

عملکرد توربین باد محور افقی مقیاس بزرگ در لایه مرزی

اتمسفری و آشفته‌گی باد

عباس ابراهیمی^۱ و امیرحسین حسین^۲

دانشکده مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷)

چکیده

در این مقاله، عملکرد آیرودینامیکی یک توربین باد محور افقی مرجع و مقیاس بزرگ تحت اثر تغییرات باد ورودی به صفحه روتور ناشی از لایه مرزی اتمسفری و آشفته‌گی جریان باد ارزیابی شده است. مدل‌سازی جریان برشی باد به روش اختلاط طولی و برای تحلیل آشفته‌گی باد از محاسبه سری‌های مبتنی بر فرکانس گردابه و سرعت میانگین جریان استفاده شده است. نیروهای آیرودینامیکی روتور با روش اصلاح‌شده ممنوم-المان پره ناپایا در شرایط نامی توربین محاسبه و اعتبارسنجی روش با نتایج توربین باد مرجع ۵ مگاواتی NREL انجام شده است. پروفیل سرعت‌های ورودی به صفحه روتور با مقادیر ضرایب زبری سطح ۰/۱ تا ۰/۵ و آشفته‌گی در زبری ۰/۵ با شدت یک تا ۱۵ درصد بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد، مقدار میانگین توان در حالت بیشینه زبری، ۱۶۰ کیلووات کاهش یافته است. افزایش شدت آشفته‌گی موجب غیریکنواختی در منحنی تراست و گشتاور شده و در شدت آشفته‌گی ۱۵ درصد، مقدار بیشینه نیروی تراست، ۵۰ کیلو نیوتن و مقدار کمینه آن ۲۵ کیلو نیوتن افزوده شده است. همچنین به بیشینه و کمینه گشتاور، به ترتیب مقدار ۷۵۰ و ۲۵۰ کیلو نیوتن متر اضافه شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین باد محور افقی، روش المان ممنوم پره، جریان برشی باد، آشفته‌گی باد

Performance Analysis of a Large-Scale Wind Turbine in Wind Shear and Inflow Turbulence Conditions

A. Ebrahimi

A. H. Hossein

Aerospace Engineering Department

Sharif University of Technology

(Received: 14/March/2019 ; Accepted: 12/March/2020)

ABSTRACT

In this paper, the effects of the atmospheric boundary layer as well as the inflow turbulence on the performance of a large-scale wind turbine are investigated. The reference wind turbine is the NREL 5 megawatts with a rotor diameter of 126 meters. Wind shear modeling is carried out using the mixing length theory. Due to the importance of turbulence analysis, the Sandia method is applied. According to the reference level, the roughness coefficients of 0.01, 0.2 and 0.5 and disturbances in the roughness of 0.5 with the intensity of 1, 5 and 15 percent are studied. The aerodynamic forces of the rotor are calculated based on the modified blade element momentum theory. The results show that in the case of maximum roughness the averaged output power is reduced to 160 kW. Moreover, at 15% turbulence intensity, 50 kN and 25 kN are added to the maximum/minimum thrust force value, respectively.

Keywords: Wind Turbine, Blade Element Momentum Theory, Wind Turbulence, Wind Shear

۱- مقدمه

با مشخص شدن شرایط باد ورودی به صفحه روتور توربین در هر لحظه، تحلیل آیرودینامیک در صفحه روتور برای استخراج نیروها و گشتاور انجام می‌شود. تحلیل آیرودینامیک روتور به روش‌های مختلفی شامل روش‌های ممنتوم المان پره، روش‌های پنل، روش‌های عملگر مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شود. این روش‌ها از نظر دقت تحلیل، فرضیات محدودکننده و هزینه محاسباتی متفاوت هستند. روش‌های مبتنی بر گردابه به دلیل مدل‌سازی دنباله آزاد، برای تحلیل رفتار دنباله روتور و بررسی تأثیر آن مناسب هستند. گراسو [۶] اثر برش باد ورودی و سطح مرجع را در تخمین بارهای آیرودینامیک توربین باد به روش گردابه آزاد انجام داد. با استفاده از این روش اثر برش باد بر گردابه‌های پشت توربین و تأثیر آن بر توربین‌های مجاور بررسی شده است. در حالتی که توربین در مقابل جریان باد با لایه مرزی زمین قرار داشت به دلیل تفاوت سرعت باد ورودی در صفحه روتور، گردابه‌های آزاد شده از پشت توربین به سمت ناحیه با سرعت باد بیشتر منحرف شد و تراکم گردابه در ناحیه بالای توربین افزایش یافت. سزر و همکاران [۷] مطالعه تأثیر برش باد در ساختار دنباله و عملکرد توربین باد محور افقی با روش پنل و مدل‌سازی گردابه آزاد را انجام دادند. برای این منظور از سه مدل باد در حالت یکنواخت، برش باد با منحنی توانی و برش باد آشفته استفاده شده است. نتایج نشان داد، وجود برش باد ساختاری پیچیده از گردابه به شکل نامتقارن و ناپایا ایجاد می‌کند. همچنین پره‌ها در محدوده نامتقارنی از توزیع فشار در صفحه روتور قرار گرفتند که موجب دامنه تغییرات بزرگی در توان و تراست تولید شده توسط توربین شدند. اخیراً ابراهیمی و نودری [۸] به کمک الگوی دیسک عملگر سه بعدی، اثر جریان برشی باد بر عملکرد توربین باد محور افقی را مطالعه کردند. در این روش با حل معادلات ناویر-استوکس در ترکیب با الگوریتم ممنتوم-المان-پره دقت بهتری از رفتار جریان حول توربین نسبت به روش ممنتوم-المان-پره به دست می‌آید و درعین حال هزینه محاسباتی کمتری نسبت به حل کامل معادلات جریان دارد.

روش ممنتوم المان پره با محاسبه زاویه حمله مؤثر در هر مقطع پره و استفاده از ضرایب آیرودینامیکی تجربی، مقدار نیروها و گشتاور وارده را استخراج می‌کند. این تئوری

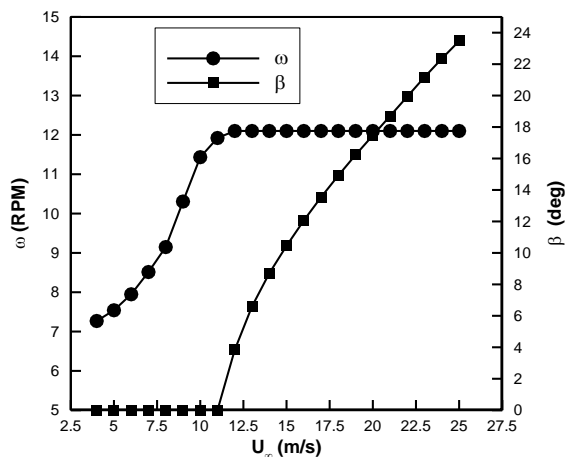
ابعاد توربین‌های بادی محور افقی به منظور جذب توان بیشتری از باد در حال افزایش است [۱،۲]. افزایش ابعاد توربین باد منجر به افزایش تأثیر تغییرات باد ورودی به صفحه روتور و در نتیجه، عملکرد آن می‌شود. تغییر باد ورودی به صفحه روتور ناشی از اثر لایه مرزی زمین و آشفستگی در سرعت است. به دلیل ابعاد زیاد روتور توربین‌های باد مقیاس بزرگ و تغییر مکان پره در صفحه روتور توربین باد، هر بخش از پره در حین چرخش روتور تحت اثر سرعت متفاوتی ناشی از لایه مرزی سطح زمین است. این اختلاف سرعت منجر به ایجاد نوساناتی در نیروهای برآ، پسا و گشتاور وارد به هر مقطع از پره حین حرکت می‌شود. علاوه بر این در نظر گرفتن آشفستگی جریان به دلیل تغییرات زبری سطح مرجع در تحلیل عملکرد توربین اهمیت زیادی دارد.

