

طراحی و مطالعه عملکرد یک توربین باد محور افقی جهت بکارگیری در سیستم اینولاکس با روش المان مومنتوم پره تصحیح شده

سعید کریمیان علی آبادی*
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، karimian@modares.ac.ir
 صابر رضایی
 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، saberrezaey@modares.ac.ir

چکیده

تا به امروز تلاش‌های بسیاری برای استخراج انرژی از باد و افزایش ظرفیت توربین‌های بادی انجام شده است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به اینولاکس، روتورهای دارای شroud و داکت اشاره کرد. در بررسی‌های صورت گرفته در خصوص سیستم توربین بادی اینولاکس، اغلب اثرات کارکرد روتور توربین باد تعبیه شده در بخش ونتوری، در مشخصه‌های جریان، دخالت داده نشده است. مضافاً طراحی و مدلسازی یک توربین باد بهینه متناسب با هندسه و شرایط ایرویدینامیکی بخش ونتوری صورت نگرفته است. لذا در این مقاله با استفاده از نظریه BEM و با در نظر گرفتن ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل و نیز تصحیح دنباله آشفته، یک کد نیمه تحلیلی توسعه داده شده و ابتدا یک توربین باد بهینه و اختصاصی بر مبنای داده‌های هندسی و عملکردی اینولاکس فرض شده، طراحی گردیده است. در ادامه مدلسازی و مطالعه عملکرد بصورت پارامتری حول مشخصه‌های هندسی توربین، نیز انجام شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که توسعه یافته توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی، عددی و تحلیلی پیشین داشته و از این رو هندسه طراحی شده برای پره‌ها قابل اتکا خواهد بود. بعلاوه بکارگیری تصحیحات گلوآرت و برتون در همین بستر ارزیابی شده است. بر اساس دستاوردهای این پژوهش، در صورتی که توربین باد طراحی شده در بخش ونتوری سیستم اینولاکس استفاده شود، توان استحصال شده از آن ۲/۴۴۲۵ برابر می‌شود. همچنین در شرایط یکسان، تصحیح برتون مقادیر کمتری را نسبت به تصحیح گلوآرت پیش بینی می‌کند. با فرض روتور ۳ پره و سرعت باد ۱۰/۶ متر بر ثانیه و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل، حداکثر ضریب توان و سرعت نوک پره متناظر با احتساب تصحیح برتون به ترتیب برابر ۰/۳۳۵ و ۷/۰۹۵ و با احتساب تصحیح گلوآرت به ترتیب برابر ۰/۳۸۵ و ۷/۸۲۵ بوده است. از بستر فراهم شده به منظور بهینه سازی شکل پره و ساختار توربین باد اینولاکس می‌توان بهره گیری نمود. **واژه‌های کلیدی:** انرژی باد، ایرویدینامیک، سیستم توربین باد اینولاکس، نظریه BEM، مطالعه پارامتری.

Design and performance study of a horizontal wind turbine inside the INVELOX system using modified blade element momentum theory

S. K. Aliabadi
 S. Rezaey

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

To date, many efforts have been made to extract energy from wind and increase the capacity of wind turbines. These systems include INVELOX, shrouded and ducted rotors. In studies conducted on the INVELOX system, most of the time, the effect of the presence of turbine blades embedded in the venturi section did not interfere with the flow characteristics. In addition, the design and modeling of an optimal wind turbine in accordance with the geometry and aerodynamic conditions of the venturi section has not been done. Therefore, in this paper, using the BEM (blade element momentum) theory and considering Prandtl's tip and hub loss factors, and also turbulent wake correction, a semi-analytical code has been developed. First of all, an optimal wind turbine according to geometrical and operational assumed INVELOX system is designed. In the continuation, modeling and performance study of geometric parameters of the designed wind turbine has been done. The validation results show that the developed code agrees accurately with the previous experimental, numerical, and analytical results, and therefore the geometry designed for the blades will be reliable. In addition, the application of Glauert and Burton's corrections has been evaluated in this manuscript. Based on the research findings, it is concluded that by using INVELOX, the output power of designed wind turbine will be 2.4425 times. Moreover, under the same conditions, Burton's correction yields more conservative results than Glauert's correction. So that assuming 3 blades and a wind speed of 11 meters per second m/s and taking into account Prandtl's tip and hub loss factor, the maximum power coefficient and blade tip speed corresponding to Burton's correction are 0.335 and 7.178, respectively, and corresponding to Glauert's correction, are 0.385 and 7.825, respectively. The provided substrate can be used to optimize the blade shape and structure of the INVELOX wind turbine system.

Keywords: Wind energy, Aerodynamics, INVELOX, BEM theory, Parametric study.

این سیستم با توجه به قابلیت افزایش سرعت جریان هوای آزاد و تحویل دادن جریانی با سرعت بالاتر به پره‌های توربین و همچنین قابلیت استفاده از دو و یا چند توربین با قطر کوچکتر نسبت به توربین‌های بادی مرسوم، اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته و گام بزرگی در پیشرفت صنعت انرژی باد برداشته است.

اولین بررسی از توربین‌های بادی پوشش دار توسط رینبرد و لیلی [۱] انجام گرفته است. در این مقاله عملکرد توربین‌های بادی پوشش

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر تلاش‌های بسیاری برای استحصال انرژی از جریان باد و افزایش ظرفیت توربین‌های بادی و بکارگیری سامانه‌های جاذب انرژی نوین صورت گرفته است. یکی از سیستم‌های موفق که به همین منظور طراحی شده است، سیستم اینولاکس می‌باشد. این سیستم ویژگی‌های نوآورانه‌ی بسیاری دارد که مشکلات موجود در زمینه‌ی توربین‌های بادی امروزی را تا حدود زیادی برطرف می‌سازد.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: karimian@modares.ac.ir

دار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از یک طراحی مناسب برای مجرای همگرا-واگرا، توان خروجی حداقل ۶۵ درصد نسبت به حالتی که توربین باد هیچگونه پوششی نداشته باشد، بیشتر خواهد بود. بعدها مفهوم دیگری از توربین های بادی پوشش دار با نام اینولاکس توسط علایی و اندرنوپولوس [۲ و ۳] مطرح گردید که در آن محفظه توربین بر روی زمین قرار می‌گیرد. این طرح مدعی است که با کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری و همچنین افزایش توان تولیدی، راه را برای تجاری شدن توربین‌های بادی پوشش دار می‌گشاید. علایی و همکارانش [۴] به بررسی و ارزیابی استفاده از چند توربین متوالی در سیستم توربین بادی اینولاکس با استفاده از روش تجربی پرداختند و با بررسی عملکرد سیستم با دو و سه توربین دریافتند که بازده سیستم برای دو توربین به میزان ۵۲ درصد و برای سه توربین به میزان ۷۲ درصد نسبت به حالتی که فقط یک توربین در داخل بخش ونتوری سیستم اینولاکس قرار داشته باشد، افزایش خواهد داشت. اصفهانیان و همکارانش [۵] با استفاده از روش صفحه‌های گردابه به بررسی عملکرد توربین‌های پوشش‌دار پرداختند. مزیت این روش، هزینه‌ی زمانی کمتر نسبت به روش‌های مرسوم عددی است و فقط به ضرایب برآ و پسا به‌عنوان ورودی نیاز دارد و می‌تواند برای تمام توربین‌های بادی و توربین‌های بادی پوشش دار استفاده شود. کومار و همکارانش [۶] یک سیستم اینولاکس را در ابعاد کوچکتر طراحی کرده و توسط یک تونل باد مادون صوت عملکرد آن را در سرعت‌های کم بررسی کردند. نتیجه این بود که اینولاکس نسبت به توربین‌های مرسوم کارایی بیشتری داشته و می‌تواند حتی در سرعت‌های باد کم نیز با بازده خوبی توان تولید کند. بیلاج و قاسم [۷] براساس مفهوم پیوستگی، مدل Simulink MATLAB یک سیستم اینولاکس ۳ بعدی را طراحی کردند. براساس این مدل نسبت سرعت بخش ونتوری به ورودی براساس ارتفاع قسمت ورودی بدست می‌آید. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی برای تعیین نسب سرعت تا حد زیادی قابل قبول است.

