مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۲، ص‌ص ۷۹-۸۴

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی اثر محل اتصال و گام اولیه پره بر عملکرد یک توربین بادی محور عمودی

علی اسفندیاری[۱]، مجید بازارگان[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهران، صندوق پستی، ۴۳۳۴۴-۱۹۹۹۱، bazargan@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۱
پذیرش: ۰۷ اردیبهشت ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:
توربین بادی محور عمودی
دینامیک سیالات محاسباتی
محل اتصال پره
گام اولیه پره

چکیده

با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی از یک سو و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی باد، در کانون توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. از میان انواع توربین‌های بادی که به منظور دریافت توان الکتریکی از جریان باد مورد استفاده قرار می‌گیرند، توربین‌های بادی محور عمودی به دلیل عدم وابستگی به جهت وزش باد، حساسیت کمتر نسبت به آشفتگی جریان و تولید صدای کمتر، امکان استفاده در مناطق شهری و در نزدیکی مصرف کنندگان را فراهم می‌سازند. در این مقاله یک توربین بادی محور عمودی با پره‌های مستقیم به روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از حل عددی آن با نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهش‌گران اعتبارسنجی شده است. پس از آن، اثر تغییر محل اتصال پره‌های روتور به بازوهای نگهدارنده و گام اولیه پره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهدکه در نمونه مورد بررسی، انتخاب گام اولیه و محل اتصال مناسب پره می‌تواند بیشینه ضریب عملکرد توربین را به ترتیب ۶۵ و ۶۰ درصد افزایش دهد.

Effects of blade mount point and preset pitch on performance of vertical axis wind turbines

Ali Esfandiari, Majid Bazargan*

Mechanical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
*P.O.B. 19991-43344 Tehran, Iran, bazargan@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 February 2013
Accepted 27 April 2013
Available Online 20 April 2014

Keywords:
Vertical Axis Wind Turbine
VAWT
CFD
Blade Mount Point
Blade Preset Pitch

ABSTRACT

Due to growth of energy consumption and depletion of fossil fuels sources, power generation of renewable energy sources such as wind energy has become one of the main interests of researchers. Among different types of wind turbines used for extracting electric power from wind flow, vertical axis wind turbines can be implemented in urban areas and in proximity of energy consumers because of their independence of wind direction, low sensitivity to wind turbulence and lower noise production. In this paper a straight-bladed vertical axis wind turbine has been simulated 3 dimensionally by use of a commercial CFD code. The numerical results have been validated against available experimental data. To improve the performance of the turbine, the effects of blade mount point offset and preset pitch have been investigated. The results show that appropriate blade offset and preset pitch leads to a 60 and 65 percent increase in the maximum performance coefficient respectively.

۱- مقدمه

توربین‌های بادی امروزی را می‌توان بر اساس نحوه جهت‌گیری محور دوران روتور نسبت به راستای وزش باد به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول که محور دوران آن‌ها در راستای جریان باد قرار می‌گیرد، توربین‌های بادی محور افقی نامیده می‌شوند. این دسته از توربین‌ها عموما به منظور تولید توان در مقیاس‌های بالا در مزارع بادی مورد استفاده واقع می‌شوند. دسته دوم توربین‌های بادی محور عمودی می‌باشند، که در آن‌ها محور دوران روتور در راستای عمود بر جهت وزش باد قرار می‌گیرد. استفاده از این توربین‌ها به دلیل برخورداری از مزایایی همچون عدم وابستگی به جهت وزش باد، حساسیت کمتر نسبت به میزان آشفتگی جریان و همچنین تولید صدای کمتر در مناطق شهری مناسب می‌باشد. البته این توربین‌ها با مشکلاتی از قبیل ضریب عملکرد پایین و همچنین ناتوانی در آغاز دوران مواجه می‌باشند.

توربین‌های بادی محور عمودی که گشتاور دورانی خود را از نیروی برآی ناشی از گذر جریان بر پره‌های روتور به دست می‌آورند، اولین بار توسط داریوس معرفی شدند [۱]. توربین داریوس دارای سه پره خمیده بود که دو سر آن‌ها به محور دوران روتور متصل شده بود. پس از آن، طرح پره‌های این توربین به منظور کاهش هزینه‌های ساخت به شکل مستقیم تغییر یافت که به آن‌ها توربین بادی محور عمودی پره مستقیم[۱] گفته می‌شود.

