

# مطالعه اثر جریان برشی باد بر عملکرد توربین باد محور افقی به کمک الگوی دیسک عملگر سه بعدی

مصطفی نوذری<sup>۲</sup>عباس ابراهیمی<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۱)

## چکیده

در پژوهش حاضر، اثر لایه برشی باد (لایه مرزی اتمسفری) روی عملکرد و رفتار جریان حول روتور توربین باد مرجع ۵MW ان.آر.ای.ال. بررسی شده است. برای این منظور، روش دیسک عملگر سه بعدی پایا با دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی کم برای حل معادلات جریان حول روتور توسعه داده شده است. با استفاده از قابلیت تعریف توابع توسط کاربر در یک نرم افزار تجاری بر مبنای روش حجم محدود، کدی برای اعمال ممنوع مجازی به سیال و پروفیل جریان ورودی ناشی از لایه مرزی زمین نوشته شده و معادلات ناویر-استوکس در میدانی استوانه‌ای با اضافه شدن عبارت نیروی حجمی به عنوان عبارت چشمه حل می‌شود. روش دیسک عملگر سه بعدی که در این پژوهش توسعه داده شده، قادر است با حل معادلات ناویر-استوکس در ترکیب با الگوریتم ممنوع-المان-پره دقت بهتری از رفتار جریان حول توربین نسبت به روش ممنوع-المان-پره ارائه کند و در عین حال هزینه محاسباتی کمتری نسبت به حل کامل معادلات جریان داشته باشد. به علت عدم تقارن جریان ورودی به صفحه روتور، پره‌های توربین شرایط مختلفی را در حین دوران تجربه می‌کنند. بنابراین، توزیع توان و نیروی محوری در راستای شعاعی پره‌ها در سه موقعیت زاویه‌ای روتور مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جریان برشی ورودی به صفحه روتور سبب عدم تقارن در الگوی جریان دنباله روتور، میدان فشار، سرعت و ورتیسیته جریان حول روتور و همچنین بارگذاری متناوب روی پره‌ها می‌شود. برای پروفیل لایه مرزی اتمسفری انتخاب شده در این پژوهش، بیشترین اختلاف نیروی محوری وارد بر هر پره حدود ۱۲۵kN است که مابین دو موقعیت زوایای ۹۰ و ۲۷۰ درجه در حین دوران رخ می‌دهد. همچنین، در این حالت عدم تقارن فیزیکی جریان حول روتور سبب ایجاد فشار بیشتر به نیمه بالایی دیسک عملگر شده، باعث ایجاد گشتاوری خمشی بر صفحه روتور می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** توربین باد محور افقی، دیسک عملگر، جریان برشی، لایه مرزی زمین

## Wind Shear Flow Effects on Horizontal Axis Wind Turbine Performance, Based on Three-dimensional Actuator Disk Model

A. Ebrahimi

M. Nozari

Aerospace Engineering Department

Sharif University of Technology

(Received: 27/May/2018 ; Accepted: 12/September/2018)

### ABSTRACT

In the present work, wind shear flow (atmospheric boundary layer) effects on aerodynamic performance of the NREL 5MW baseline wind turbine were investigated. In this regard, the steady three-dimensional actuator disk method, based on computational fluid dynamics with low computational cost, was developed, utilizing user-defined function (UDF) in a finite volume-based commercial software package. The rotor was not modeled directly, such that its momentum effect was added to the Navier-Stokes equations as a body force (source term). The developed solver was adopted to compare the flow field behavior around the rotor under uniform and wind shear inflow conditions. Different cases for the rotor azimuth angle were considered to evaluate the radial distribution of rotor power and thrust. Numerical results show that wind shear inflow leads to skew rotor wake, as well as asymmetrical pressure, vorticity, and velocity fields. Moreover, rotor experiences cyclical loading during each rotation. Note, for the selected wind shear profile of this work, the maximum difference in thrust on the rotor plane is about 125KN for each period of rotation.

**Keywords:** Wind Turbine, Actuator Disk, Wind Shear Inflow, Atmospheric Boundary Layer

۱- دانشجویار (نویسنده پاسخگو): Ebrahimi\_a@sharif.ir

۲- کارشناس ارشد: Nozari.mostafa@ae.sharif.ir

## ۱- مقدمه

ناپایا و با استفاده از معادلات تقارن محوری اویلر برای توربین باد نایب<sup>۲</sup> روش دیسک عملگر را برای اولین بار توسعه دادند. آنها برای توزیع نیروهای آیرودینامیکی روی پره توربین از یک بارگذاری بیضوی استفاده کردند. سارنسن و همکاران [۹] به منظور پیش‌بینی بهتری از گردابه‌های توربین، مفهوم دیسک عملگر را با معادلات ناویر-استوکس برای دامنه تقارن محوری ادغام کردند. همچنین میکولسون و همکاران [۱۰] به کمک روش دیسک عملگر، تاثیر زاویه مخروطی<sup>۳</sup> روتور را بر روی عملکرد توربین بررسی کردند. آنها نشان دادند که چنانچه توربین به سمت بالادست خم شود نسبت به پایین دست ۲٪-۳٪ توان بیشتری را حاصل می‌کند. همچنین، نتایج حل عددی آنها نشان می‌دهد که نیروی برشی وارد بر ریشه نسبت به روش ممنتوم المان پره بیشتر است که به علت تغییر در سطح تصویر شده است. محمودی و همکاران [۱۱] به کمک ابزار یو دی اف<sup>۴</sup> در یک نرم‌افزار تجاری حجم محدود، توربین باد مکزیکو<sup>۵</sup> را با روش دیسک عملگر شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. در روش دیسک عملگر یکی از مباحث مهم، تعیین ضخامت دیسک مجازی است. بهروزی‌فر و دربندی [۱۲] با استفاده از توابع تعریفی کاربر در یک نرم‌افزار حجم محدود، توربین باد ۵MW ان.آر.ای.ال. را در دامنه تقارن محوری 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 روش ممنتوم المان پره است، به همین منظور بوجاری و همکاران [۱۳] به کمک پارامتری توزیعی در روش خط عملگر، دقت نیروهای توزیع شده را به کمک حل گر سیالاتی این فوم<sup>۶</sup> ارتقا داده و نتایج این روش را با داده‌های تجربی توربین مکزیکو مقایسه کردند. همچنین به منظور تحلیل میدان جریان اطراف توربین، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شد. اخیراً، دربندی و بهروزی‌فر [۱۴] نیز به کمک مدل توربولانسی کی امگا اس تی<sup>۷</sup> نتایج روش خط عملگر را با روش ممنتوم المان پره برای توربین باد ۵MW ان آر ای ال مقایسه کردند.

طراحان توربین‌های بادی محور افقی مقیاس بزرگ همواره به دنبال توسعه‌ی روش‌ها و ابزارهایی هستند که توانایی تحلیل آیرودینامیکی روتور این دسته از توربین‌ها را با هزینه محاسباتی کمتر و دقت مناسب داشته باشند. روش‌های تحلیل آیرودینامیک توربین‌های باد به روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، تئوری ممنتوم المان پره، روش شبکه گردابه<sup>۱</sup> و روش‌های عملگر تقسیم‌بندی می‌شوند. معرفی و دسته‌بندی مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها، توسط نویسندگان در مرجع [۱] آمده است. روش‌های حل کامل معادلات جریان، اگرچه توصیف دقیق‌تری از فیزیک جریان حول روتور ارائه می‌دهند ولی بیشترین هزینه محاسباتی را دارند [۴-۲] در حال حاضر، بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری از روش مهندسی تئوری ممنتوم المان پره استفاده می‌کنند [۵]. این روش دارای کمترین هزینه محاسباتی است ولی برای مدل‌سازی جریان ناپایا و تحلیل روتور در حالت یاو دارای محدودیت‌هایی است. همچنین این روش نیازمند ضرایب آیرودینامیکی مقاطع پره‌های روتور به عنوان ورودی و مدل‌های اضافی برای در نظر گرفتن اثرات سه‌بعدی، تلفات نوک پره‌ها، واماندگی دینامیکی و جریان ناپایای ورودی می‌باشد. روش‌های شبکه گردابه، هزینه محاسباتی کمتری نسبت به حل کامل معادلات جریان و بیشتری نسبت به روش ممنتوم المان پره دارند. این روش‌ها، اگرچه از اثرات لزجت صرف‌نظر می‌کنند ولی توصیف خوبی از دنباله روتور حتی در حالت یاو ارائه می‌دهند.

