

طراحی پره توربین باد محور افقی با روش مومنتوم المان پره به همراه حل عددی سه بعدی جریان آن

کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک
استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک
استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

فرزاد مختاری نیا
مهدی نیلی احمدآبادی*
احمد صداقت

چکیده

هدف این پژوهش، طراحی آیرودینامیکی پره توربین باد ۲۰ کیلووات محور افقی، با روش مومنتوم المان پره و تحلیل عددی جریان سه بعدی اطراف آن، می‌باشد. در روش مومنتوم المان پره، ابتدا، منحنی‌های ضرایب آیرودینامیکی یک ایرفویل مشخص به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود. سپس، مشخصات هندسی مقاطع مختلف پره شامل: طول وتر، زاویه پیچش و زاویه نسبی جریان و همچنین قطر پره با این روش محاسبه می‌گردد. به منظور انتخاب بهترین ایرفویل برای طراحی پره توربین باد مورد نظر، با روش مومنتوم المان پره، ضریب توان مربوط به ۱۰ ایرفویل مختلف محاسبه شده و با هم مقایسه می‌گردد. همچنین، برای کارکرد بهتر توربین باد به جای استفاده از یک نوع ایرفویل از پایه تا نوک، از ۳ نوع ایرفویل -NACA63-215 در پایه، Riso A1-24 در قسمت میانی و از ایرفویل FX63-137 در قسمت بیرونی پره استفاده شده است. پره طراحی شده در نرم افزار ANSYS CFX شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. برای در نظر گرفتن اثرات چرخش پره توربین باد بر جریان اطراف آن از دو ناحیه حل استفاده می‌شود. ناحیه اطراف پره، چرخشی و ناحیه بیرونی غیرچرخشی در نظر گرفته می‌شود. در هر دو مرحله طراحی و تحلیل پره، نتایج با کار معتبر دیگران در این زمینه، به صورت اعتبارسنجی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مومنتوم المان پره، طراحی آیرودینامیکی، توربین باد، ضریب توان، تحلیل عددی، مختصات مرجع دوار.

Design of Horizontal Wind Turbine Blade via Blade Element Momentum Method with 3D Numerical Solution

F. Mokhtarinia

M.Sc. Graduate, Isfahan University of Technology, Department of Mechanical Engineering

M. NiliAhmadabadi

Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Department of Mechanical Engineering

A. Sedaghat

Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Department of Mechanical Engineering

Abstract

The purpose of this study is the aerodynamic design of 20 kW horizontal axis wind turbine using blade element momentum with 3D numerical analysis of flow around it. First, the aerodynamic coefficients curves of an airfoil are considered as input. Then, the geometrical characteristics of different blades including chord length, twist angle, relative angle and diameter of blades are calculated using this method. To select the best airfoil as wind turbine blade, power coefficient of 10 different airfoils are calculated and then compared to each other using the blade element momentum method. Also, to improve the performance, three airfoil types called NACA63-215 on the hub section, Riso A1-24 on the midsection and FX63-137 on the tip are used instead of just one airfoil type from hub to tip. Designed blade is simulated and analyzed in ANSYS CFX software. In order to consider the effects of blades rotation, two domain solutions are used for flow analysis. The surrounded area around the blades is divided into the inner rotating and outer stationary regions. In both design and analysis steps, the results are validated with the other authoritative works in this field.

Keywords: Blade element momentum, Aerodynamic design, Wind turbine, Power coefficient, Numerical analysis, Moving Reference Frame.

۱- مقدمه

طراحی آیرودینامیکی پره‌های توربین باد در افزایش کارایی توربین بسیار مهم می‌باشد زیرا هرچه پره از نظر آیرودینامیکی بهینه‌تر باشد توربین، توان بیشتری را از باد می‌گیرد. روش مومنتوم المان پره، ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای طراحی پره توربین باد است. این روش، اولین بار توسط رنکین و فرود در طراحی بال هواپیما پیشنهاد شد [۱]. سپس توسط گلارت، بتز و لانچستر توسعه داده شد [۲-۴]. لانزافیم و مسینا از این روش برای طراحی پره توربین باد کوچک با ایرفویل NACA4415 استفاده کردند و با مقایسه نتایج کد با نتایج تونل باد، این روش را دقیق یافتند [۵]. صالح و هابل از روش مومنتوم المان پره برای طراحی توربین باد ۱/۲ مگاواتی استفاده کردند. در این طراحی، به دلیل اینکه ریشه پره باید گشتاورهای ناشی از نیروهای آیرودینامیکی وارد به پره و نیروی وزن پره را تحمل کند بنابراین ریشه پره ضخیم و از ریشه تا نوک، پره نازک‌تر در نظر گرفته می‌شود [۶]. داکوته اثر صلبیت و تعداد پره را در ضریب توان توربین باد با روش مومنتوم المان پره بررسی کرد [۷]. ونگ و همکاران برای طراحی توربین باد کوچک از روش مومنتوم المان پره استفاده کردند. به منظور انتخاب ایرفویل مناسب، ۶ ایرفویل را در تونل باد آزمایشگاه انرژی تجدیدپذیر ملی^۱ تست کردند که از بین این ایرفویل‌ها، ۲ ایرفویل FX63-137 و SD1730 را مناسب تشخیص دادند [۸]. جورژکو و همکاران از روش مومنتوم المان پره، برای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره استفاده کردند. پره طراحی شده از جنس فایبرگلاس تقویت شده با پلی استر بود [۹]. لی دنگ و همکاران از روش مومنتوم المان پره به منظور طراحی پره توربین باد ۲ مگاواتی استفاده کردند [۱۰]. لیو ونزهی و همکاران در طراحی توربین باد ۲ مگاواتی، تابع درجه سوم برای پیچش و تابع خطی برای وتر پره در نظر گرفتند. آنها برای طراحی پره توربین ۲ مگاواتی، مقدار وتر در پایه را از ۳/۵ m که مقدار بدست آمده از طراحی بود را ۲/۲m در نظر گرفتند تا بتوانند هم اتصال یکنواختی بین پره و شفت ایجاد کنند و هم هزینه ساخت را کاهش دهند [۱۱]. صداقت و میرحسینی برای طراحی پره توربین باد ۳۰۰ KW از روش مومنتوم المان پره استفاده کردند [۱۲].

تامتایی و همکارش شبیه‌سازی عددی توربین باد محور افقی با پره بدون چرخش و با طول وتر ثابت را منظور یافتن زاویه حمله بهینه انجام دادند. در تحلیل انجام شده، معادلات بقا در یک مختصات مرجع چرخشی که پره و شبکه‌بندی اطراف آن نسبت به مرجع چرخشی ثابت بودند انجام شد. سپس نتایج تحلیل پره با زاویه نصب ۱۳°، با داده‌های آزمایشی آزمایشگاه انرژی تجدیدپذیر برای جریان غیر لزج و آشفته مقایسه و

اعتبارسنجی شد [۱۳]. کامیار منصور و محسن یحیی‌زاده، تحلیل عددی سه بعدی جریان اطراف پره‌های توربین باد را با مدل‌های آشفتگی متفاوت انجام دادند. نتایج مدل‌های آشفتگی را با همدیگر مقایسه و با نتایج آزمایشگاهی موجود برای توربین باد بدون پیچش پره و با طول وتر ثابت، اعتبارسنجی کردند. ناحیه‌ی محاسباتی به صورت دو ناحیه چرخشی و غیر چرخشی تقسیم شده بود. در ناحیه چرخشی که شامل پره و ناحیه نزدیک به پره‌ها می‌باشد، معادلات بقا در یک دستگاه مرجع مختصات چرخشی حل شدند [۱۴].

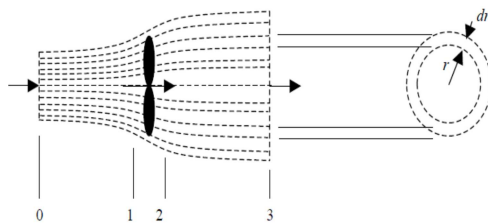
جریان اطراف توربین باد به دلیل ترکیب جریان محوری، جریان ناشی از چرخش پره و جریان ناشی از دنباله، بسیار پیچیده می‌باشد. علاوه بر این، نیروهای گریز از مرکز که ناشی از چرخش پره و در راستای شعاع پره تولید می‌شوند سبب ایجاد جریان در راستای دهانه‌ی پره می‌شوند. به همین خاطر، تحلیل جریان عبوری از توربین باد محور افقی بسیار پیچیده‌تر از بال هواپیما است [۱۴].