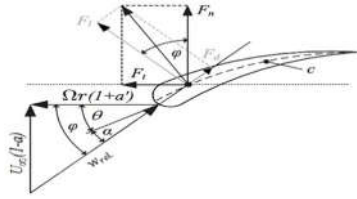
همانگونه که تحلیل عددی در بسیاری از مسائل [۸] کاربرد دارد، از این روش می‌توان در بررسی عملکرد سیستم اینولاکس نیز استفاده نمود. شیرازی و همکارانش [۸] یک سقف آیرودینامیکی قابل کنترل برای ورودی سیستم اینولاکس طراحی کردند. آن‌ها با استفاده از حل عددی به این نتیجه رسیدند که استفاده از این سقف قابل کنترل باعث می‌شود که بازده سیستم می‌تواند به اندازه‌ی ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. ستوده و همکارانش [۹] عملکرد سیستم اینولاکس را در منطقه‌ی سیستان و بلوچستان و به‌صورت عددی تحلیل کردند. آن‌ها مشاهده کردند که اگر ارتفاع ورودی سیستم اینولاکس را از ۱۰ متر به ۴۰ متر افزایش دهند، توان خروجی به میزان ۸۷٫۵ درصد افزایش می‌یابد. حسینی و گنجی [۱۰] طی مطالعات خود، اثر تغییرات هندسه‌ی بخش نازل-دیفیوزر سیستم اینولاکس را بر عملکرد این سیستم و به‌صورت عددی بررسی کردند. عنبرسوز و همکارانش [۱۱] در مطالعه‌ی خود، سه طراحی مختلف برای بخش ورودی اینولاکس پیشنهاد دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از طراحی‌های پیشنهاد شده سرعت جریان در بخش ونتوری به اندازه‌ی ۲۵ درصد افزایش یابد. عنبرسوز و همکارانش [۱۲] به بررسی پارامترهای هندسی دخیل در عملکرد آیرودینامیکی سیستم اینولاکس پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که

مساحت بخش ورودی و قطر بخش ونتوری تاثیر زیادی در افزایش سرعت دارند. در صورتی که تاثیر ارتفاع سازه در این امر کمتر است و در حالت انتخاب هندسه‌ی بهینه، نسبت سرعت جریان در ونتوری به سرعت جریان هوای آزاد برابر ۱٫۹ خواهد بود. گوهر و همکارانش [۱۳] یک طراحی جدید برای سیستم اینولاکس ارائه کرده و سیستم اینولاکس را در حالت‌های وجود یک، دو و یا سه پره‌ی توربین در بخش ونتوری بررسی کردند.

سیستم‌های جذب انرژی باد در میان تمامی سیستم‌های انرژی تجدید پذیر، عملیات نصب، تعمیر و نگهداری دشوارتری داشته و خطرات و خرابی‌های بیشتری نیز دارند. بنابراین نیاز به یک طراحی هوشمندانه دارند تا علاوه بر هزینه‌ی تولید کمتر، کارایی بالاتری داشته باشند. این سیستم‌ها در انواع مختلفی طراحی و تولید می‌شوند که یکی از مهمترین آن‌ها، توربین بادی است. پره‌های توربین بادی مسئول استخراج انرژی باد هستند. این پره‌ها از ایرفویل‌هایی تشکیل می‌شوند که توزیع وتر و زاویه پیچش این پره‌ها در شکل‌گیری کلیت پره اهمیت دارد. یکی از روش‌های کاربردی برای دستیابی به توزیع وتر و زاویه پیچش بهینه، نظریه BEM است. اساس نظریه BEM، نظریه پیشران است که قبلتر توسط گلوارت [۱۴] ارائه شده بود.

هسیانو و همکارانش [۱۵] به بررسی سه نوع مختلف از توربین‌های بادی محور افقی با قطر ۰/۷۲ متر و به‌صورت تجربی و عددی پرداختند. در این پژوهش از تونل باد به منظور دستیابی به ضریب توان هر سه پره استفاده شده است. تانگ و همکارانش [۱۶] یک روش مستقیم برای طراحی و ارزیابی پره‌های توربین‌های با ابعاد کوچک ارائه کرده و با استفاده از یک مدل آیرودینامیکی، توزیع وتر و زاویه پیچش پره را بدست آوردند. مسترز و همکارانش [۱۷] در مقاله خود یک روش عددی بسیار قوی برای تحلیل و ارزیابی توربین‌هایی که از جریابهای دریایی و جریابهای جزر و مدی استفاده می‌کنند، ارائه کرده و مدل را با استفاده از تصحیح پرانتل برای نوک پره و تویی گسترش دادند. کریمیان و راسخ [۱۸] به تجزیه و تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی شناور محور افقی NREL ۵ مگاواتی با هدف بررسی اثرات حرکت سکوی شناور بر روی ویژگی‌های آیرودینامیکی توربین پرداختند. طحانی و همکارانش [۱۹] نیز به طراحی یک توربین محور افقی ۱ مگاواتی با استفاده از خطی سازی توزیع وتر و زاویه پیچش به منظور دستیابی به بیشینه ضریب توان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ۶۰ تا ۶۴ و ۳۰ تا ۳۷ درصد پره بهترین نقاط برای اعمال خطی سازی توزیع وتر و زاویه پیچش می‌باشند.

اثر حضور پره‌های توربین تعبیه شده در بخش ونتوری سیستم اینولاکس در مشخصه‌های جریان و نیز مدل‌سازی تحلیلی یک توربین باد بهینه و منحصر به فرد برای استفاده در بخش ونتوری این سیستم از جمله مواردی هستند که در بررسی‌های پیشین توجه زیادی به آن‌ها نشده است. در مقاله حاضر هدف این است که با استفاده از نظریه BEM و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل و تصحیح دنبال آشفته به طراحی یک توربین باد با توزیع وتر و زاویه پیچش بهینه برای استفاده در بخش ونتوری سیستم توربین باد اینولاکس پرداخته شود. سپس توربین باد طراحی شده از منظر آیرودینامیکی مورد تحلیل، بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.



شکل ۲- نیروهای آیرودینامیکی وارد بر مقطع عرضی یک پره [۲۲]

در شکل ۲ جزئیات نیروهای آیرودینامیکی وارد بر مقطع عرضی یک پره از توربین باد محور افقی آورده شده است. با فرض تعداد مشخصی المان روی هر پره، نیروی پیشران و گشتاور وارد بر هر المان به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه خواهد شد [۲۱]:

$$dT = \sigma \pi \rho \frac{(1-a)^2 U_\infty^2}{\sin^2 \phi} (C_L (\cos \phi) + C_d (\sin \phi)) r dr \quad (3)$$

$$dQ = \sigma \pi \rho \frac{(1-a)^2 U_\infty^2}{\sin^2 \phi} (C_L (\sin \phi) - C_d (\cos \phi)) r dr \quad (4)$$

۲-۳- تصحیحات نظریه المان پره

برای افزایش دقت حل مساله، تصحیحات پرناتل و دنباله آشفته به نظریه المان پره اعمال می‌شود. گردابه‌های نوک بال برای یک روتور با تعداد پره محدود، کاملاً متفاوت از یک روتور با تعداد پره بی‌نهایت است. تا به اینجای کار روابط به گونه‌ای هستند که در واقع تعداد پره‌ها بی‌نهایت فرض شده‌اند. در واقع اصلاح پرناتل اثر عدم پیوستگی دیسک دوران را لحاظ می‌کند. ضریب اصلاح پرناتل که شامل دو ضریب اصلاح نوک پره و توپی می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F = \left[\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin(\phi)}} \right) \right] \left[\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(e^{-\frac{B}{2} \frac{r-R_{hub}}{r \sin(\phi)}} \right) \right] \quad (5)$$

در صورتی که مقدار ضریب القایی محوری از عدد ۰/۵ بزرگتر باشد، مقدار سرعت در خروجی حجم کنترل منفی بدست می‌آید. بنابراین نیاز است که اصلاحاتی به روابط بدست آمده اعمال شود. برای این منظور روابط متعددی توسط گلوآرت [۱۴]، انگلستون [۲۳]، بل [۲۴] و برتون [۲۵] ارائه شده است که مهمترین آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مدل‌های مختلف ارائه شده برای تصحیح دنباله آشفته

مدل	ضریب القایی محوری بحرانی	ضریب نیروی پیشران اصلاح شده
گلوآرت [۱۴]	۰/۲	$4a(1 - \frac{(5-3a)a}{4})F$
برتون و همکاران [۲۵]	۰/۳۲۶۲	$1.816 - 4(\sqrt{1.816} - 1)(1-a)$

۲-۴- نظریه BEM

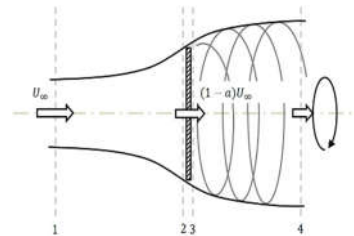
حال می‌توان با ترکیب نظریه‌های تکانه و المان پره روابط مورد نیاز را استخراج کرد. به این ترتیب که نیروی پیشران بدست آمده برای هر کدام از المان‌های حلقوی در راستای پره توسط نظریه تکانه و نظریه المان پره با هم برابر قرار می‌گیرند. در نتیجه ضریب القایی محوری و ضریب القایی مماسی به صورت دو رابطه (۶) و (۷) بدست می‌آیند [۲۱].

