

مدلسازی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی دو پره‌ای و سه پره‌ای

میلاد ندیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مرتضی خلیلیان*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در این مطالعه، ابتدا یک توربین بادی محور عمودی سه پره‌ای با پره‌های مستقیم به روش دینامیک سیالات محاسباتی و به صورت سه‌بعدی مدلسازی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران اعتبارسنجی شده‌است. سپس یک توربین بادی دو پره‌ای با پره‌های مستقیم و با همان شرایط حل قبلی مدلسازی شده و مشخصات آیرودینامیکی و عملکرد آن با نتایج بدست آمده برای توربین سه‌پره‌ای مقایسه شده‌است. مقایسه مشخصات آیرودینامیکی برای دو توربین بادی، با سرعت‌های در نوک پره مختلف و با توجه به بیشترین توان تولید شده توسط توربین موردنظر در هر سرعت در نوک پره انجام شده‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در نمونه‌های مورد بررسی، توربین بادی دوپره‌ای با وجود صلبیت کم نسبت به توربین سه پره‌ای، دارای بازده خوبی می‌باشد و بیشترین اختلاف بین ضرایب توان این دو توربین در نسبت سرعت در نوک پره ۲،۵۵ اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، در این مطالعه توان تولیدی توربین دو پره‌ای در مقایسه با توربین سه پره‌ای به میزان ۵۴٪ بیشتر است که این خود به صرفه بودن و کارا بودن توربین دو پره‌ای مورد بررسی را تصدیق می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی محور عمودی، دینامیک سیالات محاسباتی، نسبت سرعت در نوک پره، صلبیت.

Modeling and Comparison of Aerodynamic Characteristics of Two-Bladed and Three-Bladed Vertical Axis Wind Turbines

M. Nadimi

Mechanical Engineering Department, Urmia University, urmia, Iran

M. Khalilian

Mechanical Engineering Department, Urmia University, urmia, Iran

Abstract

In this study, firstly, a three-bladed vertical axis wind turbine with straight blades was three-dimensionally modeled using computational fluid dynamics (CFD) and the obtained results were compared to the experimental data presented by other researchers. Then, a two-bladed vertical axis wind turbine with straight blades was simulated under the same conditions, and its aerodynamic characteristics and performance were compared to those of the three-bladed turbine. The comparison on aerodynamic characteristics between the two turbines was made at different tip velocities considering the peak power produced by each turbine at each tip velocity. Results showed that, despite its lower rigidity compared to the three-bladed turbine, the two-bladed turbine was highly efficient, with the largest difference between power factors of the two turbines occurring at a tip velocity ratio of 2.55. Furthermore, in this research, the produced power by the two-bladed turbine exceeded that of the three-bladed turbine by 54%, further confirming cost-effectiveness and efficiency of the considered two-bladed turbine.

Keyword: Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), Computational Fluid Dynamics (CFD), Tip Speed Ratio (TSR), Solidity.

بادی محور افقی^۱ که محور چرخش آن در راستای سطح زمین است،

۲- توربین‌های بادی محور عمودی^۲ که محور چرخش آنها عمود بر سطح زمین است. اگرچه میزان استفاده از توربین‌های بادی محور افقی برای تولید توان در صنعت توربین‌های بادی شایع‌تر است و بصورت گسترده در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی توربین‌های بادی محور عمودی نیز به دلیل سادگی طراحی، عدم وابستگی به جهت وزش باد و تولید توان در مقیاس‌های کوچک بیش از پیش مورد توجه طراحان قرار گرفته‌است. علاوه بر این، توربین‌های بادی محور عمودی می‌توانند برای استفاده در مناطق شهری که سرعت وزش باد در آنها کم است، برای تولید توان منازل مسکونی و همچنین ادارات دولتی جایگزین مناسبی باشند [۱ و ۲].

توربین‌های بادی محور عمودی، ابتدا در سال ۱۹۳۱ میلادی توسط مهندس فرانسوی بنام جرج داریوس^۳ اختراع و ساخته شد [۱]. این

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی جهانی و محدود بودن منابع فسیلی کره زمین، ضرورت توجه به بحث توسعه و بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان افزایش یافته‌است. شایان ذکر است با افزایش دمای کره زمین در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، اهمیت تولید برق از طریق انرژی‌های پاک دو چندان شده‌است. بنابراین استفاده از توربین‌های بادی به عنوان یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر برای تولید توان مورد نیاز می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. این امر موجب شده است که فعالیت و پژوهش‌های مختلفی در نهادها و مراکز پژوهشی گوناگون بر روی انواع توربین‌های بادی صورت بگیرد که منجر به تولید مدل‌های مختلف آیرودینامیکی از این توربین‌ها شده‌است. توربین‌های بادی را بطور کلی می‌توان بر اساس محور چرخش آنها به دو نوع مختلف تقسیم‌بندی نمود: ۱- توربین‌های

¹ Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

² Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

³ George Darrieus

توربین دارای پره‌های خمیده و بصورت همزنی^۱ شکل بوده و بنام سازنده‌اش نامگذاری شده‌است. با گذشت زمان توربین‌های بادی محور عمودی دیگری نیز ساخته و راه‌اندازی شده‌است. یکی از این توربین‌ها، توربین بادی محور عمودی H-شکل با پره‌های مستقیم است که نسبت به توربین داریوس دارای چندین مزیت است از جمله: ۱- ایجاد صدای کمتر در سرعت‌های چرخش پایین، ۲- گشتاور شروع بالا، ۳- هزینه تعمیر و نگهداری پایین‌تر، ۴- سهولت طراحی و ساخت با توجه به استفاده از ایرفویل‌های ساده و مستقیم [۲].