در این مطالعه، برای طراحی پره، از ۱۰ ایرفویل مخصوص توربین باد کوچک برای طراحی پره توربین، در شرایطی که سرعت باد، نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد، تعداد پره، تعداد المان پره، بازده و توان برای همه یکسان است، استفاده شده است. با استفاده از روش مومنتوم المان پره، پارامترهای ضریب توان، شعاع پره، زاویه حمله بهینه و توزیع طول وتر در طول پره به ازای هر نوع ایرفویل، محاسبه شده و با ایرفویل‌های دیگر مقایسه می‌گردد. از نتیجه این مقایسه، بهترین ایرفویل از بین این ۱۰ ایرفویل برای طراحی پره انتخاب شده است. سپس برای عملکرد بهتر پره، به جای یک ایرفویل از پایه تا نوک، از سه ایرفویل برای طراحی پره استفاده شده است که ایرفویل با طول وتر بیشتر (صلبیت بیشتر) در پایه و ایرفویل با صلبیت کمتر برای طراحی قسمت بالایی پره به کار رفته است. سپس پره طراحی شده در نرم افزار ANSYS CFX شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. به منظور در نظر گرفتن اثرات چرخش پره توربین باد بر جریان اطراف آن از دو ناحیه حل استفاده می‌شود. ناحیه اطراف پره، چرخشی و ناحیه بیرونی غیر چرخشی در نظر گرفته می‌شود.

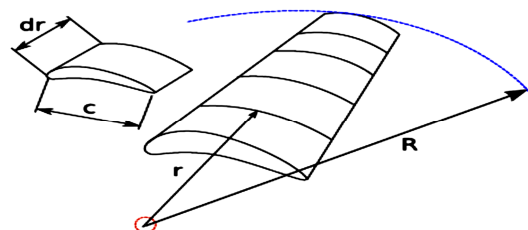
۲- مومنتوم المان پره

در این روش ابتدا پروانه محرکی را در یک لوله جریان در نظر گرفته (شکل ۱) که فشار جریان باد در گذر از این پروانه، کاهش ناگهانی خواهد داشت. سرعت روی پروانه در این تغییر فشار، ثابت فرض می‌شود. در این نظریه که به نظریه بتز معروف است بیشینه ضریب توانی که با فرض جریان غیر لزج، تراکم ناپذیر و غیر چرخشی و صرف نظر کردن از چرخش دنباله پشت پروانه و تلفات اصطکاکی به دست می‌آید ۵۹۳٪ می‌باشد [۱۵].

¹ NREL



شکل ۳- نمایش حجم کنترل در لوله جریان با در نظر گرفتن چرخش دنباله



شکل ۴- نحوه گرفتن المان در نظریه المان پره [۱۵]

مراحل طراحی با روش مومنتوم المان پره به صورت زیر است:

۱- با توجه به توان مورد نظر و سرعت نامی باد، با حدس ضریب توان و انتخاب مقدار بازده، مقدار اولیه‌ای برای شعاع پره طبق رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$P = C_p \eta \times 1/2 \times \rho \pi R^2 U^3 \quad (1)$$

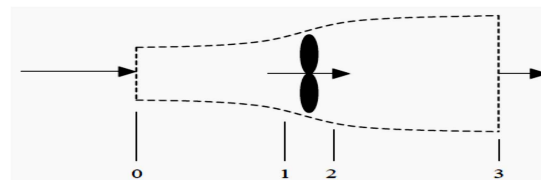
در این رابطه C_p ضریب توان توربین باد، P توان توربین باد، R شعاع پره توربین باد، U سرعت باد، ρ چگالی هوا و η بازده مکانیکی توربین باد می‌باشد.

۲- نسبت سرعت نوک و تعداد پره، طبق جدول (۱)، انتخاب می‌شود. توجه بشود که توربین دارای سرعت زاویه‌ای ثابت نیست و نسبت سرعت نوک پره ثابت می‌باشد. بنابراین با تغییر اندازه سرعت باد و ثابت بودن نسبت سرعت نوک (نسبت سرعت زاویه‌ای پره به سرعت باد)، سرعت زاویه‌ای توربین نیز تغییر می‌کند.

۳- ایرفویل مناسب انتخاب می‌شود. در این پژوهش ۱۰ ایرفویل متفاوت با هم مقایسه شده، سپس از بهترین ایرفویل در طراحی پره استفاده می‌شود.

جدول ۱- تعداد مناسب پره با نسبت سرعت نوک

تعداد پره	نسبت سرعت نوک
۸-۲۱	۱
۶-۱۲	۲
۳-۶	۳
۳-۴	۴
۱-۳	≥ 5



شکل ۱- پروانه محرک در لوله جریان

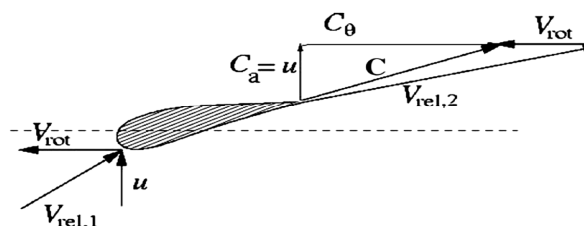
دوران دنباله پشت روتور، محدود بودن تعداد پره و لزج بودن جریان سبب تلفات شده بدین سبب، ضریب توان توربین باد واقعی کمتر از مقدار فوق می‌باشد [۱۶].

این مدل یک‌بعدی بسیار ساده، فیزیک واقعی جریان حول توربین باد را نشان نمی‌دهد اما مفاهیم مختلفی را مطرح می‌کند که کلیدی برای فهم عملکرد توربین باد می‌باشند. اگر روتور بتواند از انرژی باد توان تولید کند، سرعت باد با عبور از روتور کاهش می‌یابد. توربین باد ایده‌آل باید سرعت باد را به دو سوم سرعت جریان آزاد کاهش دهد تا بیشترین کارایی را در تولید توان داشته باشد [۱۵].

چون روتور گشتاور مفید تولید می‌کند، دوران دنباله برای برقراری پایستاری مومنتوم زاویه‌ای ضروری است به همین خاطر جریان در پشت روتور در جهت معکوس گردش آن می‌چرخد. مثلث سرعت جریان در خروج از پره (شکل ۲)، نشان می‌دهد که جریان در خروج از پره بر خلاف جهت چرخش پره می‌چرخد.

مدل پروانه محرک را می‌توان به سادگی گسترش داد تا بتواند دوران دنباله را محاسبه کند. بدین سبب، حجم کنترل مدل یک بعدی قبلی را می‌توان به حجم کنترل‌های حلقوی بسیاری تقسیم کرد (شکل ۳)، به طوری که جریان در این حجم کنترل‌ها نسبت به هم برهم کنش نداشته باشد. در این حالت ضریب توان دیسک کمتر از حالت قبلی بدست می‌آید.

در مدل دیگری برای تحلیل پره از یک ایرفویل مناسب که ضرایب برآ و پسای آن تابعی از زاویه حمله می‌باشد برای یافتن نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره استفاده می‌شود. پره به حدود ۱۰ الی ۲۰ قسمت به طول dr تقسیم شده (شکل ۴) و در هر قسمت نیروها، طول وتر، زاویه نسبی باد و... محاسبه می‌شوند. از ترکیب نظریه پروانه محرک و نظریه المان پره، روش مومنتوم المان پره به دست می‌آید.



شکل ۲- مثلث سرعت در ورود و خروج از پره [۱۷]

۴- زاویه حمله‌ی بهینه ایرفویل محاسبه می‌شود. برای هر کدام از ایرفویل‌های به کار رفته در طراحی پره، رابطه برآ و پسا بر حسب زاویه حمله موجود می‌باشد. زاویه حمله‌ای که مقدار برآ به پسا حداکثر و برآ نیز زیاد باشد، زاویه حمله بهینه است و این زاویه معمولاً بین ۵ تا ۸ درجه می‌باشد. بنابراین تنها اطلاعاتی که از توزیع نسبت ضریب برآ به پسا بر حسب زاویه حمله در کد طراحی مومنتوم المان پره برای هر ایرفویل لازم است زاویه حمله بهینه و نسبت ضریب برآ به پسا می‌باشد.