ری و همکاران [۳] بررسی مدل‌های پیش‌بینی برش باد در سطوح مرجع مختلف را انجام دادند. در این تحقیق برای استخراج داده‌های باد به روش تجربی از چند برج بلند به منظور داده‌برداری استفاده شده است. نتایج داد برای محل‌هایی با پوشش گیاهی متنوع، میانگین برش باد در سال‌های مختلف حدود ۷ درصد متفاوت است. بر پایه مطالعات آماری آن‌ها، تفاوت قابل توجهی بین روابط توانی و لگاریتمی برای پیش‌بینی برش باد وجود ندارد و هر دو دارای دقت قابل قبول هستند. وگنر و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴] اثرات برش و آشفستگی باد را بر عملکرد توربین باد در استخراج توان بررسی کردند. نمونه‌برداری داده‌های باد با استفاده از فناوری لیزری لیدار در صفحه روتور انجام شد. سپس با استخراج نتایج تجربی تطابق مدل‌سازی باد با منحنی توانی، مناسب ارزیابی شده است. با توجه به پرهزینه بودن و محدودیت‌های استخراج پروفیل باد به روش تجربی، استفاده از روش‌های تحلیلی مقرون به صرفه است. معمولاً از دو الگو برای مدل‌سازی جریان باد در انواع پوشش سطح مرجع استفاده می‌شود. روش اول قانون لگاریتمی است که بر پایه مطالعات لایه مرزی و تئوری اختلاط طولی می‌باشد. روش دوم که توسط بسیاری از محققین انرژی استفاده می‌شود، قانون توانی است. هر دو روش برای پیش‌بینی شرایط جریان کارایی دارند [۵].

دوران روتور (برابر ۱۲/۱ دور بر دقیقه) و در نتیجه توان خروجی ثابت باقی می ماند.

جدول (۱): مشخصات آیرودینامیکی پره روتور

نام ایرفویل	شروع مقطع از مرکز روتور (متر)	زاویه پیش از آیرودینامیکی (درجه)	اندازه وتر (متر)
Cylinder1	۲/۸۶	۱۳/۳	۳/۵۴
	۵/۶	۱۳/۳	۳/۸۵
Cylinder2	۸/۳۳	۱۳/۳	۴/۱۶
DU40	۱۱/۷۵	۱۳/۳	۴/۵۵
DU35	۱۵/۸۵	۱۱/۴۸	۴/۶۵
	۱۹/۹۵	۱۰/۱۶	۴/۴۵
DU30	۲۴/۰۵	۹/۰۱	۴/۲۴
DU25	۲۸/۱۵	۷/۷۹	۴
	۳۲/۲۵	۶/۵۴	۳/۷۴
DU21	۳۶/۳۵	۵/۳۶	۳/۵
	۴۰/۴۵	۴/۱۸	۳/۲۵
NACA64	۴۴/۵۵	۳/۱۲	۳/۰۱
	۴۸/۶۵	۲/۳۱	۲/۷۶
	۵۲/۷۵	۱/۵۲	۲/۵۱
	۵۶/۱۶	۰/۸۶	۲/۳۱
	۵۸/۹	۰/۳۷	۲/۰۸
	۶۱/۶۳	۰/۱	۱/۴۱



شکل (۱): تغییرات زاویه پیچ و سرعت دوران توربین باد مرجع

۳- اعتبارسنجی روش تحلیل آیرودینامیک روتور

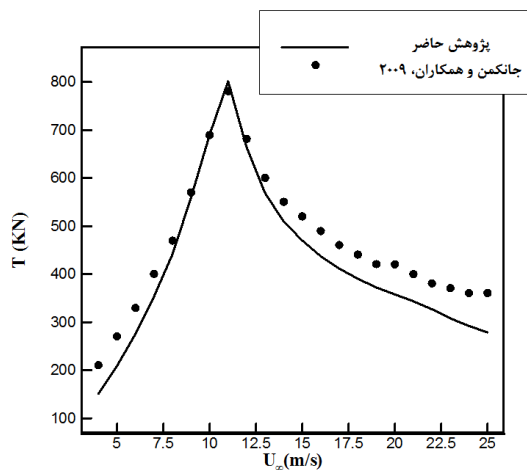
از روش ممنوم-المان پره برای تحلیل آیرودینامیک روتور و محاسبه نیروها، گشتاور و توان تولیدی استفاده شده است که روابط آن در مرجع [۱۳] آمده است. اعتبارسنجی روش برای توربین باد مرجع در شرایط با کنترل زاویه پیچ در

اولین بار توسط گلارت [۹] ارائه شد و با استفاده از آن محاسبه نیروی محوری و توان توربین در شرایط مختلف سرعت باد، سرعت چرخش روتور و زاویه پیچ فراهم می شود. اگر اطلاعات کاملی از ضرایب آیرودینامیکی مقاطع پره توربین موجود باشد، در برخی شرایط نتایج رضایت بخشی می تواند حاصل شود [۱۰ و ۱۱]. عابدی [۱۴] با مقایسه روش های المان ممنوم پره، شبکه گردابه و خط برآزا، روش المان ممنوم پره را در پیش بینی نیرو و گشتاور روتور توربین باد مرجع در شرایط نامی، با دقت بالاتری ارزیابی کرده است.

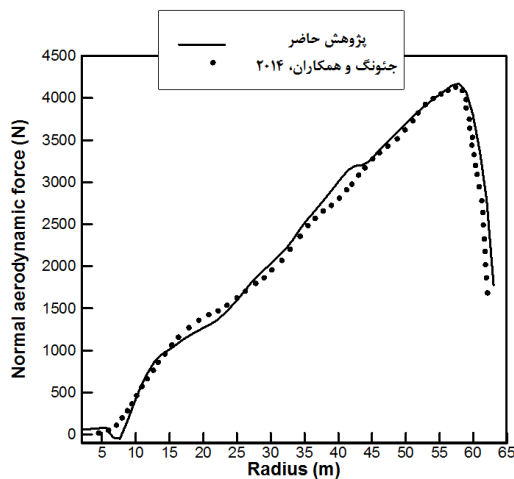
استفاده از روش های آیرودینامیک مبتنی بر گردابه به دلیل فرض غیرلزج و جریان چسبیده به سطح با توجه به ضخامت بالای مقاطع ایرفویل در پره روتور و وقوع جدایش جریان، دارای خطای محاسباتی می باشند. همچنین هزینه محاسباتی روش های عملگر و دینامیک سیالات محاسباتی نسبت به روش المان ممنوم پره بسیار زیاد است. در نتیجه در این تحقیق از روش المان ممنوم پره در شرایط نامی توربین باد با سرعت دوران ۱۲/۱ دور بر دقیقه و سرعت باد ۱۱/۴ متر بر ثانیه در هاب توربین استفاده شده است. برای مدل سازی برش باد از روش لگاریتمی برمبنای زبری سطح صاف، زبری سطح جریان آب آرام و جریان آب مواج استفاده شده است. به دلیل اهمیت آشفتگی جریان در شرایط زبری سطح مرجع بیشینه، مقدار شدت آشفتگی جریان هوا با مدل فرکانس گردابه در سه مقدار مختلف بررسی شده است. تأثیر برش و آشفتگی باد بر افت عملکرد توربین مطالعه شده است.