در روش‌های عملگر [۶-۷] که از ترکیب روش‌های حل کامل معادلات جریان و ممنتوم المان پره به وجود آمده‌اند، روتور به طور مستقیم مدل‌سازی نمی‌شود و برای شبیه‌سازی رفتار جریان پیرامون آن، نیروهای معادل آیرودینامیکی پره‌ها به صورت جمله چاه به معادلات ناویر-استوکس، در محل حضور روتور، اضافه می‌شوند. در این روش‌ها به علت عدم مدل‌سازی هندسه روتور، تعداد سلول محاسباتی بسیار کمتری برای شبیه‌سازی جریان احتیاج است. این روش‌ها نسبت به تئوری ممنتوم المان پره دقت بیشتر و نسبت به روش‌های حل کامل معادلات جریان دارای سرعت بیشتری در تحلیل روتور هستند. سارنسن و مایکن [۸] به صورت

2- Nibe

3- Cone Angle

4- UDF (User Define Function)

5- MEXICO

6- Open Foam

7- KW-SST

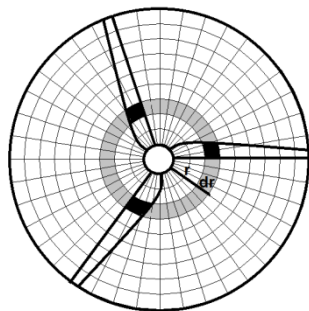
1- Vortex Lattice

مانند توزیع سرعت، ورتیسیتیه و فشار در دو حالت جریان ورودی یکنواخت و برشی به صفحه‌ی روتور مطالعه شده‌اند.

## ۲- الگوی دیسک عملگر

در روش دیسک عملگر به کمک دیسکی مجازی در میدان جریان، شرایط حضور روتور معادل‌سازی می‌شود. در شرایط واقعی نیروهای آیرودینامیکی بر روی پره‌های روتور اعمال می‌شوند ولی در این روش، توزیع نیروهای معادل آیرودینامیکی به‌عنوان جمله چاه به معادلات ناپیر-استوکس اضافه می‌شوند. شکل ۱ نحوه توزیع بارگذاری آیرودینامیکی را بر روی مقطعی به شعاع  $r$  در دیسک مجازی معادل روتور نشان می‌دهد. در این روش نیروی معادل سه پره در هر فاصله شعاعی بر روی رینگ معادل آن شعاع توزیع می‌شود. این روش به کمک ترکیب الگوی ممنوم المان پره و دینامیک سیالات محاسباتی نیروهای آیرودینامیکی را محاسبه می‌کند. همچنین به علت عدم مدل‌سازی هندسه پره‌ها، لایه مرزی<sup>۴</sup> به‌طور مستقیم شبیه‌سازی نمی‌شود و بنابراین هزینه محاسبات این روش نسبت به روش‌های حل کامل معادلات جریان بسیار کمتر است.

روش دیسک عملگر در دو دامنه تقارن محوری و سه بعدی قابلیت مدل‌سازی دارد. مساله تقارن محوری به علت هزینه محاسباتی بسیار کمتر نسبت به سه بعدی، روشی بسیار مناسب در تحلیل توربین باد است اما در شرایط جریان برشی ورودی به علت عدم تقارن جریان ورودی نسبت به ارتفاع، امکان مدل‌سازی مساله به صورت تقارن محوری وجود ندارد. بنابراین، مطالعه اثر جریان برشی ورودی به صفحه روتور در این پژوهش به کمک دیسک عملگر سه بعدی انجام می‌شود.



شکل (۱): نحوه توزیع بارگذاری آیرودینامیکی هر مقطع پره بر روی دیسک مجازی.

سرعت جریان باد در بسیاری از تحلیل‌های توربین باد به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است در حالی که در واقعیت پروفیلی از لایه مرزی اتمسفری باد به صفحه روتور برخورد می‌کند. این مساله با افزایش مقیاس روتور توربین‌های بادی و ارتفاع برج توربین مهم‌تر می‌شود. جریان برشی وارد بر صفحه‌ی روتور سبب بارگذاری متناوب و پدیده‌های سازه‌ای نظیر خستگی<sup>۱</sup> می‌شود. بارگذاری متغیر و متناوب روی صفحه روتور باعث ایجاد نوسانات ممان خمشی داخل و خارج صفحه‌ای بر روی پره و شفت روتور شده و باعث ایجاد خستگی در این دو جهت می‌شود. شن و همکاران [۱۵] به کمک روشی مبتنی بر گردابه سطح برآزا، بارگذاری متناوب را بر روی پره در شرایط جریان برشی ورودی به صفحه روتور مطالعه و برای کاهش اثر خستگی از روش کنترل پیچ<sup>۲</sup> استفاده کردند. اگرز و همکاران [۱۶] عملکرد توربین باد محور افقی را در شرایط جریان برشی با روش ممنوم المان پره مطالعه کردند. آنها نشان دادند که ممان متناوب خمشی خارج و داخل صفحه‌ای وارد بر ریشه پره در خستگی آن بیشترین اثرگذاری را دارند. میکولسن و همکاران [۱۷] به کمک ترکیب الگوی ممنوم المان پره<sup>۳</sup> و دینامیک سیالات محاسباتی توانستند اثر لایه مرزی اتمسفری زمین را روی ساختار دنباله نامتقارن روتور بررسی کنند. جونگ و همکاران [۱۸] به کمک الگوریتم ممنوم المان پره توانستند اثرات جریان برشی را در حضور جریان آشفته ورودی برای پاسخ آیروالاستیک و آیرودینامیکی توربین بررسی کنند.

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 بررسی عملکرد آن در شرایط لایه مرزی اتمسفری باد به‌عنوان ورودی به صفحه روتور است. از توربین باد ۵MW ان.آر.ای.ال. به‌عنوان توربین مرجع استفاده شده است. با توجه به عدم تقارن در جریان ورودی صفحه روتور، عملکرد روتور از نظر توزیع توان و تراست روی هر پره در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف بررسی شده است. همچنین متغیرهای میدان جریان حول روتور،

1- Fatigue  
2- Pitch Control  
3- Blade Element Momentum Theory

4- Boundary Layer

$$f_D = 0.5\rho V_{rel}^2 c_d(\alpha)c \quad (2)$$

$$f_L = 0.5\rho V_{rel}^2 c_l(\alpha)c$$

در این روابط،  $\rho$ ،  $c$ ،  $c_l$  و  $c_d$  به ترتیب چگالی جریان، طول وتر و ضرایب برآ و پسا هستند. همچنین،  $V_{rel}$  اندازه سرعت نسبی محلی هر مقطع پره است که از رابطه (۳) به دست می آید.

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

در این رابطه،  $r$  فاصله شعاعی هر کدام از المان های رینگ دایروی است و  $\Omega$  سرعت دورانی روتور است. در روش دیسک عملگر سرعت های محوری و مماسی  $V_\theta$  و  $V_z$  به کمک دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه می شوند. زاویه حمله  $\alpha$  هر المان از پره از رابطه (۴) به دست می آید.

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

در این رابطه،  $\gamma$ ،  $\theta_{pitch}$  و  $\varphi$  به ترتیب پیچش هندسی، زاویه پیچ کنترل و زاویه جریان هستند. زاویه جریان (زاویه بین سرعت نسبی و صفحه روتور) از رابطه (۵) به دست می آید.

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

در این رابطه،  $V_{wind}$  سرعت باد و  $a$  و  $a'$  به ترتیب، ضرایب القایی محوری و مماسی هستند که با توجه به رابطه (۶) محاسبه می شوند.

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

ضرایب  $a$  و  $a'$  در روش دیسک عملگر با توجه به ارتباط با  $V_\theta$  و  $V_z$  در رابطه (۶) از حل عددی معادلات جریان محاسبه می شوند. بنابراین، دقت بهتری نسبت به روش ممنتوم المان پره دارا هستند.

مولفه های نیروهای آیرودینامیکی وارد بر هر المان پره بر واحد حجم در دستگاه استوانه ای توسط رابطه (۷) محاسبه شده و به سلول های دامنه حل در سه راستای مماسی، محوری و شعاعی در محل دیسک مجازی و به صورت جمله چاه اضافه می شوند.

$$f_{b_\theta} = \frac{\rho c V_{rel}^2}{2dv} (c_l \sin(\varphi) - c_d \cos(\varphi))$$

$$f_{b_z} = \frac{\rho c V_{rel}^2}{2dv} (c_d \sin(\varphi) + c_l \cos(\varphi)) \quad (7)$$

$$f_{b_r} = 0$$

### ۳- معادلات حاکم و الگوریتم حل عددی

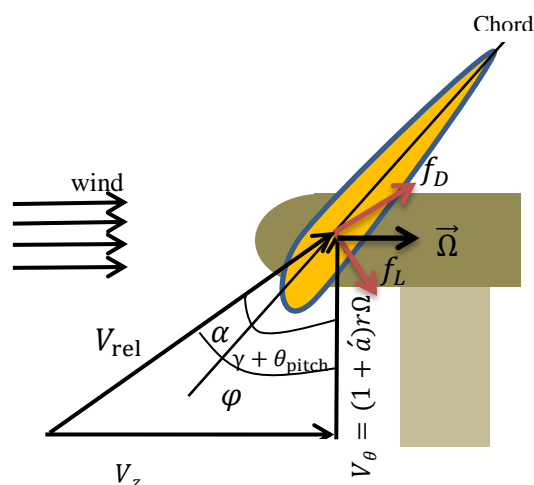
از معادلات تراکم ناپذیر ناویر- استوکس متوسط گیری شده (پیوستگی و ممنتوم) مطابق رابطه (۱) برای حل معادلات جریان حول روتور استفاده شده است.