عمده مطالعات در رابطه با توربین‌های بادی محور عمودی مربوط به

1- Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Esfandiari, M. Bazargan, Effects of blade mount point and preset pitch on performance of vertical axis wind turbines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 79-84, 2014 (In Persian)

اواخر دهه ۸۰ و اویل دهه ۹۰ قرن بیستم میلادی می‌باشد که مطالعات گسترده‌ای در آزمایشگاه‌های ملی ساندیای[1] آمریکا و دانشگاه ردینگ[2] انگلستان صورت گرفته است. پس از آن، با پذیرفته شدن اینکه توربین‌های محور افقی از راندمان بالاتری نسبت به توربین‌های محور عمودی در مقیاس‌های بالا برخوردارند، علاقه پژوهش‌گران به این توربین‌ها کاهش یافت. از این‌رو می‌توان دریافت که چرا فناوری توربین‌های بادی محور عمودی نسبت به توربین‌های محور افقی رشد چندانی نداشته است.

با این وجود، در طی سال‌های اخیر با توجه به بحران‌های انرژی و پدیده گرمایش زمین، مجددا توجه پژوهش‌گران به این توربین‌ها برای به‌کارگیری در مقیاس‌های کوچک جلب شده است. از این‌رو در سال‌های اخیر مطالعات قابل توجهی شامل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های عددی بر روی توربین‌های محور عمودی در مقیاس کوچک صورت گرفته است. در ادامه منتخبی از این مطالعات آورده شده است.

مارینی و همکارانش [۲]، اثر انحنای پره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به‌کارگیری پره‌های سهمی شکل، موجب افزایش ضریب عملکرد این توربین‌ها می‌شود. اسلام [۳] اثر به کارگیری ایرفویل‌های نامتقارن را مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد که استفاده از این ایرفویل‌ها در مقطع پره‌ها، علاوه بر بهبود کارایی این توربین‌ها موجب افزایش گشتاور تولیدی در آغاز به دوران توربین می‌شود. لازاوسکاس [۴] و استالنز و همکارانش [۵] اثر به کارگیری سیستم‌های کنترل گام پره[3] را بر توربین‌های محور عمودی با گام متغیر با استفاده از مدل مومنتم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به کارگیری این سیستم‌ها موجب افزایش ضریب عملکرد این توربین‌ها می‌شود. کلیماس و همکارانش [۶] اثر اعمال گام اولیه بر پره‌های توربین داریوس را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که انتخاب گام اولیه مناسب می‌تواند کارایی توربین را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. فیدلر و همکارانش [۷] اثر تغییر محل اتصال پره‌های روتور[4] و گام اولیه پره را به صورت آزمایشگاهی بر کارایی توربین محور عمودی پره مستقیم مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با انتخاب مقدار مناسب این دو پارامتر می‌توان ضریب عملکرد توربین را به میزان قابل توجهی افزایش داد. هاول و همکارانش [۸] کارایی یک نمونه آزمایشگاهی توربین محور عمودی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین کارایی نمونه خود را به روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت دو بعدی و سه بعدی بررسی کردند و نشان دادند که شبیه‌سازی دو بعدی این توربین‌ها به دلیل صرف‌نظر از اثرات لبه‌های انتهایی پره‌ها از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشد. سعیدی و همکارانش [۹] کارایی توربین‌های محور عمودی را به منظور به‌کارگیری در منطقه فدشک خراسان به کمک مدل مومنتم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که قیمت هر کیلووات ساعت انرژی تولید شده توسط این توربین‌ها تقریبا ۵۰ درصد ارزان‌تر از قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر خریداری شده توسط دولت می‌شود.

در این پژوهش توربین آزمایشگاهی هاول و همکارانش به عنوان نمونه مورد بررسی انتخاب شده است. از آنجا که توربین موردنظر از جمله توربین‌های با نسبت صلبیت بالا می‌باشد و مدل مومنتم قادر به ارائه برآورد مناسبی از کارایی آن نمی‌باشد، در این مقاله از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت سه بعدی به منظور بررسی آن استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی نتایج، به منظور بهبود کارایی این توربین اثر محل اتصال پره به بازوهای نگه‌دارنده و اثر اعمال گام اولیه بر پره‌های روتور بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. باید در نظر داشت که بررسی این پارامترها با استفاده از مدل مومنتم امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲- شبیه‌سازی

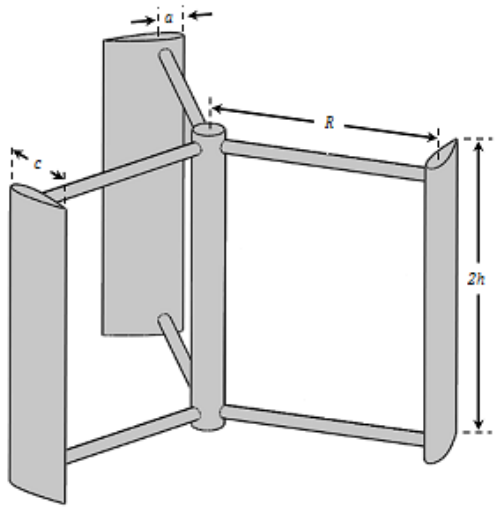
در جدول ۱ مشخصات توربین مورد استفاده توسط هاول و همکارانش آورده شده و در شکل ۱ نمایی از این توربین نشان داده شده است.