۲- معرفی توربین باد مرجع

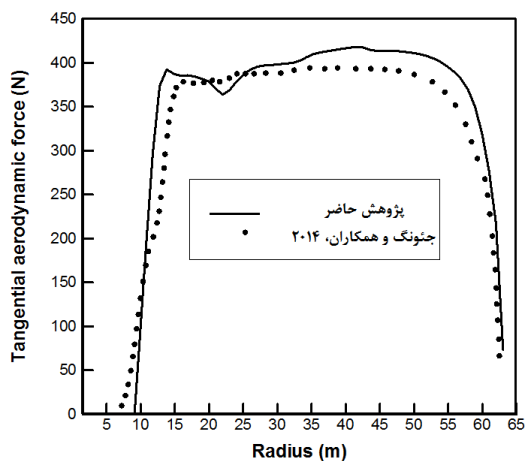
در این پژوهش، توربین باد محور افقی ۵ مگاواتی فراساحل مرجع [۱۵] به عنوان توربین مینا انتخاب شده است. پره توربین دارای طول ۶۱/۵ متر است و با احتساب شعاع ۱/۵ متری هاب، شعاع روتور به ۶۳ متر می رسد. ارتفاع برج توربین باد، از سطح دریا تا محل نصب ناسل ۹۰ متر است. مطابق جدول ۱ برای طراحی الگوی آیرودینامیکی پره های توربین باد از مقاطع ایرفویل و زوایای پیش متفاوتی استفاده شده است. این توربین دارای قابلیت کنترل توان با زاویه پیچ است که در شکل ۱ تغییرات آن با افزایش سرعت باد نشان داده شده است. همچنین مشاهده می شود، در سرعت باد بیشتر از سرعت نامی ۱۱/۴ متر بر ثانیه، سرعت



شکل (۳): تغییرات نیروی تراست در کنترل پیچ



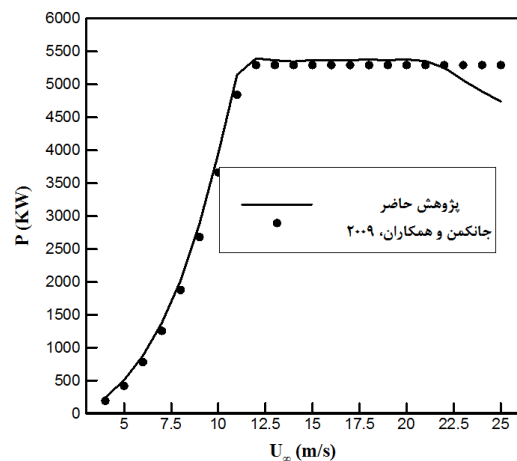
شکل (۴): مقایسه توزیع نیروی محوری در طول پره



شکل (۵): مقایسه توزیع نیروی مماسی در طول پره

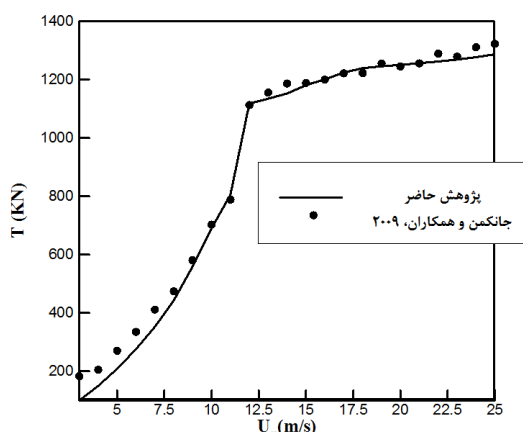
یکی دیگر از سیستم‌های کنترل توان توربین، حالت کنترل واماندگی می‌باشد که با کاهش زاویه پیچ و افزایش زاویه حمله مقاطع پره، روتور توربین دچار واماندگی

زوایای حمله کم و با کنترل زاویه پیچ-واماندگی در زوایای زیاد انجام شده است. شکل ۲ مقایسه نتایج تغییرات توان روتور نسبت به سرعت باد با مرجع [۱۵] را در حالت کنترل زاویه پیچ نشان می‌دهد. توان خروجی با افزایش سرعت باد تا قبل از سرعت نامی افزایش یافته و پس از آن به واسطه زاویه پیچ پره، ثابت شده است. زاویه پیچ پره مطابق شکل ۱ به گونه‌ای طراحی شده تا زاویه حمله مؤثر هر مقطع پره و در نتیجه نیروی برآ کاهش یافته و توان خروجی با افزایش سرعت ثابت باقی بماند. در این شکل توان روتور توربین بیش از ۵ مگاوات می‌باشد که با توجه به اتلافات و استهلاک توان در حین چرخش در نهایت به میزان ۵ مگاوات می‌رسد.



شکل (۲): مقایسه توان روتور در حالت کنترل پیچ

شکل ۳ تغییرات نیروی تراست روتور نسبت به سرعت باد در حالت کنترل زاویه پیچ را نشان می‌دهد. بیشینه نیروی تراست وارد بر روتور با توجه به سیستم کنترل پیچ پره در سرعت نامی یعنی ۱۱/۴ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. با فعال شدن سیستم کنترل پیچ و افزایش زاویه پیچ، زاویه حمله مؤثر کاهش یافته و نیروی برآ و پسا کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی تراست وارد بر پره‌ها کم می‌شود. همچنین با توجه به اهمیت توزیع نیرو در طول پره، در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه‌ای میان توزیع نیروی محوری (تراست) و نیروی مماسی در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه و سرعت چرخش ۹ دور بر دقیقه با مقادیر مرجع انجام شده است. مقایسه نتایج روش ممنوم-المان در شرایط عملکرد پایای روتور با مرجع [۱۶] تطابق مناسبی دارد.



