



طراحی توربین بادی محور عمودی فراساحلی با پره های متخلخل

حسین سیفی^{1*}، محسن سیفی داوری² و شهریار کوراوند³

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

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* چابهار، صندوق پستی 9971756499، hseifidavary@gmail.com

چکیده

با هدف توسعه یک توربین بادی محور عمودی دریایی با پره متخلخل در این پژوهش، شبیه سازی هایی بر روی ایرفویل های مختلف پروفیل های ناکا سری 4، سری 5 و سلیگ در اعداد مختلف رینولدز 60000، 100000 و 140000 با استفاده از مدل جریان چندگانه-دوگانه با تصحیح افت نوک انجام شده است. علاوه بر مشخصات پره، پارامترهای طراحی توربین مانند نسبت ابعاد و نسبت استحکام نیز با تغییر ارتفاع و وتر پره بررسی شد. علاوه بر این، مجموعه ای از آزمایش های تونل باد بر روی توربین بادی انجام خواهد شد. این مقاله تحلیلی را برای طراحی یک توربین بادی محور عمودی سه پره برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی آن از نظر ضریب توان ارائه می کند. رویکرد لوله جریان چندگانه-دوگانه با در نظر گرفتن تصحیح تلفات نوک، یک روش موثر پیش بینی عملکرد دقت مرتبه پایین تر برای تجزیه و تحلیل طیف گسترده ای از طراحی های توربین به شیوه ای مقایسه ای با هزینه محاسباتی قابل توجهی کم تر است. این مطالعه پروفایل SeligS1046 را برای آزمایش های تونل باد در اعداد وتر هدف رینولدز در محدوده 60000، 100000 و 140000 مناسب نشان داد. نسبت ابعاد در اعداد مختلف رینولدز، در نسبت ابعاد 1.0 در اعداد رینولدز کم تر و همچنین بالاتر در محدوده خوبی از نسبت سرعت نوک مناسب تر می باشد. همچنان نسبت استحکام 0.17 برای افزایش عملکرد توربین در محدوده آزمایش شده مناسب است.

کلیدواژگان: طراحی، توربین بادی، پره، محور عمودی، فراساحلی، عدد رینولدز

Design of offshore vertical axis wind turbine with porous blades

Hossein Seifi^{1*}, Mohsen seifi davary², Shahriar kouravand³

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

Iran 2- Master Civil Engineering Student, Islamic Azad University- Germe Branch, Germe, Iran

3- Associate Professor, Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran * P.O.B.

9971756499 Chabahar, Iran, hseifidavary@gmail.com

Received: 26 Nov. 2021 Accepted: 9 Nov. 2023

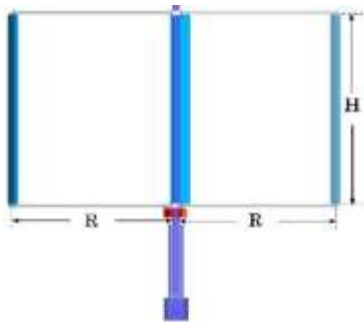
Abstract

In this research, the aim is to develop a marine vertical axis wind turbine with porous blades. Simulations were conducted using different airfoils from the NACA series 4, series 5, and Selig profiles at Reynolds numbers of 60,000, 100,000, and 140,000. The simulations utilized the multiple double stream tube model with loss correction at the tip. Additionally, turbine design parameters such as aspect ratio (AR) and solidity (σ) were investigated by varying blade height and chord length. Wind tunnel tests will also be carried out on the wind turbine. This paper presents an analysis focused on enhancing the aerodynamic performance, specifically the power coefficient, of a three-bladed vertical axis wind turbine. The Double Multiple Stream (DMST) approach, incorporating tip loss correction, proves to be a cost-effective method with lower-order accuracy for predicting performance across various turbine designs. The results indicate that the Selig 1046 profile is suitable for wind tunnel tests within the target chord Reynolds numbers. Moreover, an aspect ratio of 1.0 demonstrates suitability across different Reynolds numbers, particularly in a favorable range of Tip Speed Ratio (TSR). Furthermore, a solidity (σ) of 0.17 proves effective in enhancing turbine performance within the tested range