۵- پره، معمولاً به ۱۰ الی ۲۰ المان تقسیم می‌شود.

۶- بدون در نظر گرفتن اثرات آشفتگی جریان، چرخش دنباله، پسای اصطکاکی و تلفات نوک پره، طراحی اولیه‌ای برای پره مورد نظر انجام می‌شود [۱۵]. زاویه جریان، ضریب برآ و زاویه پیچش پره از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\varphi_i = (2/3) \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_i} \right) \quad (2)$$

$$C_i = \frac{8\pi r}{BC_{l,design}} (1 - \cos) \varphi_i \quad (3)$$

$$\varphi_i = \theta_{p,i} + \alpha_{design} \quad (4)$$

$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} \quad (5)$$

۷- با در نظر گرفتن طراحی مرحله قبل به عنوان حدس اولیه و اثرات آشفتگی جریان، چرخش دنباله، پسای اصطکاکی و تلفات نوک پره، فرآیند حل در یک حلقه تکراری قرار می‌گیرد و تا زمانی که همگرایی حاصل نشود تکرار حل با تجدید مقادیر پارامترها ادامه می‌یابد. زاویه جریان از رابطه زیر محاسبه می‌شود. از آوردن دیگر روابط مومنتوم المان پره، به دلیل زیاد بودن تعداد معادلات و داشتن چندین ضریب تجربی، خودداری شده است.

$$\tan \varphi_i = \frac{U(1 - a_i)}{\Omega r(1 + a_i)} = \frac{1 - a_i}{(1 + a_i)\lambda_i} \quad (6)$$

۸- مقدار ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد، رسم می‌شود. چنانچه در نسبت سرعت نوک انتخابی، ضریب توان بدست آمده از حل کد با ضریب توان حدس زده شده یکی باشد حل تمام است. در غیر اینصورت برنامه، ضریب توان حدسی را عوض کرده و دوباره کد حل می‌شود و تا زمانی که دو مقدار یکی شوند تکرار حل ادامه می‌یابد.

۳- نتایج طراحی پره با روش مومنتوم المان پره

برای انتخاب بهترین ایرفویل جهت طراحی پره، روابط برآ و پسای ۱۰ ایرفویل را در کدی که به روش مومنتوم المان پره نوشته شده وارد می‌شود. سپس، برای هر ایرفویل در توربین باد ۳ پره‌ای، با تقسیم هر پره به ۲۱ المان و با سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک ۶، توان ۲۰ کیلو وات، بازده ۰/۹، شعاع پایه پره ۲۳، متر و با حدس اولیه ضریب توان ۰/۴، کد حل شده

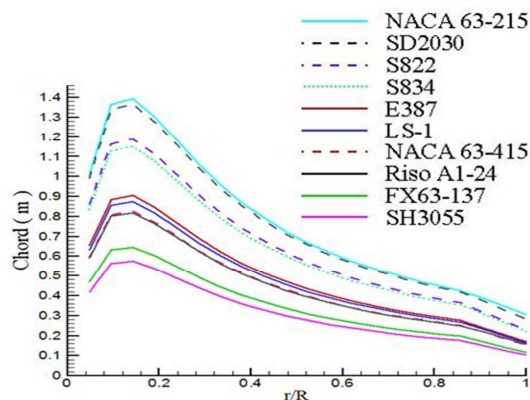
است. نام ایرفویل‌ها و اطلاعات به دست آمده از هر ایرفویل برای مقایسه در جدول (۲) و شکل‌های (۵ تا ۹) آمده است.

جدول (۲) نشان می‌دهد برای طراحی پره از ایرفویل FX63-137 به کار رود، توربین باد نسبت به حالتی که از دیگر ایرفویل‌ها استفاده شود بیشترین ضریب توان را خواهد داشت. هم چنین علاوه بر بیشتر بودن ضریب توان در این حالت، زاویه حمله بهینه حدود ۶ می‌باشد که نیز مقدار مناسبی است زیرا در ایرفویل‌های توربین باد، پدیده وامانش در زاویه حمله حدود ۶ الی ۸ درجه شروع می‌شود.

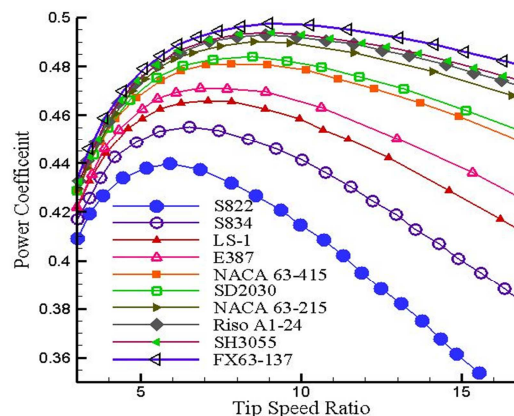
جدول ۲- اطلاعات به دست آمده از نتایج کد ۱۰ ایرفویل مختلف

ایرفویل استفاده شده در طراحی پره	شعاع پره (متر)	ضریب توان	زاویه حمله بهینه (درجه)
NACA 63-215	4.8904	0.4829	3.94
NACA 63-415	4.9205	0.477	6.48
Riso-A1-24	4.8821	0.4845	5.78
LS-1	4.9853	0.4647	6.19
E387	4.9629	0.4689	6.75
SH3055	4.8784	0.4853	7.39
FX 63-137	4.8676	0.4874	6.1
SD2030	4.9132	0.4784	3.9
S834	5.0406	0.4545	7.45
S822	5.1274	0.4393	7.76

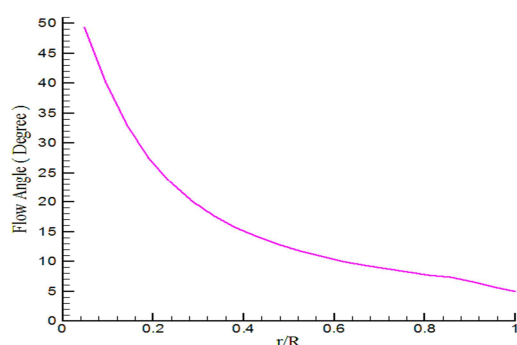
شکل (۵) نشان دهنده مقدار ضریب توان توربین با نسبت سرعت نوک می‌باشد. کاملاً مشخص است که چنانچه از ایرفویل FX63-137 در طراحی پره استفاده بشود بیشترین ضریب توان از توربین باد به دست می‌آید. همچنین مشخص است که در نسبت سرعت ۸ الی ۱۰، توربین باد، بیشینه ضریب توان را خواهد داشت. توجه بشود هدف از این طراحی، این است که با نسبت سرعت نوک انتخابی، بیشترین توان توربین به دست آید و نسبت سرعت ابتدا در محدوده مناسب برای پره انتخاب می‌شود. شکل (۶) نشان دهنده این است که در پایه پره به دلیل کوچک بودن بازوی گشتاور، ضریب توان کم است. با حرکت به سمت نوک پره، ضریب توان به دلیل زیاد شدن بازوی گشتاور زیاد می‌شود اما در نوک پره، ضریب توان به دلیل کاهش بارگذاری (کاهش طول وتر) کم می‌شود.



