می توان به دلیل این موضوع پیبرد. سرعت جریان در نزدیکی سطح بالای پره در مقاطع 2 و 3 و در فاصله 0.95 برابر طول وتر از لبه حمله، بهترتيب درحدود 10 و 56 (بهدلیل فاصله بیشتر از هاب توربین) متربرثانیه هستند. مشخص است که عملکرد عملگر با افزایش سرعت دچار افت می شود و نمی تواند بهخوبی هوای اطراف خود را تحت تأثیر قرار دهد و جریان القایی قدرتمند







شکل 13 بردار سرعت در حالت غیرفعال و فعال عملگر حالت 1 و 2 در مقطع 1





Fig. 14 Comparison of velocity profile in plasma on for case 1 and 2 at section 1



اعمال عملگر یلاسما در سه موقعیت

جدول 1



#### 8- نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از عملگر پلاسما بهعنوان ابزاری برای کنترل جریان روی پرهی روتور توربین باد 5 مگاواتی مرجع ان.آر.ای.ال. و افزایش توان خروجی آن بررسی شده است. برای این کار، عملگر پلاسما با مشخصات معرفی شده در این مقاله در سه موقعیت در نزدیکی ریشه و نوک پره قرار داده شد. نتایج نشان داد که اعمال عملگر برای تمامی حالتها روی پره باعث تغییر الگوی جریان روی پره و در نتیجه افزایش نیروهای آیرودینامیکی، گشتاور تولیدی و توان خروجی توسط روتور شده است. ولی باتوجه به افت عملکرد عملگر در سرعتهای زیاد جریان نسبی روی روتور، هنگامی که





 Fig. 17 Pressure coefficient distribution as a function of dimensionless chord length in plasma off and on for case 1 and 2 at section 2