Keywords: Design, Wind Turbine, Blade, Vertical Axis, Offshore, Reynolds Number

1- مقدمه

توربین بادی محور عمودی مدرن توسط یک مهندس فرانسوی به اسم داریوس^۱ در سال 1931 برای هر دو نوع پره مستقیم^۱ و تخم مرغی^{۱۱} [5] اختراع شد. با این حال، تا اوایل دهه 1970، تحقیقات بسیار کمتری در مورد توربین بادی محور عمودی انجام شده است. پس از آن، در چند دهه اخیر، تعدادی از مطالعات در مورد توربین بادی محور عمودی برای بهبود عملکرد آن گزارش شده است [6]. نمای جلویی توربین بادی محور عمودی داریوس در شکل 1 نشان داده شده است. عملکرد توربین بادی اغلب با ضریب قدرت و ضریب گشتاور مشخص می‌شود. شرایط عملیاتی بهینه برای چنین توربینی به ویژگی‌های نیروی آیرودینامیکی ایرفویل^{۱۲} پره، استحکام توربین، طول وتر، شعاع توربین، ارتفاع توربین، زاویه پیچش پره و نسبت سرعت نوک بستگی دارد. با این حال، بررسی‌ها بر روی ایرفویل‌های پره‌ای توربین بادی محور عمودی بسیار کمتر از آن‌هایی است که روی توربین بادی محور افقی انجام شده است و بررسی پارامتریک در طیف گسترده‌ای از طرح‌ها از نظر تجربی پره‌زین و زمان‌بر است. در این زمینه، مارتن و همکاران^{۱۳} [7] یک الگوریتم^{۱۴} پردازش سریع را بر اساس مدل لوله جریان چندگانه - دوگانه^{۱۵} همان‌طور که در [8] توضیح داده شد، توسعه داده‌اند. کاربرد مدل جریان چندگانه برای پیش‌بینی عملکرد توربین بادی محور عمودی نیز در مطالعات بری^{۱۶} و یائو^{۱۷} [9]، بیادگو^{۱۸} و همکاران [10] و وانگ^{۱۹} و همکاران مشاهده شد [11].



شکل 1 نمای جلویی توربین بادی محور عمودی داریوس با سه پره

نوآوری فعلی صنعت بادی در توسعه اجزای توربین جداگانه انجام می‌شود. هندسه پره، وتر، پیچش و توزیع نوع ایرفویل در طول دهانه، به معیارهای خروجی عملکرد پره پاسخ می‌دهد [10]. بنابراین، هندسه پره باد بهینه می‌تواند عملکرد کلی توربین را بهبود بخشد [2]. طراحی پره‌های بهینه شامل مشکلات آیرودینامیکی، ساختاری و کنترلی است. با این حال، چرخه طراحی را می‌توان عملاً به عنوان یک روش تکراری و پلکانی مورد بررسی قرار داد. برای بهینه‌سازی آیرودینامیکی، پره را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از مقاطع در

از زمان بحران انرژی در اوایل دهه 1970، منابع انرژی^۱ سبز و تجدیدپذیر توجه زیادی را در تحقیقات صنعتی و دانشگاهی به خود جلب کرده است. اثرات نامطلوب انتشار کربن سوخت‌های فسیلی و کمبود مسائل در دسترس، نگرانی‌ها را در مورد جایگزین‌های بادی، آب و انرژی خورشیدی افزایش می‌دهد [1]. انرژی باد یکی از رایج‌ترین اشکال انرژی‌های تجدیدپذیر است که بعد از انرژی خورشیدی در رتبه دوم قرار دارد. ایده فعلی استخراج انرژی جنبشی از جریان‌های باد سطحی و تبدیل این انرژی به انرژی الکتریکی با استفاده از ترکیبی از چرخ دنده‌ها و یک ژنراتور^۲ الکتریکی جدا از سایر سیستم‌های ثانویه انجام می‌شود [2]. با استفاده از یک مبدل الکترونیکی قدرت مناسب، این الکتریسیته ممکن است مستقیماً در شبکه یکپارچه شود، یا همچنین ممکن است برای تامین برق یک ایستگاه شارژ عمل کند. با کاهش سوخت‌های فسیلی، آگاهی گسترده از نیاز به انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در حال افزایش است. این انتقال، همراه با افزایش گرمایش جهانی، به ویژه به دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی برای تامین برق، منجر به نصب چند توربین بادی در مقیاس کوچک شده است [1]. این توربین‌های^۳ بادی به عنوان نصب انفرادی در بالای ساختمان‌ها در محیط‌های شهری و همچنین در مناطق باز مانند مزارع و پارک‌ها رخ می‌دهند.