میدان حل، مطابق با آزمایش‌های هاول و همکارانش، تونل بادی با مقطع ۱/۲ × ۱/۲ متر مربع در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش اثر شرط مرزی خروجی تونل باد بر الگوی جریان حول روتور، طول تونل باد دو برابر مقدار واقعی آن و برابر با ۶ متر در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور کاهش هزینه محاسباتی و با توجه به تقارن حاکم بر میدان حل، میدان جریان تنها در نیمی از تونل باد شبیه‌سازی شده است. در شکل ۲ میدان حل مورد استفاده در شبیه‌سازی نشان داده شده است.

به‌منظور مدل‌سازی دوران روتور، با استفاده از روش شبکه لغزان[5]، میدان حل به دو ناحیه دوار و ساکن تقسیم شده است. ناحیه دوار شامل استوانه دربرگیرنده توربین می‌باشد که توسط دو سطح اشتراکی[6] در برگرفته شده و از ناحیه ساکن مجزا شده است (شکل ۲). استفاده از روش شبکه لغزان این امکان را فراهم می‌سازد که ناحیه دوار که شامل پره‌های روتور و شبکه در برگیرنده آن می‌باشد، با سرعت دورانی روتور دوران کند.

جدول ۱ مشخصات روتور توربین بادی مورد بررسی

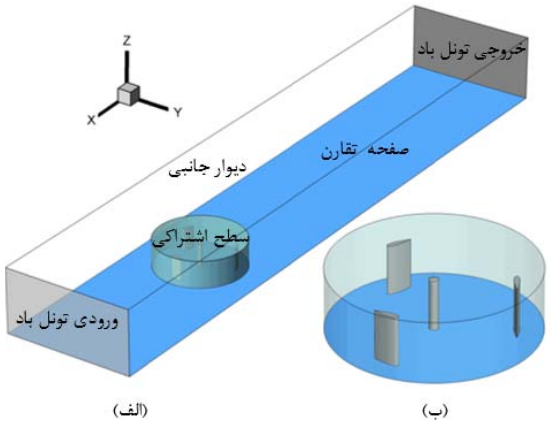
مشخصات توربین	توضیحات
تعداد پره‌ها	۳ عدد
شعاع روتور	۰/۳ متر
ارتفاع روتور	۰/۴ متر
طول وتر پره	۰/۱ متر
فاصله محل اتصال پره به بازوها از لبه حمله پره	۰/۰۲۵ متر
گام اولیه پره	۰ درجه
ایرفویل مقطع پره	NACA۰۰۲۲



شکل ۱ نمایی از توربین بادی محور عمودی مورد بررسی

1- Sandia National Laboratories
2- Reading University
3- Blade Pitch
4- Blade Mount Point Offset

5- Sliding Mesh
6- Interface



شکل ۲ شماتیکی از میدان حل: (الف) ناحیه ساکن، (ب) ناحیه دوار

شبکه‌بندی میدان حل با استفاده از نرم‌افزار گمبیت انجام شده که برای این منظور، در ناحیه ساکن از شبکه سازمان یافته و در ناحیه دوار از شبکه بی-سازمان با سلول‌های چهار وجهی استفاده شده است. در شکل ۳ نمایی از شبکه روی سطح تقارن ناحیه دوار نشان داده شده است.

به منظور حل معادلات حاکم بر میدان حل از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۶/۳ استفاده شده است که شرایط مرزی مورد استفاده برای این منظور عبارتند از:

در ورودی تونل باد از شرط مرزی سرعت ورودی[1] استفاده شده و مقادیر سرعت جریان، شدت آشفتگی[2] و طول مشخصه به ترتیب ۴/۳۱ متر بر ثانیه، ۱٪ و ۰/۰۱ متر قرار داده شده است [۸]. در خروجی تونل باد از شرط مرزی جریان خروجی[3] استفاده شده، همچنین روی دیواره‌های تونل باد، سطوح پره‌های روتور و محور دوران روتور از شرط مرزی دیوار[4] همراه با شرط عدم لغزش[5] استفاده شده است.