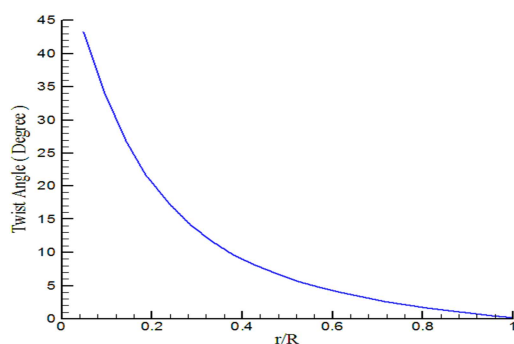
شکل ۷- توزیع طول وتر بر حسب شعاع در ۱۰ ایرفویل



شکل ۸- توزیع ضریب توان با نسبت سرعت نوک پره در ۱۰ ایرفویل

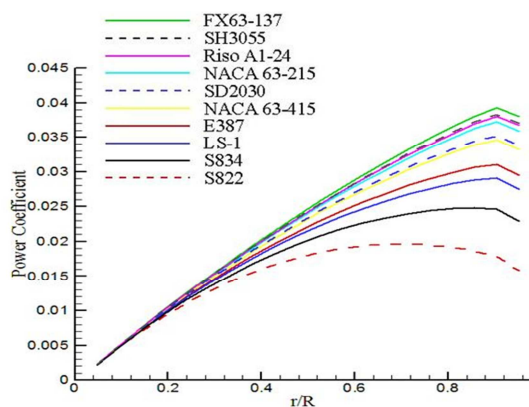


شکل ۹- توزیع زاویه سرعت نسبی باد در طول پره



شکل ۱۰- توزیع زاویه پیچش پره نسبت به نوک در طول پره

در شکل (۱۰)، توزیع ضرایب القایی زاویه‌ای و محوری آمده است. کاملاً مشخص است که ضریب القایی محوری حدود ۰/۳۳ (مقدار ایده آل)، می‌باشد. همچنین مقدار ضریب القایی زاویه‌ای در پایه پره بدلیل بزرگ بودن چرخش جریان در پایه پره، زیاد می‌باشد.

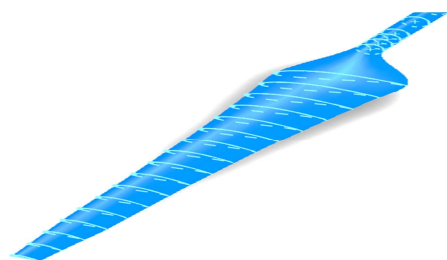


شکل ۱۱- ضریب توان بر حسب شعاع پره برای ۱۰ ایرفویل

شکل (۷) طول وتر پره را با شعاع محلی بی بعد پره نشان می‌دهد. مطابق شکل، طول وتر پره در پایه زیاد و با حرکت به سمت نوک پره، کاهش می‌یابد، که به دلیل تنش زیاد در پایه پره می‌باشد. همچنین، کمترین مقدار وتر در نوک پره می‌باشد زیرا اگر طول وتر پره در نوک زیاد شود بارگذاری در قسمت بیرونی پره افزایش می‌یابد در این صورت نیروهای وارد بر نوک و گشتاورهای وارده بر پایه پره افزایش یافته و سبب شکستن پره می‌شوند.

شکل (۸) تغییرات زاویه جریان را در طول پره نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در پایه پره به دلیل کم بودن شعاع پره، سرعت خطی پره کم بوده در نتیجه زاویه جریان باد زیاد و با حرکت به سمت نوک پره، به دلیل افزایش سرعت پره، زاویه جریان کاهش می‌یابد.

شکل (۹) نشان می‌دهد که در پایه پره به دلیل زیاد بودن زاویه جریان، زاویه پیچش پره نیز زیاد است تا زاویه حمله، نزدیک به زاویه حمله بهینه باقی بماند. چنانچه پره زاویه‌دار نباشد باید در پایه، به دلیل زیاد بودن زاویه جریان، زاویه حمله نیز زیاد باشد اما زیاد بودن زاویه حمله، سبب جدایی جریان می‌شود پس باید با پیچاندن پره، زاویه حمله را کم نگه داشت.



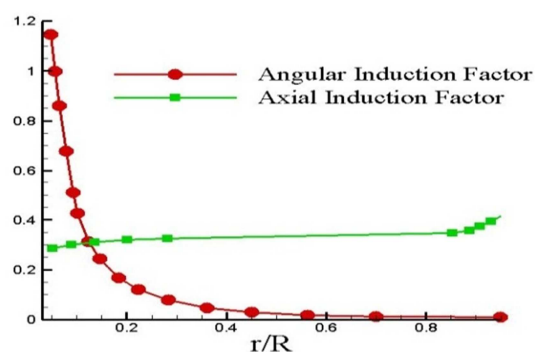
شکل ۱۲- تصویر پره طراحی شده همراه با استوانه رابط

جدول ۳- مشخصات پره طراحی شده با ایرفویل FX63-137

ایرفویل	FX63-137
شعاع استوانه رابط	۰/۰۵۷ متر
شعاع پایه پره	۱/۱۵ متر
ارتفاع استوانه رابط	۰/۶ متر
شعاع شفت	۰/۲۳ متر
طول پره	۴/۸۶ متر

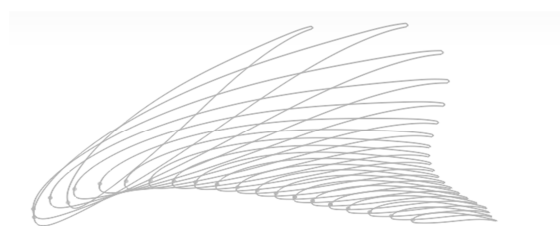
صداقت و میرحسینی برای طراحی پره توربین باد ۳۰۰ کیلوواتی از روش مومنتوم المان پره با سرعت باد ۸ متر بر ثانیه، توربین ۳ پره‌ای، تقسیم هر پره به ۲۰ المان، بازده ۰/۹ و ایرفویل Riso-A1-18 استفاده کردند [۱۲]. به منظور اعتبارسنجی، پره با شرایط فوق طراحی و نتایج حاصله، با نتایج حاصل از کار صداقت و میرحسینی مقایسه شده است. نتایج مقایسه، در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ آمده است. کاملاً مشخص است که نتایج بسیار به هم نزدیک بوده، بنابراین روند طراحی پره سه بعدی درست می‌باشد. پس نتیجه می‌شود روند طراحی سه بعدی پره با سه ایرفویل متفاوت نیز کاملاً معتبر می‌باشد.

شکل (۱۳) مقایسه ضریب توان کار انجام شده را با نتایج صداقت و میرحسینی نشان می‌دهد. بیشینه ضریب توان در کار صداقت و میرحسینی حدود ۰/۵۰۵ و در نسبت سرعت نوک ۱۰ می‌باشد، اما در این کار، به ترتیب ۰/۴۹۴ و ۹ می‌باشند. بدین صورت، حدود ۲ درصد در مقدار حداکثر ضریب توان، خطا وجود دارد. خطای موجود به دلیل تفاوت در فرموله کردن ضرایب برآ و پسا با زاویه حمله، در ایرفویل استفاده شده می‌باشد [۱۸]. در کار صداقت و میرحسینی از تقریب درجه اول ولی در طراحی انجام شده، از تقریب درجه سوم به منظور یافتن رابطه ضریب برآ و پسا با زاویه حمله استفاده شده است. در این پژوهش، ابتدا نقاط نمودار برآ و پسی ایرفویل با نرم افزار Get Data گرفته شده، سپس از یک تابع درجه ۹ به منظور تقریب رابطه برآ و پسا ایرفویل با زاویه حمله استفاده شد. تقریب زده شده به نمودار واقعی بسیار نزدیک می‌باشد. زاویه حمله بهینه در این مقاله، ۷/۷۵ درجه و نسبت برآ به پسا حداکثر، ۱۱۵ می‌باشد اما در مقاله صداقت و میرحسینی، این مقادیر به ترتیب ۷ درجه و ۱۶۷ می‌باشند.



شکل ۱۰- توزیع ضریب القایی زاویه‌ای و محوری در راستای شعاع پره

علاوه بر مقایسه ۱۰ ایرفویل مختلف با یکدیگر، ترکیب‌های ۳ تایی متفاوتی از این ۱۰ ایرفویل نیز برای طراحی پره با هم مقایسه شده است. از بین این ترکیب‌های ۳ ایرفویلی NACA63-215 در پایه، Riso A1-24 در قسمت میانی و FX63-137 در قسمت انتهایی پره، از نظر ضریب توان، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با تک ایرفویل FX63-137 ندارد. ضریب توان در حالتی که از ترکیب ۳ ایرفویل فوق استفاده شده، ۴۸۶۸ می‌باشد. شکل (۱۱) مقاطع شعاعی پره را نشان می‌دهد. کاملاً مشخص است که در پایه پره، به دلیل اینکه باید گشتاور حاصله از چرخش پره را تحمل کند، طول وتر زیاد بوده و با حرکت به سمت نوک پره، طول وتر کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) تصویر سه بعدی پره طراحی شده به همراه استوانه رابط بین پره و محور را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- توزیع مقاطع شعاعی پره طراحی شده

شعاع هاب پره طراحی شده حدود ۵/۵ شعاع پره، ۲۳۰ میلی‌متر، قطر استوانه رابط بین پره و شفت ۱۱۴ میلی‌متر و طول آن در حدود ۱۲٪ شعاع پره، یعنی ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۲، ۱۸، ۱۵]. اطلاعات پره طراحی شده در جدول (۳)، آمده است.

