



مطالعه آزمایشگاهی گشتاور لحظه‌ای مورد نیاز برای راه‌اندازی توربین بادی محور عمودی داریوس

حسین سیفی^{۱*}، شهریار کوراوند^۲، محسن سیفی داوری^۳، صغری محمدزاده^۴

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمی، گرمی، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، اقتصاد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* چابهار، صندوق پستی ۹۹۷۱۷۵۶۴۹۹، hseifdavary@gmail.com

چکیده

توربین بادی، انرژی جنبشی جریان باد را به انرژی دورانی محور روتور تبدیل می‌کند. استفاده از توربین بادی محور عمودی به عنوان یکی از منابع تولید انرژی پاک اهمیت بالایی دارد. از جمله مزیت‌های توربین بادی محور عمودی نسبت به توربین بادی محور افقی هزینه ارزان تولید، سبکی، راحتی نصب و استفاده در مناطق مسکونی است. پره‌های توربین‌های بادی عمود محور داریوس بیش‌تر به صورت پره مستقیم یا مارپیچی است. مشکل اساسی توربین بادی محور عمودی داریوس، خودشروع‌کنندگی اولیه آن‌هاست که اساس کار این پژوهش است که برای اولین بار از پره‌های امباس لوزی شکل که به صورت متخلخل است، استفاده شد تا با ایجاد نیروی درگ بر روی پره‌ها باعث افزایش خودشروع‌شوندگی در سرعت‌های پایین گردد. برای این منظور توربین بادی عمود محور داریوس در نرم‌افزار کتیا طراحی و ساخته شد. برای ساخت ایرفویل‌ها از NACA0015 و جنس استفاده شده برای پره‌های مستقیم و متخلخل، ورق آلومینیوم ساده و ورق امباس که به صورت خلل و فرج است، که هر دو از آلیاژهای سری یک آلومینوم هستند و وسایل مورد استفاده شده در ساخت و اندازه‌گیری کالیبره شده است. نتیجه نشان داد که توربین بادی پره امباس تا سرعت نه متر بر ثانیه نسبت به توربین بادی عمود محور پره مستقیم، گشتاور لحظه‌ای کم‌تری برای راه‌اندازی لازم دارد.

کلیدواژگان: ضریب لیفت، ایرفویل NACA0015، پره متخلخل، گشتاور لحظه‌ای، داریوس

Experimental study of self-starting torque required to operate darriues the vertical axis wind turbine

Hossein Seifi^{1*}, Shahriar Kouravand², Mohsen Seifi Davary³, Soghra Mohammadzadeh⁴

1- Master of Mechanical Engineering, Department Marine of Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

2- Associate Professor, Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Master Civil Engineering Student, Islamic Azad University- Germi Branch, Germi, Iran

4- Master Economics Student Economics Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran * P.O.B. 9971756499 Chabahar, Iran, hseifdavary@gmail.com

Received: 20 September 2020 Accepted: 30 September 2021

Abstract

The wind turbine converts the kinetic energy of the wind current into the rotational energy of the rotor shaft. The use of vertical axis wind turbines as a source of clean energy production is of great importance. Among the advantages of vertical axis wind turbine over horizontal axis wind turbine are low production cost, lightweight, the efficiency of the installation, and use in residential zones. The darriues blades of vertical axis wind turbines are more in the kind of straight or helical blades. The central difficulty of Darius vertical axis wind turbines is their primary self-starting, which is the basis of this study. They increase self-initiation at low speeds. For this purpose, Darius vertical axis wind turbine was designed and built-in CATIA software. NACA0015 is made for airfoils and the material used for straight and porous blades is plain aluminum sheet and porcelain embossed sheet, both of which are series alloys of aluminum and the equipment used in manufactured and calibrated Manufacturing and calibrating. The result showed that the Ambas blade wind turbine needs less torque to start up to a speed of 9m/s than the vertical blade axis wind turbine.

Keywords: Lift Coefficient, NACA0015 Airfoil, Porous Blade, Self-Starting Torque, Darriues



۱- مقدمه

با گسترش روزافزون جوامع انسانی و توسعه صنعتی در جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی در حال افزایش است. فراهم کردن انرژی ارزان قیمت، مناسب و کافی برای کاهش فقر، بهبود رفاه بشر و بالا بردن استانداردهای زندگی در سراسر جهان امری ضروری است [۱]. انرژی بادی در حال حاضر سریع‌ترین میزان نرخ رشد را در بین دیگر منابع تجدید پذیر داراست [۲]. چرا که انرژی بادی فراوان، تجدیدپذیر، پاک در طبیعت وجود دارد و بستگی به نیاز و امکانات از چند وات تا چند مگاوات برق تولید و در مقایسه با انرژی سوخت‌های فسیلی میزان کم‌تری گاز گلخانه‌ای منتشر می‌کند. میزان انرژی قابل استحصال از منابع بادی زمین بسیار بیش‌تر از کل مصرفی جهان است، به طوری که یک برآورد کلی نشان می‌دهد که ۷۲ تراوات انرژی باد بر روی زمین وجود دارد در حالی که میزان مصرف انرژی جهانی ۱۵ تراوات است [۳].

دستگاهی که برای به دست آوردن انرژی از باد مورد استفاده قرار می‌گیرد، توربین بادی نام دارد. توربین بادی وسیله‌ای است که انرژی جنبشی جریان باد را به انرژی دورانی محور روتور تبدیل می‌کند [۴]. برای پره‌های توربین‌های بادی داریوس مدل‌های مختلفی وجود دارد که بیش‌تر به صورت پره مستقیم و مارپیچی است. پره‌های توربین بادی داریوس بستگی به هزینه اقتصادی از یک تا پنج پره است. مزیت توربین بادی داریوس نسبت به سایر توربین‌های عمود محور این است که بیش‌ترین راندمان را داشته ولی مشکل اساسی آن، گشتاور پایین در لحظه استارت و شروع به گردش است [۱].

کشورهای صنعتی و در راس آن آمریکا و کانادا سرمایه‌گذاری گسترده‌ای برای تولید انرژی برق از طریق توربین‌های بادی انجام داده‌اند. پژوهشگاه ملی سنندیا در آمریکا از شاخص‌ترین مراکزی است که در سه دهه اخیر در زمینه توربین‌های بادی محور عمودی فعالیت داشته که منجر به ساخت توربین بادی محور عمودی داریوس به قطر ۳۴ متر شد. در طراحی این توربین از سه کد تحلیلی جهت بهینه‌سازی پارامترهای طراحی، تحلیل نیرویی و ارتعاشاتی المان محدود سازه توربین بادی محور عمودی استفاده شده بود [۴]. پیش از این تحلیل جریان روی پره به صورت روش‌های تئوری به همراه نتایج آزمایشگاهی محدود هست [۵] و [۶].

در دهه‌های گذشته پژوهش‌های متعددی جهت بهینه‌سازی پارامترهای مختلف موثر در عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم انجام شده است. ایسلام جنس مناسب برای پره‌های مستقیم توربین بادی محور عمودی داریوس را مطالعه نمود و در مطالعه‌اش به این نتیجه رسید که فیبر پلیمری مناسب این نوع توربین‌ها هستند [۷]. وانگ و همکاران [۸] افزایش ضخامت ایرفویل را یک عامل در بهبود عملکرد توربین در سرعت نوک پایین معرفی کردند. دومینی و همکاران [۹] اثبات کردند که توربین بادی محور عمودی نوع سه پره نسبت به دو پره، پتانسیل بهتری برای خود راه‌اندازی دارند زیرا راه‌اندازی خودکار در نوع دو پره وابستگی شدید به زاویه قرارگیری اولیه پره‌ها دارد. ادواردز [۱۰] بررسی عددی و تجربی روی توربین‌های عمود محور ابعاد کوچک را مطالعه و اثر زبری سطح پره را روی عملکرد این توربین‌ها مورد بررسی قرار داد. وانگ [۱۱] عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم را در سرعت‌های مختلف وزش باد مورد مطالعه قرار داد. هایاشی و همکاران [۱۲] نتایج آنالیز آیرودینامیکی توربین بادی ساوینیوس رایج یک طبقه را با توربین دو طبقه مقایسه و نشان دادند که افزودن طبقه، نوسانات گشتاور را کاهش ولی با اضافه شدن طبقه، اینرسی توربین زیاد شده