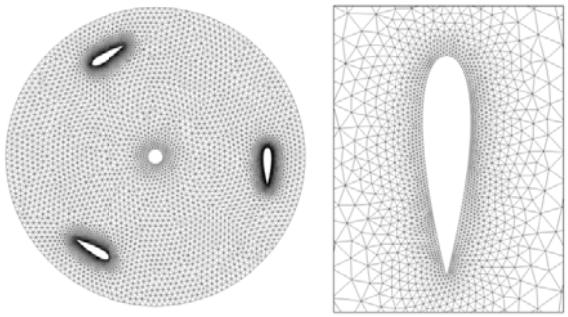
از آنجا که جریان با عبور از توربین‌های محور عمودی با جدایش‌های بزرگ همراه است، بنابر توصیه هاول [۸] در شبیه‌سازی صورت گرفته از مدل آشفتگی کی-اپسیلون آرانجی[6] استفاده شده و به منظور بررسی جریان در کناره دیواره‌ها از توابع استاندارد دیواره استفاده شده است.

حل میدان جریان به روش ناپایا[7] صورت گرفته و به منظور حل کوپلینگ سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل[8] استفاده شده است. همچنین در گسسته‌سازی گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش‌های ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده است.

استقلال نتایج از شبکه با مقایسه ضریب گشتاور روتور برای سه شبکه با تعداد سلول‌های ۱/۹، ۲/۴ و ۳/۲ میلیون مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که بیشینه اختلاف بین دو شبکه متوسط و ریز، کمتر از ۵٪ بوده، شبکه با ۲/۴ میلیون سلول برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است.

استقلال نتایج از گام زمانی با مقایسه ضریب گشتاور روتور برای دو گام زمانی متناظر با ۱و ۰/۵ درجه دوران روتور در هر گام بررسی شده است. با توجه به این که بیشینه اختلاف ضریب گشتاور بین این دو گام زمانی، کمتر از ۴٪ بوده در ادامه شبیه‌سازی از گام زمانی متناظر با ۱ درجه دوران روتور استفاده شده است.

1- Velocity Inlet
2- Turbulent Intensity
3- Outflow
4- Wall
5- No Slip
6- k-ε RNG
7- Unsteady
8- SIMPLE



شکل ۳ نمایی از شبکه مورد استفاده در ناحیه دوار

جدول ۲ روش‌های مورد استفاده در گسسته‌سازی معادلات حاکم

پارامتر	روش گسسته‌سازی
زمان	ضمنی مرتبه دوم
فشار	استاندارد
مومنتم	بادسوی مرتبه دوم
انرژی جنبشی آشفتگی	بادسوی مرتبه دوم
نرخ اتلاف آشفتگی	بادسوی مرتبه دوم

جدول ۳ هزینه محاسباتی و سخت‌افزار مورد استفاده

پارامتر	مقدار
متوسط تعداد سلول شبکه‌های محاسباتی	۲/۴ میلیون
بیشینه فضای حافظه اشغال شده	۳/۵ گیگابایت
مشخصات سی‌پی‌یو[9]	Intel corei3-3.1Mhz
مشخصات رم[10]	Bus 1333Mhz
مدت زمان هر شبیه‌سازی	۴۲ ساعت
تعداد دفعات شبیه‌سازی	۵۱ عدد
کل مدت زمان صرف شده برای شبیه سازی	۲۱۴۲ ساعت

به منظور بررسی تعداد دوران لازم روتور برای دست‌یابی به میدان جریان توسعه یافته ضرایب گشتاور روتور در دوران‌های مختلف بررسی شده است. با توجه به اینکه که بیشینه اختلاف ضریب گشتاور بین دورهای ششم و هفتم کمتر از ۵٪ است، نتایج به دست آمده در دور ششم روتور به عنوان نتایج پایا در نظر گرفته شده و از آن برای محاسبه ضرایب عملکرد استفاده شده است.

مشخصات سخت‌افزار مورد استفاده و مدت زمان محاسباتی صرف شده به منظور بررسی در این مقاله در جدول ۳ آورده شده است.

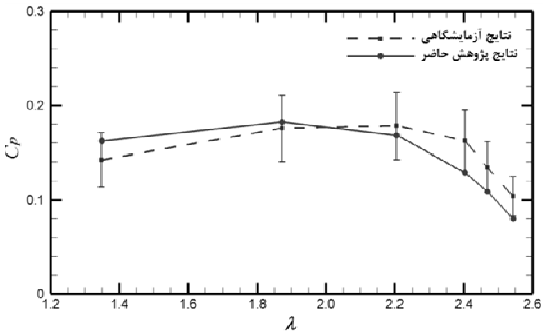
۳- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی، منحنی ضریب عملکرد توربین برحسب نسبت سرعت لبه تهیه شده و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط هاول و همکارانش مقایسه شده است (شکل ۴). همان‌طور که هاول و همکارانش اشاره کرده‌اند مقادیر آزمایشگاهی ارائه شده می‌تواند تا ۲۰ درصد خطا داشته باشد که در شکل نیز این مقدار به صورت خطوط خطا لحاظ شده است.