با تمرکز بر تبدیل انرژی باد، دو دسته وسیع از توربین‌های بادی مدرن بر اساس محور چرخشی آن‌ها وجود دارد، یعنی توربین‌های بادی محور افقی^۴ و محور عمودی^۵ [3]. اگر چه توربین بادی محور افقی‌ها بر بازار انرژی بادی تسلط دارند، در زمان‌های اخیر، علاقه مجددی به توربین بادی محور عمودی‌ها مشاهده شده است. به ویژه، رشد اخیر در بازار انرژی بادی فراساحلی و علاقه به تولید برق غیرمتمرکز، احتمالات تحقیق در مورد توربین بادی محور عمودی را افزایش می‌دهد. برای کاربردهای دریایی، توربین بادی محور عمودی‌ها مزایای مشخصی مانند قابلیت تبدیل انرژی بدون توجه به جهت باد، موقعیت خوب ژنراتور و گیربکس^۶ در زیر توربین را ارائه می‌دهند که ساختاری ساده‌تر و سبک‌تر می‌دهد و هزینه نصب را در مکان‌های دریایی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، پایداری ساختاری در بادهای با سرعت بالا یکی دیگر از مزایای توربین بادی محور عمودی است. مزایای مرکز ثقل پایین‌تر، کاهش پیچیدگی ماشین و مقیاس‌پذیری بهتر در اندازه‌های بزرگ، آن را برای کاربردهای فراساحلی جالب کرده است و چندین پروژه توربین بادی محور عمودی فراساحلی چند مگاواتی^۷ در حال حاضر در حال انجام است [1]. با این حال، از آنجایی که توربین بادی محور عمودی یک محور چرخشی معمولی نسبت به جریان دارد، آیرودینامیک^۸ جریان پیچیده‌تر از توربین بادی محور افقی معروف است [4].

11. Eggbeater types
12. Airfoil
13. Marten et al
14. Algorithm
15. DMST
16. Beri
17. Yao
18. Biadgo
19. Wang

1. Energy
2. Generator
3. Turbines
4. HAWT
5. VAWT
6. Gearbox
7. Megawatt
8. Aerodynamic
9. Darrieus
10. Straight blade

هزار تولید می‌کنند، بحث می‌کنند. سلیگ^{۱۲} و همکاران [19] در پژوهش دیگری در مورد کاربرد 15 ایرفویل متشکل از ایرفویل‌های عمدتاً نازک، در امتداد دهانه پره‌های باد کوچک بحث می‌کنند.

ایرفویل‌ها یکی از اجزای اساسی طراحی پره روتور^۸ است. هدف آن القای مکش در سطح بالایی پره برای ایجاد بالابر است. درگ^۹ نیز عمود بر بالابر ایجاد می‌شود و وجود آن بسیار نامطلوب است. برای به حداکثر رساندن ضریب قدرت و گشتاور تولیدی، ضریب لیفت^{۱۰} و نسبت ضریب لیفت به درگ^{۱۱} برای ایرفویل باید حداکثر شود [20]. نسبت‌های ضریب لیفت به درگ بالاتر به مقادیر بالاتر گشتاور کمک می‌کند [20] و مطلوب است که در نسبت‌های ضریب لیفت به درگ مطلوب، حداکثر ضریب لیفت وجود داشته باشد تا یک روتور با اندازه کوچک داشته باشیم. بسیار مهم است که روتورهای توربین بادی کوچک واکنش راهاندازی خوبی به سرعت باد کم داشته باشند تا حداکثر توان ممکن را تولید کنند [3]. بیش‌تر گشتاور راهاندازی از نزدیک جریان معمولی پره ایجاد شده در حالی که نوک آن بیش‌تر گشتاور تولید کننده نیرو را تولید می‌کند [20].

