



مطالعه اثر متقابل توربین‌های باد پشت سرهم روی عملکرد یکدیگر به کمک الگوی دیسک عملگر

عباس ابراهیمی¹، مصطفی نوزری²

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
2- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی 11155-1639، ebrahimi_a@sharif.ir

چکیده

در این پژوهش، روش دیسک عملگر دوبعدی به صورت تقارن محوری با دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی کم برای مطالعه جریان حول روتور توربین باد محور افقی و دنباله‌ای آن توسعه داده شده است. با استفاده از نرم‌افزاری تجاری بر مبنای روش حجم محدود و قابلیت تعریف توابع توسط کاربر، حلگری برای اعمال مومنت مجازی به جریان حول روتور نوشته شده که در آن، معادلات ناویر-استوکس با اضافه شدن عبارت نیروی حجمی به عنوان جمله چاه حل می‌شوند. اعتبارسنجی روش با داده‌های توربین باد مبنای 5 مگاواتی انجام شده و اثر متقابل دو توربین پشت سرهم در مزرعه بادی، روی عملکرد آیرودینامیکی یکدیگر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، حضور توربین بالادست موجب کاهش توان و تراست روتور پایین‌دست تا فاصله سه برابر قطر روتور، به ترتیب تا حدود 88 و 57 درصد می‌شود. با افزایش فاصله‌ی توربین پایین‌دست از توربین بالادست تا حدود 170 برابر قطر روتور، توان و تراست شروع به بازیابی به سمت مقادیر توربین بالادست می‌کنند. نتایج توزیع توان در راستای شعاع پره نیز نشان می‌دهد برای روتور پایین‌دست در فواصل نزدیک به روتور بالادست، بخش میانی پره سهم بیشتری در تولید توان دارد. علاوه بر این، اثر روتور پایین‌دست روی عملکرد توربین بالادست به ترتیب تا حدود 1.5 و 0.7 درصد کاهش توان و تراست است و با افزایش فاصله، این اثر از بین می‌رود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 دی 1396
پذیرش: 26 اسفند 1396
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397
کلید واژگان:
توربین باد محور افقی
دیسک عملگر
مزرعه بادی
دنباله جریان روتور
دینامیک سیالات محاسباتی

Investigating the aerodynamic interaction of tandem wind turbines based on actuator disk model

Abbas Ebrahimi*, Mostafa Nozari

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 18 January 2018
Accepted 17 March 2018
Available Online 19 April 2018

Keywords:

Horizontal axis wind turbine
Actuator disk
Wind farm
Rotor wake
Computational fluid dynamics

ABSTRACT

In this paper, the generalized axisymmetric actuator disk method with acceptable accuracy and low computational cost based on computational fluid dynamics has been adopted to study the flow behavior around the horizontal wind turbine rotor and the wake. In this method, the rotor is modeled as a virtual disc and its effect is added to the Navier-Stokes equations as a sink term via a user-defined function in a finite-volume based commercial CFD software package. The results are validated with the data of NREL-5 MW reference wind turbine. The aerodynamic interaction of tandem wind turbines in the wind farm has been investigated. The results depict that the output power and thrust of the downstream rotor due to the presence of an upstream turbine are decreased up to 88% and 57%, respectively. In addition, radial distribution of the downstream rotor power shows that at a closer distance, the middle part of the blade has a larger contribution to power generation. Further, the effect of a downstream rotor on the upstream rotor performance is up to 1.5% and 0.7% reduction in power and thrust respectively.

1- مقدمه

استفاده می‌شود. بنابراین توسعه‌ی روش‌ها و ابزارهای تحلیل و طراحی با هزینه محاسباتی پایین و در عین حال دقت مناسب در طراحی آیرودینامیکی روتور و مزرعه بادی همواره مورد نظر طراحان بوده است. روش‌های تحلیل آیرودینامیک توربین‌های باد به روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، الگوی مومنت المان پره، روش‌های پنلی و روش‌های عملگر تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل در نظر گرفتن اثرات لایه مرزی روی پره‌ها، تلفات نوک و شبیه‌سازی ناپایایی گردابه روتور دارای دقت بالایی برای تحلیل آیرودینامیک روتور هستند. این

آینده صنعت انرژی بادی نیازمند دانش فنی و مهندسی طراحی توربین‌های بادی مقیاس بزرگ برای تولید توان بیشتر است. اخیراً افزایش ابعاد توربین‌های بادی سبب شده است میانگین توان تولیدی این دسته از توربین‌ها با افزایش 15 درصدی از حدود 4.2 مگاوات در سال 2015 به 4.8 مگاوات در سال 2016 برسد. همچنین اولین توربین بادی مدرن 8 مگاواتی نیز در سال 2016 نصب و بهره‌برداری شد [1]. همچنین معمولاً برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، از چیدمان مشخصی از این نوع توربین‌ها در یک مزرعه بادی

مقایسه کردند. آنها دقت خوبی را در سرعت‌های پایین برای الگوریتم توسعه داده شده نتیجه گرفتند. بهروزی فر و دربندی [12] روش دیسک عملگر تقارن محوری را به کمک استفاده از توابع تعریفی کاربر در نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی کرده و اثر ضخامت دیسک را در بهبود نتایج مقایسه کردند. یکی از دغدغه‌های محققان در روش‌های عملگر، بهبود دقت روش در پیش‌بینی سرعت‌های القایی نسبت به الگوی مومنتم المان پره است. به همین منظور بوجاری و همکاران [13] به کمک پارامتری توزیعی در روش خط عملگر، دقت نیروهای توزیع شده را به کمک حل گر سیالاتی این‌فوم⁵ ارتقا داده و نتایج روش خط عملگر را با داده‌های تجربی توربین مکزیکو مقایسه کردند. اخیراً، دربندی و بهروزی فر [14] نیز نتایج روش خط عملگر را با الگوی مومنتم المان پره برای توربین باد مرجع 5 مگاواتی مقایسه کردند.

هدف اصلی در این مقاله ارائه‌ی روشی با دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی کم در مقایسه با روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی مشخصات جریان پیرامون روتور توربین باد و اندرکنش دو توربین در مزرعه بادی است. از روش دینامیک سیالات محاسباتی مبنای دیسک عملگر تقارن محوری به صورت دوبعدی برای تحلیل جریان پیرامون توربین باد مرجع 5 مگاواتی استفاده شده است. همچنین اثر متقابل دو توربین از این نوع در بالادست و فواصل مختلف پایین‌دست روی عملکرد یکدیگر بررسی شده است.