و امکان بروز مشکلات سازه‌ای وجود دارد. کوراوند و همکاران [۱۳] طراحی و تحلیل توربین بادی کوچک بادی را مطالعه کردند. برای این منظور منطقه مروست در استان یزد را به‌عنوان آزمون انتخاب و هدف‌شان بر این بود که با تلفیق ایرفویل روتورهای دارای گشتاور تولیدی بالا (ساوینیوس) با ایرفویل روتورهای دارای راندمان بالاتر (داریوس)، تولید انرژی در سرعت‌های کم‌تر را افزایش دهند. دواک و همکاران [۱۴] تحلیل فیزیکی نقطه شروع توربین بادی محور عمودی داریوس را مطالعه کردند. آن‌ها از یک سیستم نظارت و کنترل زاویه برای راه‌اندازی خود به خودی توربین بادی محور عمودی داریوس استفاده کرده و خود شروع شوندگی توربین در سرعت‌های پایین بهبود یافته بود. پاگینی و همکاران [۱۵] بر روی ارزیابی تولید برق و رفتار ساختاری توربین بادی محور عمودی داریوس مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که دو این مساله چگونه با هم مرتبط هستند و نتایج بدست آمده می‌تواند نشانه‌های مناسبی برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی باشد.

سان و همکاران [۱۶] اثرات تیغه بر عملکرد توربین بادی محور عمودی مستقیم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سه پارامتر زمان شروع، میانگین ضریب توان و انحراف استاندارد نیروی آیرودینامیکی را با استفاده از اشکال مختلف تیغه‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که تیغه S-1046 عملکرد بهتری نسبت به ایرفویل NACA0018 دارد.

ساغریچی و همکاران [۱۷] در مطالعه‌شان به بررسی رویکردهای متغیر زاویه گام که یکی از بهترین استراتژی‌ها برای بهبود عملکرد خود شروع شوندگی توربین‌های بادی محور عمودی داریوس انجام و رابطه بین زاویه حمله و عملکرد خودشروع شوندگی توربین بادی H روتور را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها چهار عملکرد گام با چهار دامنه را انتخاب کردند و به این نتیجه رسیدند که بهترین عملکرد گام متغیر می‌تواند زاویه تیغه حمله را در مرحله بالا دست کاهش داده و در عین حال زاویه حمله را در مرحله پایین دست افزایش می‌دهد.

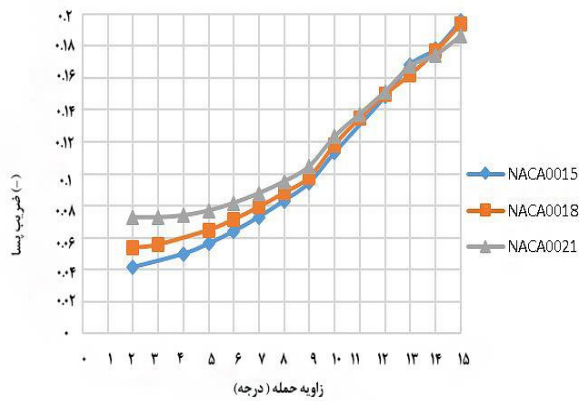
سو و همکاران [۱۸] نوع جدیدی از توربین بادی محور مستقیم با استفاده از سه جفت پره ارائه کردند که هر جفت تیغه دارای یک تیغه ثابت و یک تیغه کمکی قابل چرخش وجود داشت. نتایج تجربی بدست آمده نشان داد که ضریب گشتاور استاتیکی روتور پیشنهادی در تمامی زوایا مثبت بوده و نسبت به نوع H روتور عملکرد خود شروع شوندگی بهتری را نشان داد.

ژائو و همکاران [۱۹] به منظور بهبود چرخش توربین بادی محور عمودی از سه تیغه جدید منحرف کننده جریان^۱ استفاده نمودند. آن‌ها در ابتدا بررسی آیرودینامیکی تیغه‌ها را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که تیغه طراحی شده زاویه متوقف شدن را نسبت به ایرفویل استفاده شده تا ۲ درجه افزایش می‌دهد.

استاریو و همکاران [۲۰] در مطالعه‌شان به بررسی و بهبود قابلیت شروع خودکار توربین محور عمودی پرداختند و به صورت آزمایشی با استفاده از یک مخزن یدک‌کش در اندونزی انجام شد و با استفاده از تیغه مایل برای توربین بادی محور عمودی برای افزایش قابلیت راه‌اندازی استفاده شد و به این نتیجه رسیدند که یک توربین بادی محور عمودی با پره‌های شیب‌دار دارای قابلیت خود راه‌اندازی بهتری است که برای اجرا در منطقه‌ای با سرعت جریان جزر و مد پایین مناسب است.

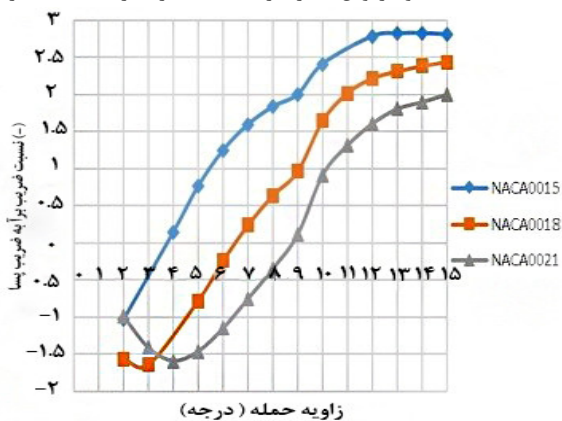
استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی به عنوان یکی از منابع تولید انرژی باد از اهمیت بالایی برخوردار هست. از جمله مزیت توربین‌های بادی





شکل ۲ ضریب پسا ایرفویل‌ها در سرعت ۵ متر بر ثانیه

در شکل ۳ ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ نسبت ضریب برآ به ضریب پسا بیش‌تری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت ۵ متر بر ثانیه داشته به طوری که بیش‌ترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در زاویه حمله ۱۳ درجه و برابر ۲/۵۸ بوده و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۸ در زاویه حمله ۱۵ درجه و برابر با ۲/۴۰ بوده که کمتر از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ است و برای ایرفویل ناکا ۰۰۲۱ بیشینه نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در زاویه ۱۵ درجه و برابر ۲ بوده که کمتر از دو ایرفویل دیگر است و در این سرعت ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب دارد.



شکل ۳ نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل‌ها در سرعت ۵ متر بر ثانیه

۲-۲- ضریب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل‌های انتخابی در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه
 ضریب برای ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ با افزایش زاویه حمله ابتدا سیر صعودی به خود گرفته به طوری که در زاویه حمله ۷/۵ درجه به بیشینه مقدار خود یعنی ۰/۷۲ و ایرفویل ناکا ۰۰۱۸ در زاویه ۴ درجه و ایرفویل ناکا ۰۰۲۱ در زاویه ۳ درجه به ناحیه واماندگی رسیده و ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ دیرتر از دو ایرفویل دیگر به ناحیه واماندگی رسیده و شرایط بهتری دارد (شکل ۴).