شکل (۸): تغییرات تراست در حالت کنترل واماندگی

۴- مدل سازی لایه مرزوی و آشفتگی باد

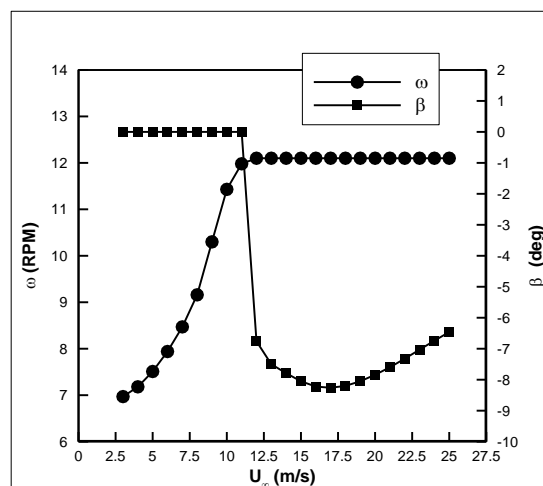
شکل ۹ نمایی از الگوی پروفیل سرعت باد اندازه گیری شده توسط وندر [۱۷] را نشان می دهد. تغییر مقدار میانگین سرعت باد تابعی از ارتفاع می باشد که به آن برش باد^۱ گفته می شود. در این پژوهش برای مدل سازی اثر برش باد از روش لگاریتمی استفاده شده است. قانون لگاریتمی از روش هایی نظیر تئوری اختلاط طولی^۲ [۱۸] و ویسکوزیته گردابه^۳ استخراج شده است. با این روش سرعت باد در ارتفاع مورد نظر از رابطه (۱) به دست می آید.

$$U(z) = U(z_r) \times \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (1)$$

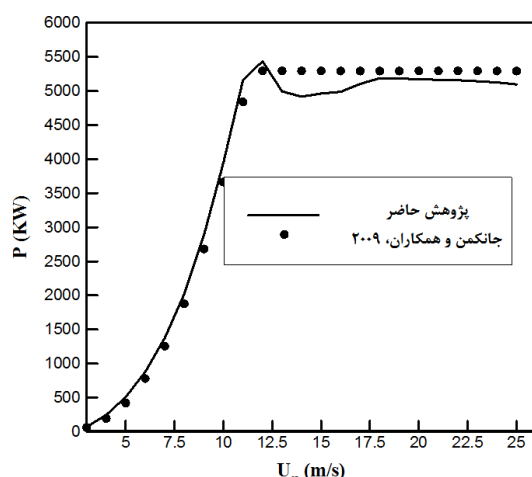
$U(z)$ معرف سرعت باد در ارتفاع z ، $U(z_r)$ سرعت باد در ارتفاع مرجع (z_r)، و z_0 طول زبری سطح می باشند. همچنین برای مدل سازی آشفتگی جریان باد در فضای سه بعدی از روش ویرز [۲۰] استفاده شده است.

توربین باد مرجع این پژوهش دارای بیشینه ارتفاع ۱۵۳ متر از سطح آب می باشد. برای مدل سازی الگوی برش باد از مقادیر زبری سطح مرجع [۱۲] استفاده شده است. سطح مرجع توربین باد در این تحقیق، دریا است و مقادیر زبری سطح آن در شرایط آرام و موج به ترتیب ۰/۲ و ۰/۵ می باشد. ارتفاع مرجع باد در نقطه نصب بادسنج معادل

می شود. در شرایط واماندگی، پره روتور با کاهش شدید نیروی برآ و افزایش نیروی پسا مواجه می شود. تغییرات زاویه پیچ و سرعت چرخش روتور نسبت به سرعت جریان باد در حالت کنترل واماندگی در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که کاهش زاویه پیچ پره مطابق الگوی داده شده پس از سرعت باد نامی موجب ثابت شدن سرعت دورانی و در نتیجه توان روتور با افزایش سرعت باد می شود. شکل های ۷ و ۸ تغییرات توان و نیروی محوری روتور نسبت به سرعت باد در حالت کنترل واماندگی در مقایسه با مقادیر مرجع را نشان می دهند. اگرچه این روش نیز باعث ثابت شدن توان روتور بعد از سرعت نامی شده است ولی برخلاف روش قبلی (کنترل با افزایش زاویه پیچ) به دلیل افزایش نیروی پسای پره در حالت واماندگی، نیروی محوری وارد بر روتور با افزایش سرعت باد همواره زیاد شده است.

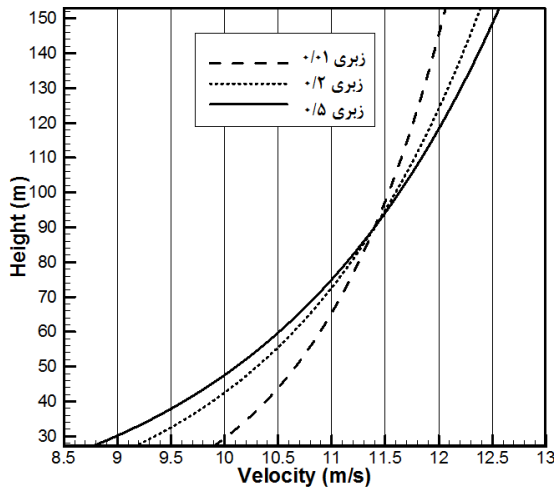


شکل (۶): تغییرات پارامترها در کنترل واماندگی



شکل (۷): تغییرات توان در حالت کنترل واماندگی

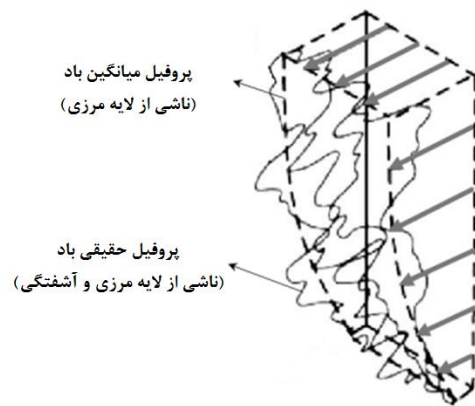
افزایش یافته است. انتظار می‌رود با افزایش دامنه نوسانات سرعت باد، دامنه نوسانات نیروهای وارد بر روتور هم افزایش یابد. افزایش دامنه نوسانات بارهای آیرودینامیکی موجب افزایش دامنه تغییر شکل‌های الاستیک می‌شود و می‌بایست در طراحی سازه توربین باد لحاظ شود.