2- توربین باد مبنا و معادلات حاکم بر جریان

به منظور مطالعه جریان حول روتور توربین باد به روش دیسک عملگر از نتایج گزارش شده توربین 5 مگاواتی مرجع [15] استفاده می‌شود. این توربین دارای سه پره با طول 61.5 متر است و هر پره از شش ایرفویل مختلف تشکیل شده که با روش کنترل گام⁶، توان توربین را برای سرعت‌های باد بیشتر از سرعت نامی (11.4 m/s) کنترل می‌کنند.

از معادلات تراکم‌ناپذیر ناویر-استوکس متوسط‌گیری‌شده (پیوستگی و مومنتم) مطابق رابطه (1) برای حل معادلات جریان حول روتور استفاده شده است.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i' \bar{u}_j'}{\partial x_j} + f_{bi} \quad (1)$$

در این رابطه f_{bi} نیرو بر واحد حجم سلول است که به عنوان جمله چاه در روش دیسک عملگر به معادلات مومنتم اضافه شده است و جایگزینی برای نیروی آیرودینامیکی وارد بر هر قسمت پره است. $\bar{p}$ ، $\bar{u}_i$ و ρ به ترتیب متوسط فشار استاتیک، متوسط سرعت جریان، چگالی جریان و ویسکوزیته سینماتیکی هستند. جمله $\bar{u}_i' \bar{u}_j'$ نیز تانسور تنش رینولدز است که در این شبیه‌سازی به کمک مدل توربولانسی مرجع [12] مدل‌سازی شده‌اند.

3- الگوی دیسک عملگر و الگوریتم حل عددی

در روش دیسک عملگر یک دیسک مجازی جایگزین روتور در میدان جریان می‌شود و عکس‌العمل توزیع نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره به معادلات ناویر-استوکس اضافه می‌شوند. در این روش نیروهای آیرودینامیکی به صورت جمله چشمه به پره اعمال و عکس‌العمل آن‌ها به صورت جمله چاه و نیروی حجمی به معادلات ناویر-استوکس اضافه می‌شوند. شکل 1 نحوه توزیع

روش‌ها به علت پیچیده بودن جریان حول روتور (سه‌بعدی و ناپایا) هزینه محاسباتی زیادی دارند [3,2]. به طور مثال برای شبیه‌سازی یک مزرعه بادی و اعمال اثرات لایه مرزی و دنباله جریان روتور به کمک این روش حدود 10^{21} سلول محاسباتی نیاز است [4]. در حال حاضر بسیاری از کدهای تجاری از روش سریع و مهندسی الگوی مومنتم المان پره استفاده می‌کنند [5]. این روش‌ها دارای مزیت‌هایی از جمله سرعت و دقت مناسب برای شرایط جریان ورودی پایا به صفحه‌ی روتور هستند ولی مدل‌سازی گردابه‌ها و دنباله روتور توربین توسط آن‌ها با تقریب‌هایی همراه است. در روش‌های عملگر با حذف هندسه روتور و اعمال اثر نیروهای آیرودینامیکی به صورت جمله چاه به معادلات ناویر-استوکس، رفتار جریان پیرامون روتور شبیه‌سازی می‌شود. روش‌های عملگر به سه دسته‌ی دیسک، خط و صفحه عملگر تقسیم می‌شوند. در این روش‌ها به علت عدم مدل‌سازی هندسه روتور، تعداد سلول محاسباتی بسیار کمتری برای شبیه‌سازی جریان احتیاج است. این روش‌ها قابلیت مدل‌سازی گردابه‌های نوک پره، دنباله جریان و لحاظ کردن اثرات سه‌بعدی و ناپایایی جریان ورودی به روتور را دارند. همچنین این روش‌ها نسبت به الگوی مومنتم المان پره دقت بیشتر و نسبت به روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارای سرعت بیشتری در تحلیل روتور هستند و بنابراین برای شبیه‌سازی اندرکنش دنباله توربین‌ها در مزرعه بادی روشی کارآمد می‌باشند.

روش دیسک عملگر اولین بار توسط سارنسن و مایکن [6] به صورت ناپایا و تقارن محوری توسعه داده شد. سارنسن و همکاران [7] به منظور پیش‌بینی بهتری از گردابه‌های توربین، مفهوم دیسک عملگر را با معادلات ناویر-استوکس برای دامنه تقارن محوری ادغام کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که گردابه آشفته توربین برای حالت بارگذاری ثابت یک پدیده‌ی ناپایا است. میکولسون و همکاران [8] به کمک روش دیسک عملگر، تاثیر زاویه مخروطی¹ روتور را بر روی عملکرد توربین بررسی کردند. با توجه به نتایج این پژوهش، توان روتور با زاویه مخروطی ناشی از مومنتم جریان ورودی به صفحه توربین و کاهش سطح موثر، کم می‌شود. آنها نشان دادند که زاویه مخروطی به سمت بالادست جریان نسبت به پایین‌دست، کاهش بیشتری را در توان خروجی سبب می‌شود. میکولسون و سارنسن [9] الگوی دیسک و خط عملگر را توسعه بیشتری دادند و به کمک این روش‌ها روتور را در حالت زاویه مخروطی و شرایط یاو² تحلیل کردند. آنها با استفاده از داده‌های ایرفویل و الگوریتمی تکراری بر مبنای الگوی مومنتم المان پره، نیروهای آیرودینامیکی را بر روی سه خط که نمایندگی پره‌های روتور را داشتند به صورت جمله‌های چاه توزیع کردند. همچنین سرعت القایی در صفحه روتور را توسط حل جریان به صورت تکراری به دست آوردند و با نتایج تجربی توربین باد مرجع 500 کیلوواتی مقایسه کردند. سارنسن و همکاران [4] به کمک روش ال ای اس³ و شبیه‌سازی دقیق‌تر گردابه‌های جریان، دقت روش خط عملگر را افزایش دادند.

کیم و همکاران [10] مدل دقیق‌تری از روش‌های عملگر را به نام صفحه عملگر توسعه دادند. نیروها در این روش علاوه بر جهت دهانه پره در راستای وتر آن نیز توزیع می‌شوند؛ بنابراین دقت بهتری نسبت به روش خط عملگر که نیروها فقط در راستای دهانه توزیع می‌شوند؛ داراست. محمودی و همکاران [11] به کمک یک نرم‌افزار تجاری بر مبنای روش حجم محدود، توربین باد مکزیکو⁴ را با روش دیسک عملگر شبیه‌سازی و با نتایج تجربی

¹ Cone Angle

² Yaw Condition

³ LES (Large Eddy Simulation)