۲- معادلات حاکم

نظریه BEM از ترکیب دو روش نظریه المان پره و نظریه تکانه بدست آمده است. در این نظریه ابتدا فرض می‌شود که می‌توان هر پره را به تعداد محدودی المان مستقل از هم تقسیم کرد. پس از اعمال این تقسیم بندی، از نظریه تکانه برای بدست آوردن سرعت‌های القایی در جهت محوری و مماسی در هر کدام از آن مقاطع پره، استفاده می‌گردد. سپس نیروهای آیرودینامیکی برای هر کدام از آن مقاطع و توسط نظریه المان پره محاسبه می‌گردند. در نهایت با تکرار نمودن شرایط ورودی مساله، می‌توان نیروهای آیرودینامیکی کل وارد بر توربین باد را برای هر کدام از این شرایط استخراج نمود.

۲-۱- نظریه تکانه

در نظریه تکانه، همانند شکل ۱ یک حجم کنترل در اطراف روتور فرض می‌شود. بدلیل وجود صفحه روتور در این حجم کنترل، در فشار درون حجم کنترل ناپیوستگی ایجاد می‌شود. در نهایت می‌توان با بهره گیری از معادلات بقای جرم، توان و نیروی پیشران را محاسبه نمود. به-منظور افزایش دقت نظریه تکانه، اثرات چرخش دنباله نیز در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- حجم کنترل انتخابی در اطراف یک روتور با چرخش دنباله

[۲۰]

سرعت زاویه‌ای چرخش روتور (ω) بزرگتر از سرعت زاویه‌ای چرخش جریان (Ω) است، بنابراین می‌توان با دقت قابل قبولی فشار جریان آزاد و فشار دوردست دنباله را برابر فرض نمود. پس از عبور جریان از روتور و اعمال اثرات چرخش روتور، مقدار سرعت زاویه‌ای جریان بیشتر شده و به $\Omega + \omega$ می‌رسد. در نهایت می‌توان با استفاده از قانون برنولی و قانون بقای تکانه زاویه‌ای، نیروی پیشران و گشتاور روتور را به صورت روابط (۱) و (۲) استخراج نمود [۲۱]:

$$dT = 4\pi \rho a(1-a)U_\infty^2 r dr \quad (1)$$

$$dQ = 4\pi \rho U_\infty a'(1-a)\Omega r^3 dr \quad (2)$$

که a ، ضریب القایی محوری و a' ، ضریب القایی مماسی بوده و به صورت $a' = \frac{\omega}{2\Omega}$ تعریف می‌شود.

۲-۲- نظریه المان پره

در این روش تعدادی متناهی المان روی پره در نظر گرفته شده و پارامترهای تاثیرگذار اعم از نیرو و گشتاور برای هر یک از این المان‌ها محاسبه می‌گردند. در نهایت با انتگرالگیری در راستای پره می‌توان نیرو و ممان کل وارد بر هر پره را بدست آورد.

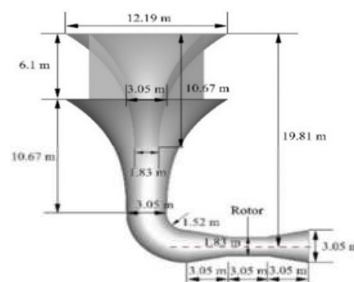
$$a = 1 / \left(\frac{4F \sin^2(\phi)}{\sigma C_n} + 1 \right) \quad (6)$$

$$a' = 1 / \left(\frac{4F \sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma C_t} - 1 \right) \quad (7)$$

رابطه (۷) فقط در حالتی که ضریب القایی محوری از مقدار بحرانی کوچکتر باشد ($a < a_c$) صادق است. اگر ضریب القایی محوری از مقدار بحرانی بزرگتر باشد ($a > a_c$)، می‌بایست با استفاده از یکی از مدل‌های مختلف ارائه شده برای تصحیح دنباله آشفته (همانند آنچه در جدول ۱ ذکر شد) مقدار ضریب نیروی پیشران و سپس مقدار ضریب القایی محوری جدید را بدست آورد. با مشخص شدن ضریب القایی محوری اصلاح شده می‌توان با استفاده از یک الگوی تکراری مقادیر ضریب القایی محوری را برای هر المان در راستای پره محاسبه نمود.

۳- معرفی هندسه و سیستم مبنا

شکل ۳ ابعاد هندسه سه بعدی سیستم توربین بادی اینولاکس مورد مطالعه و نیز محل قرارگیری توربین باد در بخش ونتوری این سیستم را نشان می‌دهد. ابعاد واقعی هندسه نیز در جدول ۲ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، سیستم توربین بادی اینولاکس طوری طراحی شده است که جریان باد را از تمام جهات جذب می‌کند و بنابراین نیازی به تنظیم مستقیم و یا غیرمستقیم جهت پره‌های توربین به سمت جهت وزش باد نیست. جریان باد جذب شده توسط ورودی سیستم اینولاکس، به سمت پایین منتقل شده و پس از عبور از یک زانویی، در بخش ونتوری به پره‌های توربین یا توربین‌های تعبیه شده در سطح زمین تابیده می‌شود.



شکل ۳- ابعاد واقعی یک سیستم توربین باد اینولاکس [۲۶]

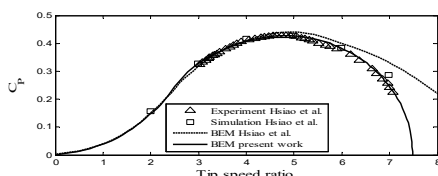
جدول ۲- مشخصات هندسی سیستم اینولاکس

پارامتر	نماد	ابعاد (متر)
قطر بالایی قیفی	$D_{Funnel\ Upper}$	۱۲/۱۹
ارتفاع کل	H	۲۱/۳۴
ارتفاع قیفی	H_{Funnel}	۱۰/۶۷
قطر پایینی قیفی	$D_{Funnel\ Lower}$	۱/۸۳
ارتفاع ورودی	H_{Inlet}	۶/۱
قطر ونتوری	$D_{Venturi}$	۱/۸۳
قطر خروجی	D_{Outlet}	۳/۰۵

۴- اعتبارسنجی

هدف از این بخش، بررسی اعتبار کد MATLAB روش BEM طراحی شده است. قرارگیری توربین باد در بخش ونتوری سیستم اینولاکس چالش‌هایی دارد که این چالش‌ها شامل اثرات لایه مرزی، پروفیل سرعت و آشفته‌گی جریان درون بخش ونتوری سیستم می‌باشند.

در حقیقت این اثرات مستقیماً در مدلسازی کار حاضر وارد نشده و به دو صورت خود را نشان می‌دهند. سرعت جریانی که توسط توربین باد در بخش ونتوری حس می‌شود، سرعتی است که توسط مراجع [۲ و ۳] و پس از مدلسازی عددی ارائه شده است. ضرایب تصحیح که در نظریه BEM اعمال می‌شوند (در بخش ۳-۲ توضیح داده شد)، تا حدودی این اثرات را پوشش می‌دهند. نهایتاً به منظور انجام فرآیند اعتبارسنجی، کد متلب روش BEM روی مدل پره بهینه هسیانو و همکارانش [۱۵] اعمال شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی و عددی پژوهش مذکور مقایسه خواهد شد. آن‌ها به بررسی سه نوع مختلف توربین بادی محور افقی با قطر ۰/۷۲ متر و به صورت تجربی و عددی پرداختند. این سه مدل شامل مدل‌های پره بهینه، پره با توزیع زاویه پیش‌پهینه و با توزیع وتر ثابت و پره با توزیع وتر ثابت و بدون پیش‌پهینه می‌باشند. لازم به توضیح است که علت انتخاب مرجع [۱۵] به منظور انجام اعتبارسنجی کد BEM، نزدیک بودن قطر روتور به کار رفته در این مرجع و کار حاضر می‌باشد. همچنین در مرجع [۱۵] بررسی تجربی نیز صورت گرفته است که می‌تواند به اعتبار فرآیند اعتبارسنجی بیافزاید. در شکل ۶ مقایسه نتایج ضریب توان بر حسب ضریب سرعت نوک پره حاصل از کد BEM طراحی شده در کار حاضر، با در نظر گرفتن تاثیر ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پرائتل و نیز تصحیح گلوآرت، و نتایج تجربی، نتایج عددی نرم‌افزار Fluent و نتایج روش BEM برای پره بهینه طراحی شده توسط مرجع [۱۵] ارائه شده است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، میان نتایج حاصل از کد BEM کار حاضر، با در نظر گرفتن تاثیر ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پرائتل و نیز تصحیح گلوآرت، و نتایج تجربی، عددی و مدلسازی BEM مرجع [۱۵] توافق خوبی برقرار است. اطلاعات مربوط به پره بهینه مرجع [۱۵]، که اعتبارسنجی بر روی آن صورت گرفته است، در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۴- اعتبارسنجی کد BEM با در نظر گرفتن تاثیر ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پرائتل و نیز تصحیح گلوآرت برای پره بهینه مرجع [۱۵]