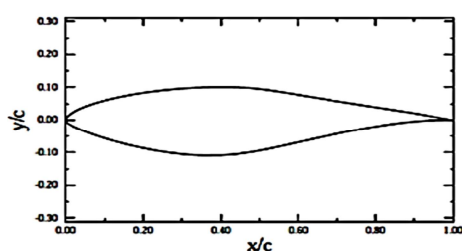
توربین باد طراحی شده، تحلیل سه بعدی می‌شود. بنابراین روش مومنتوم المان یک روش طراحی است در حالی که CFD صرفاً برای تحلیل استفاده می‌شود. هر دو روش بطور جداگانه استفاده شده‌اند. در واقع از CFD برای صحت عملکرد توربین طراحی شده به روش مومنتوم المان استفاده شده است.

در سالهای گذشته، آزمایشگاه‌های انرژی تجدیدپذیر، توربین بادهای زیادی را در تونل باد تست کرده و نتایج آزمایشات را به منظور استفاده محققین ارائه کرده است [۱۳]. در این کار از نتایج تست توربین باد NREL Phase II به منظور اعتبارسنجی تحلیل سه بعدی پره در نرم افزار ANSYS CFX استفاده می‌شود. در توربین باد NREL Phase II، پروفایل پره، ایرفویل S809 بوده که تصویر آن در شکل (۱۶)، آمده است. روتور توربین با سرعت ثابت ۷۲ rpm، چرخیده و توان خروجی آن ۲۰ KW می‌باشد. زاویه نصب پره 12^0 ، و زاویه پیش‌فرویش صفر درجه می‌باشد. شعاع پره ۵/۰۵m بوده و طول وتر پره مقدار ثابت ۰/۴۵۸m می‌باشد [۱۳]. دیگر مشخصات پره در جدول (۴) و تصویر پره در شکل (۱۷) آمده است.

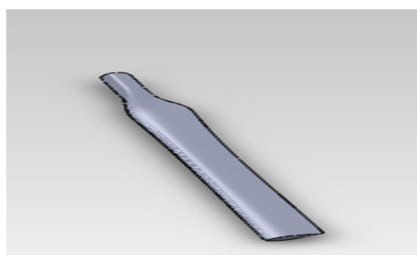
جدول ۴- مشخصات پره با ایرفویل S809

قطر پره	۱/۰ متر
قطر محور	۰/۵ متر
ارتفاع استوانه رابط	۰/۶۶ متر
شعاع استوانه رابط	۰/۰۵۷ متر
شعاع پایه پره	۱/۲۷ متر

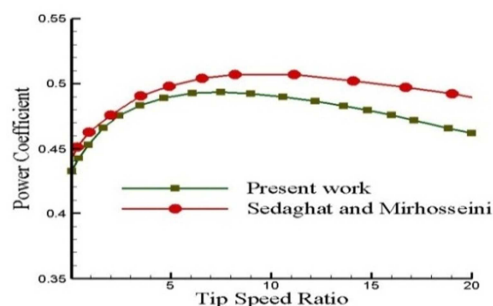
به منظور اعتبارسنجی حل سه بعدی پره، از نتایج تجربی NREL و نتایج مقالات تامتایی و همکاران [۱۳] و منصور و یحیی‌زاده [۱۴] استفاده می‌شود.



شکل ۱۶- ایرفویل S809

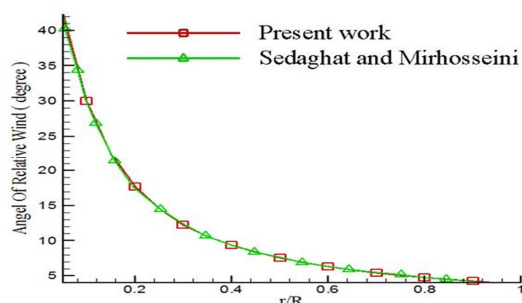


شکل ۱۷- پره NREL Phase II



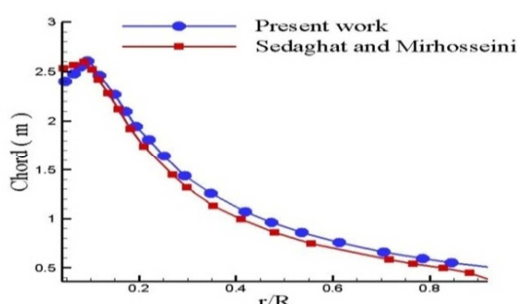
شکل ۱۳- توزیع ضریب توان با نسبت سرعت نوک پره

شکل (۱۴) مقایسه توزیع زاویه نسبی باد با شعاع بدون بعد پره را در کار انجام شده با کار صداقت و میر حسینی نشان می‌دهد. کاملاً مشخص است که نتایج بسیار به نزدیک می‌باشند.



شکل ۱۴- توزیع زاویه سرعت نسبی باد در طول پره

شکل (۱۵) مقایسه توزیع طول وتر پره، را در کار انجام شده، با نتایج صداقت و میر حسینی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، اختلاف نتایج کم بوده و این مقدار کم، به دلیل اینکه در روش مومنتوم المان پره، توزیع طول وتر با نسبت پسا به برآ ایرفویل، رابطه مستقیمی دارد می‌باشد [۱۵].



شکل ۱۵- توزیع طول وتر پره بر حسب شعاع بدون بعد پره

۴- مدل‌سازی و تحلیل پره طراحی شده در نرم افزار ANSYS CFX

روش مومنتوم المان پره، یک روش دو بعدی برای طراحی پره توربین باد می‌باشد. این روش ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای طراحی پره است. ابتدا پره توربین باد با روش مومنتوم المان پره طراحی شده سپس با استفاده از CFD، جریان اطراف

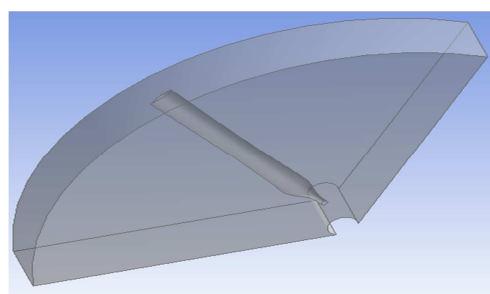
به دلیل تقارن (شرایط پریدیک) توربین باد ۳ پره‌ای، ناحیه حل ۱۲۰ درجه برای حل جریان اطراف توربین باد در نظر گرفته می‌شود. که بدین صورت، حجم محاسبات کاهش و سرعت حل افزایش می‌یابد. چرخش توربین‌های بادی می‌تواند به روشهای شبکه استاتیکی و یا دینامیکی مدل شود.

مدل شبکه دینامیکی بسیار زمانبر است. در حلهای پایا جریان اطراف اجسام دوار، مناسبتر است که از شبکه استاتیکی با مختصات مرجع دوار استفاده کرد، در این روش از دید کسی که با مختصات مرجع حرکت می‌کند، پره حرکت می‌کند [۱۳]. در این پروژه از روش مختصات مرجع دوار استفاده می‌شود. به همین خاطر، به منظور اعمال اثر چرخش جریان اطراف توربین باد، از دو ناحیه محاسباتی حل استفاده شده است. در ناحیه حل داخلی (شکل ۱۸) که شامل روتور و پره‌ها می‌باشد معادلات حاکم در مختصات مرجع دوار^۲ حل می‌شوند. دیگر ناحیه حل که به دور از روتور و پره‌ها می‌باشد معادلات در یک دستگاه مانا^۳ حل می‌شوند [۱۳ و ۱۴].