⁴ MEXICO

⁵ OpenFoam
⁶ Pitch Control

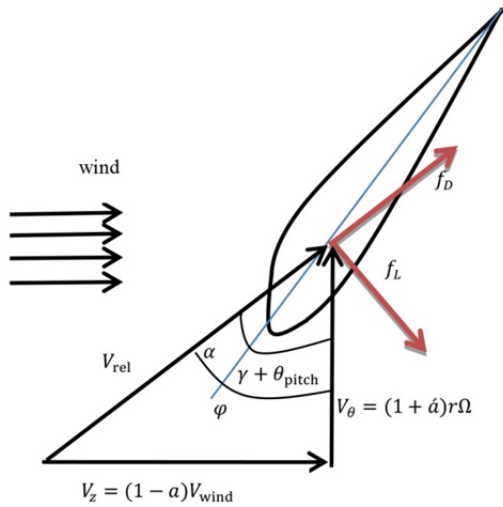


Fig. 2 Velocity and aerodynamic forces components at the blade section

شکل 2 مؤلفه‌های سرعت و نیروهای آیرودینامیکی در یک مقطع پره

مقادیر ضرایب برآ و پسای مقاطع پره توربین باد از مرجع [15] گرفته شده است. مشخصات ضرایب هر ایرفویل به‌عنوان داده ورودی به کد اعمال شده و سپس توسط تابع میان‌یاب بین داده‌های آیرودینامیکی میان‌یابی انجام می‌شود. سپس مطابق الگوریتم شکل 3، در هر تکرار زاویه حمله توسط رابطه (4) محاسبه و با توجه به زاویه محاسبه شده برای هر مقطع پره، ضریب برآ و پسای متناظر توسط تابع میان‌یاب حاصل می‌شود. سپس نیروی آیرودینامیکی به عنوان ترم چاه محاسبه و همزمان به جریان اعمال و معادلات جریان حل می‌شوند. این تکرار و به روز رسانی زاویه حمله تا همگرایی مقادیر توان و تراست انجام می‌شود.

مؤلفه‌های نیروهای آیرودینامیکی وارد بر هر المان پره بر واحد حجم در دستگاه استوانه‌ای توسط رابطه (7) محاسبه شده و به سلول‌های دامنه حل در سه راستای مماسی، محوری و شعاعی در محل روتور مجازی و به‌صورت جمله چاه اضافه می‌شوند.

$$\begin{aligned} f_{b\theta} &= \frac{\rho c V_{rel}^2}{2dv} (c_l \sin(\varphi) - c_d \cos \varphi) \\ f_{bz} &= \frac{\rho c V_{rel}^2}{2dv} (c_d \sin(\varphi) + c_l \cos \varphi) \\ f_{br} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

در این رابطه، dv حجم المان رینگ مجازی است. توان و نیروی محوری روتور که کمیت‌های تجمیعی هستند نیز توسط رابطه (8) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \text{توان} &= 0.5 \rho B \Omega \sum_{r=0}^{r=R} r c(r) V_{rel}^2 (c_l(r) \sin(\varphi) \\ &\quad - c_d(r) \cos(\varphi)) dr \\ \text{نیروی محوری} &= 0.5 \rho B \sum_{r=0}^{r=R} c(r) V_{rel}^2 (c_d(r) \sin(\varphi) \\ &\quad + c_l(r) \cos(\varphi)) dr \end{aligned} \quad (8)$$

در این رابطه، B تعداد پره است. الگوریتم روش دیسک عملکرد برای هر مقطع پره در روندنمای شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به اینکه روتور مورد مطالعه در این پژوهش از مقاطعی با ایرفویل متفاوت در راستای طول پره تشکیل شده است، از یک تابع میان‌یاب خطی برای تغییر مشخصات هندسی و آیرودینامیکی بین مقاطع مختلف استفاده شده است.

نیروهای آیرودینامیکی در فاصله شعاعی r از پره بر روی یک المان رینگ مجازی در دیسک معادل روتور را نشان می‌دهد. نیروی معادل سه پره در هر مقطع بر روی یک المان رینگ در شعاع متناظر مقطع پره توزیع می‌شود. نیروهای آیرودینامیکی بر روی دیسک مجازی به کمک ترکیب الگوریتم‌های مومنم المان پره و روش دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه می‌شوند. این روش، هرچند مبنای دینامیک سیالات محاسباتی دارد ولی نسبت به روش‌های دیگر دینامیک سیالات محاسباتی به علت عدم مدل‌سازی هندسه روتور و عدم نیاز به مدل‌سازی لایه مرزی از حجم محاسبات بسیار کمتری برخوردار است.

شکل 2 پرادهای سرعت و نیروهای آیرودینامیکی را در هر مقطع پره و در دو جهت محوری و مماسی نشان می‌دهد. نیروهای آیرودینامیکی برآ و پسای هر مقطع پره از رابطه (2) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} f_L &= 0.5 \rho V_{rel}^2 c_l(\alpha) c \\ f_D &= 0.5 \rho V_{rel}^2 c_d(\alpha) c \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن ρ ، c و c_d به‌ترتیب چگالی جریان، طول وتر و ضرایب برآ و پسای هستند. همچنین V_{rel} نیز اندازه سرعت نسبی محلی هر مقطع پره است که از رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$V_{rel} = \sqrt{V_z^2 + (r\Omega - V_\theta)^2} \quad (3)$$

در این رابطه r فاصله شعاعی هر کدام از المان‌های رینگ دایروی است و Ω سرعت دورانی روتور است. V_θ و V_z نیز سرعت‌های محوری و مماسی اعمال شده بر هر المان از پره است که در روش دیسک عملکرد به کمک دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه می‌شوند. زاویه حمله (α) هر المان از پره نیز از رابطه (4) به‌دست می‌آید.

$$\alpha = \varphi - \gamma - \theta_{pitch} \quad (4)$$

که در آن γ ، θ_{pitch} و φ به‌ترتیب پیچش هندسی، زاویه پیچ کنترل و زاویه جریان هستند. زاویه جریان (زاویه بین سرعت نسبی و صفحه روتور) از رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a)V_{wind}}{(1+a')r\Omega} \right) \quad (5)$$

در این رابطه V_{wind} سرعت باد و a و a' به‌ترتیب، ضرایب القایی محوری و مماسی هستند که با توجه به رابطه (6) محاسبه می‌شوند.

$$a = \frac{-V_\theta}{r\Omega}, a' = 1 - \frac{V_z}{V_{wind}} \quad (6)$$

این ضرایب متناسب با سرعت محوری و مماسی هستند که در روش دیسک عملکرد از حل عددی معادلات جریان محاسبه می‌شوند؛ بنابراین دقت بهتری نسبت به روش مومنم المان پره دارا هستند.