محور عمودی نسبت به سایر توربین‌ها هزینه اولیه تولید، سبکی، راحتی نصب و استفاده در مناطق مسکونی است. توربین بادی داریوس راندمان بالاتری نسبت به سایر توربین‌های بادی محور عمودی دارد. با وجود این که توربین بادی محور عمودی داریوس خود شروع شونده خوبی در سرعت‌های پایین نیستند، اما کارایی بالای آن نسبت به سایر توربین‌های بادی محور عمودی و از همه مهم‌تر عدم حساسیت به جهت وزش باد، آن را به صرفه و اقتصادی‌تر از سایر توربین‌ها کرده که در این تحقیق از توربین بادی محور عمودی داریوس به دلیل راندمان بالای آن نسبت به سایر توربین‌ها و عدم خود شروع شوندگی در سرعت‌های پایین مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

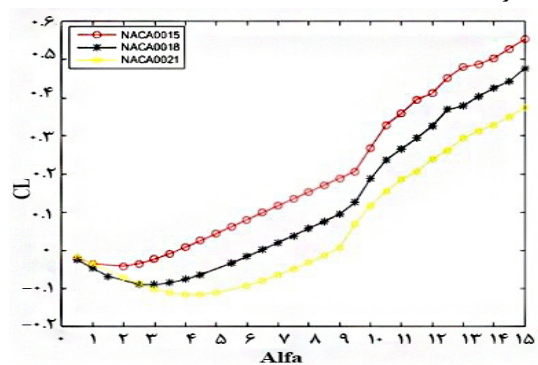
در کارهای گذشته برای مقایسه راندمان و خود شروع شوندگی توربین بادی محور عمودی داریوس از پره مستقیم استفاده شده که در این تحقیق از پره متخلخل که به صورت خلل و فرج است، استفاده شده تا گشتاور لحظه‌ای مورد نیاز برای راه‌اندازی توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم و متخلخل مقایسه گردد تا توربینی که به گشتاور لحظه‌ای کم‌تری موقع راه‌اندازی در سرعت‌های مختلف نیاز دارد، انتخاب گردد.

۲- انتخاب ایرفویل و تئوری حل و معادلات حاکم

برای انتخاب ایرفویل پره توربین بادی عمود محور داریوس سه ایرفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 انتخاب و در نرم‌افزار Q-Blade ضرایب برآ، پسا و نسبت بیشینه ضریب برآ به ضریب پسا بدست آورده و در نهایت ایرفویلی که در سرعت‌های ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه نسبت بیشینه ضریب برآ به ضریب پسا بالایی داشته باشد، انتخاب شد.

۲-۱- ضریب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل‌های انتخابی در سرعت ۵ متر بر ثانیه

همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است با افزایش زاویه حمله، ضریب برای هر سه ایرفویل افزایش پیدا کرده و ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر ضریب برای بیش‌تری داشته و در زاویه ۱۵ درجه ضریب برای بیشینه برابر با ۰/۵۵ هست که بالاترین ضریب برآ در بین ایرفویل‌ها در سرعت ۵ متر بر ثانیه دارد.



شکل ۱ ضریب برآ ایرفویل‌ها در سرعت ۵ متر بر ثانیه

در شکل ۲ هر سه ایرفویل مقدار ضریب پسا تقریباً برابری در سرعت ۵ متر بر ثانیه داشته و هر سه ایرفویل با افزایش زاویه حمله، ضریب پسا هر سه ایرفویل حالت صعودی به خود گرفته است.

۳-۲- تئوری حل و معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان هوا در توربین بادی عمود محور داریوس همان معادلات بقای جرم یا پیوستگی و اندازه حرکت یا همان معادلات تکانه هستند. جریان سیال در این مسئله تراکم ناپذیر و به صورت فرمول ۱ است [۲۱] که u ، v و w به ترتیب سرعت‌های جریان در راستای x ، y و z بوده و ρ چگالی جریان است.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای اندازه حرکت را هم می‌توان به صورت فرمول ۲ بیان کرد.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + v \cdot (\tau) + \rho g + F \quad (2)$$

در معادله بالا F و g نیروهای حجمی و شتاب گرانشی، τ تانسور تنش و p فشار هست که به صورت فرمول ۳ تعریف می‌گردد.

$$\tau = \mu [(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v I] \quad (3)$$

۴-۲- گشتاور راه‌اندازی

گشتاور نیرو کمیت برداری است در حرکت چرخشی که به بزرگی نیرو و مسیر و امکان اثر آن بستگی دارد. به عبارت دیگر گشتاور در حرکت چرخشی معادل نیرو در حرکت انتقالی است. در توربین بادی عامل تاثیر گذار در گشتاور توربین، طول بازو و سرعت دورانی روتور است و واحد آن نیوتن در متر که به صورت فرمول ۵ بیان هست که گشتاور لحظه‌ای روتور بادی نام دارد که ρ چگالی هوا، D قطر روتور، R شعاع روتور، V سرعت باد و C_m ضریب گشتاور است [۲۲].

$$T = \frac{1}{2} C_m \rho D h R V^2 \quad (4)$$

و همچنین می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

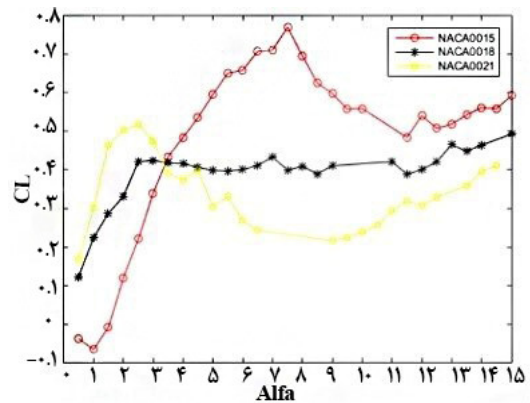
$$T = f R \quad (5)$$

و f نیروی راه‌اندازی و T گشتاور راه‌اندازی نام دارد.

۳- شبیه سازی عددی

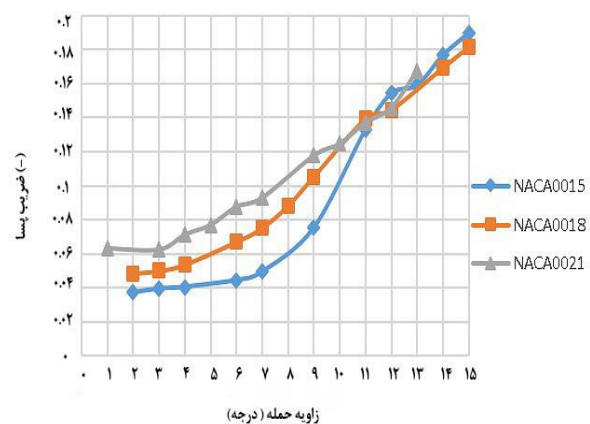
۱-۳- نحوه مش بندی

به علت پیچیدگی هندسه ایرفویل، جهت بهبود کیفیت شبکه بندی، دامنه محاسباتی به چهار ناحیه تقسیم و هر ناحیه به صورت جداگانه شبکه بندی شد. این امر کیفیت شبکه بندی را به خصوص در نواحی نزدیک سطح ایرفویل افزایش داده که این گونه مش‌زنی سبب بهبود خاصیت تعامدپذیری خطوط شبکه بر سطح ایرفویل در لبه حمله گردید. هندسه مقطع پره و مش بندی ایرفویل در انسیس انجام و شبکه ایجاد شده ساختار یافته و از دامنه محاسباتی C شکل حول ایرفویل استفاده شده که شعاع نیم دایره حول دامنه ۱۱ برابر وتر و فاصله مرز خروجی دامنه تا لبه فرار ۱۸ برابر وتر ایرفویل بوده و سعی شده تا مقدار ضریب بی بعد γ^+ به اندازه‌ای باشد تا اولین گره در نزدیکی ایرفویل در زیر لایه لزج قرار گرفته باشد. دامنه محاسباتی و نمای نزدیک در شکل ۷ نشان داده شده است.