توربین‌های بادی توان خود را از طریق نیروهای آیرودینامیکی وارد شده بر پره‌هایشان تولید می‌کنند. عوامل اصلی موثر بر عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های بادی محور عمودی عبارتند از: شعاع روتور، تعداد پره‌ها، طول پره، ارتفاع پره، نسبت سرعت در نوک پره و زاویه اولیه پره. در این مطالعه به بررسی اثرات تعداد پره‌های توربین بر عملکرد آن در نسبت‌های مختلف سرعت در نوک پره پرداخته می‌شود. انواع نیروهای وارد شده بر پره‌های توربین‌های بادی را می‌توان به دو نیروی، پسا^۲ (به موازات جهت وزش باد) و نیروی برآ^۳ (عمود بر جهت وزش باد) تقسیم‌بندی کرد. در بسیاری از ایرفویل‌ها نسبت نیروی برآ به نیروی پسا با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد تا زمانی که زاویه حمله به یک مقدار بحرانی رسیده و سپس بعد از آن در لبه‌های ایرفویل، جریان باد با جدایش همراه می‌شود. این زاویه بحرانی موجب رسیدن توربین به حد واماندگی^۴ می‌شود و با افزایش زاویه حمله و گذشتن از حد واماندگی، میزان نسبت نیروی برآ به نیروی پسا کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش قابل توجه عملکرد توربین خواهد شد [۳].

برای بهبود عملکرد توربین‌های محور عمودی، مطالعات و پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده‌است. در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی، آزمایشگاه‌های ملی ساندیای^۵ ایالات متحده آمریکا، مطالعاتی در رابطه با توربین‌های بادی محور عمودی از نوع داریوس انجام داده‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی فیزیکی توربین [۲]، آزمایش‌های انجام شده در تونل باد [۴ و ۵]، تست‌های میدانی انجام شده [۶ و ۷]، طراحی و پیش‌بینی عملکرد نظریو تجزیه و تحلیل ساختاری توربین اشاره کرد [۸ و ۹]. ارول^۶ و همکاران [۱۰] مطالعاتی را در رابطه با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های آیرودینامیکی این توربین‌ها با استفاده از مدل دوپنلی^۷ انجام داده‌اند. با وجود اینکه آنها موفق به پیش‌بینی مقدار نیروهای برآ و پسای وارد شده به پره‌ها شده بودند ولی با این حال در پیش‌بینی رفتار ناپایدار توربین داریوس ناموفق بوده‌اند.

سانگ جو^۸ و همکاران [۳] به بررسی ضرایب عملکرد توربین در صلبیت‌های مختلف پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان صلبیت، میزان ضریب عملکرد نیز تا حدی افزایش یافته و با ادامه

افزایش صلبیت توربین، ضریب عملکرد بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

چی جنگ^۹ و همکاران [۱۱] به بررسی عملکرد آیرودینامیکی مدل خاصی از ایرفویل‌ها پرداختند و با مقایسه نتایج با نتایج بدست آمده از ایرفویل مستقیم نتیجه‌گرفتند که ضریب عملکرد توربین با ایرفویل مستقیم، بصورت محسوسی بیشتر است.

مارکو راکیتی^{۱۰} و همکاران [۱۲] تاثیر میزان ضخامت ایرفویل را بر ضریب توان تولید شده بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که هر چه میزان ضخامت ایرفویل بیشتر باشد، میزان ضریب توان نیز افزایش می‌یابد.

پائول^{۱۱} و همکاران [۱۳] به بررسی یک توربین بادی پره مستقیم در حالت دو بعدی و سه بعدی پرداختند. طبق نتایج بدست آمده مشاهده کردند که شبیه‌سازی سه‌بعدی توربین به دلیل در نظر گرفتن اثرات لبه پره‌ها در آشفتگی کردن جریان، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

بویس^{۱۲} و همکاران [۱۴] به بررسی اثرات زاویه اولیه پره بر میزان عملکرد توربین در سه زاویه اولیه مختلف پرداختند. طبق نتایج بدست آمده بیشترین ضریب توان در زاویه اولیه ۶- درجه اتفاق می‌افتد. در این مطالعه، توربین ساخته شده توسط هاوول و همکارانش به عنوان نمونه اصلی در نظر گرفته شده‌است. از آنجاکه این توربین دارای صلبیت بالا است بنابراین مدل مومنوم قادر به تحلیل دقیق عملکرد این توربین نمی‌باشد لذا به منظور شبیه‌سازی این توربین بادی، از روش دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۳} استفاده شده‌است. شبیه‌سازی انجام گرفته بصورت سه بعدی بوده و پس از اعتبارسنجی نتایج توربین بادی سه‌پره‌ای با نتایج آزمایشگاهی هاوول و همکاران، توربین بادی دوپره‌ای نیز در همان شرایط شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده بمنظور انتخاب توربینی با عملکرد بهتر، با نتایج توربین سه‌پره‌ای مقایسه شده‌است.

۲- مدل فیزیکی

مشخصات توربین شبیه‌سازی شده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده‌است. مطابق با مطالعات انجام گرفته توسط هاوول و همکارانش، میدان حل؛ تونل بادی با مقطع ۱/۲×۱/۲ متر مربع می‌باشد که طول این تونل بادی ۳ متر در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه به منظور کاهش اثرات شرط مرزی خروجی، طول تونل باد دو برابر مقدار واقعی و برابر ۶ متر در نظر گرفته شده‌است.

ناحیه ساکن به دو ناحیه قبل از روتور و بعد از روتور تقسیم‌بندی می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این مطالعه در خصوص اثرات طول این دو ناحیه بر دقت شبیه‌سازی توربین مطابق با روابط بدست‌آمده، طول این دو ناحیه نسبت به قطر روتور توربین تعیین می‌شود. بطوریکه طول ناحیه قبل از روتور ۳ برابر قطر روتور (۳d) و طول ناحیه بعد از روتور ۷ برابر قطر روتور (۷d) در نظر گرفته شده‌است.