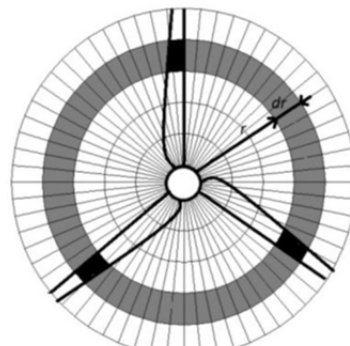


Fig. 1 Distribution of aerodynamic forces in actuator disk model

شکل 1 نحوه توزیع نیروهای آیرودینامیکی هر مقطع پره بر روی دیسک مجازی

محاسباتی مرجع [16] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود نیروی عمودی در راستای شعاعی پره، در بخش خارجی نسبت به بخش داخلی بیشتر است و با افزایش سرعت باد، تا قبل از سرعت نامی توربین، این نیرو افزایش می‌یابد. نتایج در بدترین حالت، حدود 4-5 درصد اختلاف را نشان می‌دهند. بنابراین روش پیشنهادی در این مقاله پیش‌بینی خوبی از بارگذاری آیرودینامیکی روتور بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی با هزینه محاسباتی کمتر (به علت عدم مدل‌سازی پره) ارائه می‌دهد. در شکل 7 نتایج توزیع ضرایب برآ و پسا در طول پره برای سرعت 6 متر بر ثانیه از روش دیسک عملگر با نتایج روش مومنت المان پره مرجع [12] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود برای جریان پایای ورودی به صفحه روتور، نتایج هر دو روش به یکدیگر نزدیک است. همچنین ضریب پسا در ابتدای پره به علت مقاطع سیلندری، زیاد و ضریب برآ تقریباً در این مقاطع صفر است ولی در فواصل بیشتر از 0.2R به علت مقاطع ایرفویل‌دار، ضریب پسا کاهش و ضریب برآ افزایش می‌یابد.

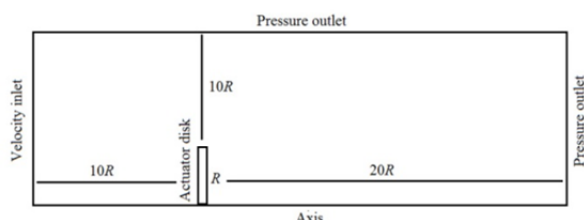


Fig. 4 Computational domain and boundary conditions

شکل 4 دامنه حل و شرایط مرزی

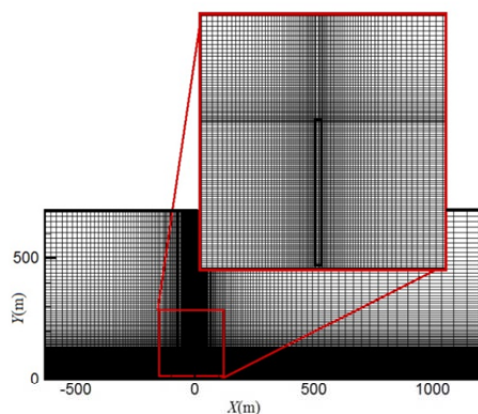


Fig. 5 Computational grid around the actuator disk

شکل 5 شبکه محاسباتی پیرامون دیسک عملگر تقارن محوری

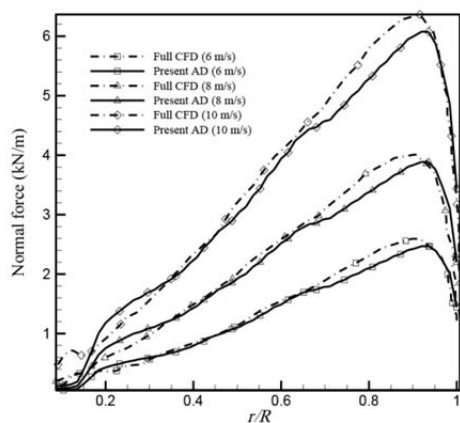


Fig. 6 Radial distribution of normal force on the blade

شکل 6 توزیع نیرو عمودی در راستای طول پره

4- دامنه حل، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

با توجه به تقارنی که در مساله دیسک عملگر در میدان جریان برقرار است از دامنه تقارن محوری استفاده می‌شود. به منظور مدل‌سازی روتور از مستطیلی به طول 61 متر (طول پره) و عرض یک متر استفاده شده است. با توجه به تجربه حل عددی در مرجع [12] روی استقلال حل از شبکه و ابعاد میدان محاسباتی، دامنه‌ای با ابعاد شکل 4 و شبکه‌ای به تعداد 220×120 سلول مطابق شکل 5 انتخاب شده است.

شرایط مرزی برای حل عددی معادلات جریان، مطابق شکل 4 برای مرز ورودی، سرعت ورودی¹، مرزهای خروجی فشار خروجی² و روی محور تقارن، شرط مرزی محور³ استفاده شده است. به منظور حل معادلات جریان از نرم‌افزاری تجاری بر مبنای روش حجم محدود و برای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی در اجرای الگوریتم شکل 3 از توابع تعریفی کاربر برای اعمال مومنت مجازی به جریان استفاده شده است. با توجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان از روش فشار مبنا و به علت حضور مؤلفه مماسی جریان⁴ از حل‌گر تقارن محوری چرخشی⁵ استفاده شده است.

5- اعتبارسنجی حل عددی

به منظور اعتبارسنجی روش دیسک عملگر، توزیع نیروی عمودی بر روی پره در سه سرعت باد 6، 8 و 10 متر بر ثانیه در شکل 6 با روش دینامیک سیالات

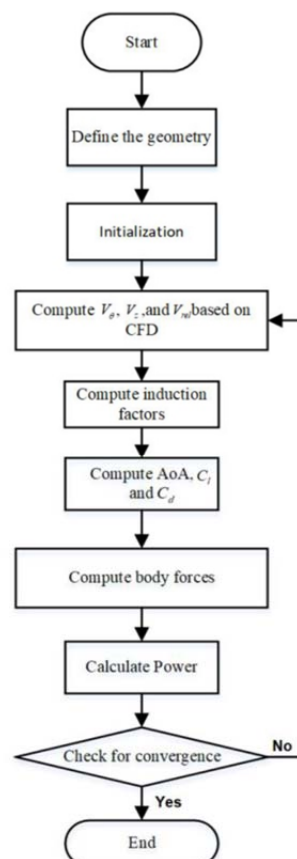


Fig. 3 Flowchart of actuator disk method

شکل 3 الگوریتم روش دیسک عملگر

¹ Velocity Inlet

² Pressure Outlet

³ Axis

⁴ Tangential Component

⁵ Swirl Axisymmetric

حضور مقاطع سیلندری و آشفته شدن جریان، مقدار ورتیسسته زیاد است. همچنین شکل 9 نشان می‌دهد که اندازه سرعت محوری جریان در حین عبور از روتور، ابتدا افت می‌کند و مجدد با فاصله گرفتن از روتور بازیابی می‌شود. باتوجه به شکل، بردار سرعت محوری در فواصل 3.25R، 6.5R و 9.75R بعد از روتور در ناحیه دنباله جریان به ترتیب حدود 50، 30 و 20 درصد کاهش یافته است. بنابراین روش دیسک عملگر برخلاف مومنتم المان پره، قابلیت ارایه توصیفی از میدان جریان حول روتور با هزینه محاسباتی کمتر از روش دینامیک سیالات محاسباتی را دارد.