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} + f_{bi}$$

در این روابط،  $f_{bi}$  نیرو بر واحد حجم سلول است که به عنوان جمله چاه در روش دیسک عملگر به معادلات ممنتوم اضافه شده است و جایگزینی برای نیروی آیرودینامیکی وارد بر هر قسمت پره است.  $\bar{p}$ ،  $\bar{u}_i$  و  $\nu$  به ترتیب متوسط زمانی فشار استاتیک، متوسط سرعت جریان، چگالی جریان و ویسکوزیته سینماتیکی هستند. جمله  $\overline{u_i u_j}$  نیز تانسور تنش رینولدز<sup>۱</sup> است که در این شبیه سازی به کمک مدل توربولانسی کی امگا اس اس تی [۱۴] مدل سازی شده اند. با توجه به مرجع [۱۴] روابط مورد استفاده در تحلیل آیرودینامیکی روش دیسک عملگر در ادامه بیان می شوند.

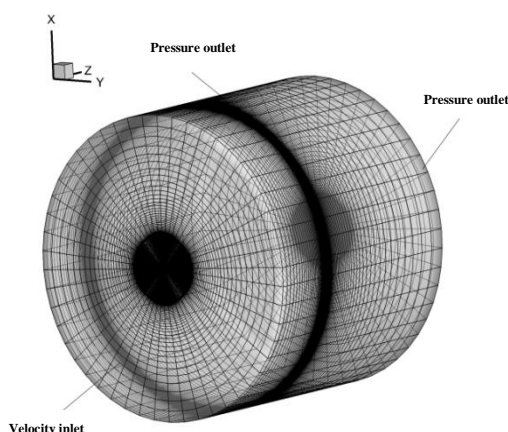
شکل ۲ مثلث بردارهای سرعت و نیروهای آیرودینامیکی را در هر مقطع پره و در دو جهت محوری و مماسی نشان می دهد. برای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی برآ و پسا در هر مقطع پره از رابطه (۲) استفاده می شود.



شکل (۲): مولفه های سرعت و نیروهای آیرودینامیکی در یک مقطع پره

#### ۴- دامنه حل، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

در روش دیسک عملگر سه بعدی، توربین باد با یک دیسک مجازی به شعاع روتور جایگزین می شود. میدان حل به صورت استوانه ای حول دیسک عملگر و شبکه ای با سازمان به ابعاد مرجع [۱۴] مطابق شکل ۴ انتخاب شده است. شکل ۵ مقطعی از شبکه محاسباتی حول دیسک عملگر را نشان می دهد. شرایط مرزی جریان برای حل مساله نیز در شکل ۴ آمده است. برای شرایط ورودی از شرط مرزی ورودی سرعت<sup>۱</sup> و در مرز خروجی و اطراف استوانه بیرونی از شرط مرزی فشار خروجی<sup>۲</sup> استفاده شده است. دیسک عملگر نیز به صورت شرط مرزی داخلی<sup>۳</sup> تعریف می شود. به عبارتی در مسیر جریان و در محل حضور دیسک، مرز جامد تعریف نمی شود. برای حل معادلات جریان از نرم افزار تجاری حجم محدود فلونت و برای اعمال پروفیل لایه مرزی اتمسفری جریان باد ورودی و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی و اعمال ممنوم مجازی به جریان از توابع تعریفی کاربر (یودی اف) در این نرم افزار استفاده شده است. همچنین به منظور صحت سنجی، از نتایج دینامیک سیالات محاسباتی در مرجع [۲۰] استفاده شده است. شکل ۸ نیز مقایسه روش حاضر را با نتایج دینامیک سیالات محاسباتی نشان می دهد. با توجه به تراکم ناپذیر بودن جریان از روش فشار مبنا<sup>۴</sup> و الگوریتم سیمپل<sup>۵</sup> استفاده شده است.



شکل (۴): دامنه محاسباتی و شرایط مرزی.

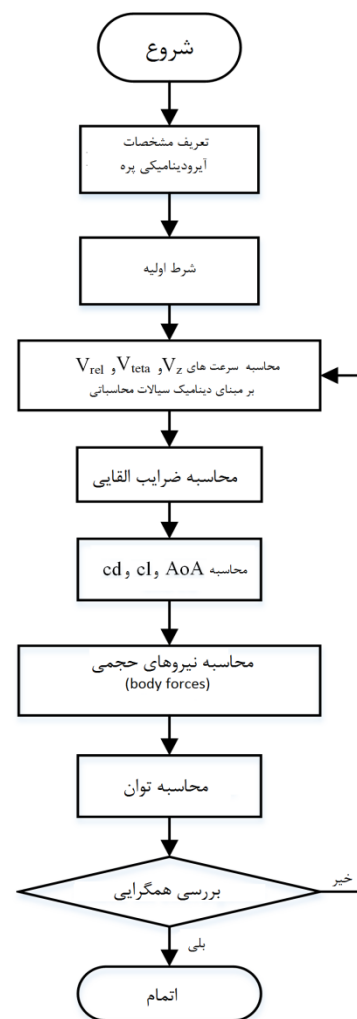
- 1- Velocity Inlet
- 2- Pressure Outlet
- 3- Interior
- 4- Pressure Based
- 5- Simple

در این روابط،  $dv$  حجم المان رینگ مجازی است. توان و نیروی محوری روتور که کمیت های تجمعی هستند نیز توسط رابط (۸) محاسبه می شوند.

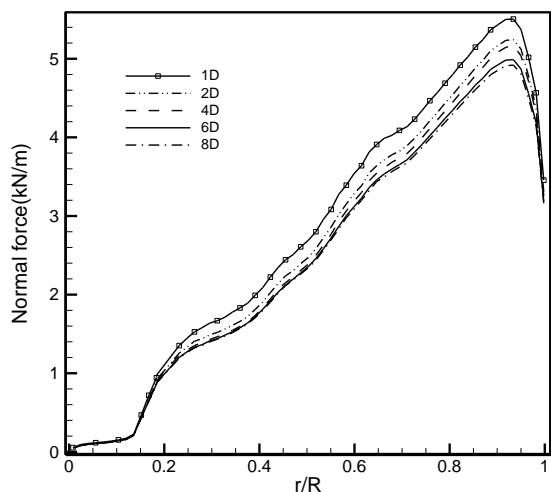
$$Power = 0.5\rho B\Omega \sum_{r=0}^{r=R} rc(r)V_{rel}^2(c_t(r)\sin(\varphi) - c_d(r)\cos(\varphi))dr$$

$$Thrust = 0.5\rho B \sum_{r=0}^{r=R} c(r)V_{rel}^2(c_d(r)\sin(\varphi) + c_t(r)\cos(\varphi))dr \quad (8)$$

در این روابط، B تعداد پره است. شکل ۳ الگوریتم روش دیسک عملگر برای هر مقطع پره را نشان می دهد. با توجه به این که روتور مورد مطالعه در این پژوهش از مقطعی با ایرفویل متفاوت در راستای طول پره تشکیل شده است، از یک تابع میان یاب خطی برای تغییر مشخصات هندسی و آیرودینامیکی بین مقاطع مختلف استفاده شده است.

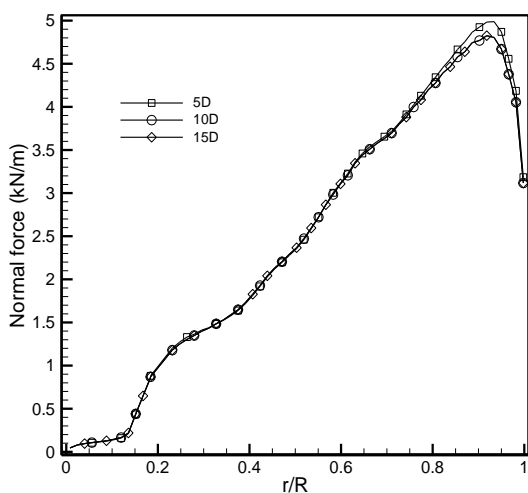


شکل (۳): الگوریتم روش دیسک عملگر.



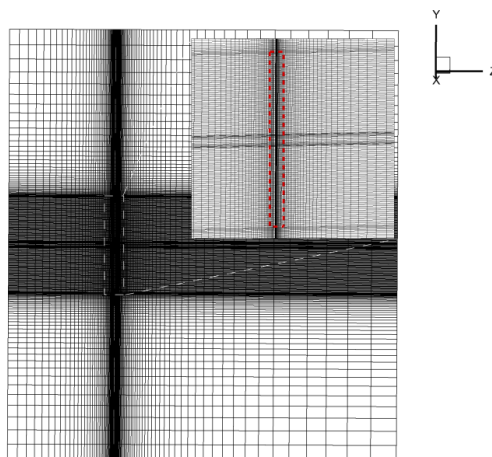
شکل (۶): بررسی استقلال از ابعاد دامنه حل در جهت شعاعی و قبل از روتور.