⁹ Chi-Jeng

¹⁰ Marco Raciti

¹¹ Paul

¹² Bose

¹³ Computational fluid dynamics (CFD)

¹ Egg Beater

² Drag Force

³ Lift Force

⁴ Failure

⁵ Sandia National Laboratories

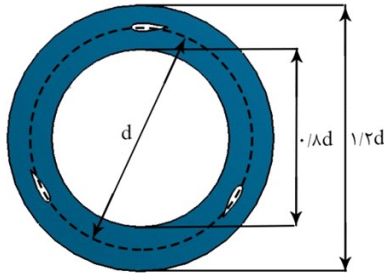
⁶ Errol

⁷ Double Panel

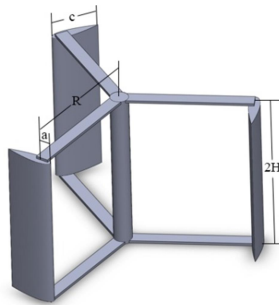
⁸ Sungjun Joo

جدول ۱- مشخصات توربین های مورد استفاده در این مطالعه

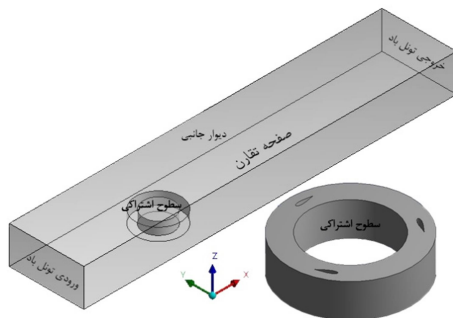
مشخصات توربین	توضیحات
نوع ایرفویل	NACA۰۰۲۲
فاصله محل اتصال پره به بازوها از لبه حمله پره (a)	۰٫۰۲۵ متر
طول وتر پره (c)	۰٫۱ متر
ارتفاع روتور (2H)	۰٫۴ متر
تعداد پره	۲ و ۳ عدد
شعاع روتور (R)	۰٫۳ متر
صلبیت ^۳	۱ و ۰٫۶۷



شکل ۱- حدود اندازه‌های محدوده دوار به منظور شبکه‌بندی میدان



شکل ۲- نمایی از توربین سه‌پره‌ای مورد مطالعه



(الف)

(ب)

شکل ۳- نمایی از میدان حل: (الف) ناحیه ساکن، (ب) ناحیه دوار

به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، قسمت دوار روتور توربین نیز به دو ناحیه دوار و ساکن تقسیم‌بندی شده است. قسمت ساکن شامل شفت دوار مرکزی توربین بوده و طبق نتایج بدست‌آمده، لحاظ کردن این قسمت، در نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین تأثیری ندارد لذا این قسمت به عنوان ناحیه ساکن در نظر گرفته شده است. قطر این ناحیه بنابر شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به منظور استقلال از هندسه شبیه‌سازی، در توربین‌های مورد مطالعه برابر ۰٫۸ قطر روتور توربین بوده و قطر خارجی ناحیه دوار روتور برابر ۱٫۲ قطر روتور توربین می‌باشد، شکل ۱.

همچنین به دلیل تقارن حاکم بر مسئله و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، نیمی از تونل باد شبیه‌سازی شده است. در شکل ۲، نمایی از توربین سه‌پره‌ای مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است. همچنین میدان حل مورد استفاده در این مطالعه نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.

به‌منظور شبیه‌سازی چرخش روتور توربین، از روش شبکه لغزان^۱ استفاده شده است که در این روش میدان حل به دو ناحیه ساکن و لغزان تقسیم‌بندی می‌شود. همچنین برای کاهش هزینه‌های محاسباتی قسمت مرکزی روتور نیز به عنوان ناحیه ساکن در نظر گرفته شده است. بنابراین ناحیه دوار شامل پره‌های در حال چرخش (شکل ۳-ب) و ناحیه ساکن شامل ناحیه بیرونی (تونل باد) و مرکز روتور (شکل ۳-الف) می‌باشد. با استفاده از شبکه لغزان، ناحیه دوار روتور که شامل پره‌های روتور می‌باشد، با سرعت دورانی روتور دوران می‌کند.

جریان در اطراف ایرفویل‌ها بصورت آشفته و ناپایدار با سیال تراکم‌ناپذیر فرض شده است. در شبیه‌سازی انجام گرفته به دلیل عدم وجود انتقال گرما، معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی جرم و پیوستگی مومنوم است. مدل توربولانسی با استفاده از رینولدز متوسط ناویر-استوکس^۲ بیان می‌شود که باعث ایجاد جملات جدیدی مشتمل بر تنش‌های توربولانسی خواهد شد. بسته به مفروضات و مدل فیزیکی این معادلات می‌توانند ساده یا با جملات اضافی اعمال شوند. معادلات حاکم در این مدل بصورت زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

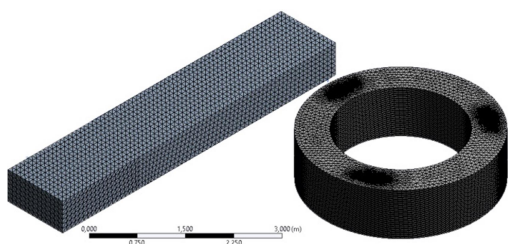
$$\tau_{ij} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (3)$$

در معادلات فوق x_j مختصات دکارتی بردارها، u سرعت متوسط جزءها، S_i منبع مومنوم، $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ تانسور تنش رینولدز، μ_t و S_{ij} به ترتیب لزجت آشفته و تانسور مدول کرنش متوسط هستند.

¹ Sliding Mesh Method (SMM)

² Reynolds Average Navier-Stokes

³ Solidity



شکل ۵- شبکه‌بندی: (الف) ناحیه دوار، (ب) ناحیه ساکن تونل باد

شکل ۵- شبکه‌بندی: (الف) ناحیه دوار، (ب) ناحیه ساکن تونل باد

با عبور جریان هوا از اطراف پره‌های توربین و با ایجاد گرادیان معکوس فشار بر روی ایرفویل‌ها، جریان با جدایش‌های بزرگ همراه می‌شود. همچنین از آنجایی که توربین شبیه‌سازی شده، توربینی با صلبیت بالا است بنابراین روش مومنتوم قادر به شبیه‌سازی صحیح رفتار جریان عبوری از توربین نمی‌باشد.