روش مومنتم المان پره به علت محدودیت‌های آن، توانایی تحلیل اندرکنش توربین‌ها در مزرعه بادی را ندارد و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی نیز برای این نوع مسایل بسیار پرهزینه هستند. یکی از کاربردهای روش‌های عملگر، مطالعه اندرکنش توربین‌های مزرعه بادی با حجم محاسبات کمتر و دقت قابل قبول است. در این بخش به کمک روش توسعه یافته در این مقاله، اثرپذیری متقابل دو توربین پایین‌دست و بالادست که در فواصل مختلف مطابق شکل 10 از یکدیگر قرار دارند بررسی شده است.

6-1- اثر روتور بالادست بر عملکرد روتور پایین‌دست

برای بررسی عملکرد توربینی که در پایین‌دست توربین دیگری در فواصل مختلف از آن (مطابق شکل 10) قرار گرفته است، مقادیر توان خروجی و نیروی عمود بر صفحه روتور (تراست) برای سرعت نامی باد در شکل 11 نشان داده شده است.

مقایسه مقادیر توان و تراست توربین پایین‌دست در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد که در فواصل نزدیک به توربین بالادست، توان و تراست روتور پایین‌دست به شدت افت می‌کنند. به طوری که در فاصله 3D (D قطر روتور)، توان و تراست به ترتیب 88 و 57 درصد کاهش می‌یابند. سپس با افزایش فاصله‌ی توربین پایین‌دست از توربین بالادست، توان و تراست شروع به بازیابی به سمت مقادیر توربین بالادست می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند حتی تا فاصله 120D، توربین پایین‌دست (با کاهش عملکرد حدود 30 درصد) تحت اثر توربین بالادست است. با برون‌یابی داده‌های شکل 11، پیش‌بینی می‌شود در فاصله حدود 170D، توان خروجی توربین پایین‌دست برابر توربین بالادست شود. همچنین باتوجه به کاهش طول دنباله جریان روتور بالادست در سرعت‌های باد کمتر از سرعت نامی، پیش‌بینی می‌شود بازیابی توان خروجی توربین پایین‌دست در فاصله‌ای نزدیک‌تر انجام شود.

شکل‌های 12 و 13 توزیع توان و تراست در راستای شعاعی پره روتور برای موقعیت‌های مختلف روتور پایین‌دست را با روتور بالادست مقایسه می‌کنند. مشاهده می‌شود برای روتور بالادست و همچنین روتور پایین‌دست در فاصله بسیار زیاد، حدود 20 درصد انتهایی پره سهم بیشتری در تولید توان دارد اما برای روتور پایین‌دست در فواصل نزدیک این روند تغییر پیدا کرده و در محدوده میانی پره، سهم تولید توان بیشتر می‌شود. بنابراین برای بهبود توان توربین‌هایی که در این موقعیت از توربین بالادست قرار دارند بهتر است روش‌هایی نظیر کنترل جریان روی پره در بخش میانی پره اعمال شود. کانتور سرعت محوری جریان حول روتور توربین بالادست و همچنین توربین پایین‌دست در سه موقعیت 15، 30 و 45 برابر قطر روتور در شکل 14 نشان داده شده است. سرعت محوری جریان در صفحه روتور بالادست حدود 9.5 متربرثانیه ولی این سرعت برای سه موقعیت مختلف توربین در پایین‌دست به ترتیب برابر حدود 6.5، 7 و 7.5 متربرثانیه است. بنابراین سرعت محوری ابتدا کاهش و سپس با افزایش فاصله شروع به بازیابی می‌کند.

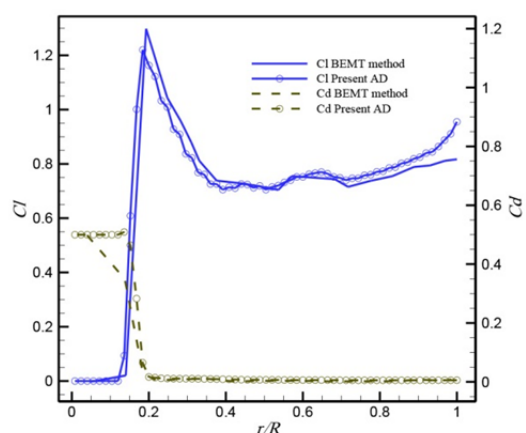


Fig. 7 Distribution of the lift and drag coefficients along the blade in wind speed of 6 m/s

شکل 7 توزیع ضرایب آیرودینامیکی برآ و پسا در طول پره در سرعت باد 6 متربرثانیه

6- نتایج و بحث

برای مطالعه میدان جریان حول روتور، شکل 8 کانتور فشار نسبی جریان در صفحه محوری روتور را نشان می‌دهد. باتوجه به اثرپذیری جریان پایین‌دست از بالادست، سرعت جریان حین نزدیک شدن به صفحه روتور کاهش و در نتیجه فشار نسبی قبل از روتور تا 30 پاسکال افزایش می‌یابد. با عبور جریان از صفحه روتور، فشار افت شدیدی کرده و بخشی از انرژی جریان توسط روتور به کار مکانیکی تبدیل می‌شود. بیشترین اختلاف فشار دو طرف روتور، حدود 30 پاسکال یا 0.055 درصد فشار جریان آزاد است که سبب ایجاد نیرویی در جهت باد به صفحه روتور می‌شود.

شکل 9 کانتور ورتیسسته جریان و بردار سرعت را در صفحه محوری پایین‌دست روتور برای سرعت باد نامی نشان می‌دهد. روش دیسک عملگر از طریق تزریق مومنتم مجازی به جریان در صفحه روتور سبب ایجاد گردادیان در سرعت جریان حول روتور شده و گردابه‌های ناشی از حضور روتور را شبیه‌سازی می‌کند. مشاهده می‌شود میزان ورتیسسته جریان در نواحی نوک پره و قسمت هاب روتور از بقیه قسمت‌های پره بیشتر است. در قسمت نوک پره به علت برگشت جریان از سطح زیری پره به سطح روی آن، گردابه‌های نسبتاً قوی به پایین دست منتشر می‌شوند. در قسمت هاب روتور نیز به علت