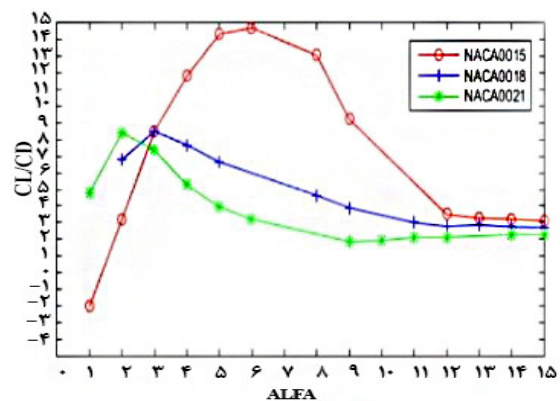
شکل ۴ ضریب برای ایرفویل‌ها در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۵ ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ در ابتدا نسبت به دو ایرفویل دیگر ضریب پسای کمتری داشته ولی با افزایش زاویه حمله بیشترین مقدار ضریب درگ در زاویه حمله ۱۵ درجه به مقدار ۰/۱۸۵ رسیده است.



شکل ۵ ضریب پسای ایرفویل‌ها در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۶ ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بیشتری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه داشته و بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در زاویه حمله ۶/۵ درجه و برابر ۱۵/۳ و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل ناکا ۰۰۱۸ در زاویه حمله ۳ درجه و برابر ۸/۲ که و ایرفویل ناکا ۰۰۲۱ بیشینه نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در زاویه ۳ درجه و برابر ۸/۵ بوده که کم‌تر از ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ است و در این سرعت ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب داشته و نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بیشتری دارد.

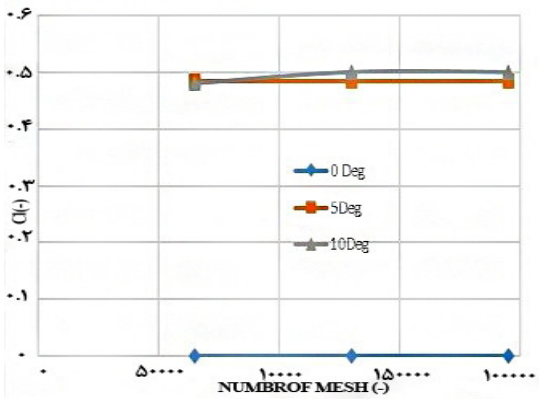


شکل ۶ نسبت ضریب برآ به ضریب پسای ایرفویل‌ها در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

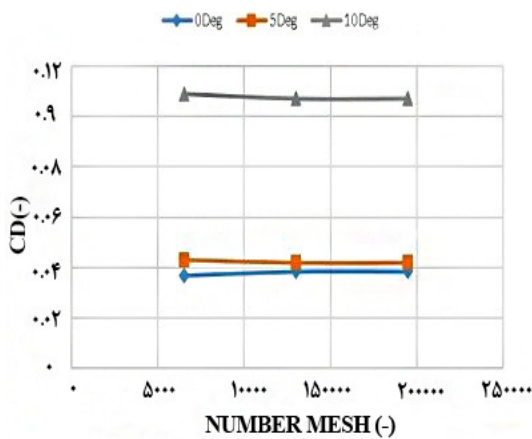


۳-۳- استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال حل عددی و نتایج از شبکه محاسباتی، تحقیقی انجام شد که در آن از سه نوع شبکه متفاوت در حالت پایا و در زاویه حمله پنج و ۱۰ درجه و سه نوع شبکه بندی درشت با تعداد ۶۵۰۰۰، متوسط با تعداد ۱۳۰۰۰۰ و ریز به تعداد ۱۹۵۰۰۰ برای ایرفویل NACA0015 مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹ استقلال از شبکه ضریب برآ در زوایای مختلف

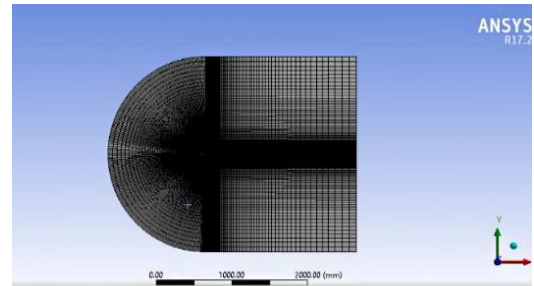
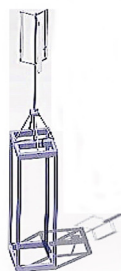


شکل ۱۰ استقلال از شبکه ضریب پسا در زوایای مختلف

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده شد که نتایج با افزایش سلول‌های شبکه ضریب برآ و پسا در زاویه‌های پنج و ۱۰ درجه تغییری نکرده کرده و به اصطلاح مستقل از شبکه شده است.

۴- طراحی و ساخت

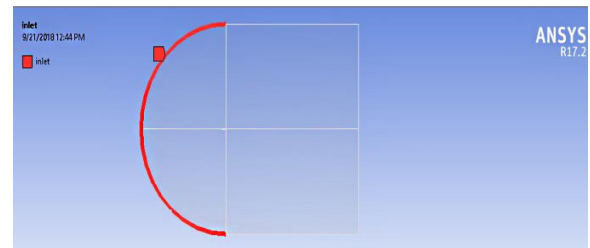
شماتیک توربین بادی در نرم‌افزار کتیا طراحی و در مقیاس ۵:۱ نمونه اصلی ساخته شد و ارتفاع پره طراحی و ساخته شده برابر ۳۵ سانتی‌متر، شعاع پره ۱۸/۵ سانتی‌متر و طول ایرفویل برابر ۶/۴ سانتی‌متر است.



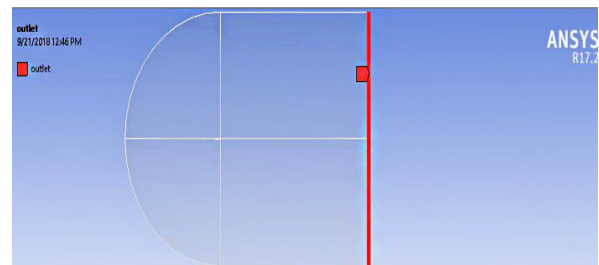
شکل ۷ نمایی از شبکه بندی کل ایرفویل NACA0015

۲-۳- شرایط مرزی

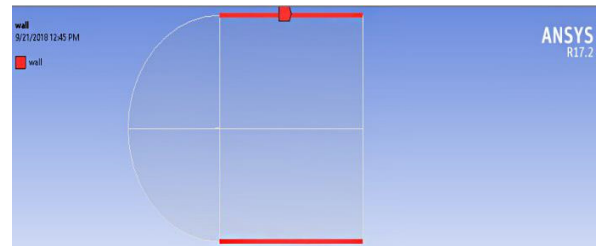
شرط مرزی ورودی سرعت Inlet Velocity، در خروجی جریان Pressure Outlet که در این شرط مرزی فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد، برای سطح ایرفویل شرط مرزی دیوار Wall و شرط عدم لغزش به صورت پیش فرض در حرکت سیال از روی سطح ایرفویل اعمال و قسمت خروجی شبکه outlet، قسمت بالا و پایین شبکه Wall و ایرفویل مورد نظر Airfoil نام گذاری شد، شکل ۸.



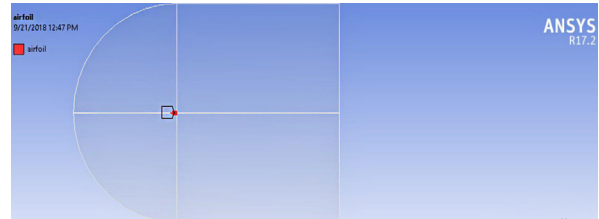
الف



ب



ج

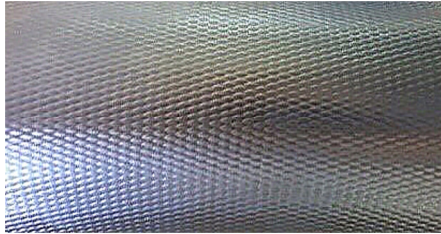


د

شکل ۸ نمایی از شبکه‌بندی کل دامنه حل (الف) و نمای نزدیک ایرفویل (ب)



الف



ب

شکل ۱۳ ورق ساده آلومینیوم و امباس لوزی شکل

برای ساخت پره از ایرفویل NACA0015 و جنس مورد استفاده برای روکش پرها از ورق آلومینیوم ساده برای پره مستقیم و برای پره متخلخل از روکش ورق امباس که به صورت خلل و فرج است، استفاده و ورق‌های آلومینیوم با استفاده از پرچ و پیچ خودرو به هم وصل و با استفاده از ساعت اندیکاتور، لقی و فرورفتگی پره‌های مستقیم و متخلخل کنترل شده تا برآمدگی و فرورفتگی در پرها ایجاد نشود و کنترل پرها دقیق و در هر حالت مقایسه، هر کدام از پرها شرایط و کنترل دقیق و یکسانی دارند تا خطایی در محاسبات و ساخت پیش نیاید شکل ۱۴.