به منظور استقلال از فاصله دامنه بعد از روتور، سه حالت مختلف ۵ و ۱۰ و ۱۵ برابری قطر روتور بعد از حضور توربین برای دامنه در نظر گرفته می‌شود. نتایج در شکل ۷ نشان می‌دهد که در فاصله ۱۰ و ۱۵ برابری قطر روتور، توزیع نیروی عمودی بر روی پره تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین فاصله کمتر ۱۰ برابری برای این بخش از دامنه در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۷): بررسی استقلال از ابعاد دامنه حل بعد از روتور

مقایسه دقت جواب‌های روش توسعه داده شده در کار حاضر با نتایج دینامیک سیالات محاسباتی مرجع [۲۰] در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل نیروی عمودی بر روی پره در سه سرعت باد ۶ m/s، ۸ m/s و ۱۰ m/s با



شکل (۵): مقطعی از شبکه محاسباتی پیرامون دیسک عملگر

## ۵- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا حل عددی جریان اعتبارسنجی شده سپس اثر لایه مرزی اتمسفری زمین و جریان حول روتور بررسی می‌شود.

### ۵-۱- اعتبارسنجی حل عددی

به منظور اعتبارسنجی نتایج مقاله حاضر، از داده‌های توربین باد مرجع ۵MW ان آر ای ال [۱۹] استفاده شده است. مشخصات ایرفویل هر مقطع پره این توربین در این مرجع بیان شده است.

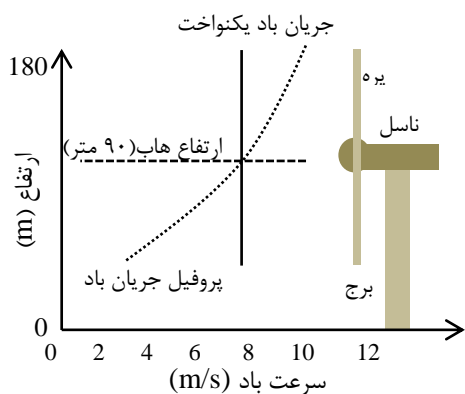
به منظور بررسی مستقل بودن دامنه محاسباتی در قبل و بعد از روتور و همچنین در جهت شعاعی، ابتدا با در نظر گرفتن فاصله ۵ برابری قطر روتور بعد از حضور توربین، فاصله دامنه در راستای شعاعی و قبل از روتور طی ۴ مرحله افزایش داده می‌شود تا استقلال دامنه از فاصله شعاعی و فاصله قبل از روتور مشخص شود. سپس با ثابت نگاه داشتن فاصله در این دو راستا، دامنه بعد از روتور طی دو مرحله افزایش می‌یابد تا استقلال در این راستا نیز مشخص شود. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است ابتدا با فاصله یک برابری از قطر روتور (1D)، توزیع نیروی عمودی روی پره در راستای شعاعی مبنای مقایسه قرار می‌گیرد. با افزایش فاصله از فاصله ۶ برابری به بعد (تا فاصله ۸ برابری قطر روتور) تغییرات به حداقل مقدار ممکن (۰.۳-۲٪) می‌رسد. بنابراین، فاصله ۶ برابری قطر روتور فاصله مناسب برای قبل از حضور روتور و در جهت شعاعی در نظر گرفته می‌شود.

۵-۲- مطالعه اثر لایه مرزی اتمسفری زمین

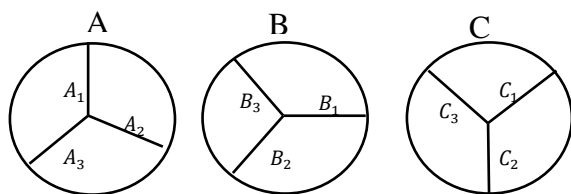
روش ممنتوم المان پره به علت عدم حل معادلات جریان و استفاده از داده‌های دو بعدی عددی/تجربی مقاطع پره، توانایی پیش‌بینی رفتار سه بعدی جریان حول روتور در مواجهه با لایه مرزی اتمسفری را ندارد. در این بخش به کمک روش دیسک عملگر سه بعدی، مساله لایه مرزی زمین برای موقعیت‌های مختلف پره‌های روتور بررسی شده است. پروفیل سرعت باد در لایه مرزی اتمسفری مطابق مرجع [۱۵] با تابعی توانی به صورت رابطه (۹) مدل شده است.

$$U(h) = U(h_r) \left( \frac{h}{h_r} \right)^\alpha \quad (9)$$

در این رابطه،  $U(h)$  و  $h$  سرعت و ارتفاع نسبت به زمین،  $U(h_r)$  و  $h_r$  سرعت و ارتفاع مرجع و  $\alpha$  یک ثابت هستند. به منظور شبیه‌سازی جریان ورودی به صفحه روتور، سرعت در ارتفاع مرجع  $90\text{m}$  (ارتفاع هاب) برابر  $8\text{m/s}$  و  $\alpha$  برابر  $0.155$  مطابق مرجع [۱۵] انتخاب شده است. شکل ۹ پروفیل لایه مرزی در مقایسه با جریان باد ورودی یکنواخت را نشان می‌دهد. برای مطالعه میدان جریان حول روتور و همچنین توان و تراست تولیدی، سه موقعیت زاویه‌ای A، B و C برای پره‌ها نسبت به یکدیگر مطابق شکل ۱۰ انتخاب شده است.

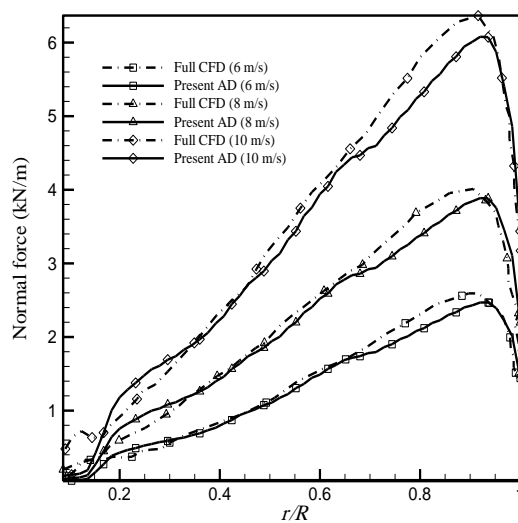


شکل (۹): جریان ورودی یکنواخت و متغیر به صفحه روتور

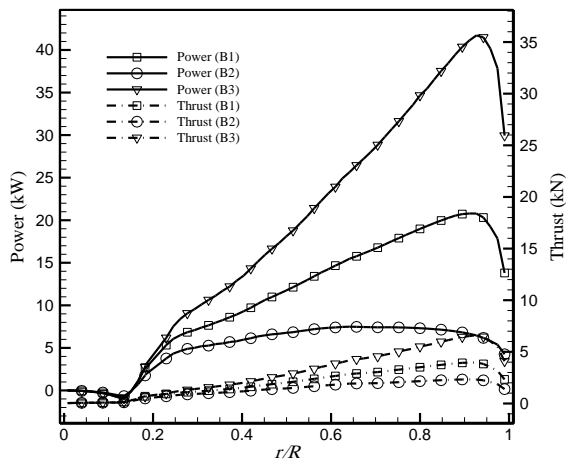


شکل (۱۰): موقعیت‌های مختلف پره‌ها در حالت جریان برشی ورودی

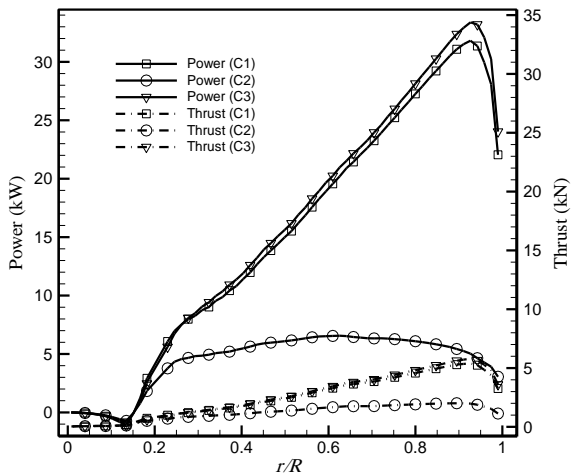
روش دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده است. نیروی عمودی وارد بر پره که نقش تراست وارد بر روتور را داراست، در راستای شعاعی پره روند افزایشی داشته و به بخش خارجی پره نسبت به بخش داخلی آن نیروی بیشتری وارد می‌شود. روند این نیرو در سه سرعت باد یادشده تا قبل از سرعت نامی توربین ( $11.4\text{m/s}$ ) افزایشی است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف توزیع نیرو در نواحی نزدیک نوک پره کمتر از ۷ درصد است. همچنین اختلاف انتگرال توزیع نیرو کمتر از ۴ درصد است که نشان می‌دهد تطابق مناسبی بین این دو روش عددی وجود دارد. از طرفی، پژوهش قبلی نویسندگان [۲۱] نشان داده است که در روش Full CFD برای هر اجرای عددی در حدود ۳۶ ساعت هزینه محاسباتی با سیستمی به مشخصات ۸ هسته، فرکانس  $2/4\text{GHz}$  و شبکه‌ای در حدود ۴ میلیون سلول صرف می‌شود. درحالی‌که برای حل این مساله به کمک روش دیسک عملگر سه بعدی، شبکه‌ای در حدود  $1/5$  میلیون سلول نیاز است و به کمک ۴ هسته محاسباتی با فرکانس پردازشی مشابه مرجع [۲۱] در حدود ۸ ساعت زمان نیاز دارد. بنابراین، ابزار توسعه داده شده به علت عدم مدل‌سازی روتور و کاهش تعداد سلول‌های محاسباتی، سرعت حل عددی میدان جریان را با حفظ دقت مناسب افزایش داده است."