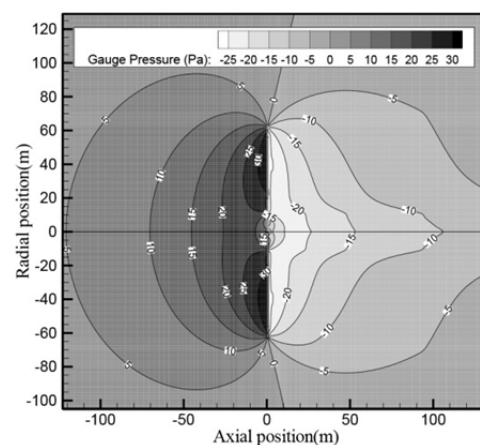


Fig. 8 Gauge pressure distribution around the rotor

شکل 8 کانتور توزیع فشار نسبی حول روتور

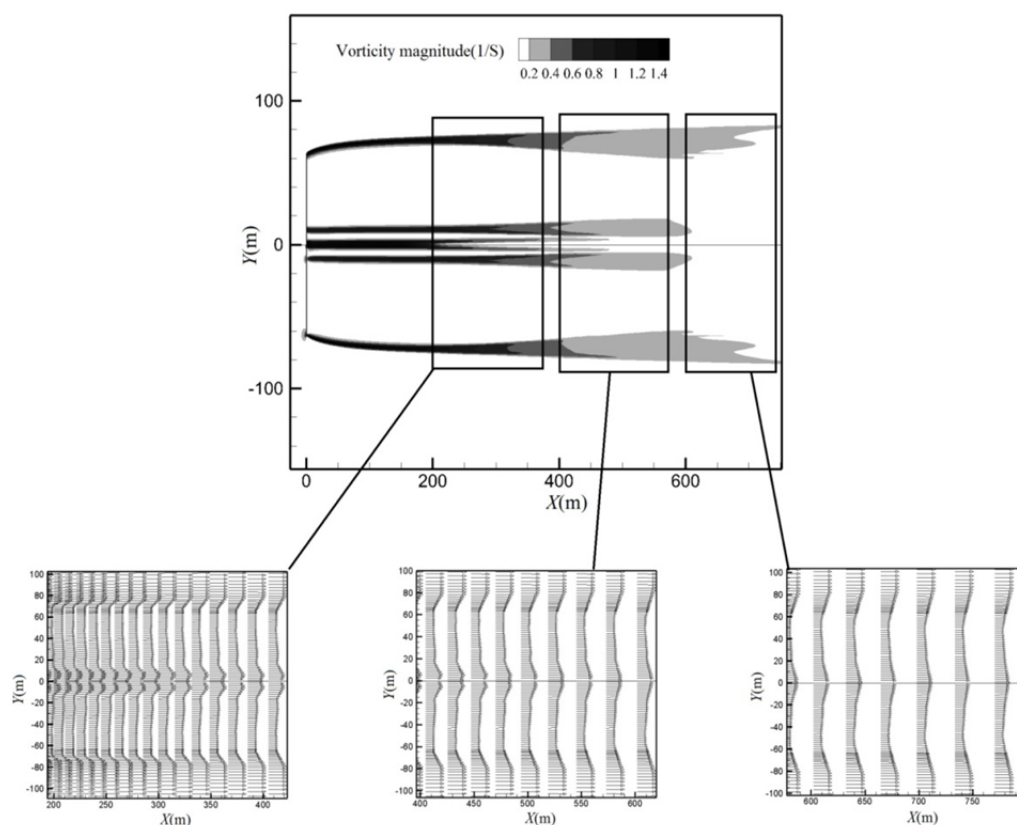


Fig. 9 Vorticity contour around actuator disk and velocity vectors in rotor wake

شکل 9 کانتور ورتیسسته حول دیسک عملگر و بردارهای سرعت جریان در دنباله روتور

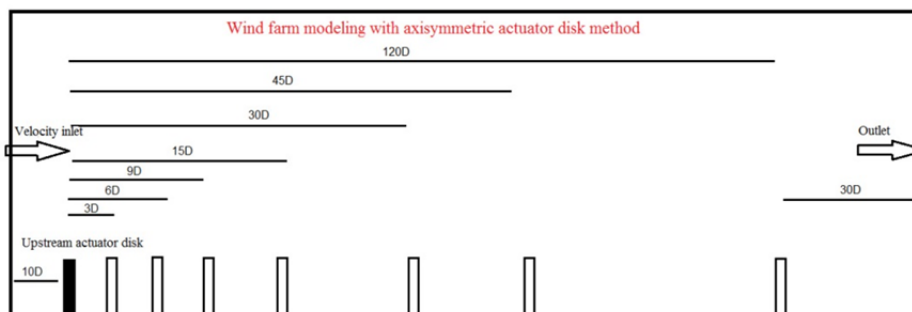


Fig.10 Different positions of the downstream wind turbine from the upstream rotor

شکل 10 موقعیت‌های مختلف توربین دوم در پایین دست توربین اول

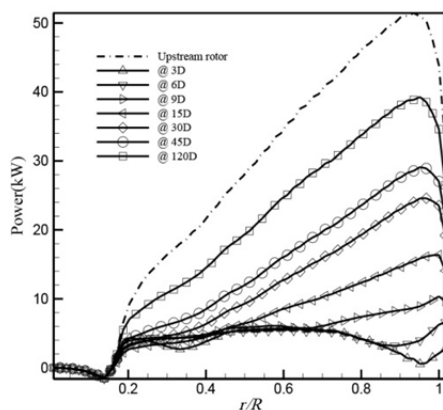


Fig. 12 Radial distribution of the power in different downstream positions

شکل 12 توزیع توان بر روی پره، در موقعیت‌های مختلف توربین پایین دست

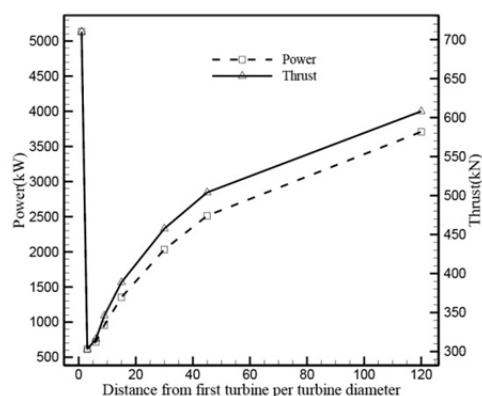


Fig. 11 Variation of the power and thrust of the downstream rotor in different positions

شکل 11 تغییرات توان و تراست روتور پایین دست در موقعیت‌های مختلف

فاصله 3D، توان و تراست توربین بالادست به ترتیب حدود 80 کیلووات و 5 کیلو نیوتون کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش فاصله روتور پایین‌دست، اثرپذیری عملکرد روتور بالادست کاهش و در فاصله حدود 9D، ناچیز می‌شود. شکل‌های 16 و 17 نیز توزیع توان و تراست بر روی پره در راستای شعاعی و در حضور روتوری پایین‌دست در فواصل مختلف را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود، تغییرات توزیع توان و تراست روی پره روتور بالادست به علت حضور توربینی در پایین‌دست، اندک است. همچنین برخلاف نتایج شکل 14، همچنان بخش انتهایی پره سهم بیشتری در تولید توان دارد و استفاده از روش‌های کنترل جریان برای بهبود توان توربین بالادست در این ناحیه از پره مؤثرتر است.