گشتاور راهاندازی توربین‌های بادی کوچک به دلیل اندازه روتور کوچک آن‌ها کوچک است که راهاندازی و دوران در سرعت‌های باد کم را دشوار می‌کند [2]. پارامترهای مرتبط با بهینه‌سازی هندسه پره‌ها مهم هستند، زیرا هنگامی که بهینه‌سازی شوند، پره‌های روتور کوچک‌تر در مقایسه با پره‌هایی که بهینه نشده و قطر بزرگ‌تری دارند، قدرت مشابهی را تولید می‌کنند. کارایی روتور تا حد زیادی به مشخصات پره [21] در افزایش بالابر برای تولید نیرو و گشتاور کافی بستگی دارد. همراه با بهینه‌سازی آیرودینامیکی، پره‌های سبک‌تر با اینرسی^{۱۲} چرخشی کم عملکرد بهتری را در سرعت‌های کاهش باد کم‌تر ارائه می‌دهند.

برای بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی با پره‌های متخلخل برای کاربردهای فراساحلی، تحقیقات زیر بررسی شده است. به عنوان بخش مقدماتی این پروژه، یک سری شبیه‌سازی بر روی چندین ایرفویل پره‌ای با استفاده از مدل جریان چندگانه-دوگانه برای طراحی توربین بادی محور عمودی برای آزمایش در تونل باد^{۱۳} در اعداد رینولدز^{۱۴} محدود 60000 تا 140000 انجام شده است. برای آزمایش مدل تونل باد، انتخاب چنین عدد رینولدز کم (ترتیب 10000-100000) را می‌توان از طریق روش مقیاس‌بندی شبیه‌سازی برای عدد فرود^{۱۵} و عدد رینولدز توجیه کرد [22]. گزارش شده است که این رویکرد برای آزمایش مدل توربین‌های واقعی در مقیاس بزرگ که در عدد رینولدز در 1000000 کار می‌کنند، مفید می‌باشد. هدف اول انتخاب یک ایرفویل مناسب از پروفیل‌های سری ناکا^{۱۶} 4 و 5 رقمی و سلیگ^{۱۷} است. هدف بعدی طراحی توربین با توجه به نسبت تصویر^{۱۸} و نسبت استحکام^{۱۹} با تغییر شعاع توربین^{۲۰} و طول وتر پره^{۲۱} می‌باشد.

امتداد محور گام مدل‌سازی کرد. هر بخش دارای شکل ایرفویل، طول وتر و زاویه اتصال است که نتیجه یک زاویه گام جمعی و یک پیچش محلی است. این آخرین ویژگی پره است، در حالی که زاویه گام به استراتژی کنترل کل سیستم^۱ انرژی بستگی دارد.

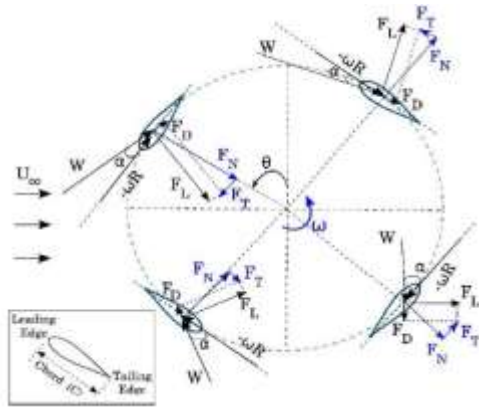
توربین‌های بادی کوچک واکنش راهاندازی خوبی به سرعت‌های کم باد داشته باشند تا حداکثر توان ممکن را تولید کنند [3]. گشتاور راهاندازی توربین‌های بادی کوچک نیز به دلیل اندازه روتور کوچک آن‌ها کوچک است که برای راهاندازی روتورها در سرعت باد کم کافی نیست [12]. برای رفع این مشکل، توربین‌های بادی کوچک دارای پره‌های روتور متعددی هستند تا گشتاور کم شروع را جبران کنند [12]. افزایش تعداد پره‌ها به شروع سریع روتورها کمک می‌کند و به توربین اجازه می‌دهد تا با سرعت باد بسیار کم‌تری کار کند. به توربین‌های بادی کوچکی که با سرعت کم باد برای افزایش تولید برق کار می‌کنند، اولویت زیادی داده شده است [13]. کار با سرعت‌های کم باد و آب از طریق بهینه‌سازی آیرودینامیکی پره‌های روتور که مهم‌ترین بخش یک توربین بادی است امکان‌پذیر شده است [14]. بهینه‌سازی آیرودینامیکی پره‌های روتور با بهینه‌سازی توزیع وتر و پیچش، تعداد پره‌ها، انتخاب شکل ایرفویل و نسبت سرعت نوک^۲ مرتبط است [15]. با بهینه‌سازی پره‌ها، ضرایب توان توربین‌های بادی نزدیک به حد بتز^۳ 59.2 درصد می‌رسد [16]. توربین‌های بادی توسعه‌یافته تاکنون دارای ضریب توانی بین 20 تا 45 درصد هستند [16]. توربین‌های بادی کوچک در مقایسه با توربین‌های بزرگ که عملکردی در حدود 45 درصد دارند، با راندمان 30 درصد یا بیش‌تر کار می‌کنند [16].