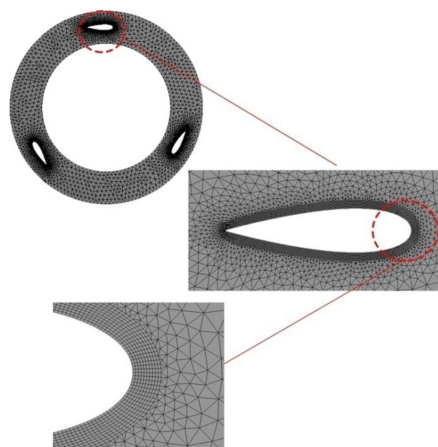
با توجه به مطالعات انجام شده توسط رابرت هاول^{۱۱} و همکارانش [۱۵]، به دلیل جدایش‌های بزرگ جریان در اطراف پره‌های توربین و همچنین بالا بودن صلبیت توربین‌های مورد مطالعه، از مدل آشفتگی K-ε RNG استفاده شده است [۱۵] و نیز برای بررسی جریان در اطراف دیواره‌ها، از توابع استاندارد دیواره استفاده شده است.

گفتنی است در شبیه‌سازی توربین‌های بادی به دلیل وجود چرخش در توربین و به تبع آن چرخش جریان اطراف توربین، مدل k-ω نیز قادر به حل دقیق مسئله می‌باشد ولی از آنجائیکه مقیاس توربین‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی کوچک بوده و دارای صلبیت بالا نیز هستند لذا استفاده از این مدل در شرایط موجود باعث افزایش میزان خطای طراحی و همچنین افزایش زمان شبیه‌سازی خواهد شد.

با مقایسه ضرایب گشتاور در دوره‌های پنجم و ششم و با توجه به اینکه بیشینه اختلاف ضرایب گشتاور بین این دو دور کمتر از ۵٪ بوده است لذا تعداد دوران لازم برای دستیابی به جریان توسعه یافته اطراف روتور، ۶ دور در نظر گرفته شده است.

برای حل دقیق جریان اطراف پره‌ها، از شبکه لایه مرزی^{۱۲} استفاده شده است. همچنین برای ایجاد شبکه‌های سه بعدی، در ناحیه دوار و ناحیه ساکن داخل روتور از روش جاروب^{۱۳} استفاده شده است که این امر موجب ایجاد شبکه منظم به شکل منشوری در اطراف پره‌های توربین و همچنین ناحیه دوار خواهد شد. در ناحیه ساکن از شبکه‌های هرمی شکل استفاده شده است و سطح اشتراک بین ناحیه دوار و ساکن، شامل شبکه‌هایی با اندازه یکسان می‌باشد. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی میدان حل، شبیه‌سازی با چهار شبکه مختلف با تعداد سلول‌های ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۷ میلیون صورت گرفته است و با توجه به اینکه بیشینه اختلاف بدست آمده بین دو شبکه ۱/۵ و ۱/۷ میلیون کمتر از ۴٪ بوده است، لذا برای ادامه شبیه‌سازی از شبکه با تعداد سلول‌های ۱/۵ میلیون استفاده شد است.

شکل ۴ نمایی از شبکه مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. برای شبکه‌بندی میدان حل، از نرم افزار انسیس مشینگ^۱ استفاده شده است و برای ناحیه ساکن بیرونی از شبکه‌بندی با سازمان^۲ و در ناحیه دوار و ساکن داخل روتور از شبکه‌بندی بی‌سازمان^۳ استفاده شده است. برای تحلیل بهتر جریان اطراف ایرفویل‌ها، در مجاورت پره‌ها از شبکه لایه مرزی^۴ استفاده شده است. شکل ۵ نمایی از شبکه بندی ناحیه دوار و ناحیه ساکن را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمایی از شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی

شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار انسیس فلوننت^۵ نسخه ۱۶٫۲ انجام شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در این شبیه‌سازی عبارتند از: برای ورودی تونل باد از شرط مرزی سرعت ورودی^۶ استفاده شده است و مقادیر سرعت جریان باد، طول مشخصه و شدت آشفتگی^۷ طبق آزمایشات صورت گرفته [۱۵] به ترتیب برابر ۴٫۳۱ متر بر ثانیه، ۰٫۰۱ متر و ۱٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است چون متوسط سرعت وزش باد در شهر ارومیه طبق داده‌های آماری هواشناسی تقریباً ۴/۵ متر بر ثانیه می‌باشد لذا در این مطالعه به منظور کاربردی کردن توربین‌های مورد مطالعه، سرعت جریان باد ۴٫۳۱ متر بر ثانیه (۲/۵۵، ۲/۴، ۱/۸۵، ۱/۳۵ = TSR) لحاظ شده است [۱۶]. در خروجی تونل باد از شرط مرزی جریان خروجی^۸ با نرخ جرمی خروجی^۹ استفاده شده است و در دیواره‌های تونل باد و همچنین سطوح پره‌ها از شرط مرزی دیواره همراه با عدم لغزش^{۱۰} استفاده شده است. با توجه به تقارن موجود در مسئله، در سطح پایینی تونل باد و همچنین ناحیه دوار از شرط مرزی تقارن استفاده شده است.

¹ Ansys Meshing
² Structured Grid
³ Unstructured Grid
⁴ Boundary Layer Mesh
⁵ Ansys Fluent
⁶ Velocity Inlet
⁷ Turbulent Intensity
⁸ Out Flow
⁹ Outlet mass flow rate
¹⁰ No Slip

¹¹ Robert Howell

¹² Boundary Layer Mesh

¹³ Sweep

۳- اعتبار سنجی

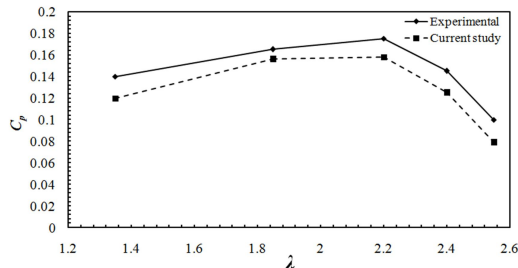
به منظور اعتبارسنجی نتایج، توربین سه پره‌ای ساخته شده توسط هاول و همکاران، بصورت سه بعدی و در شرایط مشخص شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده مطابقت داده شده‌است. طبق مطالعات هاول و همکاران، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سه بعدی و نتایج آزمایشگاهی می‌تواند تا ۲۰٪ خطا داشته باشد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که بصورت کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار بوده و بیشترین اختلاف بین نتایج بدست آمده در نسبت سرعت در نوک پره 2.55^3 می‌باشد و برابر ۲۴٪ است.