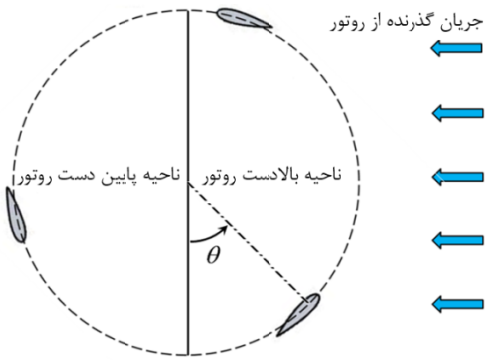
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی نتایج حاصل از حل عددی از هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد و بیشینه اختلاف بین نتایج در نسبت سرعت لبه ۲/۵۵ به مقدار ۲۳٪ می‌رسد.

باید توجه داشت که در شکل ۴، ضریب عملکرد توربین از رابطه (۱) و نسبت سرعت لبه پره توربین با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است.

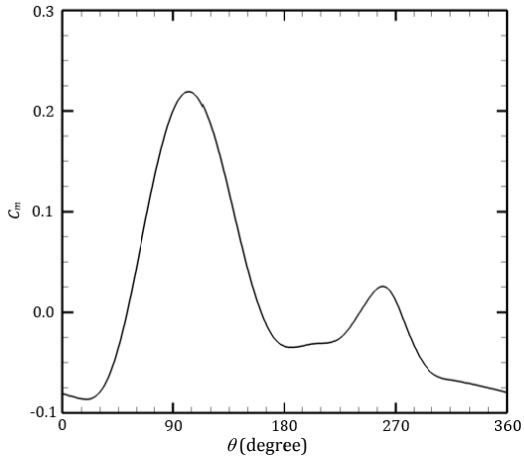
9- CPU(Central Processing Unit)
10- RAM (Random Access Memory)



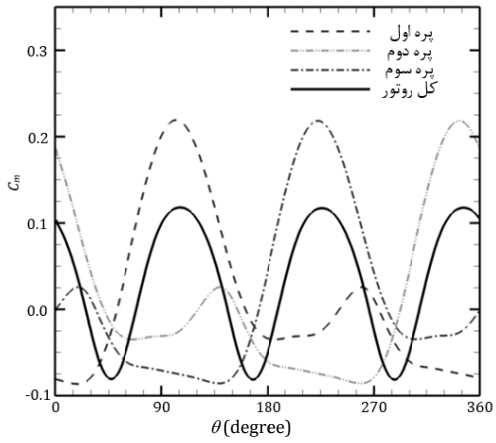
شکل ۴ نمودار ضریب عملکرد بر حسب نسبت سرعت لبه پره در سرعت باد ۴/۳۱ متر بر ثانیه



شکل ۵ نمایی از روتور و نواحی تشکیل دهنده آن



شکل ۶ ضریب گشتاور تولیدی پره مرجع در یک دوران



شکل ۷ ضریب گشتاور تولیدی روتور و پره‌های آن

$$C_p = \frac{\bar{T}\omega}{0.5\rho D H V_\infty{}^3} \quad (۱)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (۲)$$

۴- عملکرد توربین در یک دوران

به منظور درک بهتر نحوه عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی، در این قسمت عملکرد توربین در یک دوران آن در یک نسبت سرعت لبه (۲/۵۵) مورد بررسی قرار گرفته است.

موقعیت روتور نسبت به جریان گذرنده از آن با استفاده از موقعیت یک پره آن مشخص می‌شود که در اینجا این پره به صورت پره مرجع مورد خطاب قرار داده شده است. زاویه موقعیت پره مرجع و روتور و همچنین نواحی بالادست و پایین‌دست روتور در شکل ۵ نشان داده شده است.

با عبور جریان بر پره‌های روتور، دو نیروی عمودی و مماسی بر پره‌های روتور در مرکز فشار پره وارد شده و گشتاور تولیدی پره، از مجموع گشتاور این دو نیرو حول محور دوران روتور حاصل می‌شود.

نمودار ضریب گشتاور تولیدی توسط پره مرجع در یک دوران روتور در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمده دریافت انرژی از جریان توسط پره در ناحیه بالادست روتور صورت می‌گیرد و در ناحیه پایین‌دست بخش اندکی از انرژی جریان به پره‌های روتور منتقل می‌شود. باید توجه داشت در ناحیه پایین‌دست، در برخی مواقع گشتاور تولیدی در خلاف جهت دوران می‌باشد که این موجب کاهش کارایی توربین می‌شود.