ناحیه بیرونی (شکل ۱۹) به صورت یک قطاع ۱۲۰ درجه بوده که ضخامت ناحیه در راستای محور چرخشی، ۶۷/۵ متر می‌باشد که قسمت اعظم این مقدار (۴۵ متر) در پشت توربین می‌باشد تا تأثیر گردابه بهتر در نظر گرفته شود. ضخامت ناحیه در راستای دهانه پره ۱۵ متر می‌باشد.

به دلیل کم بودن عدد رینولدز در جریان اطراف توربین باد، اندازه شبکه نزدیک پره بسیار مهم می‌باشد به همین خاطر به منظور کنترل درستی نتایج، مقدار y^+ باید آزموده شود. y^+ یک عدد بدون بعد بوده که مقدار آن معیاری از دقت شبکه نزدیک به دیواره و مقدار رینولدز جریان اطراف پره، می‌باشد. مقدار y^+ از رابطه (۲) به دست آمده و به منظور اینکه شبکه اطراف پره قابل قبول باشد باید کمتر از ۱۵۰ باشد [۱۴].

$$y^+ = \frac{y}{\mu} \sqrt{\rho \tau_w} \quad (2)$$

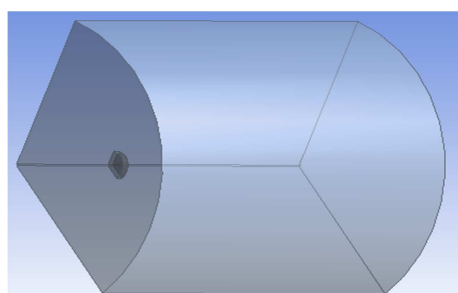


شکل ۱۸- تصویر ناحیه چرخشی اطراف پره

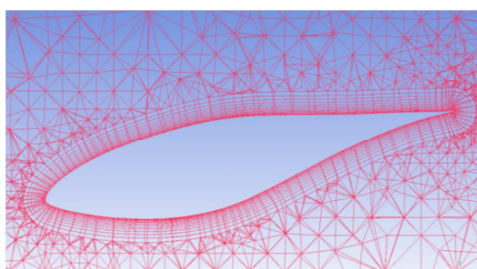
در این رابطه y فاصله از دیواره، μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی هوا و τ_w تنش برشی بر روی دیواره پره می‌باشد. منظور

دقیق بودن شبکه، ناحیه نزدیک به پره را شبکه باسازمان زده (شکل ۲۰)، سپس بقیه نواحی حل را شبکه بی‌سازمان (شکل ۲۱) زده می‌شود. ضمناً برای نشان دادن دقت شبکه با سازمان اطراف پره، توزیع مقدار y^+ در شکل (۲۲) آمده است که در حدود ۲۰ می‌باشد. تعداد کل المان‌های شبکه، ۳۲۳۴۵۰۹ می‌باشد که نزدیک به تعداد شبکه در کار منصور و همکارش می‌باشد.

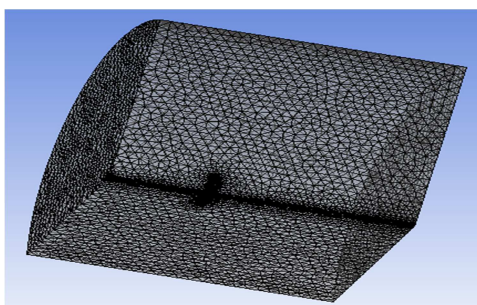
برای ورودی، شرط مرزی سرعت ۱۰/۵ متر بر ثانیه و خروجی فشار اتمسفر، دیواره‌های اطراف تناوبی و ناحیه داخلی به صورت چرخشی با سرعت زاویه‌ای ۷/۵۳۶- رادیان بر ثانیه انتخاب شده است. برای لایه مرزی از شبکه با سازمان و نواحی بیرون از لایه مرزی، شبکه بی‌سازمان استفاده شده است. برای تحلیل از مدل آشفتگی SST استفاده شده زیرا این مدل محل جدایش را بهتر از مدل‌های دیگر مشخص کرده و برای جریانهای خارجی مناسبتر است. حالت جریان پایدار و مغشوش بوده و معیار همگرایی ۰/۰۰۰۰۰۱ می‌باشد. با کامپیوتر ۷ هسته ای و ۱۶ RAM گیگابایت حدود ۱۰ ساعت طول می‌کشد که حل با ۶۰۰ تکرار، همگرا شود.



شکل ۱۹- ناحیه محاسباتی غیر چرخشی



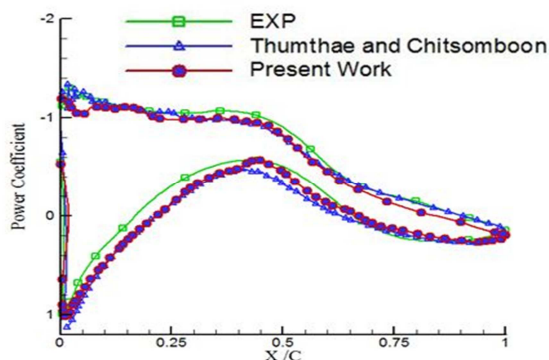
شکل ۲۰- شبکه با سازمان نزدیک پره



شکل ۲۱- تصویر شبکه بی سازمان اطراف پره توربین باد

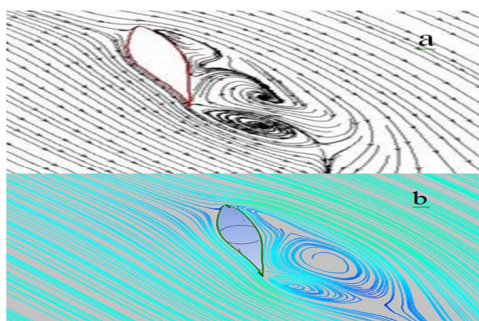
² Moving Reference Frame

³ Stationary

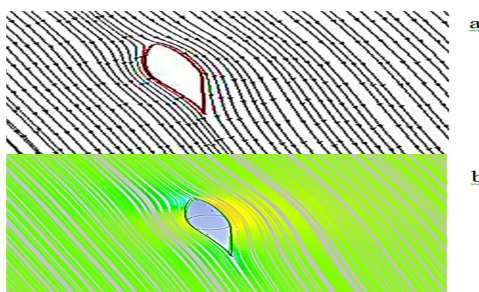


شکل ۲۴- توزیع ضریب فشار در ۸۰ درصد دهانه پره

در شکل‌های (۲۷ و ۲۸)، کانتور فشار در کار انجام شده و کار منصور و همکارش [۱۴]، آورده شده است. کاملاً مشخص است که نتایج بسیار به هم نزدیک می‌باشند. بعد از اطمینان یافتن از درست بودن نتایج شبیه‌سازی سه بعدی پره توربین باد، پره طراحی شده با روش مومنتوم المان پره با مشخصات جدول (۳) در نرم افزار شبیه‌سازی شده و همانند پره قبلی شبکه بندی و سپس تحلیل می‌شود. برای ورودی شرط مرزی سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و خروجی فشار اتمسفر، دیواره‌های اطراف پریودیک و ناحیه داخلی به صورت چرخشی با سرعت زاویه‌ای -7.536 رادیان بر ثانیه انتخاب شده است.



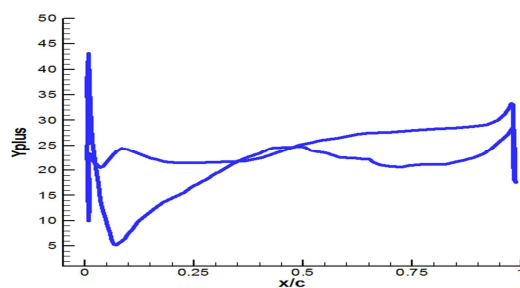
شکل ۲۵- خطوط جریان در ۳۰ درصد دهانه پره در منصور و همکارش (a) [۱۴] و کار کنونی انجام شده (b)



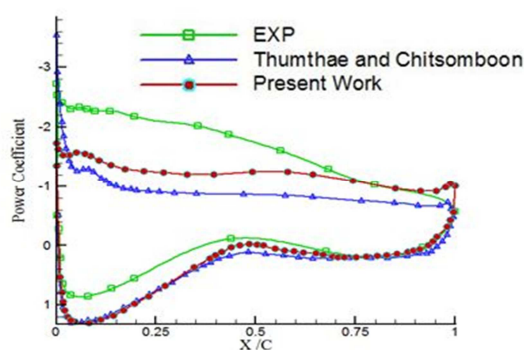
شکل ۲۶- خطوط جریان در ۸۰ درصد دهانه پره در کار منصور و همکارش (a) [۱۴] و کار کنونی انجام شده (b)

در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ توزیع فشار در مقاطع ۳۰ درصدی و ۸۰ درصدی شعاع پره آمده است. شکل ۲۳ نشان می‌دهد که در پایه پره به دلیل آیرودینامیک پیچیده، نتایج عددی حاصل از این کار با نتایج تونل باد تطابق کم، ولی نسبت به نتایج تامتایی و همکارش [۱۳]، دقت بیشتری را دارا می‌باشند. همچنین شکل ۲۴ نشان می‌دهد که نتایج عددی به نتایج تجربی بسیار نزدیک می‌باشند.