شکل (۸): مقایسه توزیع شعاعی نیرو عمودی بر روی پره در روش دیسک عملگر سه بعدی با نتایج دینامیک سیالات محاسباتی



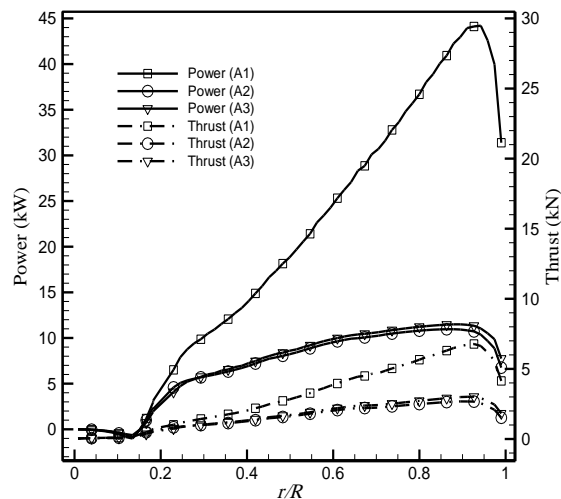
شکل (۱۲): توزیع توان و تراست در راستای شعاعی پره در موقعیت B برای سه پره.



شکل (۱۳): توزیع توان و تراست در راستای شعاعی پره در موقعیت C برای سه پره.

مثلث سرعت‌ها برای یک مقطع دلخواه از یکی از پره‌ها در سه ارتفاع، پایین‌ترین موقعیت، در ارتفاع هاب<sup>۱</sup> و بالاترین موقعیت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این مقطع در موقعیت پایین‌ترین ارتفاع (که سرعت باد حدود ۴m/s است) نسبت به وقتی که در ارتفاع هاب و بالاترین ارتفاع (که سرعت باد به ترتیب حدود ۸m/s و ۱۰m/s است) قرار دارد، سرعت نسبی کمتری خواهد داشت و توان و تراست کمتری تولید می‌کند. بنابراین، در شرایط لایه مرزی اتمسفری، هر پره در حین دوران نیروهای متناوبی را تجربه می‌کند.

شکل ۱۱ توزیع توان و تراست در راستای شعاع سه پره توربین را برای روتور در موقعیت A نشان می‌دهد. در این حالت، پره  $A_1$  به‌علت قرارگیری در ارتفاع بالاتر و در نتیجه جریان باد با سرعت بیشتر، نسبت به دو پره دیگر، توان و تراست به مراتب بیشتری تولید می‌کند. همچنین به‌علت تقارن موقعیت عرضی و یکسان بودن جریان ورودی برای پره  $A_2$  و  $A_3$ ، توان و تراست تقریباً یکسان و کمتر از پره اول تولید می‌شود. بنابراین برای روتور موقعیت A، یکی از پره‌ها بیشترین نقش را در تولید توان دارد و دو پره دیگر رفتاری مشابه دارند.

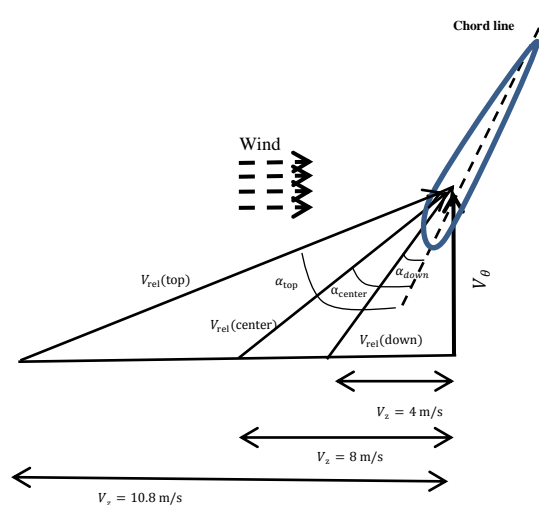


شکل (۱۱): توزیع توان و تراست در راستای شعاعی پره در موقعیت A برای سه پره.

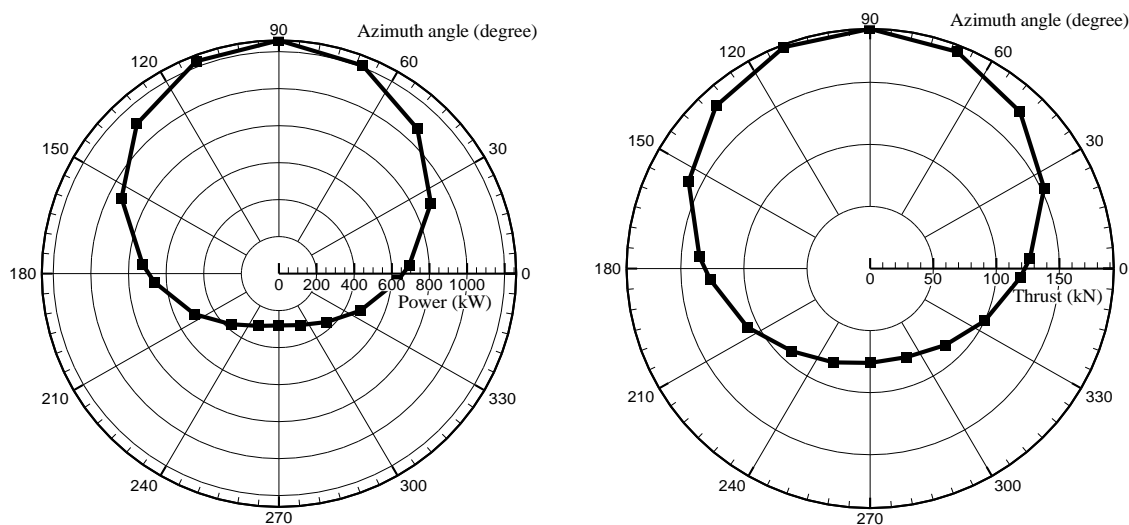
شکل ۱۲، توزیع توان و تراست را برای پره‌های روتور در موقعیت B نشان می‌دهد. در این حالت، پره  $B_3$  بیشترین توان و تراست را در بین سه پره داراست. پره  $B_1$  به‌علت قرارگیری در ارتفاعی بالاتر از پره  $B_2$ ، توان و تراست بیشتری دارد و پره  $B_2$  به‌علت قرارگیری در سرعت باد کمتر، نسبت به دو پره دیگر، کمترین توان و تراست را داراست. شکل ۱۳ توزیع توان و تراست را در موقعیت C نشان می‌دهد. در این حالت دو پره  $C_1$  و  $C_3$  که بالاتر از هاب روتور نسبت به پره سوم و متقارن نسبت به یکدیگر قرار دارند، توان و تراست بیشتر و تقریباً یکسانی تولید می‌کنند.



شکل ۱۵ تغییرات توان و تراست وارد بر یک پره را در زوایای مختلف از یک دوران کامل را نشان می‌دهد. در شرایط لایه مرزی اتمسفری، توان تولیدی پره در حین دوران باتوجه به شکل ۱۳ (سمت چپ) متناوب است و بیشترین مقدار آن در زاویه ۹۰ درجه در نیمه بالایی صفحه روتور به ۱,۲۰۰ kW و در بدترین شرایط در زاویه ۲۷۰ درجه به ۳۰۰ kW می‌رسد. همچنین مطابق شکل ۱۵ (سمت چپ) نیروی عمودی تراست وارد بر پره نیز رفتاری مشابه توان داراست و حداکثر و حداقل این نیرو در زوایای دوران ۹۰ و ۲۷۰ درجه به ترتیب برابر ۲۰۰ kN و ۷۵ kN است. به عبارتی در حین دوران، پره تفاوت نیروی محوری حدود ۱۲۵ kN را تجربه می‌کند که به علت متناوب بودن این بارگذاری، سبب خمش متغیر و خستگی سازه‌ای می‌شود.