ایرفویل‌های رینولدز^۴ کم در محدوده زیر رینولدز 500000 عمل می‌کنند که در آن جریان در سطح بالایی ایرفویل عمدتاً آرام است. ایرفویل‌های درون این محدوده عدد رینولدز از حباب جداسازی آرام رنج می‌برند و مستعد جداسازی جریان آرام هستند که زمانی رخ می‌دهد که جریان جدا شده آرام دوباره به سطح نچسبد و در نتیجه عملکرد آیرودینامیکی از بین برود [17]. ایرفویل‌های رینولدز کم مناسب برای کاربردهای توربین بادی کوچک باید به گونه‌ای طراحی شوند که دارای درجه بالایی از تحمل در اجتناب از پیک‌های مکش پیش‌رو بالا و گرادیان فشار نامطلوب بالا^۵ باشد که منجر به جداسازی جریان می‌شود. ایرفویل‌های رینولدز کم به گونه‌ای طراحی شده‌اند که نازک‌تر از ایرفویل‌های سنتی که با اعداد رینولدز بالا کار می‌کنند [17]. ایرفویل‌های نازک برای کاربرد اعداد رینولدز کم انتخاب می‌شوند تا پیک مکش نزدیک لبه جلویی ایرفویل کاهش یابد [17]. گیگور^۶ و همکاران [18] در مورد استفاده از ایرفویل نازک که از سری SG60XX از خانواده ایرفویل نازک SG6040-SG6043 تشکیل شده است، برای کاربرد در پره‌های توربین بادی کوچک که مقادیر ضریب لیفت 1.40-1.65 را در محدوده رینولدز 100 هزار تا 500

12. Inertia
13. Wind Tunnel
14. Reynolds Number
15. Froude number
16. NACA
17. Selig
18. Aspect ratio (AR = H/D)
19. $\sigma = nC/2R$
20. Radius
21. Chord

1. System
2. TSR
3. Betz
4. Reynolds number
5. APG
6. Giguere
7. Selig
8. Rotor
9. Drag
10. CL
11. L/D

2- طراحی آیرودینامیکی با استفاده از نرم‌افزار Q-blade



شکل 3 نیروهای وارد بر پره‌های توربین بادی محور عمودی داریوس

ضریب بالابر¹⁰ و ضریب درگ¹¹ به صورت زیر داده می‌شود [24-25]:

$$C_L = \quad (1)$$

$$F_L / 0.5 \rho S U_{\infty}^2$$

$$C_D = \quad (2)$$

$$F_D / 0.5 \rho S U_{\infty}^2$$

که ρ چگالی هوا و S ناحیه جاروب شده پره است. مقادیر نیروی کارآمد نرمال¹² و ضریب نیروی مماسی¹³ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$= C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (3)$$

$$C_N = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (4)$$

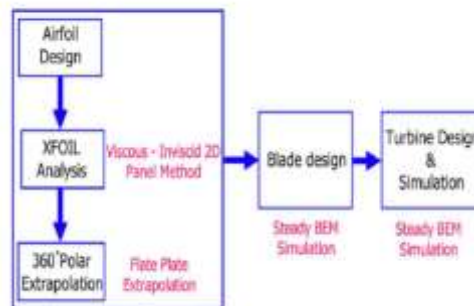
که در آن، زاویه حمله¹⁴ را می‌توان از زاویه¹¹، شعاع توربین¹¹، سرعت چرخشی¹²، سرعت نسبی¹³ و سرعت القایی محلی¹⁴ محاسبه کرد [9]:

$$\tan \alpha = \frac{U_{\infty} \sin \theta}{R\omega + U_{\infty} \cos \theta} \quad (5)$$