در هر زاویه، گشتاور تولیدی کل روتور از مجموع گشتاور تولیدی توسط هر پره حاصل می‌شود (شکل ۷). همان‌طور که قابل مشاهده است، گشتاور تولیدی کل روتور ماهیتی نوسانی دارد و برای محاسبه ضریب عملکرد توربین (رابطه ۱)، از مقدار متوسط آن استفاده می‌شود.

ضریب گشتاور ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷، از رابطه ۳ محاسبه شده است.

$$C_m = \frac{T}{0.5\rho V_\infty^2 D H R} \quad (۳)$$

۵- بررسی اثر محل اتصال پره

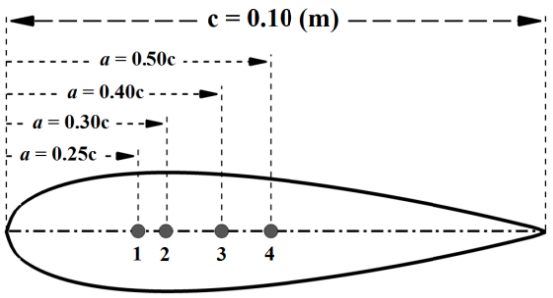
به منظور بررسی اثر تغییر محل اتصال پره بر کارایی توربین موردنظر، ۳ روتور دیگر با محل اتصال‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ شماتیکی از نقاط اتصال پره به بازوهای نگه‌دارنده مورد بررسی در این قسمت نشان داده شده است. در این شکل نقطه اول در مرکز آیرودینامیکی، نقطه دوم در محل بیشینه ضخامت، نقطه سوم در مرکز سطح و نقطه چهارم در میانه وتر ایرفویل انتخاب شده است.

شکل ۹ منحنی ضریب عملکرد توربین بر حسب نسبت سرعت لبه را برای روتور با محل اتصال‌های ذکر شده نشان می‌دهد.

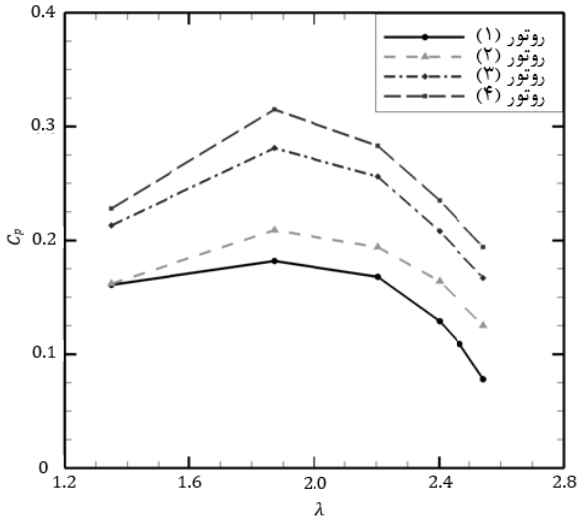
باید توجه داشت که در شکل ۹ و همچنین در شکل ۱۱، شماره‌گذاری روتورها مطابق با شماره‌گذاری صورت گرفته برای محل اتصال پره‌ها در شکل ۸ می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با دور شدن محل اتصال از لبه حمله پره، ضریب عملکرد توربین افزایش می‌یابد و در عین حال، نسبت سرعت لبه مربوط به بیشینه ضریب عملکرد ثابت می‌ماند.

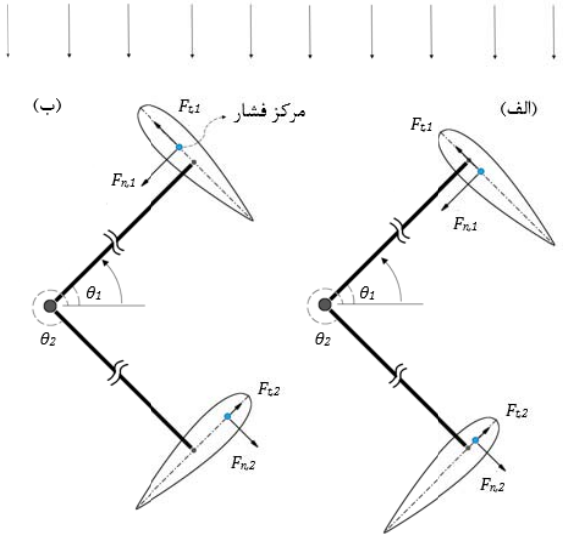
علت افزایش ضریب عملکرد توربین با دور شدن محل اتصال از لبه حمله پره را می‌توان ناشی از افزایش گشتاور نیروهای عمودی حول محور دوران دانست.