7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش دیسک عملگر بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی که نسبت به الگوی مومنتم المان پره دارای دقت بیشتر و نسبت به روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی دارای هزینه محاسباتی کمتر در تحلیل روتور است، معرفی شده است. به کمک روش توسعه داده شده، اثر متقابل دو توربین پشت سرهم در یک مزرعه بادی، روی عملکرد آیرودینامیکی یکدیگر در سرعت نامی بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده قابلیت روش دیسک عملگر در شبیه‌سازی دنباله روتور است به گونه‌ای که، حین عبور جریان از روتور بالادست، بخشی از سرعت محوری جریان به سرعت چرخشی تبدیل می‌شود و با فاصله گرفتن از روتور بالادست، گردابه‌های ناشی از آن دچار اضمحلال شده و سرعت محوری جریان دوباره بخشی از مومنتم جریان آزاد را جذب کرده و بازیابی می‌شود. همچنین حضور توربین بالادست موجب می‌شود که تا فاصله 3D، توان و تراست روتور پایین‌دست به ترتیب تا حدود 88 و 57 درصد کاهش یابند. سپس با افزایش فاصله‌ی توربین پایین‌دست از

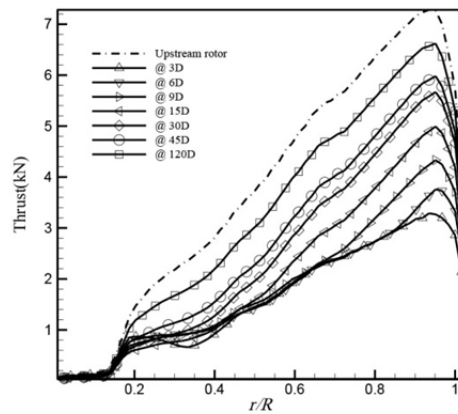


Fig. 13 Radial distribution of the thrust in different downstream positions

شکل 13 توزیع تراست بر روی پره، در موقعیت‌های مختلف توربین پایین‌دست

به عبارتی، حین عبور جریان از روتور بالادست، بخشی از سرعت محوری جریان به سرعت چرخشی تبدیل می‌شود و با فاصله گرفتن از روتور بالادست، گردابه‌های ناشی از آن دچار اضمحلال شده و سرعت محوری جریان دوباره بخشی از مومنتم جریان آزاد را جذب کرده و بازیابی می‌شود.

6-2- اثر روتور پایین‌دست بر عملکرد روتور بالادست

باتوجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان در مسایل توربین باد، بنابراین جریان روی روتور بالادست از روتور پایین‌دست اثر می‌پذیرد. شکل 15 عملکرد توان خروجی و تراست توربین بالادست در حضور روتور پایین‌دست در فواصل به ترتیب 3، 6 و 9 برابری قطر توربین را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در

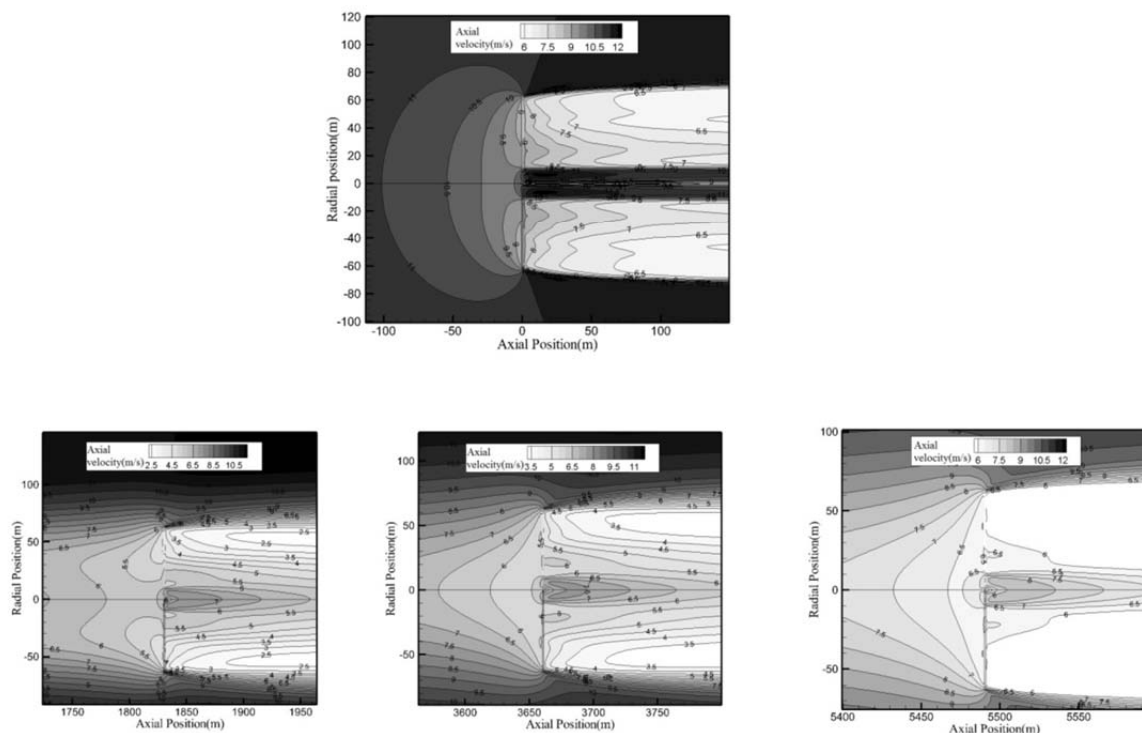


Fig. 14 Axial velocity contour at different positions downstream of the rotor

شکل 14 کانتور سرعت محوری در موقعیت‌های مختلف پایین‌دست از روتور

توربین بالادست تا حدود 170D، توان و تراست شروع به بازیابی به سمت مقادیر توربین بالادست می‌کنند. علاوه بر این، نتایج توزیع توان و تراست در راستای شعاع پره نشان داد برای روتور بالادست و روتور پایین‌دست در فاصله بسیار زیاد، حدود 20 درصد انتهایی پره سهم بیشتری در تولید توان دارد اما برای روتور پایین‌دست در فواصل نزدیک این روند تغییر پیدا کرده و در محدوده میانی پره، سهم تولید توان بیشتر می‌شود. بنابراین برای بهبود توان توربین‌هایی که در این موقعیت از توربین بالادست قرار دارند، بهتر است روش‌هایی نظیر کنترل جریان روی پره در بخش میانی پره اعمال شود. اثر روتور پایین‌دست نیز تا فاصله 3D، روی عملکرد توربین بالادست به ترتیب تا حدود 0.7 و 1.5 درصد کاهش توان و تراست است و با افزایش فاصله، این اثر از بین می‌رود. با توجه به نتایج به دست آمده، چنانچه هدف بررسی توان توربین بالادست باشد، تا فاصله 6D توان این توربین متأثر از روتور پایین‌دست است و بعد از این فاصله، بر روی توان توربین بالادست تغییراتی مشاهده نمی‌شود.