ویژگی‌های لیفت و درگ ایرفویل‌های مختلف آزمایش شده در این مطالعه با استفاده از الگوریتم ایکس‌فویل¹⁵ ادغام شده با کد منبع باز¹⁶ در اعداد وترهای مختلف رینولدز¹⁷ به دست آمده است. با این حال، محاسبه در زاویه حمله کوچکی که قبل و کمی فراتر از نقطه توقف قرار دارد حفظ شده است تا از تأثیر جدایی و عدم همگرایی جلوگیری شود. برای عملکرد صاف با مدل چندگانه-دوگانه، قطب‌های ضریب برآ و پسا به دست آمده از تجزیه و تحلیل ایکس‌فویل به زاویه حمله 360 درجه (شکل 4) با استفاده از روش برون‌یابی تعمیم داده شده‌اند [26].

از نظریه دیسک محرک دوگانه و روش لوله جریان چندگانه برای تجزیه و تحلیل عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی استفاده شد. ناحیه روتور به یک سری از سطوح فعال کننده پشت سر هم تقسیم می‌شود که هر کدام یک لوله جریان را قطع می‌کند. بنابراین روتور توربین بادی محور عمودی را می‌توان با دو سطح فعال کننده پشت سر هم در هر بخش روتور نشان داد. سطح اول نمایانگر ناحیه‌ای است که پره آن را جاروب کرده و برای نیمه رو به سمت باد که توسط پره‌ها جاروب شده است. این روش شامل برابر کردن تغییرات تکانه سیال و نیروی اعمال شده توسط جریان هوا بر روی پره، با استفاده از تئوری تکانه عنصر پره² است.

این روش شامل برابر کردن تغییرات تکانه سیال و نیروی اعمال شده توسط جریان هوا بر روی پره، با استفاده از تئوری تکانه عنصر پره است که سپس محاسبه گشتاور و توان تولید شده را ممکن می‌سازد. مزایای این مدل را می‌توان از طریق این واقعیت مشاهده کرد که اجرای نسبتاً ساده و همبستگی بهتری بین نتایج محاسبه شده و تجربی می‌دهد. با این حال، اشکال عمده این مدل، پیش‌بینی بیش از حد توان برای یک توربین با استحکام بالا است و به نظر می‌رسد یک مشکل همگرایی برای همان نوع توربین، به ویژه در سمت پایین دست و در نسبت سرعت نوک بالاتر وجود داشته باشد [23]. برای استفاده از روش لوله جریان چندگانه از نرم‌افزار Q-Blade استفاده می‌کنیم، این یک چارچوب متن باز برای طراحی و شبیه‌سازی آیرودینامیکی توربین‌های بادی محور عمودی است. شکل 2 ماژول‌های Q-Blade و انواع آنالیز⁴ را تشریح می‌کند.