شکل ۸ نمایی از محل اتصال‌های مختلف مورد بررسی



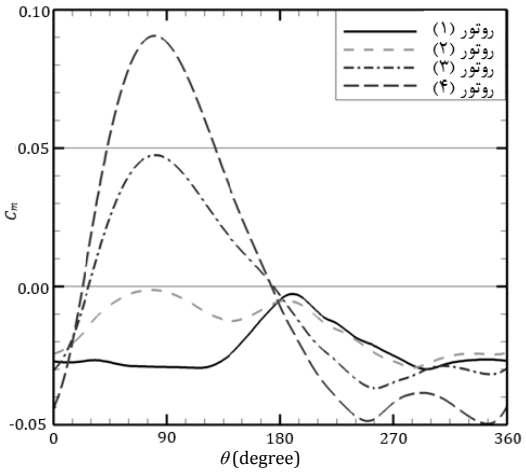
شکل ۹ منحنی ضریب عملکرد برای محل اتصال‌های مختلف



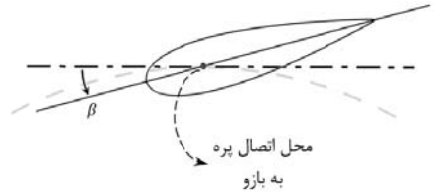
شکل ۱۰ نمایی از موقعیت مرکز فشار نسبت به محل اتصال پره به بازوهای نگهدارنده

در نمونه اصلی که محل اتصال پره در مرکز آیرودینامیکی ایرفویل واقع است، همواره گشتاوری در خلاف جهت دوران روتور توسط نیروی عمودی به وجود می‌آید (شکل ۱۰- الف). این شکل برای محل اتصال ۰/۲۵ و ۰/۳ برقرار است.

در زوایایی که نیروی عمودی در جهت منفی می‌باشد، به طور همزمان مرکز فشار در فاصله بین محل اتصال تا لبه فرار پره قرار می‌گیرد و در زوایایی که این نیرو در جهت مثبت وارد می‌شود، مرکز فشار به فاصله بین لبه حمله تا محل اتصال منتقل شده و در کل موجب می‌شود که گشتاور تولیدی ناشی از این نیرو همواره با دوران روتور مخالفت کند.



شکل ۱۱ ضریب گشتاور تولیدی نیروی عمودی برای محل اتصال‌های مختلف



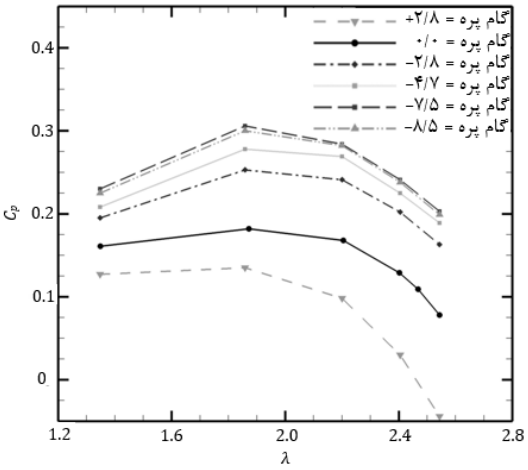
شکل ۱۲ نمایی از گام اولیه پره در توربین‌های محور عمودی

برای محل اتصال ۰/۴ و ۰/۵، مرکز فشار همواره در ناحیه بین لبه حمله پره تا محل اتصال آن قرار می‌گیرد (شکل ۱۰- ب). این موجب می‌شود که در زوایایی که نیروی عمودی در جهت منفی می‌باشد، گشتاور تولیدی ناشی از این نیرو در جهت دوران روتور وارد شود و در تولید گشتاور روتور مشارکت کند ولی در زوایایی که نیروی عمودی در جهت مثبت وارد می‌شود، همچنان گشتاور ناشی از آن نیرو در خلاف جهت دوران روتور وارد شود. به منظور درک بهتر توضیحات فوق، نمودار ضریب گشتاور ناشی از نیروی عمودی در نسبت سرعت ۲/۲ در شکل ۱۱ آورده شده است.

۶- بررسی اثر گام اولیه پره

در توربین‌های محور عمودی، گام پره به صورت زاویه بین خط وتر پره و خط مماس بر مسیر دوران تعریف می‌شود. مقادیر مثبت این زاویه همانند شکل ۱۲ به سمت داخل مسیر دوران پره می‌باشد.