ضریب عملکرد توربین بر حسب نسبت سرعت در نوک پره با استفاده از شبیه‌سازی عددی، در شکل ۷ نشان داده شده‌است و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. برای بدست آوردن ضریب عملکرد توربین در یک دوران از رابطه ۴ استفاده شده‌است و همچنین نسبت سرعت در نوک پره توربین نیز از رابطه ۵ محاسبه شده‌است.

$$C_p = \frac{\bar{T}\omega}{0.5\rho dHV_\infty^3} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (5)$$

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که عمده دریافت انرژی توسط توربین بادی در نیم دور اول چرخش صورت می‌گیرد. در شکل ۸ نمودار ضریب گشتاور پره مرجع توربین سه پره‌ای در زاویه‌های مختلف چرخش نشان داده شده‌است. برای محاسبه ضریب گشتاور در یک دوران روتور از رابطه ۶ استفاده شده‌است.



شکل ۷- نمودار ضریب عملکرد توربین سه پره‌ای

بمنظور بدست آوردن گشتاور کل روتور، مجموع ضرایب گشتاور حاصل از تک تک پره‌ها در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، گشتاور حاصل از کل روتور ماهیتی نوسانی داشته و برای محاسبه ضریب عملکرد توربین از مقدار متوسط آن استفاده می‌شود.

$$C_m = \frac{T}{0.5\rho V_\infty dHR} \quad (6)$$

در شکل ۶، نتایج بدست آمده برای پره مرجع توربین در یک نسبت سرعت در نوک پره مشخص برای هر یک از شبکه‌های بررسی شده مقایسه شده‌است. با توجه به شکل ۶، مشخص می‌شود که هندسه شبیه‌سازی شده با تعداد سلول‌های ۱/۵ میلیون دارای نتایج بهتری است.

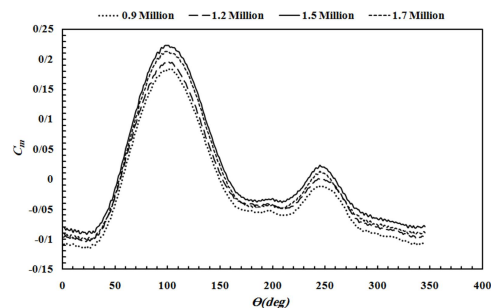
با توجه به اینکه در اطراف پره‌های توربین از شبکه لایه مرزی استفاده شده‌است، لذا تغییر در ضخامت و تعداد این شبکه‌ها باعث تغییر در تعداد شبکه‌های کل هندسه خواهد شد. در این مطالعه استقلال از شبکه با توجه به تعداد و ضخامت شبکه‌های لایه مرزی و همچنین تعداد شبکه‌های ناحیه دوار انجام گرفته‌است. ضخامت اولین لایه مرزی اطراف پره‌های توربین به گونه‌ای انتخاب شده که مقدار y^+ در محاسبات کمتر از ۳۰ باشد. کیفیت شبکه‌بندی نیز به گونه‌ای است که نسبت ابعاد سلول‌ها بین ۱ تا ۱۲٫۵ باشند.

برای بررسی استقلال نتایج از گام زمانی، شبیه‌سازی با سه گام زمانی متناظر با ۱٫۵، ۱ و ۰٫۵ درجه دوران روتور انجام گرفته شده‌است و با توجه به اینکه بهترین نتایج مربوط به گام زمانی متناظر با ۰٫۵ و ۱ درجه دوران روتور بوده‌است و اختلاف نتایج بین این دو گام زمانی کمتر از ۵٪ می‌باشد، بنابراین برای ادامه شبیه‌سازی از گام زمانی متناظر با ۱ درجه دوران روتور استفاده شده‌است.

مشخصات سخت افزار مورد استفاده و مدت زمان محاسباتی صرف شده برای شبیه‌سازی در این مطالعه، در جدول ۲ آورده شده‌است.

جدول ۲- هزینه محاسباتی و سخت‌افزار مورد استفاده

پارامتر	مقدار
متوسط سلول شبکه‌های محاسباتی	۱٫۵ میلیون
مشخصات سی پی یو ^۱	Intel AMD 2.5 GHz, 16 Core
مشخصات رم ^۲	۳۲ گیگا بایت
مدت زمان هر شبیه‌سازی	۵۶ ساعت
تعداد دفعات شبیه‌سازی	۶۲ عدد
کل مدت شبیه‌سازی	۳۴۷۲ ساعت

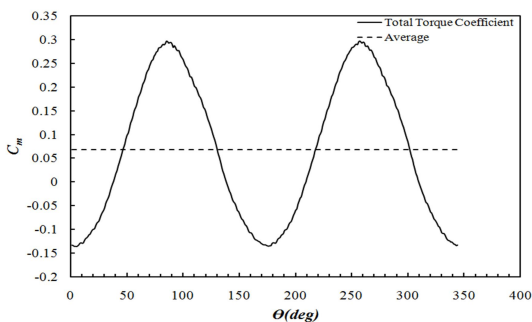


شکل ۶- نمودار ضریب گشتاور پره مرجع در نسبت سرعت در نوک پره ۱٫۳۵ با تعداد شبکه‌های ۰٫۹، ۱٫۲، ۱٫۵ و ۱٫۷ میلیون

^۱ CPU (Central Processing Unit)

^۲ RAM (Random Access Memory)

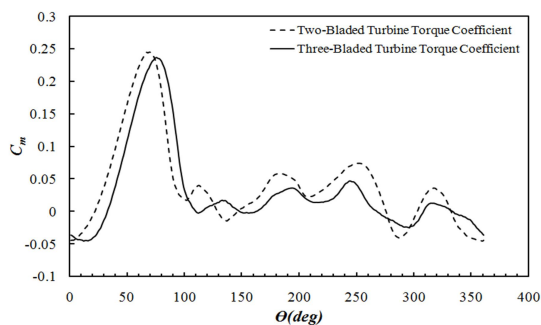
^۳ Tip Speed Ratio (TSR)