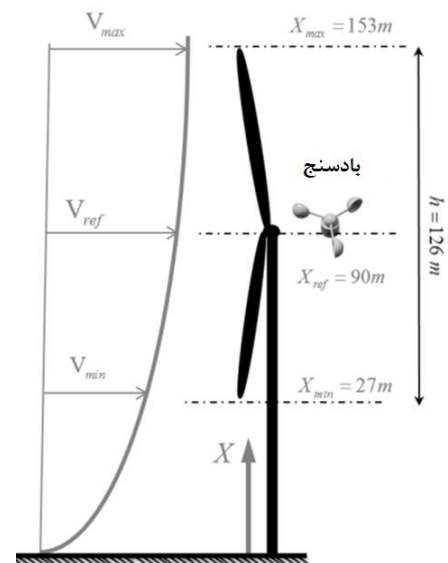
شکل (۱۱): سرعت جریان در ارتفاع روتور نسبت به زبری سطح

شکل ۱۲ نمای شماتیک موقعیت پره‌ها در مختصات محلی و مرجع را نمایش می‌دهد. به دلیل چرخش پره‌ها، موقعیت پره در مختصات مرجع روتور متغیر است. با تغییر سرعت باد نسبت به ارتفاع در صفحه روتور برای استخراج سرعت ورودی به هر مقطع پره باید موقعیت پره در مختصات مرجع در هر لحظه محاسبه شود. با استفاده از ماتریس انتقال اولر و تبدیل مختصات محلی پره به مختصات مرجع، محل هر المان از پره و سرعت باد روی آن حین چرخش به دست آمده است. با چرخش روتور به میزان θ_r در سرعت $12/1$ دور بر دقیقه موقعیت پره‌ها در دستگاه مختصات مرجع تغییر می‌کند و سرعت باد ورودی به هر المان پره نیز تغییر می‌کند. این تغییرات نوسانی سرعت ورودی در هر دور چرخش روتور موجب تغییر نوسانی نیروی محوری و گشتاور وارده به پره می‌شود. شکل ۱۳ تغییرات سرعت جریان باد ورودی به نوک پره اول نسبت به زبری سطح متغیر حین چرخش روتور را نشان می‌دهد. دامنه تغییر سرعت در نوک پره در زبری $0/5$ حدود ۴ متر بر ثانیه است. این تغییرات

ارتفاع هاب قرار دارد و برابر ۹۰ متر می‌باشد. مجموع طول پره و شعاع هاب ۶۳ متر است و در نتیجه تغییرات سرعت باد در محدوده ارتفاع ۲۷ الی ۱۵۳ متر مورد نیاز می‌باشد. در شکل ۱۰ نمای شماتیک اختلاف ارتفاع بین نقاط بالا و پایین روتور توربین و برش باد ورودی نمایش داده شده است.



شکل (۹): نمایی از الگوی باد حقیقی [۱۷]

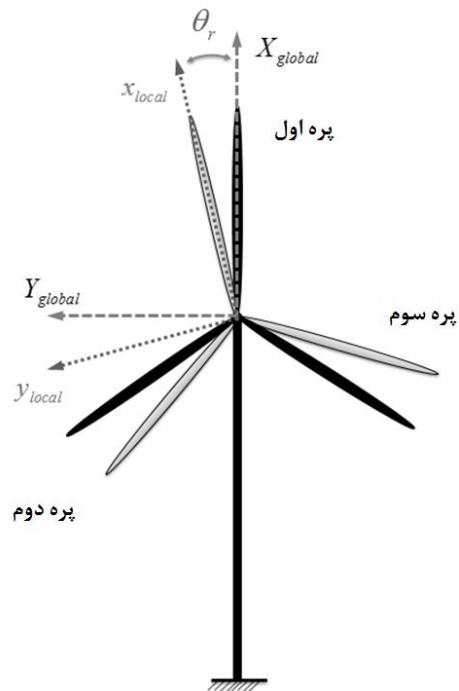


شکل (۱۰): برش باد ورودی به روتور

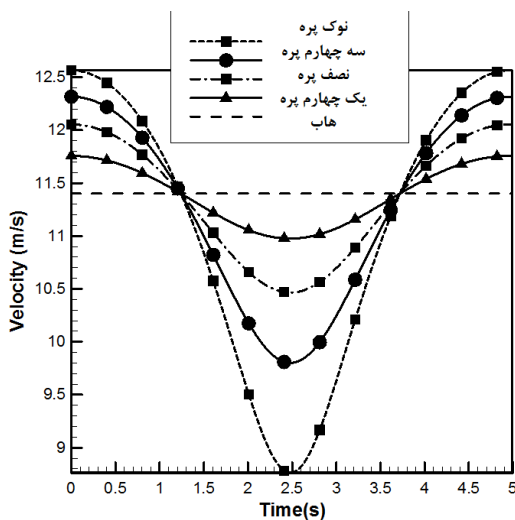
با توجه به شکل ۱۱ میزان تغییرات سرعت باد برای سطح صاف با زبری سطح کمینه $0/01$ در محدوده $9/8$ تا 12 متر بر ثانیه و برای دریای آرام با زبری سطح $0/2$ در محدوده $9/1$ تا $12/3$ متر بر ثانیه و برای دریای مواج با زبری سطح $0/5$ در محدوده $8/7$ تا $12/5$ متر بر ثانیه است. با افزایش زبری سطح مرجع، مقدار محدوده تغییرات سرعت

نسبت به سرعت نامی ۱۱/۴ متر بر ثانیه قابل توجه است. سرعت جریان ورودی در زبری سطح ۰/۵ برای یک پره در نقاط مختلف آن انجام شده است. با نزدیک شدن به ریشه پره و کاهش تغییرات ارتفاع، دامنه تغییرات سرعت جریان کاهش یافته است. همچنین مطابق شکل ۱۵، وجود اختلاف فاز ۱۲۰ درجه در مختصات زاویه نصب هر پره موجب اختلاف فاز در منحنی سرعت باد ورودی به هر پره حین چرخش روتور شده است.

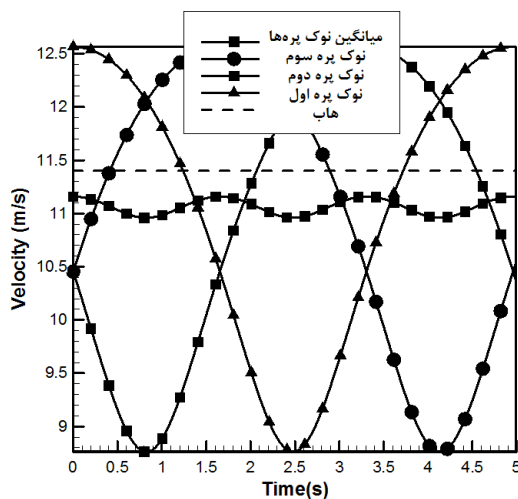
شکل (۱۲): موقعیت پرها در دستگاه مختصات محلی و مرجع



شکل (۱۲): موقعیت پرها در دستگاه مختصات محلی و مرجع

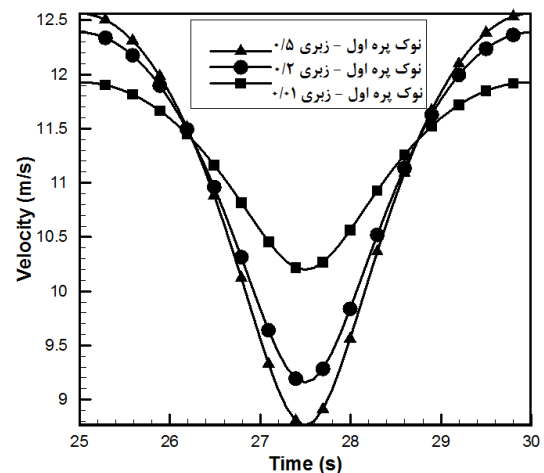


شکل (۱۴): سرعت باد در طول‌های مختلف پره حین دوران



شکل (۱۵): سرعت باد در نوک هر پره حین دوران

تغییر ارتفاع در طول پره ناشی از حرکت روتور موجب افزایش گرادیان سرعت ناشی از لایه مرزی سطح مرجع در طول پره می‌شود و با توجه به تأثیرگذاری مستقیم سرعت جریان در محاسبه نیروها موجب افزایش گرادیان نیرو و تغییر شکل در طول پره می‌شود. در شکل ۱۴ مقایسه