شکل (۱۴): مولفه‌های سرعت در موقعیت‌های مختلف پره‌ها.



شکل (۱۵): تغییرات توان (سمت چپ) و تراست (سمت راست) پره در زوایای مختلف دوران.

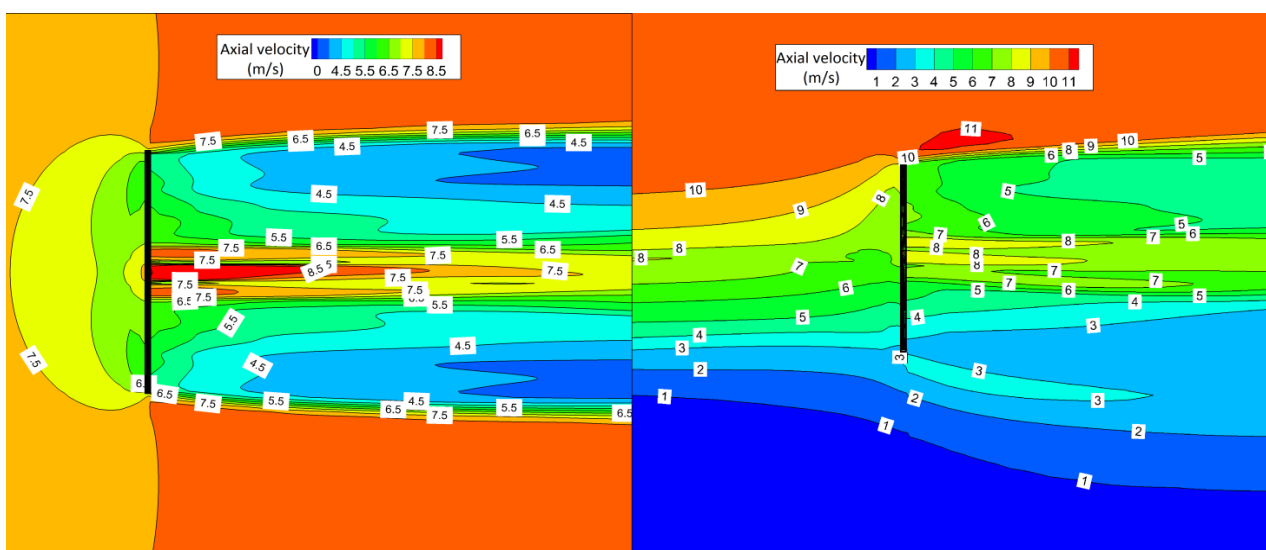
مرزی اتمسفری مطابق رابطه (۹) انتخاب شده و تغییرات سرعت جریان روی صفحه روتور بین ۴ m/s تا ۱۰/۸ m/s است. شکل ۱۶ کانتور سرعت محوری جریان حول روتور را در دو حالت بیان شده نشان می‌دهد. در حالت اول (سمت چپ) سرعت محوری به صورت متقارن به صفحه روتور برخورد می‌کند اما در حالت دوم (سمت راست) تغییرات سرعت روی صفحه روتور باعث عدم تقارن الگوی جریان دنباله روتور شده است. برای بررسی بیشتر تغییرات میدان

### ۳-۵- مطالعه جریان حول روتور

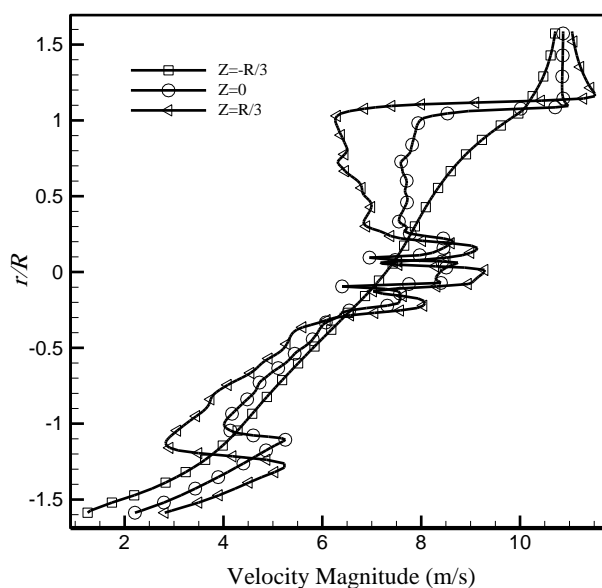
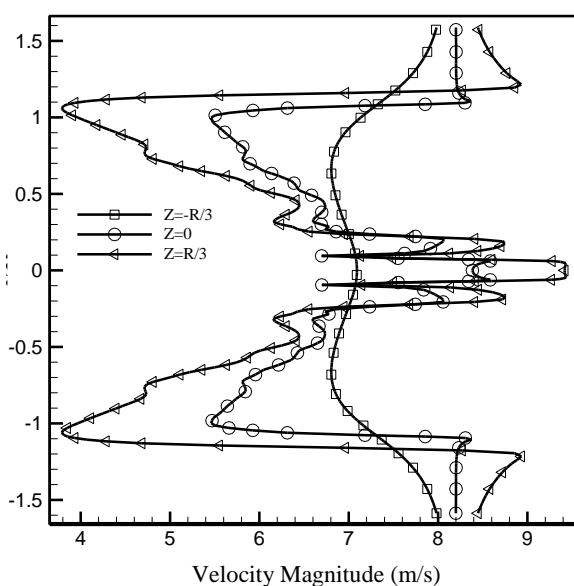
مطالعه جریان حول روتور به کمک حل معادلات جریان یکی از مباحث مهم در تحلیل توربین باد است. برای نشان دادن توانایی روش دیسک عملگر سه بعدی در ارائه جزئیات بیشتری از ویژگی‌های میدان جریان حول روتور، در این بخش نتایج برای دو حالت ارائه شده است. در حالت اول، سرعت جریان ورودی یکنواخت و برابر ۸ m/s و در حالت دوم، جریان ورودی به صورت پروفیل سرعت لایه

مولفه سرعت دورانی تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. در حالت دوم نیز سرعت محوری در نزدیکی صفحه روتور و بعد از آن کاهش دارد ولی درصد کاهش آن نسبت به حالت اول کمتر است. همچنین در هر دو حالت، کاهش سرعت محوری در نواحی نوک پره‌ها بیشتر از سایر نقاط روتور است. در حالت دوم، درصد کاهش سرعت نوک پره درحالتی که پره در بالاترین ارتفاع قرار دارد بیشتر از وقتی است که پره در پایین‌ترین ارتفاع می‌باشد.

سرعت محوری، شکل ۱۷ توزیع سرعت محوری در جهت شعاعی و صفحه‌ی عمود بر روتور را در دو حالت نشان می‌دهد. همچنین رفتار جریان در این دو حالت در ۳ موقعیت مختلف، قبل ( $Z=-R/3$ )، بعد ( $Z=R/3$ ) و در صفحه روتور ( $Z=0$ ) بررسی شده است. در حالت اول، تقارن سرعت ورودی در محل حضور روتور، قبل و بعد از آن برقرار است. سرعت محوری جریان در نواحی قبل از حضور روتور به علت اثرپذیری از پایین‌دست، تا حدود ۱۵٪ و بعد از عبور از روتور نیز به علت جذب ممنتوم توسط روتور و تبدیل به



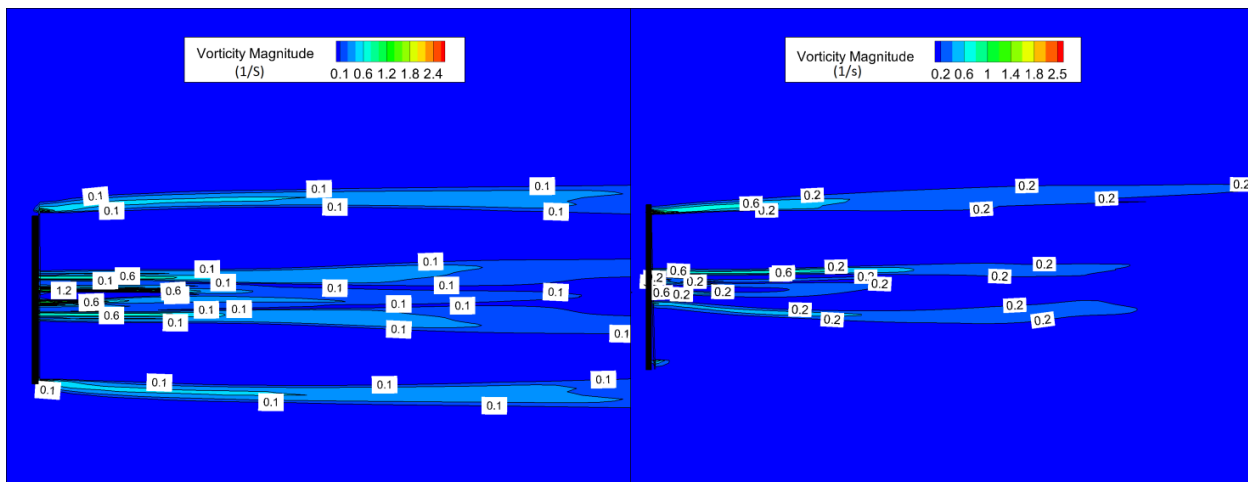
شکل (۱۶): کانتور سرعت محوری حول روتور در حالت اول (سمت چپ) و حالت دوم (سمت راست).