الف

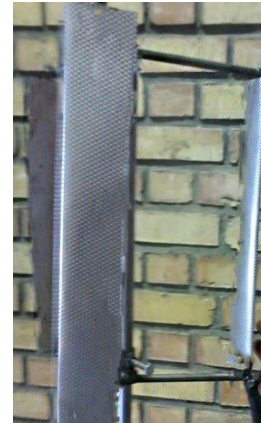


ب

شکل ۱۴ پره طراحی شده و توربین بادی پره متخلخل با ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری

برای تراز کردن شاسی از تراز دیجیتال که به جای حباب تراز از سنسور محاسبه شیب جهت اندازه‌گیری شیب استفاده شده تا به کمک صفحه نمایش-گر مقدار شیب سطوح را با دقت ۰/۱ درجه نمایش می‌دهد. پایه توربین باید از لحاظ استقامتی محکم باشد و چون دارای ارتفاع و ابعاد نسبتاً بزرگ است، پایه یا شاسی دارای ارتفاع بزرگ و از همه مهم‌تر باید در مقابل تنش و استرس احتمالی مقاوم باشد و ارتعاشات کل دستگاه در حالت

الف



ب

شکل ۱۱ شماتیک و ساخت توربین

۱-۴- ساخت بازوهای توربین

برای ساخت بازوی توربین ابتدا فولاد به قطر ۱۰ میلی‌متر و به طول ۱۸/۵ سانتی‌متر برش و سپس به فاصله ۱۰ میلی‌متر از یک طرف بازو، سوراخی به قطر پنج میلی‌متر و پخی به اندازه ۸/۵ میلی‌متر ایجاد و برای این‌که بازوها را بتوان به شفت توربین وصل و راحت‌تر بتوان ارتفاع پرها را افزایش یا کاهش داد، قطعه‌ای به قطر داخلی و خارجی ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر طراحی و ساخته شد، شکل ۱۲.



شکل ۱۲ اتصال بازوها در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری

۲-۴- استفاده از ورق آلومینیوم برای ساخت پره

آلومینیوم و آلیاژهای آن به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته شد. این آلیاژها به دلیل دانسیته پایین، هدایت حرارتی بالا و خواص الکترومغناطیس، در صنایع هوافضا، قطعات هواپیما و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارند.

ورق آلومینیومی نوع خاصی از ورق است که از آلیاژ سری یک، با ویژگی‌های فلز آلومینیوم تولید و در دسته‌های ورق فلزی سبک قرار می‌گیرد. برای ساخت پرها از یک ورق ساده آلومینیوم به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر به ابعاد ۲×۱ متر و برای ساخت پره متخلخل از ورق آلومینیوم امباس که به صورت خلل و فرج به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر استفاده شد و پرها دارای پیچش نبوده و از نوع راست پره هستند.

یکی از مهم‌ترین قسمت در این کار اندازه‌گیری متغیرهای مورد نظر جهت بررسی و تحلیل سیستم راه‌انداز، داده برداری با استفاده از ابزار اندازه‌گیری دقیق شامل ساعت اندیکاتور، دورسنج، سرعت‌سنج و دیگر ابزارآلات اندازه‌گیری است.



ب



الف



د



ج

شکل ۱۶ ابزارهای اندازه‌گیری

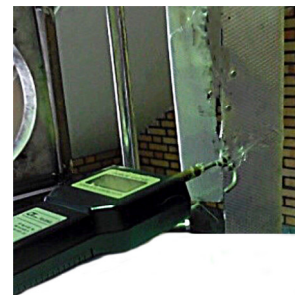
دینامیکی در محدوده قابل مجاز بوده و شاسی دستگاه موقع اندازه‌گیری در دو حالت پره صاف و متخلخل به چهار وزنه ۲۵ کیلوگرمی کنسول شده تا ارتعاشی و لرزشی موقع اندازه‌گیری در دو حالت پره صاف و متخلخل نداشته باشد. در توربین‌های بادی، یاتاقان‌های توپی نقش مهم و اساسی را ایفا می‌کنند که برای دوران شفت توربین از آن‌ها استفاده شد. برای اتصال پایه به توربین بادی محور عمودی از یاتاقان توپی به قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر استفاده که دارای چهار سوراخ به قطر ۱۲ میلی‌متر که با پیچ و مهره به پایه نصب می‌گردد. یاتاقان توپی که در اتصال شفت به پایه یا بدنه توربین استفاده شد باید به اندازه کافی روان باشد تا در مقابل حرکت توربین مقاومت ایجاد نکند. یاتاقان توپی استفاده شده در این کار از نوع ایتیکا به قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر برای اتصال مورد استفاده قرار گرفته که دارای قابلیت روان کاری از طریق پین مخصوص روغن را دارد. برای محکم نگه داشتن شفت و هم‌چنین جهت حفظ کنترل شفت از یک یاتاقان توپی دیگر استفاده که به اندازه ۲۲ سانتی‌متر بالاتر از پایه و یاتاقان توپی دیگر قرار دارد.

۳-۴- گشتاور راه‌اندازی پره مستقیم و متخلخل در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری

یکی از مشکلات توربین‌های بادی محور عمودی داریوس توانایی کم آن‌ها در راه‌اندازی اولیه بوده که اساس کار این پژوهش هم بر این اساس است. برای همین لازم است در ابتدا نیروی لازم برای شروع به حرکت توربین را اندازه‌گیری کرد. شکل ۱۵ نحوه استفاده نیروسنج برای ایجاد نیروی راه‌اندازی اولیه را نشان می‌دهد. برای این کار ابتدا در سرعت بادی که توربین می‌تواند در آن شروع به کار کند، نیروسنج را به پره توربین متصل و سپس نیروی مورد نیاز برای اندازه‌گیری در پره مستقیم و متخلخل در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری مشخص شد. لازم به ذکر است که ارتعاشات کل دستگاه در حالت دینامیکی محدوده مجاز بوده و برای اندازه‌گیری دقیق‌تر نیروسنج با دقت ۰/۲ و اسنجی شده‌اند.



الف



ب

شکل ۱۵ نیروسنج و نحوه نصب نیروسنج به توربین بادی محور عمودی داریوس

ساعت اندیکاتور یا ساعت اندازه‌گیری جز ابزارهای اندازه‌گیری متغیر است که با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر بعد از برش قطعات و تعیین اختلاف سطح پیچ متری و سایر قطعات مورد استفاده در ساخت توربین با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده و برای ایجاد جریان باد از دمنده که از چهار فن با قابلیت هوادهی و برای اندازه‌گیری سرعت باد از سرعت‌سنج لوترون مدل YK2004AH و برای اندازه‌گیری دوران توربین از یک دورسنج لوترون مدل DT-2268 استفاده شد.

۴-۵- تست توربین

بعد از ساخت توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم و متخلخل در جلوی دمنده قرار و شروع به تست در سرعت‌های مختلف نموده و نیروی راه‌اندازی توربین بادی در هر دو حالت پره مستقیم و متخلخل اندازه‌گیری و در شکل ۱۷ قرارگیری توربین بادی در مقابل دمنده را نشان می‌دهد.