شکل (۱۳): سرعت باد در نوک پره حین دوران در زبری‌های مختلف

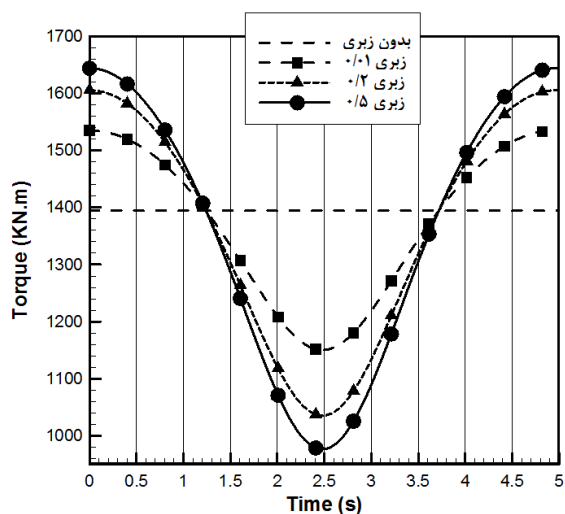
المان نوک پره را در مقایسه با شدت آشفته‌گی ۱۵ درصد برای مدل‌سازی آشفته‌گی باد همراه با لایه مرزی سطح، سرعت ورودی در صفحه روتور با کد FAST در ۳۰ ثانیه محاسبه شده است. شکل ۱۶ تغییرات سرعت ورودی به

۵- تأثیر باد ورودی بر عملکرد توربین

باد ورودی به صفحه روتور توربین تحت تأثیر لایه مرزی سطح مرجع و مقدار آشفتگی باد تغییر می‌کند. در نتیجه توربین حین چرخش روتور با تغییراتی در نیروها و گشتاورهای وارده به روتور مواجه می‌شود. در ادامه تأثیر لایه مرزی و آشفتگی در زبری سطح مختلف بررسی شده است.

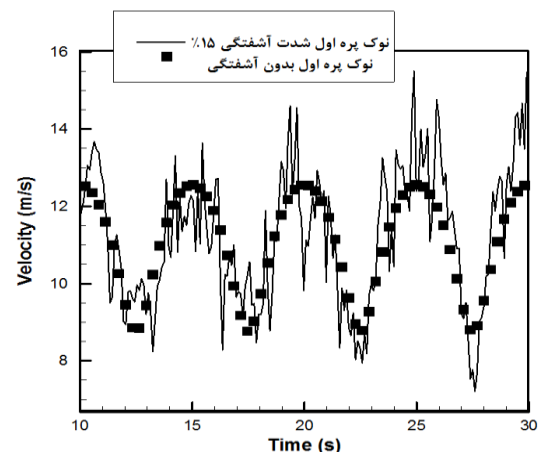
۵-۱- تأثیر لایه مرزی سطح

مقدار سرعت باد ورودی به صفحه روتور توربین در اثر لایه مرزی سطح با افزایش ارتفاع در مختصات مرجع زیاد می‌شود. الگوی این افزایش به شکل لگاریتمی اتفاق می‌افتد و در نقاط هم ارتفاع برابر فرض می‌شوند. با فرض جریان آرام، سرعت در هر نقطه در مختصات مرجع حین زمان ثابت است و تغییرات در سرعت باد ورودی به پره تنها ناشی از چرخش پره می‌باشد. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، تأثیر زبری سطح روی گشتاور و تراست وارد به پره اول نمایش داده شده است. این تغییرات مربوط به یک دور چرخش با سرعت ۱۲/۱ دور بر دقیقه و معادل ۵ ثانیه می‌باشد. با شروع چرخش پره و کاهش ارتفاع آن نسبت به مختصات مرجع، مقدار باد ورودی کاهش می‌یابد. در نتیجه مؤلفه‌های محوری و چرخشی نیروی وارد به پره کم می‌شوند. این تغییرات در هر دوران کامل پره به صورت نوسانی هستند.

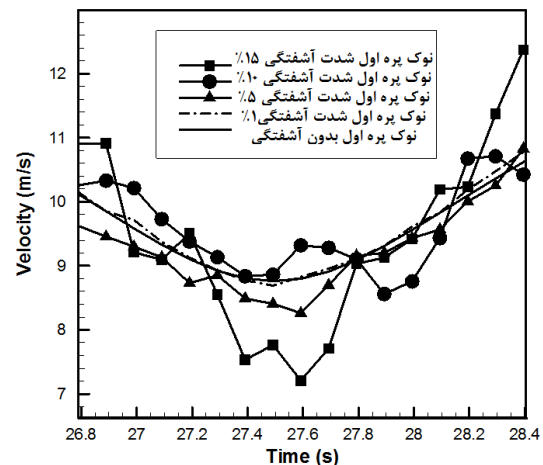


شکل (۱۸): گشتاور پره اول نسبت به زبری سطح

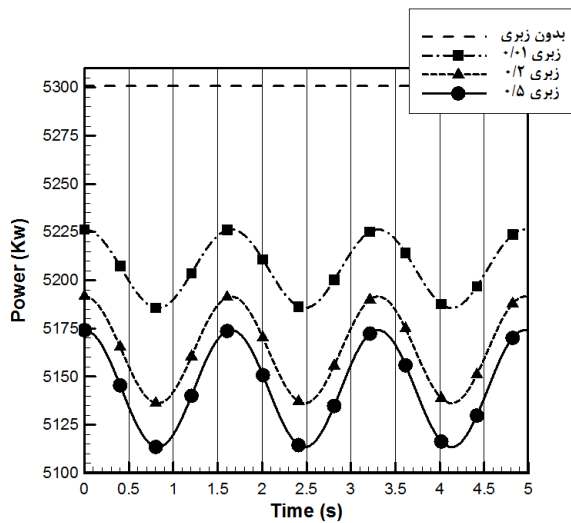
نمایش می‌دهد. در طی ۴ دور چرخش روتور از زمان ۱۰ الی ۳۰ ثانیه، سرعت ورودی نوک پره اول در شرایط آشفتگی همراه با لایه مرزی نسبت به بدون آشفتگی تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. این اختلاف در زمان ۲۵ ثانیه دارای بیشینه‌ای برابر ۳ متر بر ثانیه معادل ۲۴ درصد نسبت به بدون آشفتگی است. اگر لایه مرزی نیز در نظر گرفته نشود، میزان تغییرات سرعت باد نسبت به مقدار نامی سرعت باد توربین (۱۱/۴ متر بر ثانیه) برابر ۴/۱ متر بر ثانیه و معادل ۳۵/۹ درصد می‌باشد. بنابراین، لایه مرزی و شدت آشفتگی تأثیر زیادی روی باد ورودی به پره حین چرخش روتور دارند. شکل ۱۷ نیز در یک بازه زمانی کوچک نشان می‌دهد که با افزایش شدت آشفتگی تغییرات نوسانی در سرعت باد افزایش یافته است. این تغییرات در شدت آشفتگی بیشینه ۱۵ درصد، به ۲ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. این مقدار نسبت به مقدار ۱۱/۴ متر بر ثانیه (سرعت نامی توربین) حدود ۱۷ درصد می‌باشد.