شکل (۱۷): پروفیل سرعت محوری در دو حالت جریان ورودی یکنواخت (سمت چپ) و برشی (سمت راست).

اما در حالت دوم به علت عدم تقارن در سرعت ورودی، قدرت گردابه و دنباله جریان تولیدشده در نیمه بالایی و پایین روتور تقارن ندارند.

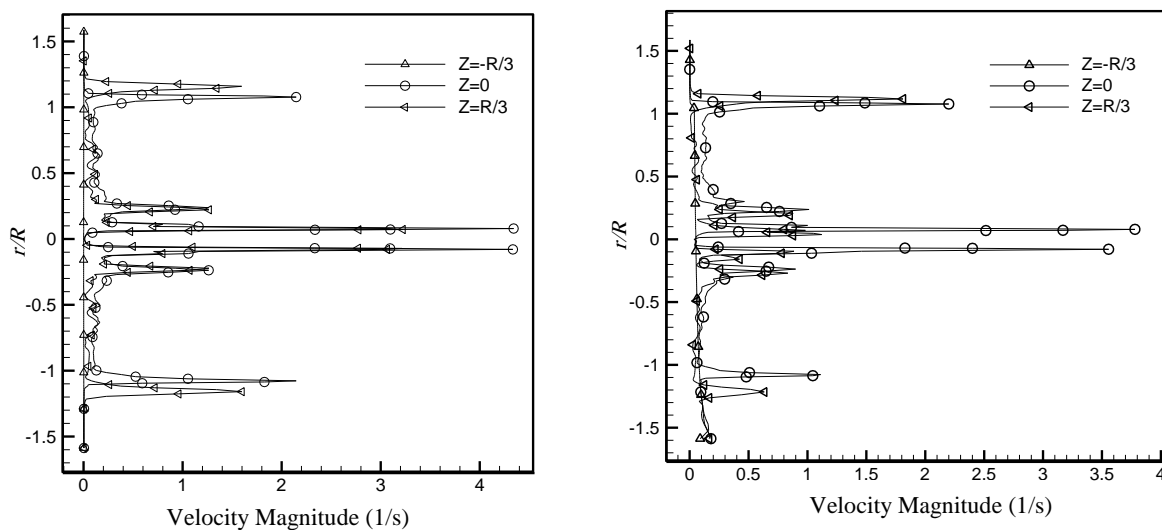
شکل ۱۸ کانتور ورتیسیته جریان بعد از روتور را در دو حالت نشان می دهد. در حالت اول، نواحی نوک روتور و قسمت هاب بیشترین ورتیسیته جریان را دارا هستند و سبب انتشار متقارن گردابه به پایین دست جریان می شوند؛



شکل (۱۸): کانتور ورتیسیته جریان حول دیسک عملگر در دو حالت جریان ورودی یکنواخت (سمت چپ) و برشی (سمت راست).

تفاوت ورتیسیته مشاهده می شود. همچنین در موقعیت های قبل از صفحه روتور ( $Z=-R/3$ ) در هر دو حالت، تغییرات ورتیسیته جریان صفر است که نشان دهنده عدم نفوذ آن به بالادست جریان است. بنابراین، در حین عبور از صفحه روتور، ورتیسیته تولید و به پایین دست انتشار می یابد.

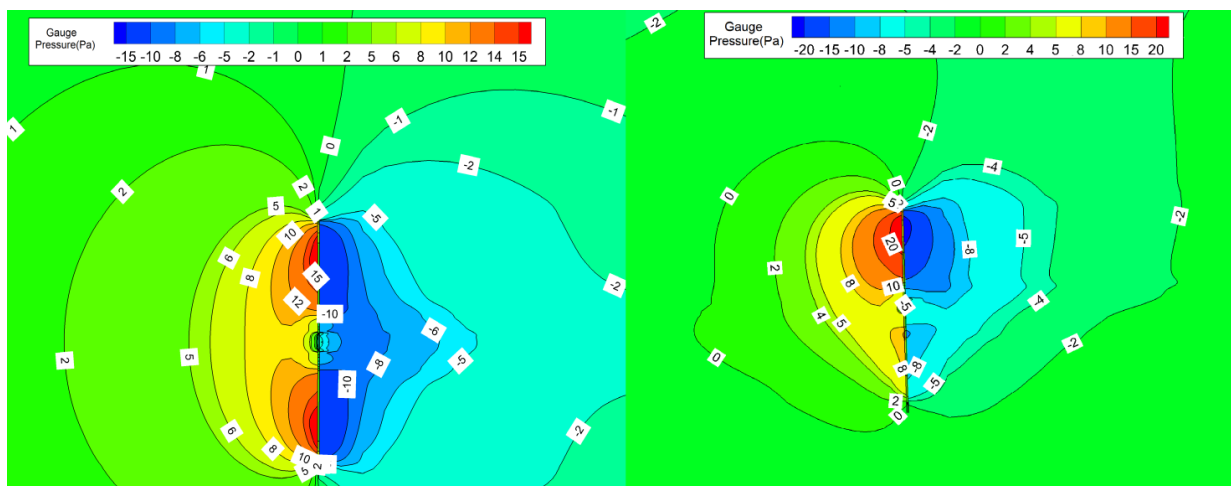
شکل ۱۹ نیز توزیع ورتیسیته را در راستای شعاعی برای سه موقعیت بیان شده در دو حالت نشان می دهد. در این شکل عدم تقارن نقطه اوج ورتیسیته در نوک پره در حالت دوم (سمت راست) برای موقعیت بعد از روتور ( $Z=R/3$ ) و در صفحه روتور ( $Z=0$ ) نشان داده شده است. در حالت دوم (سمت راست) نسبت به حالت اول (سمت چپ)  $1.5 \text{ 1/s}$



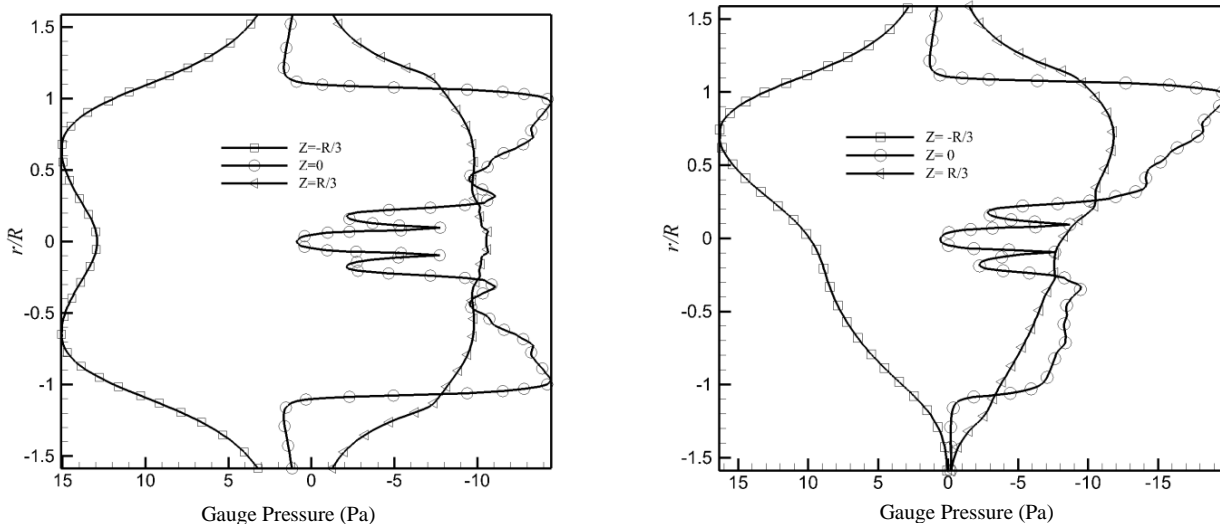
شکل (۱۹): توزیع ورتیسیته در جهت شعاعی دیسک عملگر در دو حالت جریان ورودی یکنواخت (سمت چپ) و برشی (سمت راست).

است. به عبارتی به مقاطع بالایی دیسک نیروی بیشتری در جهت محوری که همان نیروی تراست است وارد می‌شود و این سبب خمش صفحه روتور می‌شود. شکل ۲۱ نمودار توزیع فشار سیال را در راستای شعاعی پره برای سه موقعیت قبل، بعد و در صفحه روتور برای دو حالت نشان می‌دهد.