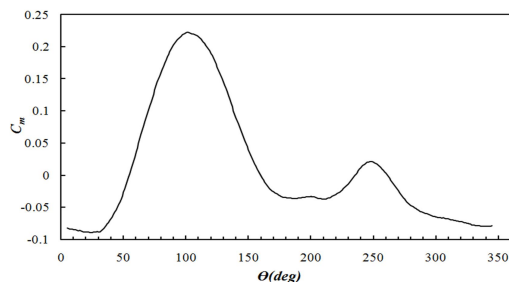
شکل ۱۱- نمودار ضریب گشتاور کل برای توربین دوپره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲٫۵۵

۵- مقایسه نتایج توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای

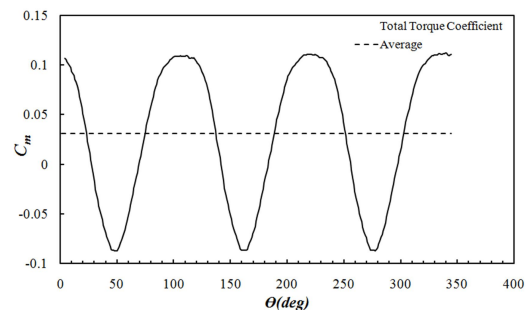
به‌منظور درک بهتر عملکرد توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای، نمودار ضریب گشتاور این دو توربین در نسبت‌های سرعت در نوک پره برابر ۱٫۳۵، ۱٫۸۵، ۲٫۴ و ۲٫۵۵ در شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده ضریب گشتاور توربین دوپره‌ای در نسبت‌های سرعت ۱٫۳۵ و ۱٫۸۵ نسبت به توربین سه‌پره‌ای کمتر است که بیشترین اختلاف ضریب عملکرد بین دو توربین در این ناحیه برابر ۸٫۵٪ است. این اختلاف به دلیل تعداد نیروهای وارد بر پره‌های روتور و به تبع آن میزان گشتاور وارد شده بر مرکز دوران روتور می‌باشد. همانطور که اشاره شد، نیروهای وارد شده بر هر یک از پره‌های روتور شامل دو نیروی برآ و پسا است. بنابراین بصورت کلی تعداد نیروهای وارد شده بر پره‌های توربین سه‌پره‌ای برابر ۶ نیرو بوده که باعث افزایش گشتاور وارد شده بر مرکز دوران روتور می‌باشد. این درحالی است که تعداد نیروهای وارد شده بر پره‌های توربین دوپره‌ای (مجموع نیروهای برآ و پسی وارد شده بر کل پره‌های روتور) در مجموع به تعداد ۴ نیرو می‌باشد که به تبع آن گشتاور وارد شده بر مرکز دوران روتور نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- ضریب گشتاور توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۱٫۳۵



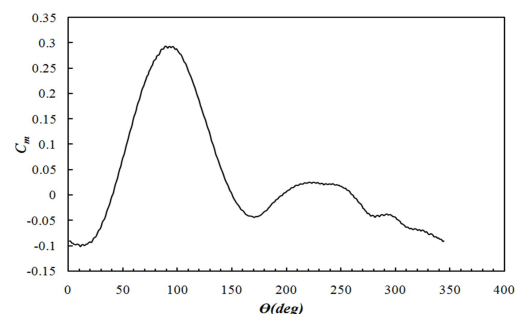
شکل ۸- ضریب گشتاور تولیدی پره مرجع در یک دوران



شکل ۹- ضریب گشتاور تولیدی کل پره‌های توربین سه‌پره‌ای

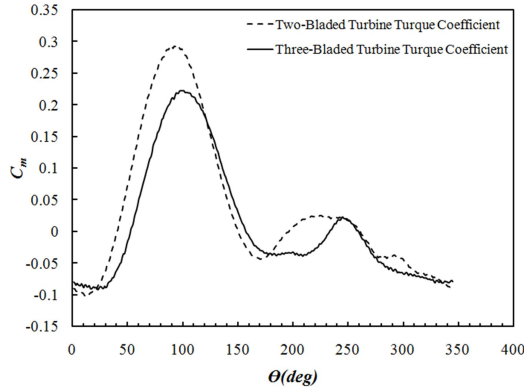
۴- شبیه‌سازی توربین دو پره‌ای

به‌منظور کاهش هزینه‌های ساخت و راه‌اندازی توربین بادی، در این مطالعه به مقایسه بین توان حاصله از دو توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی توربین دوپره‌ای در شرایط مشخص برای پره مرجع در یک دوران روتور برای نمونه در نسبت سرعت در نوک پره برابر ۲٫۵۵ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

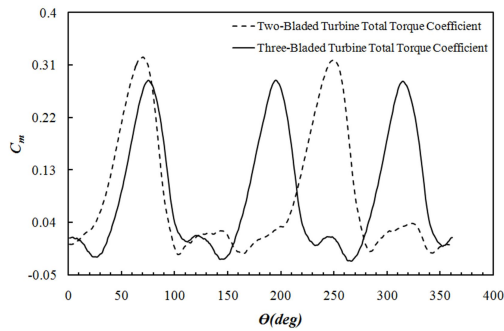


شکل ۱۰- نمودار ضریب گشتاور برای توربین دوپره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲٫۵۵

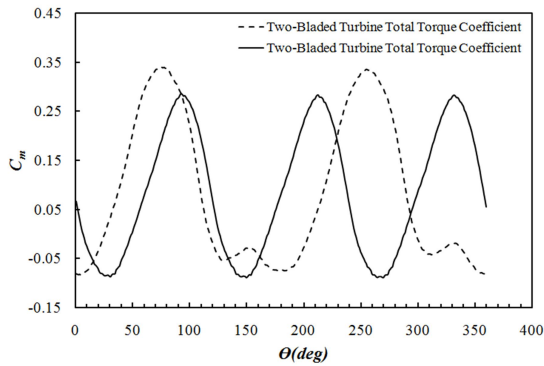
همچنین ضریب گشتاور کل روتور که از مجموع ضرایب گشتاور تک تک پره‌ها حاصل می‌شود در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل دوپره‌ای بودن توربین شبیه‌سازی شده، نمودار گشتاور کل در زاویه‌های دوران مختلف دارای دو نقطه حداکثر است و بصورت نوسانی ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر تعداد نقاط اوج در نمودار گشتاور کل، به تعداد پره‌های روتور بستگی دارد.