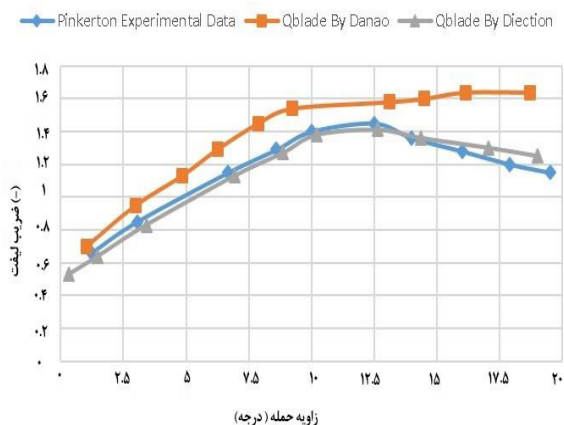
شکل ۱۷ تست توربین در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری

۴-۶- انواع خطاها

در پژوهش حاضر، خطاهای موجود به صورت زیر است:

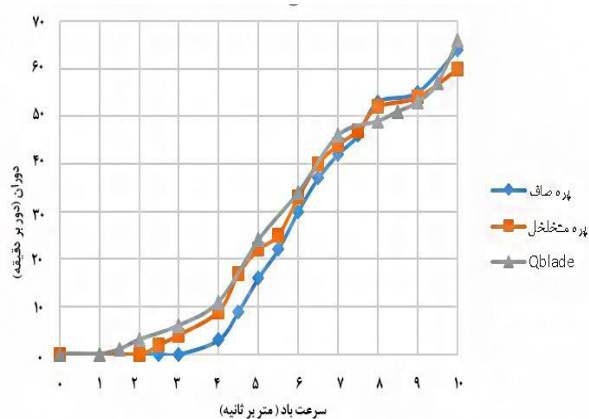
۴-۴- وسایل مورد نیاز برای ساخت، تست و اندازه‌گیری





شکل ۱۹ اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

برای صحت‌سنجی داده‌های بدست آمده در نتایج آزمایشگاه حاصل از دوران توربین بادی پره مستقیم و متخلخل در ارتفاع ۳۵ سانتی متری در سرعت بادی مختلف، نتایج را در نرم افزار Q-blade تحلیل کرده که با افزایش سرعت باد، دوران توربین بادی افزایش پیدا کرده و مدل عددی، نتایج آزمایشگاهی را به دقت پیش‌بینی کرده و خطای نتایج تجربی شامل خطای دستگاه اندازه‌گیری یا سرعت دمنده، خطای ساخت مدل و تنظیم موقعیت قرارگیری بوده که در شکل ۲۰ نتایج تصدیق داده‌های تجربی را نشان داد.



شکل ۲۰ تصدیق و صحت‌سنجی داده‌های تجربی

۲-۵- مقایسه نتایج ضریب برآ در نرم افزارهای Q-blade و Ansys Fluent

در شکل ۲۱ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت پنج متر بر ثانیه بر حسب زاویه آلفا برای ایرفویل NACA0015 نشان داده شده است. با افزایش زاویه آلفا، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته که می‌توان در نتایج دو نرم افزار به این نتیجه رسید.

الف- خطای اندازه‌گیری سرعت دمنده: سرعت در مقطع آزمون تست باد با استفاده

از سرعت سنج و حسگر نصب شده بر روی دمنده تعیین شد.

ب- خطای تنظیم موقعیت قرارگیری مدل در فاصله مورد نظر: اگر چه با استفاده از ساعت اندیکاتور، شابلون و ترازسنج دیجیتالی سعی گردید که مدل دقیقاً در محل خود قرار گیرد.

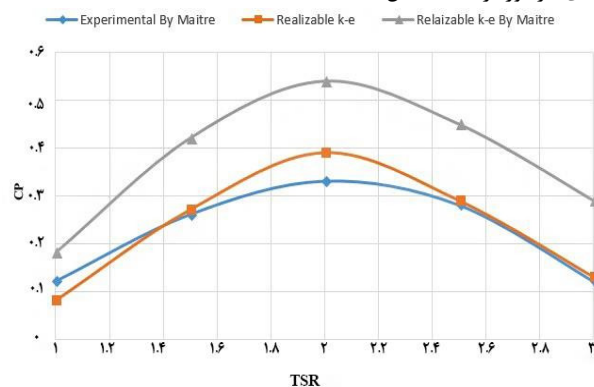
ج- خطای موجود در ساخت مدل: به دلیل خطای دستگاه‌های ساخت مدل، همواره در این مرحله مقداری خطا ایجاد شده که بر نتایج تست تاثیر می‌گذارد.

د- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری: اگر چه دستگاه به دقت واسنجی شده ولی وجود مقداری خطا در ثبت اطلاعات اجتناب‌ناپذیر است. خطاهای دستگاه می‌تواند مربوط به نیروسنج، دورسنج یا سرعت‌سنج باشد که دارای دقت ۰/۲ درصد است.

۵- بحث و نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی داده‌های تئوری با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت و Q-Blade

برای صحت‌سنجی نتایج انسیس فلونت، نتایج بدست آمده را با نتایج عددی و آزمایشگاهی مایتر و همکاران [۲۳] مقایسه کرده که نتایج بدست آمده در شکل ۳۷ نشان داده شده و خطای عددی برابر ۲/۱ درصد بوده که از مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی [۲۳] داشته و از دقت بسیار خوب و دقیق نسبت به تحلیل عددی برخوردار است، شکل ۱۸.

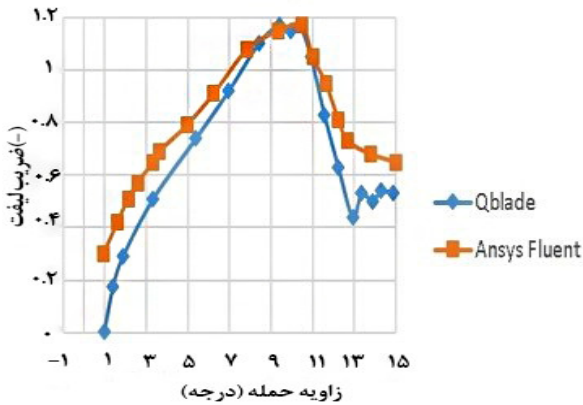


شکل ۱۸ اعتبارسنجی نتایج انسیس فلونت با نتایج تجربی و عددی

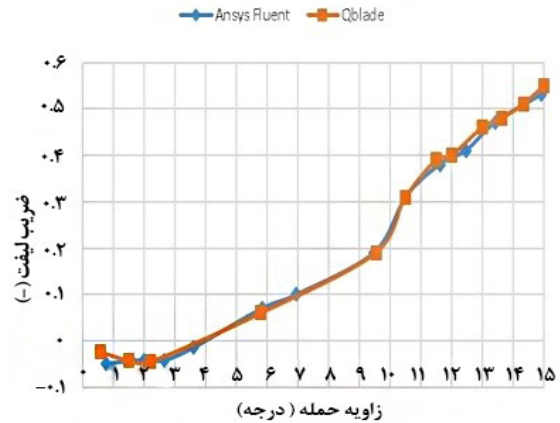
برای صحت کار انجام شده در مرحله اول نتایج به دست آمده را با داده‌های عملی به دست آمده توسط پینکرتون [۲۴] و تحلیل داناو [۲۵] برای ایرفویل NACA4412 در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰۰ و زوایای صفر تا ۲۰ درجه اعتبارسنجی شد، شکل ۱۹.

در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از زاویه واماندگی، ضریب نیروی برآ به صورت خطی افزایش پیدا کرده و در روش حاضر مدل انتخاب شده دقیق‌تر نسبت به مدل داناو، نتایج را پیش‌بینی و با نزدیک شدن به مرحله واماندگی در زاویه حمله بالا، به خاطر جدایی جریان، نتایج دارای اختلاف در نزدیکی‌های زاویه واماندگی بوده و مقدار بیشینه ضریب برآ پیش‌بینی شده در تحقیق حاضر خیلی نزدیک‌تر نسبت به مدل حل شده داناو برای مدل تجربی است و خطای نتایج Q-Blade برابر ۵/۹ درصد است.