شکل (۱۶): سرعت نوک پره در آشفتگی بیشینه



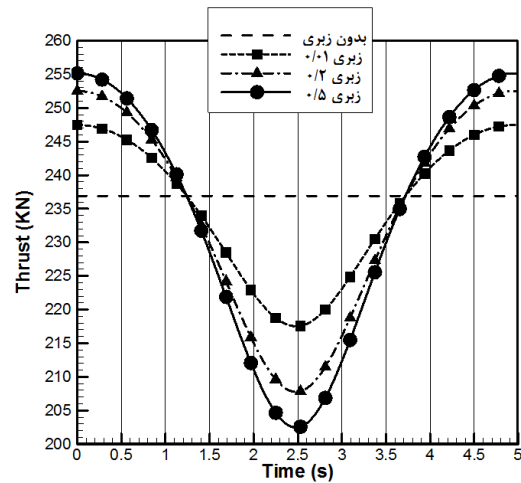
شکل (۱۷): سرعت نوک پره در شدت آشفتگی‌های مختلف



شکل (۲۱): توان روتور نسبت به زبری سطح

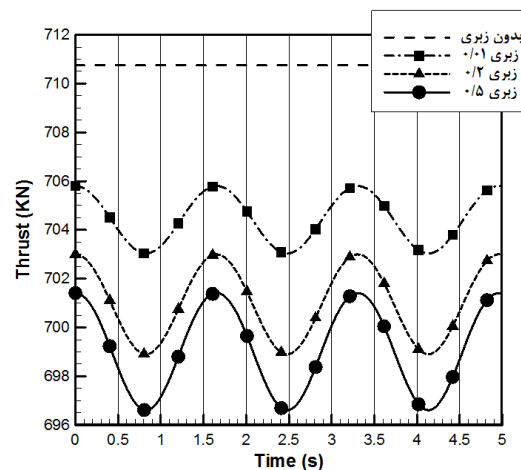
۵-۲- تأثیر آشفته‌گی باد

نوسانات سرعت باد ورودی به روتور توربین باد متناسب با شدت آشفته‌گی جریان افزایش می‌یابد. همچنین در این شرایط سرعت باد در هر نقطه حین زمان متغیر است که به پیچیدگی و لزوم تحلیل می‌افزاید. با توجه به افزایش شدت آشفته‌گی در زبری سطح بالا، مطالعه محدود به زبری سطح ۰/۵ شده است. شکل ۲۲ و شکل ۲۳ تغییرات نیروی تراست و گشتاور پره اول در مقایسه با شدت آشفته‌گی ۱، ۵ و ۱۵ درصد را نمایش می‌دهند. تغییرات نیرو و گشتاور در شدت آشفته‌گی ۱ درصد مشابه با شرایط صرف لایه مرزی و عدم تحلیل آشفته‌گی می‌باشد و معیار مناسبی برای درک تأثیر آشفته‌گی در شرایط دیگر است. افزایش شدت آشفته‌گی موجب غیریکنواختی در منحنی تراست و گشتاور وارده به پره اول شده است. در شدت آشفته‌گی ۱۵ درصد مقدار بیشینه نیروی تراست یک پره ۵۰ کیلونیوتن و مقدار کمینه آن ۲۵ کیلونیوتن افزوده شده است. همچنین در بیشینه گشتاور مقدار ۷۵۰ کیلونیوتن متر و در کمینه گشتاور ۲۵۰ کیلونیوتن متر اضافه شده است.



شکل (۱۹): تراست پره اول نسبت به زبری سطح

به دلیل اختلاف فاز ۱۲۰ درجه در مختصات زاویه‌ای نصب پره‌ها، فرکانس نیروی تراست و توان وارد بر روتور معادل ۰/۶ هرتز و سه برابر یک پره است. شکل ۲۰ و ۲۱ تغییرات تراست و توان روتور نسبت به تغییرات زبری را نمایش می‌دهند. به دلیل کاهش میانگین باد ورودی به صفحه روتور در لایه مرزی زمین، افزایش زبری موجب کاهش عملکرد روتور توربین شده است. مقدار میانگین تراست وارد بر روتور از مقدار ۷۱۱ کیلونیوتن در شرایط بدون لایه مرزی به مقدار ۶۹۸ کیلونیوتن در زبری بیشینه رسیده است. مقدار میانگین توان نیز در حالت بیشینه زبری ۱۶۰ کیلووات کاهش یافته است. همچنین دامنه تراست و گشتاور روتور با افزایش زبری سطح بیشتر شده است. مقدار دامنه تغییرات نیروی تراست نسبت به زبری سطح به ترتیب معادل ۳، ۴ و ۵ کیلونیوتن می‌باشد.