جدول ۳- اطلاعات مربوط به توربین بهینه هسیانو و همکارانش [۱۵]

۵۰	توان نامی (وات)
۱۰	سرعت وزش باد (متر بر ثانیه)
۵	نسبت سرعت نوک پره در نقطه طراحی
۳	تعداد پرها
۵/۵	زاویه حمله در نقطه طراحی (درجه)
NACA4418	نوع مقطع استفاده شده

۵- نتایج کد نیمه تحلیلی BEM

۵-۱- بهینه‌سازی هندسه

با توجه به اینکه قطر محل ونتوری سیستم اینولاکس ارائه شده توسط توسط علایی و اندرئوپولوس [۲ و ۳] برابر ۱/۸۲۸ متر است، و

۴-۵- مطالعه پارامتری

نتایج حاصل از کد MATLAB روش BEM را می‌توان به‌طور کیفی به دو دسته تقسیم نمود. این دو دسته شامل تغییرات پارامترهای مختلف در راستای طول پره و تغییرات پارامترهای مختلف بر حسب نسبت سرعت نوک پره می‌باشند. در این مقاله در ابتدا به بررسی تغییرات پارامترهای مختلف بر حسب نسبت سرعت نوک پره پرداخته شده و یک توربین باد بهینه برای بکارگیری در سیستم اینولاکس پیشنهاد می‌گردد و سپس تغییرات پارامترهای مختلف در راستای طول پره برای پره‌های توربین پیشنهاد شده بررسی خواهند شد.

۳-۵- مطالعه پارامتری بر حسب نسبت سرعت نوک پره

در ابتدا و به‌منظور تحلیل پارامترهای مختلف بر حسب نسبت سرعت نوک پره و با توجه به فرآیند استقلال از شبکه، ۲۰ المان بر روی هر پره فرض شده است. همانطور که در بخش اعتبارسنجی آورده شد، ترکیب ضرایب اصلاح نوک پره و تویی پرانتل و نیز تصحیح گلوآرت توانستند توافق خوبی را با نتایج مرجع [۱۵] رقم بزنند. حال در این بخش تاثیر هرکدام از ضرایب اصلاح نوک پره، اصلاح تویی، تصحیح گلوآرت، تصحیح برتون و نیز تعداد پره‌ها ارزیابی و مقایسه می‌شوند تا در نهایت با استفاده از بهترین الگوریتم انتخابی بتوان توربین مناسبی را برای به کار گیری در بخش ونتوری سیستم اینولوکس پیشنهاد کرد. در شکل ۶ نموداری از مقایسه تغییرات ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای دو حالت تصحیح دنباله آشفته گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره پرانتل برای هر دو حالت و برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه [۲] و [۳] و تعداد پره ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که در این نمودار فقط ضریب اصلاح نوک پره پرانتل دخالت داده شده و اثری از ضریب اصلاح تویی پرانتل در این دو وجود ندارد. همانطور که ملاحظه می‌شود تا حوالی نسبت سرعت نوک پره ۵ دو نمودار بر هم منطبق‌اند. اما با افزایش نسبت سرعت نوک پره، دو نمودار از هم فاصله می‌گیرند. این فاصله رفته رفته افزایش پیدا می‌کند تا اینکه در حوالی نقطه بیشینه ضریب توان، به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همانطور که ملاحظه می‌گردد از نقطه بیشینه ضریب توان به بعد، این فاصله ثابت باقی می‌ماند. در نواحی فوق‌الذکر، نمودار مربوط به تصحیح دنباله آشفته برتون همواره پایین نمودار مربوط به تصحیح دنباله آشفته گلوآرت است. بیشینه ضریب توان در تصحیح گلوآرت برابر ۰/۴۴۶ بوده و در نسبت سرعت نوک پره ۷/۹۱۲ رخ می‌دهد. در صورتی که بیشینه ضریب توان در تصحیح برتون برابر ۰/۳۸۴ بوده و در نسبت سرعت نوک پره ۷/۱۷۸ اتفاق می‌افتد.

با توجه به نتایج ارائه شده در مرجع [۲۷]، قطر توربین برابر ۱/۷۳۳۶ متر و قطر تویی برابر ۰/۰۹۵۲ متر در نظر گرفت شده‌اند. لازم به توضیح است که ۰/۴۷۶ متر ابتدایی شعاع پره‌ها برای تویی در نظر گرفته شده است. یعنی در عمل طول هر پره برابر ۰/۸۱۹۲ متر است. در گزارشی که توسط تانجیر و سومرز [۲۸] ارائه شده، برای پره‌های با طول ۱ تا ۵ متر، ایرفویل‌های NREL-S822 و NREL-S823 به ترتیب برای مقاطع حوالی ریشه و مقاطع حوالی نوک پره پیشنهاد شده است که به‌علت طول کم پره‌ها با توجه به محدودیت قطر محل ونتوری سیستم اینولاکس، در این مقاله از ایرفویل NREL-S823 برای تمام مقاطع پره استفاده شده است. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که تغییرات عدد رینولدز بجز در نواحی ابتدایی و انتهایی پره ناچیز است. با در نظر گرفتن این نتیجه و نیز با توجه به نتایج مراجع [۲] و [۳] و با در نظر گرفتن سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه برای جریان باد در بخش ونتوری و با توجه به محدوده تغییرات طول وتر [۱۵]، مقدار رینولدز در نواحی میانی پره (۷۵ درصد طول پره) و در محل ونتوری در حدود $Re = \frac{\rho V C_{me}}{\mu} \approx 10^5$ می‌باشد. در جدول ۴ داده‌های مربوط به ایرفویل NREL-S823 در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ آورده شده‌اند.

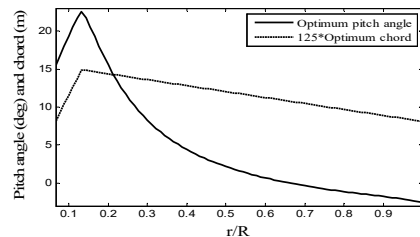
جدول ۴- داده‌های ایرفویل NREL-S823 در رینولدز ۱۰۰۰۰ [۲۹]

NREL-S823	مقطع
۹	N_{crit}
۸۶/۱۵	$(C_L/C_D)_{max}$
۰۷	α_{opt}
۱/۰۸۲	$C_{L,\alpha_{opt}}$
۰/۰۱۲۵۶	$C_{D,\alpha_{opt}}$

اطلاعات مربوط به توربین طراحی شده بصورت خلاصه در جدول ۵ آورده شده است. با در نظر گرفتن زاویه حمله بهینه برای ایرفویل NREL-S823 در نقطه طراحی و در نظر گرفتن المان‌هایی به طول ۰/۱ متر روی پره، نمودار توزیع وتر و زاویه پیچش با بهره‌گیری از نتایج مرجع [۲۱] و نیز با استفاده از کد BEM که در بخش قبل اعتبارسنجی شد، به‌صورت شکل ۵ بدست می‌آید.