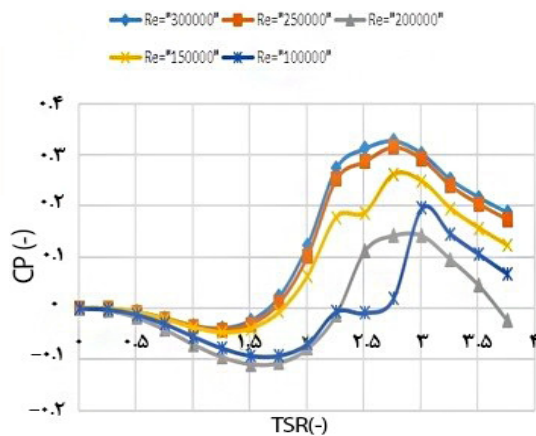
شکل ۲۳ مقایسه داده‌های Q-blade و fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه



شکل ۲۱ مقایسه داده‌های Q-blade و Fluent ضریب برآ بر زاویه آلفا در سرعت پنج متر بر ثانیه

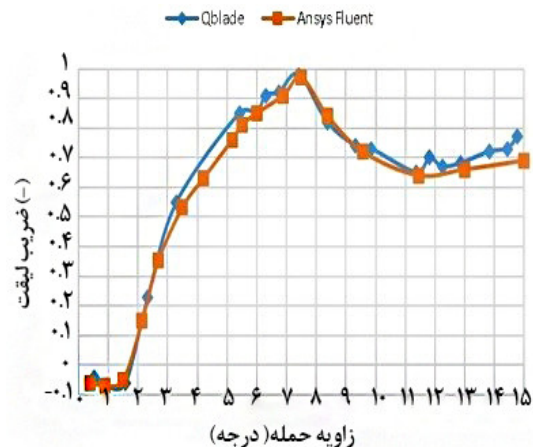
۳-۵ محاسبه ضریب عملکرد توربین در عدد رینولدزهای مختلف با استفاده از نرم افزار Q-blade

در شکل ۲۴ هر چقدر عدد رینولدز توربین بادی طراحی شده بیشتر باشد، ضریب عملکرد توربین بادی زیادتر هست و هر چقدر ضریب عملکرد توربین بیشتر باشد، کارایی و راندمان توربین بادی طراحی شده بیشتر است. بالاترین عدد رینولدز در این مدل‌سازی برابر سیصد هزار و محدوده بالاترین عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس بین ۱/۵ تا چهار بوده و ماکزیمم ضریب عملکرد توربین برابر ۰/۳۳ است.



شکل ۲۴ ضریب عملکرد توربین بادی طراحی شده در اعداد رینولدز مختلف

در شکل ۲۲ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه بر حسب زاویه آلفا نشان داده شده که با افزایش زاویه آلفا، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته و در زاویه هفت درجه به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۰/۹۷۵ رسیده و در این زاویه، واماندگی برای ایرفویل NACA0015 رخ داده و با افزایش بیشتر زاویه آلفا نمودار سیر نزولی به خود گرفته است.

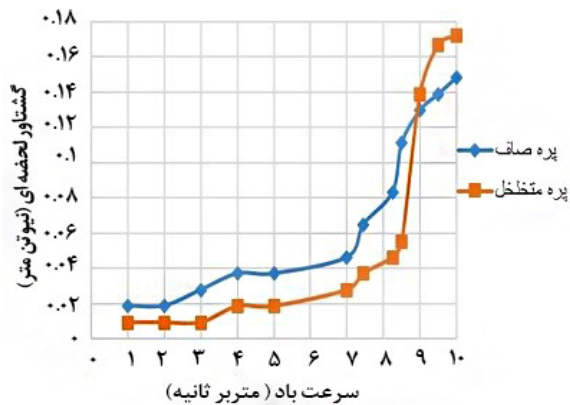


شکل ۲۲ مقایسه داده‌های Q-blade و fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۲۳ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه بر حسب زاویه آلفا نشان داده شده است. با افزایش زاویه آلفا، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته و در زاویه هشت درجه به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۱/۱۸ رسیده و در این زاویه، واماندگی برای ایرفویل NACA0015 رخ داده و با افزایش بیشتر زاویه آلفا نمودار سیر نزولی به خود گرفته است.

۴-۵ بررسی تجربی گشتاور لازم برای راهاندازی توربین بادی محور عمودی داریوس

در شکل ۲۵ توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل گشتاور راهاندازی کم‌تری نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم نیاز دارد تا شروع به دوران کند، به طوری که در سرعت‌های یک، دو و سه متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راهاندازی برابر ۰/۰۰۹۲۵ نیوتن متر بوده ولی در توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم در سرعت یک و دو متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای شروع برابر ۰/۰۱۸۵ نیوتن متر که دو برابر مقدار گشتاور لازم برای دوران توربین پره متخلخل است و در سرعت سه متر بر ثانیه مقدار گشتاور لازم برای حرکت در توربین بادی پره مستقیم برابر سه برابر همین مقدار برای توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل است. در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای پره متخلخل برابر ۰/۰۱۸۵ نیوتن متر هست که برای پره مستقیم در سرعت‌های ذکر شده برابر ۰/۰۳۷ نیوتن متر است.



شکل ۲۵ مقایسه گشتاور راهاندازی توربین بادی پره مستقیم و متخلخل

۶- نتیجه گیری

ایرفویل NACA0015 با استفاده از نرم افزار Q-blade انتخاب و تاثیر توزیع فشار در زوایای مختلف ایرفویل Naca0015 در نرم افزارهای انسیس فلونت و Q-blade بررسی شد. برای تحلیل عددی از مدل SST-K- ω استفاده و در نهایت ضریب لیفت و درگ را در زوایای مختلف در نرم افزار انسیس فلونت بدست آورده که همخوانی خوبی با داده‌های نرم افزار Q-blade و نتایج آزمایشگاهی داشت.

با استفاده از نرم افزار Q-blade و تحلیل آیرودینامیکی این نتیجه حاصل شد که با افزایش عدد رینولدز، ضریب عملکرد توربین افزایش یافته و کارایی توربین بهتر شد.

برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل در سرعت‌های یک و دو متر بر ثانیه ۵۰٪ گشتاور کمتر نسبت به توربین بادی پره صاف لازم است تا توربین شروع به دوران نماید. برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل در سرعت سه متر بر ثانیه ۳۳٪ گشتاور توربین بادی پره صاف لازم است تا شروع به دوران نماید و برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه ۵۰٪ و در سرعت هفت متر بر ثانیه ۶۰٪ گشتاور توربین بادی پره صاف و در سرعت ۷/۴۵ متر بر ثانیه ۵۷٪ گشتاور توربین بادی پره صاف و در سرعت ۸/۲۵ متر بر ثانیه ۵۵٪ گشتاور توربین بادی پره صاف و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۵۰٪ گشتاور توربین بادی پره صاف لازم است تا شروع به دوران نماید. برای راهاندازی توربین بادی پره صاف در سرعت نه متر بر ثانیه ۹۳٪ گشتاور توربین بادی پره متخلخل و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۸۶٪ گشتاور لحظه‌ای توربین بادی پره متخلخل لازم است تا شروع به دوران نماید.

۷- فهرست علائم

P	چگالی (kgm^{-3})
τ	تانسور تنش
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
V	سرعت جریان (m/s)
D	قطر روتور (متر)
F	نیروهای حجمی (N)

نیوتن متر است که برای راهاندازی آن در سرعت‌های ذکر شده دو برابر پره متخلخل گشتاور باید وارد گردد تا شروع به دوران نماید.