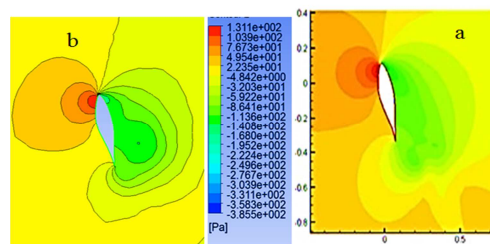
در شکل ۲۵، خطوط جریان در ۳۰ درصد دهانه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، کاملاً مشخص است که به دلیل شعاع در پایه پره، سرعت خطی کم بوده بنابراین، با توجه به ثابت گرفتن سرعت باد و زیاد بودن زاویه حمله جریان جدایش رخ می‌دهد. اما به دلیل کم بودن شعاع، گردابه ایجاد شده تأثیر آنچنانی بر روی ضریب توان ندارد. شکل (۲۶) که خطوط جریان را در ۸۰ درصد دهانه پره نشان می‌دهد مشخص است. که به دلیل اینکه زاویه حمله در محدوده مناسب بوده جدایشی رخ نداده و جریان کاملاً به پره چسبیده است. از شکل‌های ۲۵ و ۲۶ کاملاً مشخص است که نتایج حل عددی انجام شده با نتایج حل عددی کامیار منصور و همکارش [۱۴]، کاملاً تطابق دارد.



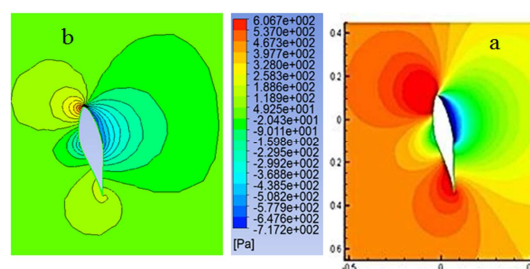
شکل ۲۲- تصویر مقدار Yplus بر روی دیواره پره



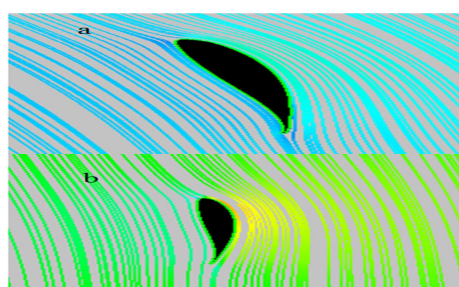
شکل ۲۳- توزیع ضریب فشار در ۳۰ درصد دهانه پره



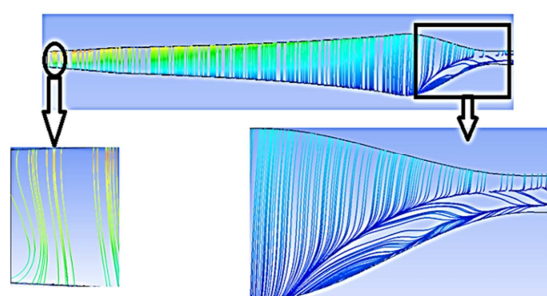
شکل ۲۷- توزیع فشار اطراف پره با ایرفویل S809، کار منصور و همکارش (a) و کار کنونی انجام شده (b) در ۳۰ درصد دهانه



شکل ۲۸- توزیع فشار اطراف پره با ایرفویل S809 در کار منصور و همکارش (a) و کار کنونی انجام شده (b) در ۸۰ درصد دهانه پره

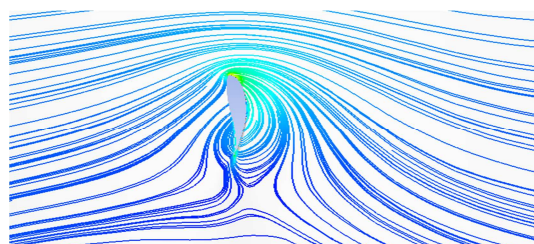


شکل ۲۹- تصویر خطوط جریان در ۳۰ درصد دهانه پره (a) و ۸۰ درصد دهانه پره (b)



شکل ۳۰- متمایل شدن خطوط جریان در نوک پره به سمت داخل

شکل (۳۱)، خطوط جریان را در ناحیه چرخشی را نشان می‌دهد. طبق شکل (۳۱)، خطوط جریان اطراف پره، همانند خطوط جریان اطراف استوانه دوار می‌باشد و این موضوع، با توجه به چرخش پره توربین در ناحیه حل، قابل قبول می‌باشد.



شکل ۳۱- خطوط جریان اطراف پره در دستگاه مختصات مطلق و در ناحیه چرخشی

بعد از حدود ۸۰۰ تکرار، حل همگرا شده و خطوط جریان در دو مقطع متفاوت پره در شکل (۲۷) آمده است. از این شکل، کاملاً مشخص است که هیچ گونه جدایش جریانی وجود ندارد. با یافتن مقدار گشتاور از حل عددی می‌توان ضریب توان را طبق رابطه زیر حساب کرد.

$$\text{Power Coefficient} = (\text{Torque} \times W) / (0.5 \rho A U^3) \quad (2)$$

A مساحت جاروب شده توسط پره توربین به شعاع R می‌باشد. در این تحلیل، مقدار ضریب توان ۰/۴۴۸ (طبق جدول ۵) و کمتر از مقداری است که از روش مومنتوم المان پره بدست آمده است. مهم‌ترین دلیل این اختلاف این است که در تحلیل سه بعدی به منظور مدل سازی پره، قسمت پایه پره را حذف کرده و به جای این قسمت که مقطع ایرفویلی داشت از مقطع استوانه به منظور مدل سازی پایه پره استفاده شده است. نیروی برای ایجاد شده توسط جسمی با مقطع استوانه، کمتر از نیروی برای ایجاد شده حول جسمی با مقطع ایرفویلی می‌باشد بنابراین سبب کاهش ضریب توان در تحلیل سه بعدی نسبت به تحلیل دوبعدی (مومنتوم المان پره) می‌شود.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضریب توان

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$W(\text{rad/s})$	$A(\text{m}^2)$	Torque(NM)
1.185	-12.32	24.66	-531.874

در پره‌های دوار، نیروهای گریز از مرکز و کریولیس نقش مهمی در لایه مرزی جدا شده که بعد از وامانش رخ می‌دهد بازی می‌کنند. در لایه مرزی چون سرعت و بنابراین مومنتوم نسبت به نیروهای گریز از مرکز کوچک است پس این پدیده

سرعت زاویه‌ای پره ثابت به دست می‌آید. در نتیجه توان توربین در پایه که حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای است کم است. با تعویض ایرفویل مشکل فوق حل نمی‌شود، چون این موضوع برای همه‌ی ایرفویل‌ها صادق است. پس بهتر است در قسمت پایه از یک ایرفویل ضخیم‌تر استفاده شود تا بهتر بتواند نیروها و گشتاورهای وارده را تحمل بکند. با توجه به اینکه ایرفویل NACA63-215 صلبیت (طول وتر) بیشتری دارد در پایه، ایرفویل FX63-137 ضریب توان بالا و صلبیت کمی دارد در قسمت بیرونی پره و ایرفویل Riso A1-24 که نسبت برآ به پسا بالا و صلبیت متوسطی دارد در قسمت میانی پره، استفاده می‌شود. استفاده از ۳ ایرفویل، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در ضریب توان، نسبت به حالتی که از تک ایرفویل FX63-137 برای طراحی پره استفاده می‌شود، ندارد. در نتیجه با ۳ ایرفویل فوق در طراحی پره، پایه پره، گشتاورهای وارد بر روتور را به خوبی تحمل خواهد کرد. همچنین به دلیل اینکه، ایرفویل بیرونی پره، طول وتر کمی دارد پس بارگذاری در نوک پره کاهش می‌یابد، که این سبب کم شدن نیروهای وارد بر نوک پره می‌شود.