جدول ۵- اطلاعات مربوط به توربین طراحی شده

۳	تعداد پره
۰/۸۱۹۲ متر	طول هر پره
۱/۷۳۳۶ متر	قطر روتور
۰/۰۹۵۲ متر	قطر تویی
از محل تویی تا ۰/۴۷۶ متر	مقاطع استفاده شده
از ۰/۴۷۶ متر تا ۰/۸۶۶۸ متر	

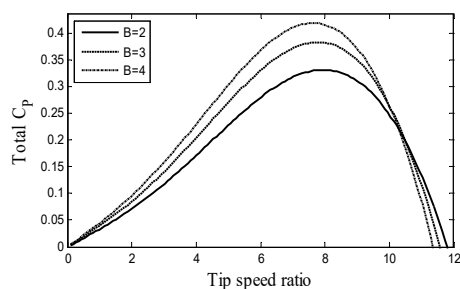


شکل ۵- نمودار توزیع وتر بهینه و توزیع زاویه پیچش بهینه در راستای پره

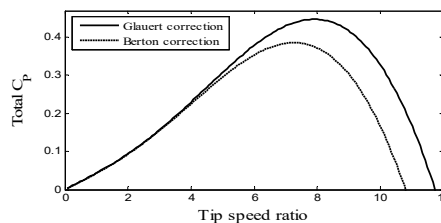
جدول ۶- ضریب توان بیشینه برای دو تصحیح گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن اثر ضریب اصلاح نوک پره و اثر توام ضریب اصلاح نوک پره

و تویی پراتنل		
مدل	ضریب توان بیشینه	نسبت سرعت نوک پره در ضریب توان بیشینه
تصحیح گلوآرت و اثر اصلاح نوک پره	۰/۴۴۶	۷/۹۱۲
تصحیح گلوآرت و اثر توام اصلاح نوک پره و تویی	۰/۳۸۵	۷/۸۲۵
تصحیح برتون و اثر اصلاح نوک پره	۰/۳۸۴	۷/۱۷۸
تصحیح برتون و اثر توام اصلاح نوک پره و تویی	۰/۳۳۵	۷/۰۹۵

در شکل ۸ و جدول ۷ ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای تعداد پره‌های مختلف و با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تعداد پره‌هایی که بر روی تویی تعبیه می‌شوند در مقدار ضریب توان تاثیر بسزایی دارد. برای تعداد ۲ پره بیشینه ضریب توان برابر ۰/۳۲۸ در نسبت سرعت نوک پره ۸/۰۰۲، برای تعداد ۳ پره همانطور که قبلا نیز ذکر شد بیشینه ضریب توان برابر ۰/۳۸۵ در نسبت سرعت نوک پره ۷/۸۲۵ و برای تعداد ۴ پره بیشینه ضریب توان برابر ۰/۴۳۹ در نسبت سرعت نوک پره ۷/۵۴۷ می‌باشد. همانطور که قابل ملاحظه است، با افزایش تعداد پره‌ها از ۲ به ۳، بیشینه ضریب توان ۱/۱۹۳ برابر و با افزایش تعداد پره‌ها از ۳ به ۴، بیشینه ضریب توان ۱/۱۲۵ برابر گردیده است و مقدار نسبت سرعت نوک پره متناظر با بیشینه توان با کم شدن تعداد پره‌ها و به علت کاهش صلیب روتور مقداری افزایش یافته است. نکته دیگر در این است که سه نمودار در بازه نسبت سرعت نوک پره ۹/۹۷۵ تا ۱۰/۵۱۵ سه نمودار بهم برخورد می‌کنند. نمودارهای مربوط به ۳ و ۴ پره در نسبت سرعت نوک پره ۹/۹۷۵، نمودارهای مربوط به ۲ و ۴ پره در نسبت سرعت نوک پره ۱۰/۳ و نمودارهای مربوط به ۲ و ۳ پره در نسبت سرعت نوک پره ۱۰/۵۱۵ همدیگر را قطع می‌نمایند. تا در نهایت برخلاف روندی که سه نمودار تا قبل از این طی می‌کرده‌اند که نمودار مربوط به ۴ پره در بالا و نمودار مربوط به ۲ پره در پایین قرار داشت، نمودار مربوط به ۲ پره در بالا و نمودار مربوط به ۴ پره در پایین قرار گرفته است.

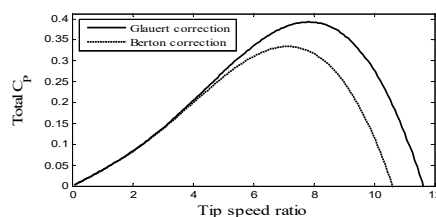


شکل ۸- ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای تعداد پره‌های مختلف و با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه



شکل ۶- ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای تصحیح گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره پراتنل برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه و تعداد پره ۳

در شکل ۷ نیز نمودار تغییرات ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای دو حالت تصحیح دنباله آشفته گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره پراتنل و ضریب اصلاح تویی پراتنل برای هر دو حالت و برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه و تعداد پره ۳ آورده شده است. در واقع تفاوت نمودار شکل‌های ۶ و ۷ فقط در ضریب اصلاح تویی پراتنل است. در این حالت همانطور که ملاحظه می‌گردد، مقدار بیشینه ضریب توان نسبت به حالتی که فقط ضریب اصلاح نوک پره اثر داده شده است، کاهش یافته است. در این حالت بیشینه ضریب توان در حالت تصحیح گلوآرت برابر ۰/۳۸۵ بوده و در نسبت سرعت نوک پره ۷/۸۲۵ رخ می‌دهد. در صورتی که بیشینه ضریب توان در تصحیح برتون برابر ۰/۳۳۵ بوده و در نسبت سرعت نوک پره ۷/۰۹۵ اتفاق می‌افتد. همانطور که مشهود است پس از دخالت دادن اثر ضریب اصلاح تویی پره، مقدار بیشینه ضریب توان در حالت تصحیح گلوآرت ۰/۸۶۳ برابر و در حالت تصحیح برتون ۰/۸۷۲ برابر و نسبت سرعت نوک پره متناظر در حالت تصحیح گلوآرت ۰/۹۸۹ برابر و در حالت تصحیح برتون ۰/۹۸۸ برابر شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اصلاح تویی پره باعث تعدیل نیرو و گشتاور و نهایتاً کاهش مقادیر ضریب توان و سرعت نوک پره متناظر می‌شود.



شکل ۷- ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای تصحیح گلوآرت و برتون و با در نظر گرفتن ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه و تعداد پره ۳

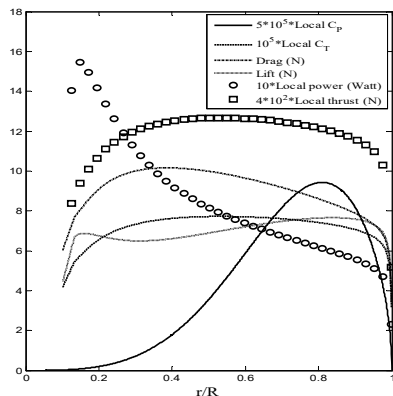
همانطور که اشاره شد، اثر دادن ضریب اصلاح تویی علاوه بر ضریب اصلاح نوک پره، سبب می‌شود که مقدار ضریب توان در هر نسبت سرعت نوک پره کاهش پیدا کند. که بیشترین کاهش ضریب توان در نقطه بیشینه ضریب توان رخ می‌دهد. اشاره شد که پس از دخالت دادن اثر ضریب اصلاح نوک پره، مقدار بیشینه ضریب توان در حالت تصحیح گلوآرت ۰/۸۷۹ برابر و در حالت تصحیح برتون ۰/۸۶۷۱ برابر شده است. در جدول ۶ مقایسه ضریب توان برای دو تصحیح گلوآرت و برتون و اثر ضریب اصلاح نوک پره و اثر توام ضریب اصلاح نوک پره و تویی پراتنل آورده شده است.

جدول ۸ نیز اطلاعات مربوط به نقطه طراحی توربین بادی طراحی شده آورده شده است.