8- مراجع

- [1] I. Pineda, P. Tardieu, *The European offshore wind industry-key trends and statistics*, A report by the European Wind Energy Association (EWEA), 2017.
- [2] M. Carrión, R. Steijl, M. Woodgate, G. N. Barakos, et al., Aeroelastic analysis of wind turbines using a tightly coupled CFD-CSD method, *Fluids and Structures*, Vol. 50, pp. 392–415, 2014.
- [3] A. Ebrahimi, M. Movahhedi, Power improvement of a large horizontal-axis wind turbine by DBD plasma actuator, *Modares Mechanic Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 509–517, 2016. (in Persian)
- [4] J. N. Sørensen, R. F. Mikkelsen, S. Dan, S. Ivanell, et al., Simulation of wind turbine wakes using the actuator line technique, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373, No. 2035, pp. 20140071, 2015.
- [5] A. Ebrahimi, M. Sekandari, Aeroelastic response of horizontal-axis horizontal axis wind turbine in sudden wind gusts based on Unsteady Blade Element Momentum Element Momentum method, *Modares Mechanic Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 177–184, 2016. (in Persian)
- [6] J. N. Sørensen, A. Myken, Unsteady actuator disc model for horizontal axis wind turbines, *Wind Energy*, Vol. 39, No. 1–3, pp. 139–149, 1992.
- [7] J. N. Sørensen, W. Z. Shen, X. Munduate, Analysis of wake states by a full-field actuator disc model, *Wind Energy*, Vol. 1, No. 2, pp. 73–88, 1998.
- [8] R. Mikkelsen, J. N. Sørensen, W. Z. Shen, Modelling and analysis of the flow field around a coned rotor, *Wind Energy*, Vol. 4, No. 3, pp. 121–135, 2001.
- [9] R. Mikkelsen, *Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines*, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Denmark, June, 2003.
- [10] T. Kim, S. Oh, K. Yee, Improved actuator surface method for wind turbine application, *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 16–26, 2015.
- [11] E. Mahmoodi, A. Jafari, A. Keyhani, Wind turbine rotor simulation via cfd based actuator disc technique compared to detailed measurement, *Renewable Energy Development*, Vol. 4, No. 3, pp. 205, 2015.
- [12] A. Behrouzifar, G. E. Schneider, M. Darbandi, G. E. Schneider, Numerical investigation of actuator disc thickness effect on predicting the performance and far wake of the horizontal axis wind turbine, *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Houston, Texas, 2015.
- [13] M. Boojari, E. Mahmoodi, A. Abbas Nejad, S. Sarmast, Modeling the wake of Mexico experiment's wind turbine using elliptic force distribution in actuator line method in *OpenFOAM*, *Modares Mechanic Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 77–86, 2016. (in Persian)
- [14] M. Darbandi, A. Behrouzifar, R. Jalali, G. E. Schneider, Megawatt wind turbine far wake and performance predictions using the unsteady actuator line model, *34th Wind Energy Symposium*, San Diego, California, USA, 2016.
- [15] 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, U.S. department of energy, 2009.
- [16] N. Ramos Garcia, J. N. Sørensen, W. Z. Shen, Validation of a three-dimensional viscous-inviscid interactive solver for wind turbine rotors, *Renewable Energy*, Vol. 70, pp. 78–92, 2014.

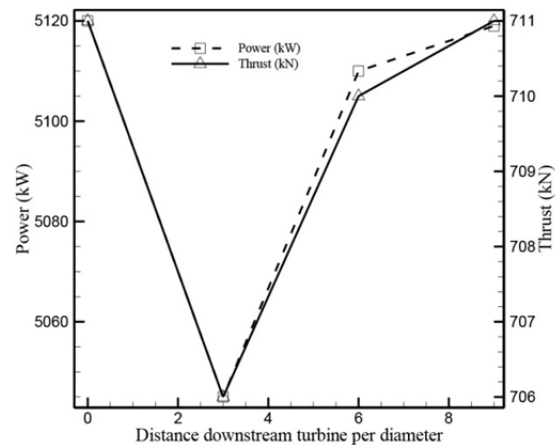


Fig. 15 Variation of the power and thrust of the upstream rotor in different positions

شکل 15 تغییرات توان و تراست روتور بالادست در موقعیت‌های مختلف

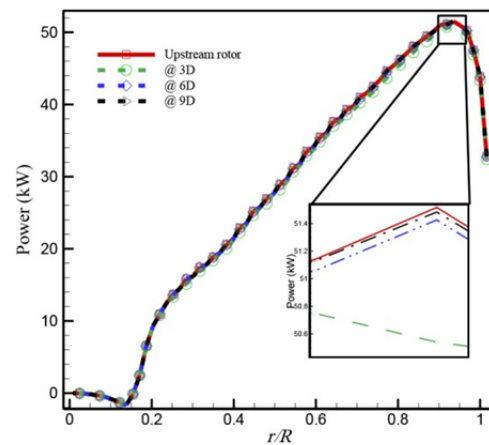


Fig. 16 Radial distribution of the power on upstream rotor blade

شکل 16 تغییرات توان روی پره روتور بالادست در موقعیت‌های متفاوت روتور

پایین‌دست

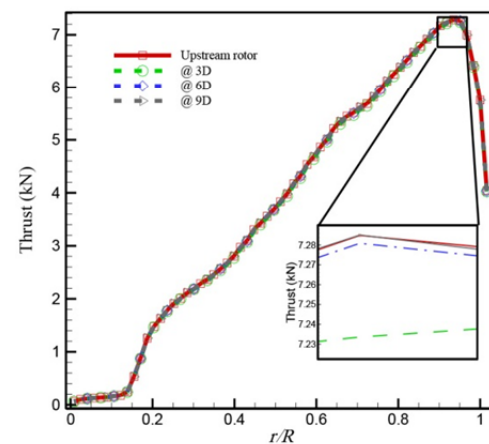


Fig. 17 Radial distribution of the thrust on upstream rotor blade

شکل 17 تغییرات تراست روی پره روتور بالادست در موقعیت‌های متفاوت روتور

پایین‌دست