 شكل 17 توزيع ضريب فشار برحسب طول بىبعد براى عملگر غيرفعال و فعال حالت

 1 و 2 در مقطع 2

**شکل 15** بردار سرعت برای عملگر غیرفعال و فعال حالت 1 و 2 در مقطع 2



**Fig. 16** Comparison of velocity profile in plasma off and on for case 1 at section 2

شکل 16 مقایسه پروفیل سرعت برای عملگر غیرفعال و فعال حالت 1 در مقطع 2

- [6] N. Benard, E. Moreau, Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 11, pp. 1-43, 2014.
- [7] The European offshore wind industry-key trends and statistics 2015, A report by the European Wind Energy Association (EWEA), 2016.
- [8] R. C. Nelson, T. C. Corke, H. Othman, M. P. Patel, S. Vasudevan, T. Ng, A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, January 7-10, 2008.
- [9] D. Greenblatt, M. Schulman, A. Ben-Harav, Vertical axis wind turbine performance enhancement using plasma actuators, *Renewable Energy*, Vol. 37, No. 1, pp. 345-354, 2012.
- [10] M. Kotsonis, R. Pul, L. Veldhuis, Experimental study on airfoil circulation control using plasma actuators, *31st AIAA Applied Aerodynamics Conference*, San Diego, CA, USA, June 24-27, 2013.
- [11] H. Aono, Y. Abe, M. Sato, A. Yakeno, K. Okada, T. Nonomura, K. Fujii, Flow control using a DBD plasma actuator for horizontal-axis wind turbine blades of simple experimental model, *The 11th World Congress on Computational Mechanics*, Barcelona, Spain, July 20-25, 2014.
- [12] J. A. Cooney, Ch. Szlatenyi, N. E. Fine, The development and demonstration of a plasma flow control system on a 20 kW wind turbine, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA, 2016.
- [13] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL-TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [14] F. Villalpando, M. Reggio, A. Ilinca, Numerical study of flow around iced wind turbine airfoil, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 39-45, 2012.
- [15]Y. Bazilevs, M. C. Hsu, I. Akkerman, S. Wright, K. Takizawa, B. Henicke, T. Spielman, T. E. Tezduyar, 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 65, No. 1-3, pp. 207-235, 2011.
- [16] M. H. Giahi, A. Jafarian Dehkordi, FSI simulation of a small size horizontal axis wind turbine to investigate the effects of blade thickness and material on blade deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 145-152, 2015. (in Persian (فارسی)
- [17] G. Bernardi, Feasibility Study of a 3D CFD Solution for FSI Investigations on NREL 5MW Wind Turbine Blade, Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, EGI-2015-006MSC EKV1077, 2015.
- [18] A. Rafi, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of the plasma actuator effects on the flow field and heat transfer coefficient in a flat channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 23-30, 2015. (in Persian فارسى)
- [19] R. Thompson, T. Moeller, Numerical investigations of plasma actuator lorentz body forces, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, USA, January 9-12, 2012.
- [20] Y. Suzen, G. Huang, Simulations of flow separation control using plasma actuators, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, January 9-12, 2006.
- [21] D. M. Orlove, T. C. Corke, Numerical simulation of aerodynamic plasma actuator effects, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, January 10-13, 2005.
- [22] A. Mukut, H. Mizunuma, O. Hiromichi, T. Segawa, Winglet type dielectric barrier discharge plasma actuators: performance characterization and numerical comparison. *Proceedia Engineering*, Vol. 105, pp. 250-257, 2015.
- 123 A. Mukut, H. Mizunuma, H. Obara, T. Segawa, Flow characteristics induced by winglet-type plasma actuators, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 396-406, 2013.
  [24] M. Kotsonis, S. Ghaemi, L. Veldhuis, F. Scarano, Measurement of the body
- [24] M. Kotsonis, S. Ghaemi, L. Veldhuis, F. Scarano, Measurement of the body force field of plasma actuators, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 4, pp.045204, 2011.



Fig. 18 Comparison of velocity profile at x/c=0.95 in plasma off and on for case 1 and 3 at section 2 and 3

شکل 18 مقایسه پروفیل سرعت در x/c=0.95 برای عملگر غیرفعال و فعال حالت 1 و 3 در مقاطع 2 و 3

عملگر در نزدیکی ریشه پره قرار دارد، تأثیر آن بیشتر از زمانی است که در نزدیکی نوک پره نصب شده است. همچنین با قرارگیری عملگر در ناحیه کمسرعت روی سطح بالایی مقطع پره، کارایی آن افت میکند و برای بهرهوری بیشتر، بهتر است عملگر در مرز ناحیه کمسرعت (یا ناحیه جدایش) قرار داده شود. بیشترین درصد افزایش توان توربین برای حالت 1 برابر 1.18 بوده است که در سرعت باد 9 متربرثانیه معادل حدود 35 کیلووات میباشد. بنابراین اعمال روش پیشنهادی برای توربینهای یک مزرعه بادی میتواند در افزایش راندامان مزرعه مؤثر باشد.

#### 9- مراجع

- S. El-Khabiry, G. M. Colver, Drag reduction by dc corona discharge along an electrically conductive flat plate for small Reynolds number flow, *Physics* of Fluids, Vol. 9, No. 3, 587-599, 1997.
- [2] J. Roth, D. Sherman, S. Wilkinson, Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma, *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, USA, January 12-15, 1998.
- [3] S. Johnson, C. P. Van Dam, D. E. Berg, Active load control techniques for wind turbines, SANDIA Report, SAND2008-4809, Sandia National Laboratories, 2008.
- [4] J. Kriegseis, B. Simon, S. Grundmann, Towards in-flight applications? a review on dielectric barrier discharge-based boundary-layer control, *Applied Mechanic Review*, Vol. 68, No. 2, pp. 1-41, 2016.
- [5] M. Kotsonis, Diagnostics for characterisation of plasma actuators, Measurement Science and Technology, Vol. 26, No. 9, pp. 1-35, 2015.