جدول ۸- اطلاعات مربوط به نقطه طراحی توربین طراحی شده با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و اثر توام ضریب اصلاح نوک پره و توپی
پرانتل برای سرعت ۱۰/۶ متر بر ثانیه و تعداد پره ۳

۰/۳۸۵	ضریب توان
۷/۸۲۵	نسبت سرعت نوک پره
۹۵	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)

با مشخص بودن نقطه بهینه طراحی، می‌توان نمودار پارامترهای مختلف در راستای طول پره را برای این نقطه رسم نمود. در این بخش به منظور افزایش دقت نمودارها و داده‌های استخراج شده در راستای هر پره، ۱۰۰۰ المان روی هر پره در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، نمودار توان در راستای پره برای سرعت باد ۱۰/۶ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۹۵ دور بر دقیقه آورده شده است. هر نقطه روی این نمودار بیانگر میزان توان تولید شده در آن المان از پره است. همانطور که ملاحظه می‌شود، از انتهای قسمت توپی یعنی شعاع ۰/۰۴۷۶ متر که پره آغاز می‌شود تا شعاع ۰/۱۲ متر که در آن طول وتر بیشینه (۰/۱۱۹ متر) بوده و بیشینه زاویه پیش ۲۲/۵۳۸ (درجه) در آن رخ می‌دهد، روند نمودار به صورت صعودیست تا اینکه در شعاع ۰/۱۲ متر بیشترین توان تولیدی اتفاق می‌افتد که مقدار آن برابر ۰/۵۱۶ وات می‌باشد. لازم به ذکر است که در این ناحیه، همانطور که در شکل ۵ به وضوح دیده می‌شود، طول وتر و زاویه پیش پره، هر دو صعودی هستند و در نقطه فوق‌الذکر (شعاع ۰/۱۲ متر)، طول وتر و زاویه پیش بیشترین مقدار خود را دارند. پس از این نقطه، همانند روند نزولی توزیع طول وتر و زاویه پیش، نمودار توان نیز روند نزولی به خود می‌گیرد تا اینکه در شعاع ۰/۹ متر به حوالی مقدار صفر می‌رسد. این روند منطقی است، چرا که با کاهش طول وتر در راستای پره، طبیعتاً مقدار تولیدی توسط آن المان کاهش خواهد یافت. با انترگرالی از نمودار توان در راستای پره، می‌توان کل توان تولید شده توسط کل روتور را بدست آورد. برای نسبت سرعت نوک پره ۷/۸۲۵ و تعداد ۳ پره، مقدار کل توان تولیدی معادل ۸۱۹/۰۶۲ وات بدست می‌آید. این مقدار در اصل همان مساحت زیر نمودار توان در شکل ۱۰ می‌باشد.

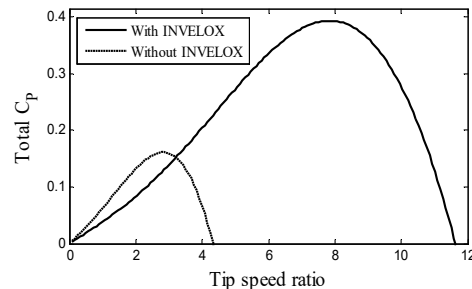


شکل ۱۰- نمودارهای توان، نیروی پیشران، برآ، پسا، ضریب توان و ضریب پیشران در راستای پره برای سرعت باد ۱۰/۶ متر بر ثانیه

جدول ۷- ضریب توان بیشینه برای تصحیح گلوآرت با در نظر گرفتن اثر توام ضریب اصلاح نوک پره و توپی پرنتل برای تعداد پره‌های مختلف

مدل	تعداد پره	ضریب توان بیشینه	نسبت سرعت نوک پره در ضریب توان بیشینه
تصحیح گلوآرت و اثر توام اصلاح نوک پره و توپی	۲	۰/۳۲۸	۸/۰۰۲
	۳	۰/۳۸۵	۷/۸۲۵
	۴	۰/۴۳۹	۷/۵۴۷

همانطور که ملاحظه می‌گردد با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که از ترکیب ضرایب اصلاح نوک پره و توپی پرنتل و نیز تصحیح گلوآرت بهره گرفته شود. بنابراین می‌توان ادعا نمود که پروفیلی که برای توزیع وتر و توزیع زاویه پیش پره‌های توربین در بخش ۵-۱ پیشنهاد گردید بهینه بوده و توربین باد با مشخصات ارائه شده در جدول ۵ و با توزیع وتر و زاویه پیشی که در شکل ۵ آورده شده است، برای استفاده در بخش ونتوری سیستم اینولاکس پیشنهاد می‌گردد. در نهایت نیز به منظور اثبات تاثیر سیستم اینولاکس بر توان استحصال شده از جریان باد، نمودار ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای توربین باد پیشنهاد شده در دو حالت با اینولاکس و بدون اینولاکس در شکل ۹ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که توان استحصال شده از توربین باد طراحی شده در صورت استفاده در بخش ونتوری سیستم اینولاکس ۲/۴۴۲۵ برابر حالتی است که این توربین بدون حضور اینولاکس در برابر جریان آزاد قرار گیرد.



شکل ۹- ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره برای توربین باد پیشنهاد شده در دو حالت با اینولاکس و بدون اینولاکس

۴-۵- مطالعه پارامتری در راستای طول پره

پس از بررسی تغییرات پارامترهای مختلف بر حسب نسبت سرعت نوک پره، به بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در راستای طول پره پرداخته خواهد شد. در ابتدا نیاز است که با توجه به سرعت بادی که در محل ونتوری سیستم توربین بادی اینولاکس بدست آمد، نقطه بهینه طراحی تعیین شود. منظور از نقطه بهینه طراحی همان نسبت سرعت نوک پره متناظر با ضریب توان بیشینه در سرعت باد ۱۰/۶ متر بر ثانیه است. با در نظر گرفتن تصحیح گلوآرت و اثر توام اصلاح نوک پره و توپی، بیشینه ضریب توان برابر ۰/۳۸۵ بوده و در نسبت سرعت نوک پره ۷/۸۲۵ رخ می‌دهد. که با در نظر گرفتن سرعت باد ۱۰/۶ متر بر ثانیه، این نقطه متناظر با سرعت دورانی ۹۵ دور بر دقیقه است. در

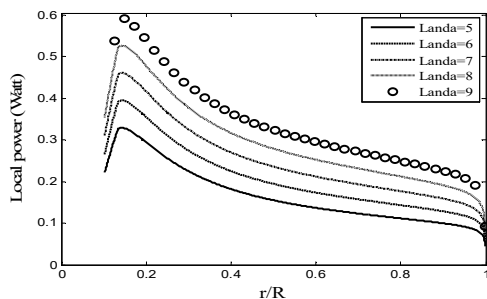
نمودار نیروی پیشران در راستای پره برای سرعت باد $10/6$ متر بر ثانیه و سرعت دورانی 95 دور بر دقیقه نیز در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود. همانگونه که مشهود است، روند نمودار در ابتدا صعودی است و رفته رفته شیب این صعود کاهش می‌یابد تا اینکه در شعاع $0/455$ متر به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در این نقطه مقدار نیروی پیشران برابر $0/1$ نیوتون است. سپس نمودار روند نزولی به خود می‌گیرد و با نزدیک شدن به انتهای پره، رفته رفته شیب این نزول افزایش می‌یابد و در انتهای پره به حوالی $0/04$ نیوتون می‌رسد. مجدد با استفاده از انتگرالگیری می‌توان مقدار کل نیروی پیشران روتور را بدست آورد که این مقدار برای نسبت سرعت نوک پره $7/825$ و تعداد 3 پره معادل $21/912$ نیوتون می‌باشد.

نمودار نیروی برآ در راستای پره برای سرعت باد $10/6$ متر بر ثانیه و سرعت دورانی 95 دور بر دقیقه نیز در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همانطور که مشهود است در ابتدا روند نمودار صعودیست تا اینکه نمودار در شعاع $0/1445$ متر بیشینه موضعی خود را حس می‌کند. مقدار نیروی برآ در این نقطه برابر $2/29$ نیوتون است. سپس نیروی برآ به علت تغییر در روند تغییرات وتر و افزایش احتمال وقوع استال، دچار کاهش شده و در شعاع $0/2797$ دچار کمینه موضعی می‌شود. در این نقطه مقدار نیروی برآ برابر $2/165$ نیوتون می‌باشد. در ادامه نمودار روند صعودی به خود گرفته و در شعاع $0/7537$ متر به بیشینه مقدار خود یعنی $2/552$ نیوتون می‌رسد. در شکل ۱۰ نمودار نیروی پسا نیز برای شرایط مشابه فوق‌الذکر ارائه شده است. نیروی پسا نیز در ابتدا روندی صعودی دارد و در شعاع $0/3478$ متری به بیشینه مقدار خود معادل $2/387$ نیوتون می‌رسد. از این نقطه به بعد روند نیروی پسا تغییر کرده و نزولی می‌شود. انتظار می‌رود که نقاط ابتدایی پره در محدوده استال قرار داشته باشند، بنابراین در این نقاط نسبت به نقاط انتهایی پره نیروی پسا بیشتر و نیروی برآ کمتر است. از این استدلال می‌توان نتیجه گرفت که روند نیروی پسا نزولی بوده و روند نیروی برآ در راستای پره بعد از کاهشی که پس از نقطه بیشینه وتر حس می‌کند، صعودی باشد [۳۰ و ۳۱].