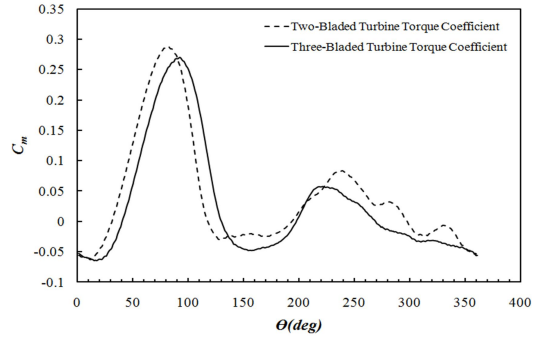
شکل ۱۵- ضریب گشتاور توربین دو پره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲/۵۵



شکل ۱۶- ضریب گشتاور کل توربین دوپره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۱/۳۵



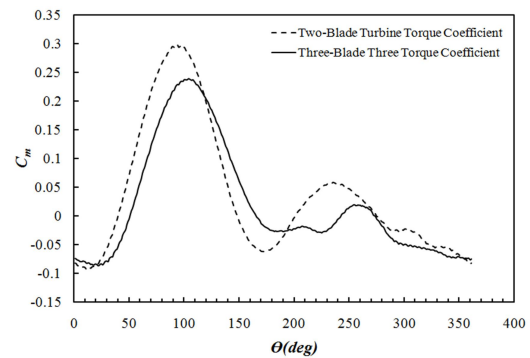
شکل ۱۷- ضریب گشتاور کل توربین‌های دوپره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۱/۸۵



شکل ۱۳- ضریب گشتاور توربین دوپره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۱/۸۵

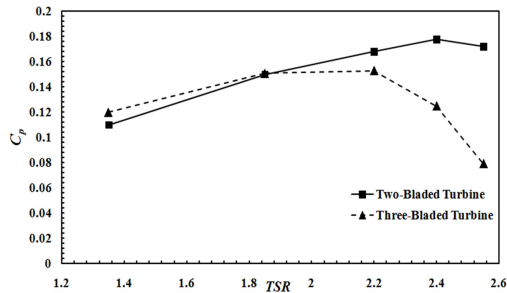
با افزایش نسبت سرعت در نوک پره، میزان نیروهای مقاوم در برابر حرکت توربین که از نیروهای وارد شده بر پره‌های توربین حاصل می‌شود نیز افزایش می‌یابد. این امر موجب کاهش گشتاور وارده از پره‌های توربین به مرکز روتور خواهد شد. بنابراین ضریب عملکرد حاصله از گشتاور وارد شده به مرکز دوران روتور توربین دوپره‌ای نسبت به توربین سه پره‌ای به دلیل داشتن تعداد پره‌های کمتر و به تبع آن کاهش میزان نیروهای مقاوم در برابر حرکت توربین، دارای مقادیر بیشتری خواهد بود.

به منظور درک بهتر عملکرد دو توربین مورد مطالعه، مقایسه نمودار ضریب گشتاور کل حاصله از پره‌های روتور در شکل‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در نسبت‌های سرعت در نوک پره مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار ضریب گشتاور کل روتور توربین دوپره‌ای در نسبت‌های سرعت در نوک پره بالاتر از ۱/۸۵، دارای مقادیر بیشتری نسبت به توربین سه پره‌ای بوده و در نتیجه میانگین حاصل از نمودار ضریب گشتاور کل نیز دارای مقادیر بالاتری است که این خود موجب افزایش ضریب توان حاصله از توربین دوپره‌ای نسبت به توربین سه پره‌ای در نسبت‌های سرعت چرخش بالا می‌باشد.



شکل ۱۴- ضریب گشتاور توربین دوپره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲/۴

در اطراف پره‌های توربین که با تغییرات سرعت جریان اطراف پره‌ها ایجاد می‌شوند، نیز می‌باشد. ولی در این مطالعه به دلیل کم بودن سرعت جریان هوای اطراف پره‌ها، از این عامل تا حدودی صرف نظر شده است.



شکل ۲۰- ضریب عملکرد توربین‌های دوپره‌ای و سه‌پره‌ای

۶- نتیجه‌گیری

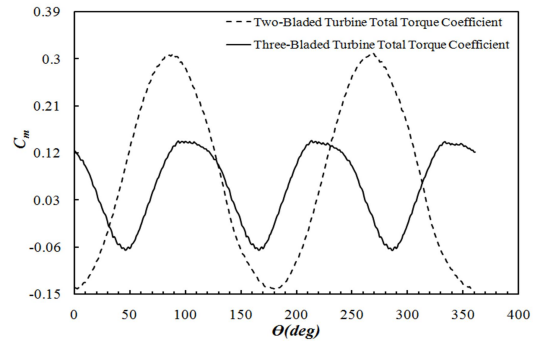
در این پژوهش مقایسه عملکرد دو توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت‌های سرعت مختلف نشان داده شده‌است. طبق نتایج بدست آمده توربین سه‌پره‌ای در نسبت‌های سرعت پایین‌تر از ۱/۸۵ نسبت به توربین دوپره‌ای عملکرد بهتری را نشان می‌دهد و اختلاف بین ضرایب توان این دو توربین به ۸/۵٪ می‌رسد. ولی با افزایش نسبت سرعت در نوک پره توربین، به دلیل وجود نیروهای مقاوم در برابر حرکت، توربین دوپره‌ای عملکرد بسیار بهتری را نسبت به توربین سه‌پره‌ای نشان می‌دهد که بیشینه اختلاف ضرایب عملکرد بین این دو توربین در نسبت سرعت در نوک پره ۲/۵۵ بوده و برابر ۵۴٪ است. می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های پایین باد، توان تولید شده توسط توربین دوپره‌ای نسبت به توربین سه‌پره‌ای بیشتر است. همچنین هزینه ساخت و راه‌اندازی توربین دوپره‌ای نیز به دلیل داشتن تعداد پره‌های کمتر نسبت به توربین سه‌پره‌ای، پایین‌تر است.