در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل مقدار ۰/۰۲۷۷۵ نیوتن متر گشتاور نیاز است در حالی که برای راهاندازی توربین بادی پره مستقیم در همین سرعت مقدار ۰/۰۴۶۲۵ نیوتن متر گشتاور لازم است تا توربین شروع به چرخش نماید. در سرعت ۷/۴۵ متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین بادی پره متخلخل برابر ۰/۰۳۷ نیوتن متر است، در حالی که برای توربین بادی پره مستقیم برابر ۰/۰۶۴۷۵ نیوتن متر است. در سرعت ذکر شده باید نیروی زیادتری به توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اعمال گردد تا بتواند شروع به چرخش نماید.

در سرعت ۸/۲۵ متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل برابر ۰/۰۴۶۲۵ نیوتن متر است، در حالی که در همین سرعت برای توربین بادی پره مستقیم برابر ۰/۰۸۳۲۵ نیوتن متر است که تقریباً دو برابر توربین بادی پره متخلخل گشتاور لازم است تا بتواند در همین سرعت توربین بادی پره مستقیم را بچرخاند. در سرعت ۸/۵ متر بر ثانیه مقدار گشتاور لازم برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل برابر ۰/۰۵۵ نیوتن متر است و برای توربین بادی پره مستقیم مقدار گشتاوری که بتواند توربین شروع به دوران کند برابر ۰/۱۱۱ نیوتن متر است که دو برابر گشتاور مورد نیاز توربین بادی پره متخلخل است.

در سرعت نه متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین بادی پره متخلخل برابر ۰/۱۳۸۷۵ نیوتن متر است، در حالی که برای توربین بادی پره مستقیم برابر ۰/۱۲۹۵ نیوتن متر است. در سرعت ذکر شده برعکس سرعت‌های قبل از نه متر بر ثانیه، برای توربین بادی پره متخلخل گشتاور بیش‌تری نسبت به پره مستقیم لازم است. در سرعت ۹/۵ متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل ۰/۱۶۶۵ نیوتن متر است، در حالی که برای توربین بادی پره مستقیم گشتاور راهاندازی برابر ۰/۱۳۸۷۵ نیوتن متر است که در سرعت ذکر شده نیز مثل سرعت نه متر بر ثانیه، گشتاور راهاندازی توربین بادی پره متخلخل نسبت به پره مستقیم بیش‌تر است.

در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل برابر ۰/۱۷۲۰۵ نیوتن متر و گشتاور لازم برای راهاندازی توربین بادی پره مستقیم برابر ۰/۱۴۸ نیوتن متر است. در سرعت ذکر شده گشتاور مورد نیاز برای راهاندازی توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از توربین بادی پره صاف است و در این سرعت دوران پره متخلخل برای شروع به چرخش انرژی زیادی نسبت به پره صاف مستقیم خواهد نمود. ولی برای سرعت‌های یک تا نه متر بر ثانیه گشتاور مورد لازم برای راهاندازی در توربین بادی پره متخلخل کمتر از پره مستقیم است و در سرعت نه تا ۱۰ متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای دوران توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از توربین بادی پره مستقیم است.



- [14] M. Douak, Z. Aouachira, R. Rabehi and N. Allam, Wind energy systems: Analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [15] L. Pagnini, G. Piccardo and M. P. Repetto, Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, 2017.
- [16] X. Sun, J. Zhu, A. Hanif, Z. Li, G. Sun, Effects of blade shape and its corresponding moment of inertia on self-starting and power extraction performance of the novel bowl-shaped floating straight-bladed vertical axis wind turbine, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 38. No.1, pp. 640-648, 2020.
- [17] A. Sagharichi, T. Najafi, S. Toudarbari, Impact of harmonic pitch functions on performance of Darrieus wind turbine, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 241. No.1, pp.298-310, 2019.
- [18] H. Su, B. Dou, T. Qu, P. Zeng, L. Lei, Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function, *Energy Conversion and Management*, Vol.217, No.1, pp.113-125, 2020.
- [19] H. Zhu, W. Hao, C. Li, Q. Diang, Effect of flow-deflecting-gap blade on aerodynamic characteristic of vertical axis wind turbines, *Renewable Energy*, Vol. 158, No. 1, pp. 370-387, 2020.
- [20] D. Stario, I. Utama, Experimental investigation into the improvement of self-starting capability of vertical-axis tidal current turbine, *Energy Reports*, Vol.10, No. 1, pp. 4587-4594, 2021.
- [21] E. Sobhani, M. Ghaffari and M. J. Maghrebi, Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine, *Energy*, 2018.
- [22] N. C. Batista, R. Melicio, V. Mendes, M. Calderon, A. Ramiro, on a self-start Darrieus wind turbine: Blade design and field tests, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, No.1, pp. 508-522, 2015.
- [23] T. Maître, E. Amet and C. Pellone, Modeling of the Flow in a Darrieus Water Turbine: Wall Grid Refinement Analysis and Comparison with Experiments, *Renewable Energy*, vol. 51, No. 1, pp. 497 – 512, 2013.
- [24] R. M. Pinkerton, R. M., *The Variation with Reynolds Number of Pressure Distribution over an Airfoil Section*, Technical Report No. 613, NASA, Cranfield, UK, 1938.
- [25] L.A. Danao, B. Abuan, R. Howel, *Design Analysis of a Horizontal Axis Tidal Turbine*, 2016.

شتاب گرانشی ($\frac{m}{s^2}$)	G
زمان (ثانیه)	T
ارتفاع پره (متر)	H
شعاع روتور (متر)	R
گشتاور راه‌اندازی (نیوتن متر)	T
ضریب گشتاور (-)	C _m
طول وتر پره (متر)	C
نیروی راه‌اندازی (نیوتن)	F
فشار	P

۸- مراجع

- [1] R. Firdaus, T. Kiwata, T. kano and K. Nagao, Numerical and experimental studies of a small vertical axis wind turbine with variable – pitch straight blades, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.10, No.1, pp.220-228, 2015.
- [2] M. Zamani, S. Nazari, S. A. Moshizi and M. J. Maghrebi, Three dimensional Simulation of j-shaped darrieus vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, Vol.116, No. 1, pp.1243-1255, 2016.
- [3] K. W. Wonga, T. W. Chonga, N. L Sukiman, S. C. poh, Y. Shiah, and C. T Wang, Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, No.1, pp. 904-921, 2017.
- [4] D. E. Berg, *Structural design of the Sandia 34-meter vertical-axis wind turbine*, Report SAND84-1287, 1985.
- [5] V. Bussel, *A momentum theory for horizontal axis wind turbine rotors and comparison with experiments*, Delft University of Technology, 1990.
- [6] F. S. Stoddard, Discussion of momentum theory for windmills. University of Massachusetts, *wind Energy Center Reports*, 1976.
- [7] M. Islam, D. Ting and M. Fartaj, *Investigation of alternative materials for use in mid-Size vertical axis wind turbine blades: materials assessment*, CANMET Energy Technology Centre (CETC). Ontario, Canada, 2001.
- [8] W. You, Y. Chao and Z. Tao, Numerical investigation of dynamic stall vortex movement of different thickness airfoils, *journal of Beijing university of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 32, No. 2, pp. 153-157, 2006.
- [9] R. Dominy, P. Lunt, A. Bickerdyke and J. Dominy, Self-starting capability of a darrieus turbine. proceedings of the institution of mechanical engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, Vol. 221, No.1, pp.111-120, 2007.
- [10] J. Edwards, N. Durrani and R. Howell, *Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine*, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, UK, 2008.
- [11] S. Wang, D. B. Ingham, M. Lin and M. Pourkashanian, *Numerical investigations on dynamic stall of low reynolds number flow around oscillating airfoils*, 2001.
- [12] T. Hayashi, Y. Li, Y. Hara and K. Suzuki, Wind tunnel tests on a different phase three-stage savonius rotor, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol.48, No.1, pp. 9-16, 2005.
- [13] S. Kouravand, B. M. Imani and A. M. Kermani, Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil, *Renewable Magazine*, Vol.2, No.3, pp. 65-73, 2016.