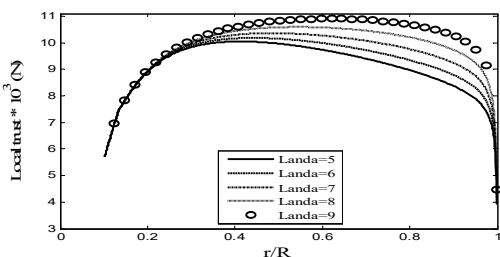
در شکل ۱۰ نمودار ضریب توان در راستای پره برای سرعت باد $10/6$ متر بر ثانیه و نیز سرعت دورانی 95 دور بر دقیقه نیز ملاحظه می‌گردد. همانطور که انتظار می‌رفت، روند کلی نمودار ضریب توان محلی، درست همانند روند کلی نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره می‌باشد. در نمودار ضریب توان محلی بیشینه ضریب توان تقریباً در نزدیکی‌های نوک پره و در این حالت خاص در شعاع $0/7182$ متر رخ می‌دهد و این بیشینه ضریب توان برابر $1/887 \times 10^{-5}$ می‌باشد. لازم به توضیح است که مقدار ضریب توان محلی در هر المان از پره کاملاً وابسته به تعداد المان‌های انتخابی روی پره است و در صورت انتخاب عدد دیگری برای تعداد المان‌های انتخابی این عدد نیز طبیعتاً متفاوت خواهد شد. همانطور که پیشتر گفته شد، نقاط ابتدایی پره چون بیشتر در معرض استال قرار دارند، بنابراین سهم کمتری در تولید توان خواهند داشت. در نتیجه انتظار می‌رود که محل رخداد بیشینه ضریب توان در نقاط انتهایی پره باشد [۳۱]. در شکل ۱۰ نمودار ضریب نیروی پیشران در شرایط مشابه فوق‌الذکر نیز آورده شده است. همانطور که در این نمودار ملاحظه می‌گردد، روند کلی این نمودار مشابه روند کلی در نمودار نیروی پیشران می‌باشد. در شکل‌های

۱۱ تا ۱۶ به ترتیب نمودارهای توان، نیروی پیشران، نیروی برآ، نیروی پسا، ضریب توان و ضریب نیروی پیشران در راستای پره و برای سرعت باد $10/6$ متر بر ثانیه و تعداد پره 3 ، در نسبت سرعت نوک پره‌های 5 تا 9 ارائه گردیده است.

رفتار توان، نیروی پیشران، نیروی برآ و ضریب نیروی پیشران، با افزایش نسبت سرعت نوک پره یکسان است و مقادیر آن‌ها با افزایش نسبت سرعت نوک پره، افزایش می‌یابد. اما در خصوص نیروی پسا و ضریب توان چنین نیست. در شکل ۱۴ که مربوط به نمودار نیروی پسا است، ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت سرعت نوک پره، نیروی پسا رفتار عکس از خود نشان می‌دهد و دچار کاهش می‌گردد. با افزایش نسبت سرعت نوک پره و با توجه به ثابت فرض شدن سرعت باد، زاویه حمله کاهش یافته و این کاهش سبب کاهش ضریب درگ و بالطبع نیروی درگ می‌گردد. اما در خصوص رفتار ضریب توان با افزایش نسبت سرعت نوک پره می‌توان استدلال جالبی مطرح نمود. شکل ۱۵ را در نظر بگیرید. در شکل ۱۵ دیده می‌شود که در ابتدا با افزایش نسبت سرعت نوک پره، مقدار بیشینه ضریب توان محلی افزایش یافته و محل رخداد آن از نوک پره دور می‌شود. اما در حوالی نسبت سرعت نوک پره 7 روند تغییرات ضریب توان محلی دچار تغییر می‌شود. به این ترتیب که با افزایش بیشتر نسبت سرعت نوک پره، بیشینه ضریب توان محلی کاهش می‌یابد و مجدد همانند قبل، محل وقوع آن از نوک پره دور می‌گردد. مشابه همین روند در خصوص تغییرات ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره نیز قابل برداشت است. مشخص است که با افزایش نسبت سرعت نوک پره، مقدار ضریب توان در ابتدا دچار افزایش می‌شود تا اینکه، در نسبت سرعت نوک پره $7/825$ ، ضریب توان به بیشینه مقدار خود می‌رسد. سپس روند تغییر کرده و با افزایش نسبت سرعت نوک پره، ضریب توان کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- توان در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره‌های مختلف



شکل ۱۲- نیروی پیشران در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره‌های مختلف

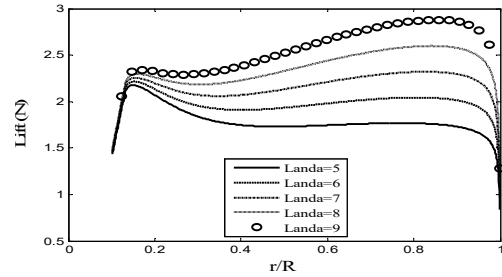
در امتداد طول پره مطالعه شده است. کمیت های عملکردی محاسبه شده شامل توان، نیروی پیشران، نیروی برآ و ضرایب نیروهای ایرودینامیکی در مقاطع و در کل روتور می باشند. بر اساس نتایج بدست آمده، رویه های زیر استخراج شده است:

- در فاز اعتبارسنجی توافق قابل قبول بین خروجی کد و داده های تجربی، نتایج عددی و تحلیلی پیشین وجود دارد. بنابراین این روند طراحی قابل استفاده و تعمیم خواهد بود.
- تصحیح برتون به نسبت تصحیح گلوآرت مقادیر کمتری را پیش بینی می کند.
- با توجه به بررسی های صورت گرفته، بهترین نتایج زمانی بدست می آیند که از ترکیب ضرایب اصلاح نوک پره و توپی پراتنل و نیز تصحیح گلوآرت استفاده گردد. در کار حاضر و با استفاده از این ضرایب، یک توربین باد بهینه برای استفاده در سیستم اینولاکس پیشنهاد گردید.
- اثرات لایه مرزی، پروفیل سرعت و آشفتگی جریان درون بخش ونتوری سیستم اینولاکس از جمله چالش های بکارگیری نظریه BEM در پیش بینی عملکرد سیستم اینولاکس می باشد که با استفاده از مدلسازی های پیشین (در بستر حل عددی) و نیز با بهره گیری از ضرایب اصلاح پراتنل و تصحیح گلوآرت بهبود می یابد.
- توان استحصال شده از توربین باد طراحی شده در صورت استفاده در بخش ونتوری سیستم اینولاکس ۲/۴۴۲۵ برابر حالتی است که این توربین بدون حضور اینولوکس در برابر جریان آزاد قرار گیرد.
- مقادیر توان، نیروی پیشران و نیروی برآ در سیستم اینولاکس مطالعه شده، با افزایش نسبت سرعت نوک پره افزایش می یابند در حالی که نیروی پسا در همین شرایط کاهش یافته است.
- با افزایش نسبت سرعت نوک پره، در ابتدا مقدار بیشینه ضریب توان محلی افزایش یافته و این روند تا نسبت سرعت نوک پره حدود ۷ ادامه یافته و سپس با افزایش نسبت سرعت نوک پره، بیشینه ضریب توان محلی کاهش می یابد.
- مشابه همین الگوی تغییرات در خصوص ضریب نیروی پیشران و ضریب گشتاور بر حسب سرعت نوک پره نیز ملاحظه می شود. این نکته می تواند در اعتبار سنجی کدهای نیمه تحلیلی مورد توجه قرار گیرد.

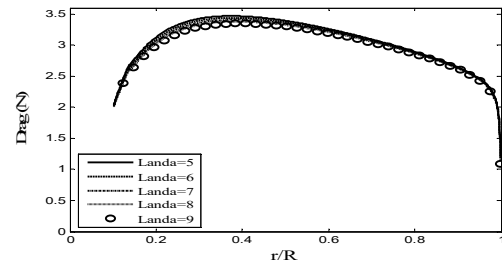
بر مبنای این مطالعه و با استفاده از بستر حل نیمه تحلیلی ارائه شده، می توان در خصوص بهینه سازی هندسه و چیدمان توربین های بادی در سیستم اینولاکس، مطالعات جذاب و سودمندی را انجام داد. این کار مستقل توسط نویسندگان مقاله حاضر در دست انجام است.