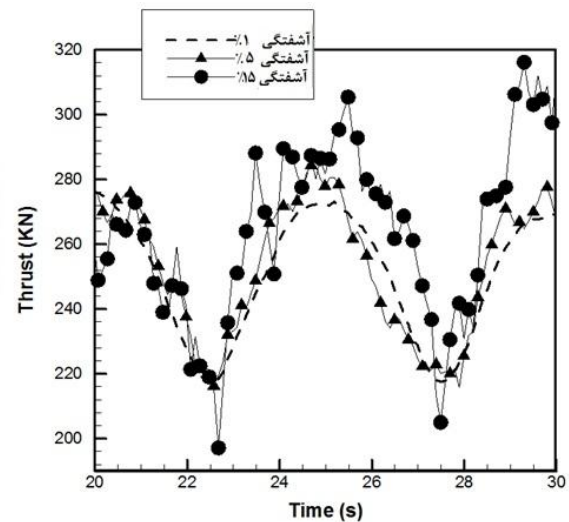


شکل (۲۰): تراست روتور نسبت به زبری سطح

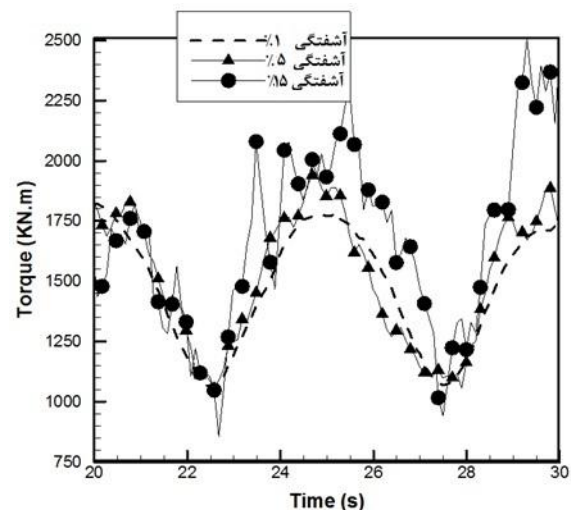
۱۲/۵ متر بر ثانیه است. دامنه تغییر سرعت در نوک پره در زبری ۰/۵ حدود ۴ متر بر ثانیه است. این تغییرات نسبت به سرعت نامی ۱۱/۴ متر بر ثانیه قابل توجه است. سرعت ورودی نوک پره اول در شرایط شدت آشفستگی ۱۵ درصد همراه با لایه مرزی نسبت به بدون آشفستگی حدود ۲۴ درصد تفاوت دارد. اگر لایه مرزی نیز در نظر گرفته نشود، میزان تغییرات سرعت باد نسبت به مقدار نامی سرعت باد توربین (۱۱/۴ متر بر ثانیه) برابر ۴/۱ متر بر ثانیه و معادل ۳۵/۹ درصد می‌باشد. تغییرات نوسانی در سرعت باد در شدت آشفستگی بیشینه ۱۵ درصد، به ۲ متر بر ثانیه نیز می‌رسد. این مقدار نسبت به مقدار ۱۱/۴ متر بر ثانیه (سرعت نامی توربین) حدود ۱۷ درصد می‌باشد. مقدار میانگین تراست وارد بر روتور از مقدار ۷۱۱ کیلونیوتن در شرایط بدون لایه مرزی به مقدار ۶۹۸ کیلونیوتن در زبری بیشینه رسیده است. مقدار میانگین توان نیز در حالت بیشینه زبری، ۱۶۰ کیلووات کاهش یافته است. همچنین دامنه تراست و گشتاور روتور با افزایش زبری سطح بیشتر شده است. مقدار دامنه تغییرات نیروی تراست نسبت به زبری سطح به ترتیب معادل ۳، ۴ و ۵ کیلونیوتن می‌باشد. افزایش شدت آشفستگی نیز موجب غیریکنواختی در منحنی تراست و گشتاور وارده به پره اول شده است. در شدت آشفستگی ۱۵ درصد مقدار بیشینه نیروی تراست یک پره ۵۰ کیلونیوتن و مقدار کمینه آن ۲۵ کیلونیوتن افزوده شده است. همچنین در بیشینه گشتاور، مقدار ۷۵۰ کیلونیوتن متر و در کمینه گشتاور ۲۵۰ کیلونیوتن متر اضافه شده است.

۷- مراجع

1. Arrambide, I., Zubia, I., and Madariaga, A. "Critical Review of Offshore Wind Turbine Energy Production and Site Potential Assessment", *Electr. Pow. Syst. Res.*, Vol. 167, no. 2, pp. 39-47, 2019.
2. Elsner, P. "Continental-scale Assessment of the African Offshore Wind Energy Potential: Spatial Analysis of an Under-appreciated Renewable Energy Resource", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 104, no. 6, pp. 394-407, 2019.
3. Ray, M. L., Rogers, A. L., and McGowan, J. G. "Analysis of Wind Shear Models and Trends in Different Terrains", *proc. Int. Conf. AWEA*



شکل (۲۲): تراست پره اول در آشفستگی متغیر



شکل (۲۳): گشتاور پره اول در آشفستگی متغیر

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل آیرودینامیک توربین باد مرجع با هدف محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد به پره تحت اثر برش و آشفستگی باد انجام شده است. برش باد ورودی در شرایط زبری سطح صاف، آب آرام و آب موج به ترتیب با ضریب زبری سطح ۰/۰۱، ۰/۲ و ۰/۵ مدل‌سازی شده است. همچنین تأثیر جریان آشفسته با شدت‌های ۱، ۵ و ۱۵ درصد در زبری سطح ۰/۵ بررسی شده است. نتایج نشان داد تغییرات سرعت باد برای سطح صاف با زبری سطح کمینه ۰/۰۱ در محدوده ۹/۸ تا ۱۲ متر بر ثانیه و برای دریای آرام با زبری سطح ۰/۲ در محدوده ۹/۱ تا ۱۲/۳ متر بر ثانیه و برای دریای موج با زبری سطح ۰/۵ در محدوده ۸/۷ تا

12. Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons, Ltd. New York, pp. 118–119, 2009.
13. Shen, W. Z., Mikkelsen, R., and Sørensen, J. N. "Tip Loss Corrections for Wind Turbine Computations, Wind Energy", International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, Vol. 8, no. 4, pp. 457–475, 2005.
14. Abedi, H. "Development of Vortex Filament Method for Aerodynamic Loads on Rotor Blades", Technical report, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.
15. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL/TP-500-38060", National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
16. Jeong, M. S., Kim, S. W., Lee, I., and Yoo, S. J. "Wake Impacts on Aerodynamic and aeroelastic Behaviors of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade for Sheared and Turbulent Flow Conditions", J. Fluids Struct., Vol. 50, pp. 66–78, 2014.
17. Van Der Tempel, J. "Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines", PhD Thesis Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, TUDelft, Netherlands, 2006.
18. Wortman, A. J. "Introduction to Wind Turbine Engineering", NASA STI/Recon Technical Report A 84, 1983.
19. Hansen, M. O. L. "Aerodynamics of Wind Turbines, Routledge press, Technical University of Denmark, 2015.
20. Veers, Paul S. "Three-dimensional Wind Simulation. SAND-88-0152C; CONF-890102-9, Sandia National Labs., Department of Energy NM, USA, 1988.
- Wind Power, University of Massachusetts Amherst, USA, 2005.
4. Wagner, R., Courtney, M., Larsen, T. J., and Paulsen, U. S. "Simulation of Shear and turbulence Impact on Wind Turbine Performance", Information Service Department Risø National Laboratory for Sustainable Energy Technical University of Denmark, 2010.
5. Hiester, T. R. and Pennell, W. T. "The Meteorological Aspects of Siting Large Wind Turbines", PNL-2522, Pacific Northwest Lab. Richland, Washingt., USA, Vol. 99352, 1981.
6. Grasso, F., "Ground and Wind Shear Effects in Aerodynamic Calculations", Technical report ECN-E-10-016, Energy research center of the Netherlands (ECN), 2010.
7. Sezer-Uzol, N. and Uzol, O. "Effect of Steady and Transient Wind Shear on the Wake Structure and Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine Rotor", Wind Energy, Vol. 16, no. 1, pp. 1-17, 2013.
8. Ebrahimi, A. and Nozari, M. "Wind Shear Flow Effects on the Horizontal Axis Wind Turbine Performance Based on Three-dimensional Actuator Disk Model", Accepted for publication in J. Fluid Mech. & Aerospace, Vol. 8, no. 1, pp. 1-14, 2019.
9. Hermann, G. "Airplane Propellers", In Aerodynamic Theory, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 169-360, 1935.
10. Rogério, J., Vaz, P., Tavares, J., Luiz, A., and Mesquita, A. "An Extension of BEM Method Applied to Horizontal-axis Wind Turbine Design", Renew. Energy, Vol. 36, no. 6, pp. 1734–1740, 2011.
11. Hansen, M. H. "Improved Modal Dynamics of Wind Vibrations to Avoid Stall- induced Vibrations", Wind Energy, Vol. 6, no. 2, pp. 179-195, 2003.