۴- تحلیل عددی نشان می‌دهد که روش مومنتوم المان پره، از دقت خوبی در طراحی برخوردار است. خطوط جریان در اطراف پره‌ای که با این روش طراحی شده کاملاً به پره چسبیده و جدایشی وجود ندارد.

۵- روش مومنتوم المان پره، تنها اثرات دو بعدی جریان را در نظر گرفته، اما نسبت به دیگر روشهای طراحی پره توربین باد، ساده‌تر و سریعتر می‌باشد.

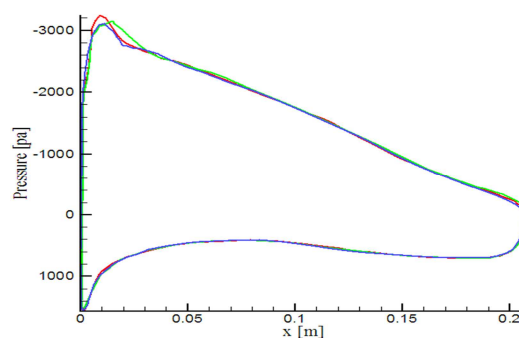
نمادهای انگلیسی

A	مساحت جاروب شده توسط پره توربین
C	به شعاع R، بر حسب متر مربع
C_p	طول دهانه پره، بر حسب متر
P	ضریب توان توربین باد
Power Coefficient	توان توربین باد، بر حسب کیلو وات
R	ضریب توان توربین
r	شعاع پره توربین باد، بر حسب متر
SST	شعاع محلی پره، بر حسب متر
Torque	مدل انتقال تنش برشی
U	گشتاور، بر حسب نیوتن متر
W	سرعت نامی باد، بر حسب متر بر ثانیه
Yplus	سرعت زاویه ای پره، بر حسب رادیان بر ثانیه
	عددی بدون بعد برای نشان دادن دقت شبکه روی سطح پره

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، از سه نوع شبکه بندی با شبکه ریز، متوسط و درشت استفاده شده که اطلاعات این سه نوع شبکه در جدول (۶)، آمده است. شکل (۳۲)، توزیع فشار اطراف پره در شبکه بندی متفاوت را نشان می‌دهد، کاملاً مشخص است که توزیع فشارها کاملاً بر هم منطبق شده بنابراین حل عددی دارای استقلال از شبکه می‌باشد.

جدول ۶- شبکه بندی های متفاوت به منظور بررسی استقلال شبکه

اندازه شبکه	تعداد المان
درشت	۳۰۳۶۰۹۸
متوسط	۳۸۹۱۳۱۶
ریز	۵۳۳۱۱۹۴



شکل ۳۲- نمایش توزیع فشار در ۸۰/۰ دهانه پره در سه نوع شبکه بندی متفاوت

۵- نتیجه گیری

۱- در نسبت سرعت های نوک بالا، پره با سرعت زیادی می‌چرخد. زیاد بودن سرعت پره، مانعی برای عبور جریان است در نتیجه سبب کاهش توان می‌شود. طبق شکل (۵) مشخص است که تا نسبت سرعت ۱۰، ضریب توان افزایش یافته و از آنجا به بعد کاهش می‌یابد. علاوه بر این سریع چرخیدن پره ها، سبب سر و صدا می‌شود. پس محدوده مناسب برای انتخاب نسبت سرعت نوک، ۶ الی ۸ می‌باشد.

۲- زاویه سرعت نسبی باد و زاویه پیچش پره، تابعی از نسبت سرعت نوک می‌باشند. با ثابت گرفتن نسبت سرعت نوک، توزیع این دو زاویه در راستای طول پره ثابت و مستقل از نوع ایرفویل می‌باشد (تابعی از سرعت باد نمی‌باشند چون با تغییر دادن مقدار سرعت باد، سرعت زاویه‌ای پره به نسبت سرعت باد تغییر کرده و نسبت سرعت نوک، ثابت می‌ماند).

۳- در پایه پره طبق شکل (۶)، چون شعاع کم است پس گشتاور که حاصل ضرب نیرو در شعاع می‌باشد کوچک است. از طرفی با ثابت فرض کردن سرعت باد و نسبت سرعت نوک،

نمادهای یونانی

ρ	چگالی هوا، بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب
η	بازده چرخ‌دنده توربین
φ	زاویه نسبی جریان باد، بر حسب درجه
	مثلاثاتی
λ	نسبت سرعت نوک
θ	زاویه پیچش پره، بر حسب درجه
α	زاویه حمله، بر حسب درجه
α_{design}	زاویه حمله بهینه، بر حسب درجه
τ_w	تنش برشی روی پره
μ	لزجت دینامیکی هوا
y^+	عددی بدون بعد برای نشان دادن دقت شبکه
	روی سطح پره

مراجع

- Wind Turbine Generator System", International Conference on Energy and Environment Technology, 2009.
- [11] Wenzhi L., Jianxin W., Fuhai Z., Changzeng L., "3D Modeling Methods of Aerodynamic Shape for LargeScale Wind Turbine Blades", International Conference on Information Technology and Computer Science, 2009.
- [12] Sedaghat A., Mirhosseini M., "Aerodynamic design of a 300 kW horizontal axis wind turbine for province of Semnan", Energy Conversion and Management, 2012.
- [13] Thumthae C., Chitsomboon T., "Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine". Renewable Energy, 34, 1279–1284, 2009.
- [14] Mansour K., Yahyazadeh M., "Effects of turbulence Model in Computational Fluid Dynamics Of Horizontal Axis Wind Turbine Aerodynamic", Wseas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. July 2011.
- [15] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., "Wind Energy Explained", University of Massachusetts, Amherst, USA. Copyright, by John Wiley and Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 2002.
- [16] Hansen M.O.L., "Aerodynamics Of Wind Turbines", Second Edition, published by Earth scan in the UK and USA, 2008.
- [17] Snel H., "Review of the present state of rotor aerodynamics", Wind Energy, Pilot Issue Spring 1998.
- [18] Fuglsang P., "Design of a 21 m Blade with Risø-A1 Airfoils for Active Stall Controlled Wind Turbines", Risø National Laboratory, Roskilde, December 2002.

- [1] Rankine WJM., "on the mechanical principles of the action of propellers", Transt Inst Naval Archit, 6, PP.13–39, 1865.
- [2] Froude RE., "on the part played in propulsion by difference in pressure", Transt Inst Naval Archit, 30, pp. 390–423, 1889.
- [3] Lanchester FW., "A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller", Transt Inst Naval Archit, pp. 98–116, 1915.
- [4] Glauert H., "Airplane propellers", In: Durand WF, editor, Aerodynamic theory, vol.4. Dover, 1943.
- [5] Lanzafame R., Messina M., "Fluid dynamics wind turbine design: Critical analysis, optimization and application of BEM theory", Renewable Energy 32, pp. 2291–2305, 2007.
- [6] Habali S.M., Saleh I.A., "Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced", Energy Conversion and Management, 41, pp. 249–280, 2000.
- [7] Duquette M. M., "The effect of solidity and blade number on the aerodynamic performance of small horizontal axis wind turbines", Master's thesis, Clarkson University, Potsdam, NY, 2002.
- [8] Wang F., Bai L., Fletcher J., Whiteford J., Cullen D., "Development of small domestic wind turbine with coop and prediction of its annual power output", Renewable Energy, 33, pp.1637–1651, 2008.
- [9] Jureczko M., Pawlak M., ezyk A. M., "Optimisation of wind turbine blades", Journal of Materials Processing Technology, 167, pp. 463–471, 2005.
- [10] Dong L., Liao M., Li Y., Song X., Xu K., "Study on Aerodynamic Design of Horizontal Axis