شکل ۲۰ کانتور فشار نسبی جریان را حول روتور در دو حالت نشان می‌دهد. سرعت جریان به محض رسیدن به صفحه روتور کاهش یافته و در نتیجه فشار روی صفحه روتور افزایش می‌یابد که در هر دو حالت این مساله رخ داده است. برای حالت اول توزیع فشار روی دیسک عملگر متقارن است ولی در حالت دوم قسمت بالایی دیسک تحت فشاری در حدود ۲۵ پاسکال بیشتر از پایین صفحه روتور



شکل (۲۰): کانتور فشار نسبی حول دیسک عملگر در دو حالت جریان ورودی یکنواخت (سمت چپ) و برشی (سمت راست).



شکل (۲۱): توزیع فشار در جهت شعاعی دیسک عملگر در دو حالت جریان ورودی یکنواخت (سمت چپ) و برشی (سمت راست).

سپس با فاصله گرفتن از روتور فشار دوباره بازیابی شده است. در فواصل  $r/R > 1$  و  $r/R < -1$  کمترین گرادیان فشار نسبی وجود دارد. که بیانگر عدم تغییر رفتار جریان در

در حالت اول، فشار با نزدیک شدن به صفحه روتور افزایش پیدا می‌کند اما به محض عبور از آن در  $(Z=0)$  با افتی در حدود ۱۵ پاسکال در دو طرف صفحه روتور مواجه می‌شود و

## ۷- مراجع

1. Ebrahimi, A. and Sekandari, M. "Aeroelastic Response of Horizontal-axis Horizontal Axis Wind Turbine in Sudden Wind Gusts Based on Unsteady Blade Element Momentum Element Momentum Method", *Modarres Mech. Eng.*, Vol. 16, No. 8, pp. 177-184, 2016 (in Persian).
2. Carrión, M., Steijl, R., Woodgate, M., Barakos, G.N., Munduate, X., and Gomez-Iradi, S. "Aeroelastic Analysis of Wind Turbines, Using a Tightly Coupled CFD-CSD Method", *Fluids and Structures*, Vol. 50, pp. 392-415, 2014.
3. Ebrahimi, A. and Movahhedi, M. "Power Improvement of a Large Horizontal-Axis Wind Turbine by DBD Plasma Actuator", *Modarres Mech Eng*, Vol. 16, No. 12, pp.509-517, 2016 (in Persian).
4. Sørensen, J.N., Mikkelsen, R.F., Dan, S., Ivanell, S. Sarmast, S., and Andersen, S. "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, p. 20140071, 2015.
5. Zhang, P. and Huang, S. "Review of Aeroelasticity for Wind Turbine: Current Status, Research Focus and Future Perspectives", *Frontiers in Energy*, Vol. 5, No. 4, pp. 419-434, 2011.
6. Mikkelsen, R. "Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines", PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, Denmark, June, 2003.
7. Kim, T., Oh, S., and Yee, K. "Improved Actuator Surface Method for Wind Turbine Application, Renewable Energy", Vol. 76, pp. 16-26, 2015.
8. Sorensen, J.N. and Myken, A. "Unsteady Actuator Disc Model for Horizontal Axis Wind Turbines", *Wind Energy*, Vol. 39, No's. 1-3, pp. 139-149, 1992.
9. Sorensen, J.N., Shen, W.Z., and Munduate, X. "Analysis of Wake States by a Full-Field Actuator Disc Model", *Wind Energy*, Vol. 1, No. 2, pp. 73-88, 1998.
10. Mikkelsen, R., Sørensen, J.N., and Shen, W.Z. "Modelling and Analysis of the Fow Field around a Coned Rotor", *Wind Energy*, Vol. 4, No. 3, pp. 121-135, 2001.
11. Mahmoodi, E., Jafari, A., and Keyhani, A. "Wind Turbine Rotor Simulation via CFD Based Actuator Disc Technique, Compared to Detailed Measurement", *Renewable Energy Development*, Vol. 4, No. 3, p. 205, 2015.

نواحی بالا و پایین روتور است؛ اما در نواحی که پره روتور قرار دارد بیشترین تغییرات مشاهده می شود که به علت تبدیل ممنتوم محوری جریان به چرخشی در گذر از صفحه روتور است. در حالت دوم همان طور که در سمت راست شکل ۲۱ مشاهده می شود اندازه اختلاف فشار در هر سه موقعیت نسبت به ارتفاع روند صعودی داشته و فشار نسبی قسمت بالای صفحه روتور با قسمت پایین در حدود ۲۰ پاسکال اختلاف دارد؛ که سبب ایجاد گشتاوری خمشی بر روتور در جهت جریان می شود. در این حالت هم با نزدیک شدن به صفحه روتور فشار جریان افزایش یافته و بلافاصله پس از عبور از روتور، کاهش شدید پیدا کرده و سپس با دور شدن از روتور شروع به بازیابی می کند. باتوجه به نتایج شکل های ۱۷ و ۱۹ و ۲۱ برای موقعیت قبل از روتور ( $Z=-R/3$ )، متغیر فشار و سرعت برخلاف ورتیسسته از پایین دست اثرپذیری داشته و رفتار جریان قبل از رسیدن به صفحه روتور تغییر پیدا می کند.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، روش دیسک عملگر سه بعدی بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی که نسبت به روش های حل کامل معادلات سیال دارای هزینه محاسباتی کمتر و نسبت به روش ممنتوم المان پره دارای دقت بیشتری است، توسعه داده شده است. به کمک این روش، رفتار میدان جریان و تولید توان و تراست اعمالی به صفحه روتور در دو حالت جریان ورودی یکنواخت و لایه مرزی اتمسفری برای موقعیت های زاویه ای مختلف پرها بررسی شده است. نتایج نشان می دهد جریان ورودی برشی سبب عدم تقارن در الگوی جریان دنباله روتور و همچنین بارگذاری متناوب روی پرها می شود. برای پروفیل لایه مرزی اتمسفری انتخاب شده در این پژوهش، بیشترین اختلاف نیروی محوری (تراست) وارد بر هر پره حدود ۱۲۵ kN است که مابین دو موقعیت زاویه ای ۹۰ و ۲۷۰ درجه درحین دوران رخ می دهد. همچنین در این حالت، عدم تقارن فیزیک جریان حول روتور سبب ایجاد فشار بیشتر به نیمه بالایی دیسک عملگر شده و باعث ایجاد گشتاوری خمشی بر صفحه روتور می شود.

12. Behrouzifar, A., Schneider, G.E., and Darbandi, M. "Numerical Investigation of Actuator Disc Thickness Effect on Predicting the Performance and Far Wake of the Horizontal Axis Wind Turbine" The Int. Conf. Engineering Congress and Exposition., Texas, 2015.
13. Boojari, M., Mahmoodi, E., Nejad, A.A., and Sarmast, S. "Modeling the Wake of Mexico Experiment's Wind Turbine, Using Elliptic Force Distribution in Actuator Line Method in OpenFOAM", Modarres Mech. Eng., Vol. 16, No. 9, pp.77-86, 2016 (in Persian).
14. Darbandi, M., Behrouzifar, A., Jalali, R., and Schneider, G.E. "Megawatt Wind Turbine Far Wake and Performance Predictions, Using the Unsteady Actuator Line Model", The 34th Int. Conf., Wind Energy Symposium, USA, 2016.
15. Shen, Xin., Zhu, Xiaocheng., and Du, Zhaohui. "Wind Turbine Aerodynamics and Loads Control in Wind Shear Flow", Energy, Vol. 36, pp. 1424-1434, 2011.
16. Eggers, A.J., Digumarthi, R., and Chaney, K. "Wind Shear and Turbulence Effects on Rotor Fatigue and Loads Control", Solar Energy Engineering, Vol. 125, pp. 402-409, 2003.
17. Mikkelsen, R. and Sørensen, JN. "Prescribed Wind Shear Modelling Combined With the Actuator Line Technique", The Int. Conf., European Wind Energy Conference and Exhibition, Milano, 2007.
18. Jeong, M., Kim, S., Lee, I., and Yoo, S. "Wake Impacts on Aerodynamic and Aeroelastic Behaviors of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade for Sheared and Turbulent Flow Conditions", Fluids and Structures, Vol. 50, pp. 66-78, 2014.
19. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development" Technical Report NREL-TP-500-38060.
20. Ramos García, N., Sørensen, J. N., and Shen, W.Z. "Validation of a Three-dimensional Viscous-Inviscid Interactive Solver for Wind Turbine Rotor", Renewable Energy, Vol. 70, pp.78-92, 2014.
21. Ebrahimi A. and Movahhedi, M. "Power Improvement of NREL 5-MW Wind Turbine, Using Multi-DBD Plasma Actuators", Energy Conversion and Management, Vol. 146, pp. 96-106, 2017.