در توربین‌های محور عمودی با نسبت صلبیت بالا، زاویه حمله جریان در طول خط وتر پره تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد [۷]. به این خاطر، دست‌یابی به مقدار مناسب گام اولیه پره‌ها به منظور بهبود عملکرد این توربین‌ها امری ضروری می‌باشد. در این قسمت به منظور بررسی اثر گام اولیه پره بر کارایی توربین و دست‌یابی به مقدار مناسب آن برای توربین موردنظر، گام‌های اولیه ۲/۸+، ۲/۸-، ۴/۷-، ۶/۶-، ۷/۵- و ۸/۵- درجه بر پره‌های روتور اعمال شده است. در شکل ۱۳ منحنی ضریب عملکرد توربین بر حسب نسبت سرعت لبه برای روتور با گام‌های اولیه مختلف پره نشان داده شده است. با توجه به این که نتایج ضریب عملکرد روتور با گام‌های اولیه ۶/۶- و ۸/۵- درجه تقریباً بر هم منطبق شده‌اند در ارائه نتایج به منظور وضوح بیش‌تر، از ارائه نتایج مربوط به گام اولیه ۶/۶- درجه صرف‌نظر شده است.همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال گام اولیه مثبت بر پره‌های روتور ضریب عملکرد کاهش یافته و مقدار آن در نسبت سرعت لبه ۲/۵۵، منفی می‌شود. این به مفهوم آن است که با گذر جریان بر پره‌ها، روتور حتی قادر نخواهد بود که به سرعت دورانی مربوط به این نسبت سرعت لبه دست یابد.



شکل ۱۳ منحنی ضریب عملکرد برای گام‌های اولیه مختلف پره

با اعمال گام اولیه منفی بر پره‌های روتور، تا گام اولیه ۷/۵- درجه ضریب عملکرد توربین افزایش می‌یابد و با بیش‌تر شدن گام اولیه (۸/۵- درجه)، ضریب عملکرد تغییر چندانی نخواهد کرد. با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود که بیش‌ترین ضریب عملکرد برای توربین مورد نظر در گام اولیه ۷/۵- درجه حاصل می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش در بررسی اثر محل اتصال پره‌های روتور به بازوهای نگهدارنده نشان داده شده است که اتصال پره‌های روتور در فواصل دورتر از لبه حمله پره موجب افزایش ضریب عملکرد توربین خواهد شد به گونه‌ای که اتصال پره‌ها به بازوهای نگهدارنده در میانه طول وتر موجب می‌شود که بیشینه ضریب عملکرد توربین نسبت به نمونه اصلی تقریبا ۶۰ درصد افزایش یابد. همچنین بررسی اثر گام اولیه پره‌های روتور نشان می‌دهد که اعمال زوایای گام تا ۷/۵- درجه موجب افزایش ضریب عملکرد توربین می‌شود. در گام اولیه ۷/۵- درجه بیشینه ضریب عملکرد توربین نسبت به نمونه اصلی تقریبا ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت.

۸- فهرست علایم

a فاصله محل اتصال پره به بازوها از لبه حمله پره (m)

c طول وتر پره (m)

C_p ضریب عملکرد توربین

C_m ضریب گشتاور

D قطر روتور (m)

H ارتفاع پره (m)

R شعاع روتور (m)

T گشتاور تولیدی در هر موقعیت (N.m)

$\overline{T}$ متوسط گشتاور تولیدی کل روتور (N.m)

V_∞ سرعت باد (ms^{-1})

ρ چگالی هوا (Kgm^{-3})

θ زاویه موقعیت پره (degree)

λ نسبت سرعت لبه

ω سرعت دورانی روتور (rad/sec)

β گام اولیه پره (degree)

۹- مراجع

[1] G.J.M. Darrieus, Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current, US Patent No. 1835081, 1931.

[2] M. Marini, A. Massardo, A. Satta, Performance of vertical axis wind turbine with different shapes, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 39, pp. 83-93, 1992.

[3] M. Islam, Analysis of fixed-pitch straight-bladed WAVT with asymmetric airfoils, PhD thesis, Ontario, University of Windsor, 2008.

[4] L. Lazauskas, Three pitch control systems for vertical axis wind turbines compared, Wind engineering, Vol. 16, pp. 269-282, 1992.

[5] Y. Staelens, F.Saeed, I.Paraschivoiu, A straight-bladed variable-pitch VAWT concept for improved power generation, AIAA, 2003.

[6] P. Klimas, M.Worstell, Effects of blade preset pitch/offset on curved-blade darrieus vertical axis wind turbine performance, Sandia National Laboratories report, SAND-18-1762. Albuquerque NM, 1981.

[7] A.J. Fiedler, S.Tullis, Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine, Wind engineering, Vol. 33, pp. 237-246, 2009.

[8] R. Howell, N.Qin, J.Edwards, N.Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, Renewable energy, Vol. 35, pp. 412-422, 2010.

[9] D. Saeidi, A. Sedaghat, P. Alamdari, A.A. Alemrajabi, Aerodynamic design and economical evolution of site specific small vertical axis wind turbines, Applied energy, Vol. 101, pp. 765-775, 2013.