۷- فهرست علائم

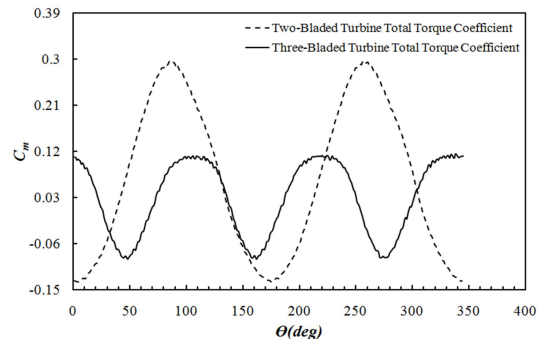
a	فاصله محل اتصال پره به بازو از لبه حمله پره (m)
c	طول وتر پره (m)
C_p	ضریب عملکرد توربین
C_m	ضریب گشتاور
d	قطر روتور (m)
H	ارتفاع پره (m)
R	شعاع روتور (m)
T	گشتاور تولیدی در هر موقعیت (N.m)
\bar{T}	متوسط گشتاور تولیدی کل روتور (N.m)
V_{∞}	سرعت متوسط باد ($m.s^{-1}$)

علائم یونانی

ρ	چگالی هوا ($Kg.m^{-3}$)
θ	زاویه موقعیت پره (degree)
λ	نسبت سرعت در نوک پره
ω	سرعت دورانی روتور (rad/sec)



شکل ۱۸- ضریب گشتاور کل توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲/۴



شکل ۱۹- ضریب گشتاور کل توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره ۲/۵۵

در شکل ۲۰ ضریب عملکرد توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت‌های سرعت در نوک پره مختلف آورده شده‌است. طبق نتایج بدست آمده بیشترین میزان ضریب عملکرد، مربوط به توربین دوپره‌ای و در نسبت سرعت در نوک پره برابر ۲/۴ می‌باشد. با توجه به اینکه توان محاسبه شده برای هر توربین با استفاده از حداکثر ضریب عملکرد تولید شده توسط آن توربین انجام می‌پذیرد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که توان کل تولید شده توسط توربین دوپره‌ای نسبت به توربین سه‌پره‌ای بیشتر خواهد بود.

همچنین در شکل ۲۱ کانتور سرعت و فشار برای توربین دوپره‌ای و سه‌پره‌ای در نسبت‌های سرعت در نوک پره مختلف آورده شده‌است. با توجه به شکل ۲۱ که هر یک از کانتورهای سرعت و فشار را در TSRهای مختلف نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با افزایش TSR که از تغییر سرعت چرخش توربین (ω) حاصل می‌شود، تغییرات فشار در اطراف پره‌ها بیشتر شده است. با تغییر فشار، سرعت جریان اطراف پره‌ها نیز تغییر کرده و سبب ایجاد نیروهای لیفت و درگ با مقادیر مختلف در اطراف پره‌ها خواهد شد. از آنجاکه ضریب توان توربین وابسته به نیروهای برآ و پسا وارده بر پره‌ها است و همچنین با افزایش TSR میزان نیروهای موافق جریان حرکت توربین افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد، لذا با تغییر این نیروها ضریب توان توربین نیز تا ۲/۴ برابر افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن نیروهای مخالف جریان حرکت توربین، ضریب توان توربین نیز کاهش خواهد یافت. گفتنی است که این کاهش مقدار ضریب توان ناشی از گردابه‌های ایجاد شده

[9] Veers P., Modeling stochastic wind loads on vertical axis wind turbines. In *25th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, p. 910, 1984.

[10] Oler J. W., Strickland J. H., Im B. J. and Graham G. H., *Dynamic stall regulation of the Darrieus turbine*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1983.

[11] Bai C. J., Lin Y. Y., Lin S. Y. and Wang W. C., Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis wind turbine blade with tubercle leading edge. *Wind Energy*, Vol. 15, pp. 349-361, 2015.

[12] Castelli M. R. and Benini E., Effect of blade thickness on Darrieus Vertical-Axis Wind turbine performance. *Applied energy*, Vol. 101, pp. 765-775, 2013.

[13] Untaroiu A., Wood H. G., Allaire P. E. and Ribando R. J., Investigation of self-starting capability of vertical axis wind turbines using a computational fluid dynamics approach. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 1087-1109, 2011.

[14] Bose S., Premeai T. P., Prithviraj P., Mugundhan V. and Velamati R. K., Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, Vol. 4, No. 4, pp. 929-935, 2014.

[15] Howell R., Qin N., Edwards J. and Durrani N., Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 412-422, 2010.

[16] Surface Meteorology and Solar Energy, a Renewable Energy Resource, Accessed on 10 November 2017; <https://eosweb.larc.nasa.gov>.

[1] Park K. S., Asim T. and Mishra R., Computational fluid dynamics based fault simulations of a vertical axis wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 364, No. 1, pp. 012138, 2012.

[2] Blackwell B. F., *Vertical-axis wind turbine: how it works* (No. SLA-74-0160). Sandia Labs., Albuquerque, N. Mex.(USA), 1974.

[3] Joo S., Choi H. and Lee J., Aerodynamic characteristics of two-bladed H-Darrieus at various solidities and rotating speeds, *Energy*, Vol. 90, pp. 439-451, 2015.

[4] Blackwell B. F., Sheldahl R. E. and Feltz L. V., *Wind tunnel performance data for the Darrieus wind turbine with NACA0012 blade*. (No. SAND-76-0130). Sandia Labs., Albuquerque, N. Mex.(USA), 1976.

[5] Sheldahl R. E. and Klimas P. C., *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines* (No. SAND-80-2114). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1981.

[6] R. E. Sheldahl, P. C. Klimas, L. V. Feltz, *Aerodynamic performance of a 5-metre-diameter Darrieus turbine with extruded aluminum NACA-0015 blades*. National Technical Information Service, 1980.

[7] Ashwill T. D., *Measured data for the Sandia 34-meter vertical axis wind turbine*. Sandia National Laboratories, 1992.

[8] Carrie T. G. and Nord A. R., Modal testing of a rotating wind turbine. In *Proc Sixth Biennial Wind Energy Conf and Workshop*, pp. 825-34, 1983.

شکل ۲۱ - مقایسه بین کانتور سرعت و فشار برای توربین دو پره‌ای و سه پره‌ای در نسبت سرعت در نوک پره مختلف