۷- نمادها

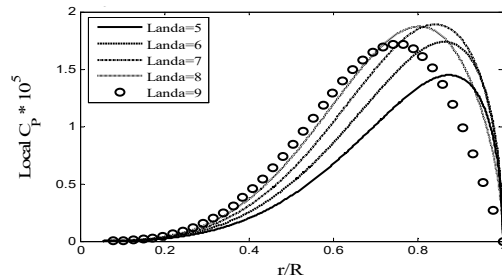
F	ضریب اتلاف پراتنل
a	ضریب القایی محوری
a'	ضریب القایی مماسی
C_L	ضریب برآ



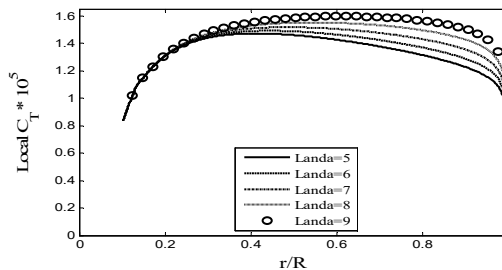
شکل ۱۳- نیروی برآ در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره های مختلف



شکل ۱۴- نیروی پسا در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره های مختلف



شکل ۱۵- ضریب توان در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره های مختلف



شکل ۱۶- نمودار ضریب نیروی پیشران در راستای پره برای نسبت سرعت نوک پره های مختلف

۶- نتیجه گیری

در این مقاله در ابتدا با استفاده از نظریه BEM و توسعه یک کد نیمه تحلیلی، با احتساب هندسه سیستم اینولاکس مبنای یک توربین باد مناسب جهت استقرار در بخش ونتوری این سیستم، طراحی شد. در کد توسعه داده شده، ضریب اصلاح نوک پره و توپی پراتنل و تصحیح دنباله آشفته نیز در نظر گرفته شده است. در ادامه مطالعه پارامتری و بررسی عملکرد توربین ارائه شده، حول مشخصه های هندسی انجام شد. تغییرات نسبت سرعت نوک پره و نیز تغییرات وتر و زاویه پیش

IET Renewable Power Generation **11**(6), 791-798 , 2017.

[13] Gohar, G.A., Manzoor, T., Ahmad, A., Hameed, Z., Saleem, F., Ahmad, I., Sattar, A., Arshad, A., Design and comparative analysis of an INVELOX wind power generation system for multiple wind turbines through computational fluid dynamics. *Advances in Mechanical Engineering* **11**(4), 1687814019831475, 2019.

[14] Glauert, H., The analysis of experimental results in the windmill brake and vortex ring states of an airscrew. HM Stationery Office, 1926.

[15] Hsiao FB, Bai CJ, Chong WT., The performance test of three different horizontal axis wind turbine (HAWT) blade shapes using experimental and numerical methods. *Energies*. 2013 Jun, 6(6):2784-803.

[16] Tang X, Huang X, Peng R, Liu X., A direct approach of design optimization for small horizontal axis wind turbine blades. *Procedia CIRP*, 2015 Jan, 1;36:12-6.

[17] Masters I, Chapman JC, Willis MR, Orme JA., A robust blade element momentum theory model for tidal stream turbines including tip and hub loss corrections. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 206/10 Jan 1;10(1):25-35.

[18] Karimian Aliabadi S, Rasekh S., Effect of platform disturbance on the performance of offshore wind turbine under pitch control. *Wind Energy*, 2020 May;23(5):1210-30.

[19] Tahani M, Kavari G, Masdari M, Mirhosseini M., Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine with innovative local linearization of chord and twist distributions. *Energy*, 2017 Jul 15;131:78-91.

[20] Shin, J.H., Lee, J.H. and Chang, S.M., A Simplified Numerical Model for the Prediction of Wake Interaction in Multiple Wind Turbines. *Energies*, 12(21), p.4122.35, 2019.

[21] Hansen, M.O., Sorensen, J.N., *Unsteady BEM Model. Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd ed., Earthscan: London, UK, 85-102, 2008.

[22] Rommel DP, Di Maio D, Tinga T., Calculating wind turbine component loads for improved life prediction. *Renewable energy*, 2020 Feb 1;146:223-41.

[23] D. M. Eggleston and F. S. Stoddard., *Wind Turbine Engineering Design*, New York, NY, Van Nostrand Reinhold, 1987.

[24] M. L. Buhl., A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State. *Tech. Rep. NREL/TP-500-36834*, no. August, 2005.

[25] D. S. and E. B. T. Burton, N. Jenkins., *Wind Energy Handbook*. 2nd edition, John Wiley & Sons, 2001.

[26] Ding L, Guo T., Numerical Study on the Power Efficiency and Flow Characteristics of a New Type of Wind Energy Collection Device. *Applied Sciences*, 2020 Jan;10(21):7438.

[27] SnehaliNarendrabhai, P., Desmukh, T., Numerical simulation of flow through invelox wind turbine system. *International Journal of Renewable Energy Research* **8**(1), 291-301 , 2018.

[28] Tangier J. L., Somers D. M., Report on NREL Airfoil Families for HAAWTs. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, Jan 1995.

[29] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s823-nr>

[30] Peraro, R., Development of an Unsteady BEM Code for Wind Turbine Applications. 2019.

[31] Song Q, Lubitz WD., BEM simulation and performance analysis of a small wind turbine rotor. *Wind Engineering*, 2013 Aug;37(4):381-99.

ضریب پسا	C_D
نسبت ضریب برآ به پسای بیشینه	$(C_L / C_D)_{max}$
ضریب توان	C_P
توان (وات)	P
نیروی محوری (نیوتن)	T
گشتاور (نیوتن متر)	Q
شعاع روتور (متر)	R
توزیع وتر در راستای پره (متر)	$C(r)$
نسبت سرعت نوک پره	λ
تعداد پره	B
معیار آشفته‌گی جریان آزاد	N_{crit}
زاویه حمله (درجه)	α
زاویه پیچش (درجه)	θ
زاویه جریان (درجه)	ϕ
ضریب استحکام یا صلبیت	σ
سرعت دورانی روتور (دور بر دقیقه)	ω

۸- مراجع

[1] Lilley, G., Rainbird, W., A preliminary report on the design and performance of ducted windmills, 1956.

[2] Allaei, D., Andreopoulos, Y., INVELOX: a new concept in wind energy harvesting. *Proceeding of ASME 7th international Conference on energy Sustainability & 6/10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference ES-Fuel Cell 2013*, pp. 14-19, 2013.

[3] Allaei, D., Andreopoulos, Y., INVELOX: Description of a new concept in wind power and its performance evaluation. *Energy* **69**, 336-344, 2014.

[4] Allaei, D., Tarnowski, D., Andreopoulos, Y., INVELOX with multiple wind turbine generator systems. *Energy* **93**, 1030-1040, 2015.

[5] Fereidoonzhad, M., Tahani, M., Esfahanian, V., Analysis of Ducted Wind Turbine using Surface Vorticity Method. *3rd International Conference of IEA, Iran, Tehran*, 2017.

[6] Kumar, N.M., Subathra, M., Cota, O.D., Design and wind tunnel testing of funnel based wind energy harvesting system. *Procedia Technology* **21**, 33-40, 2015.

[7] Billah, S.B., Qasim, S., Development of MATLAB simulink model of Invelox to Analyze The Impact of Inlet Height On speed ratio. *International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*, pp. 1-5. IEEE, 2019.

[8] Rezaey S., Numerical Investigation of a Globe Control Valve and Estimating its Loss Coefficient at Different Opening States. *European Journal of Computational Mechanics*. 2021 May 22:549-76.

[8] Golozar, A., Shirazi, F.A., Siahpour, S., Khakiani, F.N., Gaemi Osguei, K., A novel aerodynamic controllable roof for improving performance of INVELOX wind delivery system. *Wind Engineering*, 0309524X20910986, 2020.

[9] Sotoudeh, F., Kamali, R., Mousavi, S.M., Field tests and numerical modeling of INVELOX wind turbine application in low wind speed region. *Energy* 759-745, 181, 2019.

[10] Hosseini, S.R., Ganji, D.D., A novel design of nozzle-diffuser to enhance performance of INVELOX wind turbine. *Energy*, 117082, 2020.

[11] Anbarsooz, M., Amiri, M., Rashidi, I., A novel curtain design to enhance the aerodynamic performance of Invelox: A steady-RANS numerical simulation. *Energy* **168**, 207-221, 2019.

[12] Anbarsooz, M., Hesam, M.S., Moetakef-Imani, B., Numerical study on the geometrical parameters affecting the aerodynamic performance of Invelox.