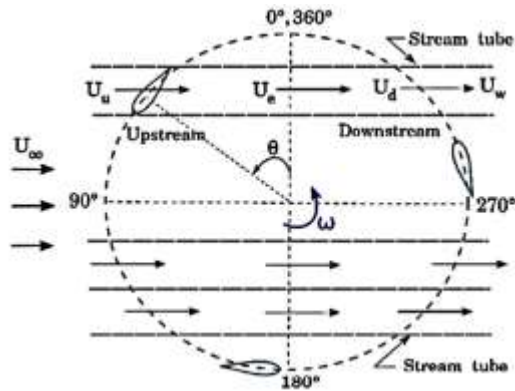


شکل 2 ماژول‌های Q-Blade و انواع آنالیز

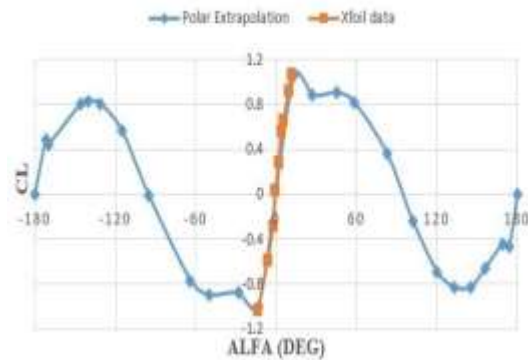
اولین مرحله برای این تحلیل، محاسبه نیروهای وارد بر پره‌های توربین بادی محور عمودی داریوس است، (شکل 3).

10. θ
11. R
12. ω
13. W
14. U_{∞}
15. XFOIL
16. XFRL5
17. Re_c

1. MST
2. BEM
3. Modules
4. Analyze
5. CL
6. CD
7. CN
8. CT
9. α



شکل 5 برون‌یابی قطبی به زاویه حمله 360 درجه



شکل 4 برون‌یابی قطبی به زاویه حمله 360 درجه

ضرایب تداخل بالا دست و پایین دست برای هر موقعیت ارتفاع بر اساس نیروهای وارد بر نیمه دایره‌ای مربوطه محاسبه می‌شود و در چرخش نیم دایره یکپارچه می‌شود. این عوامل با استفاده از تئوری عنصر پره و معادله تکانه بر روی هر لوله جریان با استفاده از اثر نیروی کارآمد نرمال و ضریب نیروی مماسی محاسبه می‌شوند [7]. ضریب گشتاور² در طول چرخه کامل چرخشی یکپارچه شده است. معادلات مورد استفاده در کار حاضر برای استخراج پارامترها و ضریب گشتاور را می‌توان یافت [8]. ضریب توان³ از ضریب گشتاور به دست آمده است:

$$C_p = C_Q \lambda \quad (10)$$

که در آن، نسبت سرعت نوک⁴ توربین توسط معادله 11 بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{R \omega}{U_\infty} \quad (11)$$

3- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی این کار، نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی و نرم‌افزار Q-Blade توسط بیانچینی⁵ و همکاران [27] برای NACA0021 با سه پره و سرعت باد 9 متر بر ثانیه مقایسه و اعتبارسنجی شد، نتایج به خوبی مطابقت داشتند، همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است. استفاده از این روش به انعطاف پذیری برای مطالعه طیف وسیعی از پارامترهای طراحی ایرفویل و توربین برای به دست آوردن یک طراحی آیرودینامیکی مناسب از توربین بادی محور عمودی با هزینه محاسباتی قابل توجهی کم‌تر اجازه می‌دهد. طرح به دست آمده را می‌توان از طریق تجزیه و تحلیل جامع دینامیک سیالات محاسباتی⁶ با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار داد.

گام بعدی این است که هندسه توربین بادی محور عمودی را برای هر یک از ایرفویل‌ها در مازول طراحی پره Q-Blade با استفاده از داده‌های قطبی برون‌یابی شده در هر عدد وتر رینولدز تعریف کنیم. طول وتر هر ایرفویل 0.09 متر با شعاع توربین 0.8 متر و ارتفاع توربین 0.9 متر تعیین شده است. پس از مرحله طراحی، شبیه‌سازی‌ها برای هر یک از ایرفویل‌ها انجام شده است. مدل لوله دو جریان چندگانه، توسط یک جفت دیسک¹ روتور محرک پشت سر هم مدل شده است (شکل 5)، یکی در بالا دست چرخش توربین (0-180 درجه) و دیگری در پایین دست چرخش توربین (180-360 درجه). هر یک از پره‌های توربین به تعداد عناصر گسسته تقسیم می‌شود و چرخه کامل چرخش هر عنصر به مراحل 5 درجه تقسیم می‌شود [7]. جریان از طریق پره‌های توربین به تعداد زیادی لوله جریان تقسیم می‌شود. سرعت‌های مختلف القایی در مکان‌های بالادست و پایین دست برای هر یک از لوله‌های جریان محاسبه می‌شود. اثر تلاطم نادیده گرفته می‌شود و جریان دو بعدی فرض می‌شود. همان‌طور که جریان از یک لوله جریان خاص عبور می‌کند، پره‌ها انرژی جنبشی سیال جاری را در مکان‌های بالادست و پایین دست استخراج می‌کنند و در نتیجه سرعت در هر دیسک روتور محرک هر لوله جریان کاهش می‌یابد. سرعت باد جریان آزاد، سرعت‌ها را در هر بخش با در نظر گرفتن عوامل تداخل در بالادست و آگهی در پایین دست مدل‌سازی می‌کند:

$$= a_u U_\infty \quad (6)$$

$$U_u$$

$$U_e = (2 a_u - 1) U_\infty \quad (7)$$

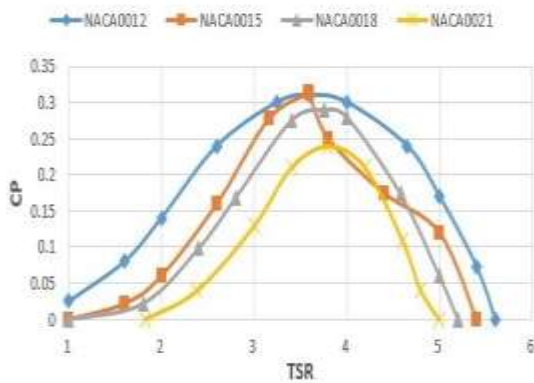
$$U_d = a_d (2 a_u - 1) U_\infty \quad (8)$$

$$U_w = (2 a_d - 1) (2 a_u - 1) U_\infty \quad (9)$$

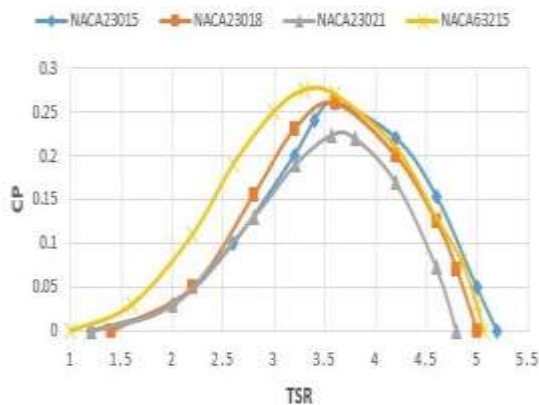
همان‌طور که جریان از یک لوله جریان خاص عبور می‌کند، پره‌ها انرژی جنبشی سیال جاری را در مکان‌های بالادست و پایین دست استخراج می‌کنند و در نتیجه سرعت در هر دیسک روتور محرک هر لوله جریان کاهش می‌یابد، (شکل 5).

5. Bianchini et al
6. CFD

1. Disc
2. C_Q
3. C_p
4. Tip speed Ratio (λ)

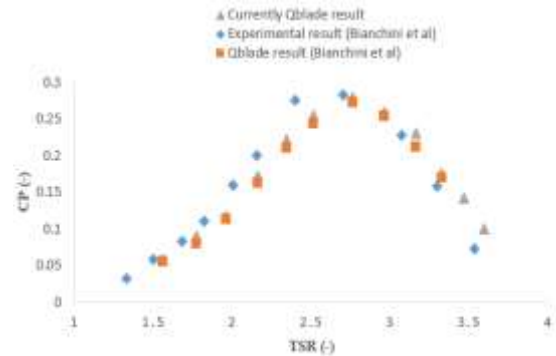


شکل 7 تغییرات ضریب توان ناکا سری 4 در عدد رینولدز 60000



شکل 8 تغییرات ضریب توان ناکا سری 5 در عدد رینولدز 60000

در عدد رینولدز 100000، روند تقریباً مشابهی از حداکثر ضریب توان برای ایرفویل‌های بهتر مشاهده می‌شود که در عدد رینولدز 60000 یافت می‌شود. مقادیر حداکثر ضریب توان به صورت 0.37، 0.37 و 0.36 برای NACA0015 در نسبت سرعت نوک 3.8، NACA0018 در نسبت سرعت نوک 3.8 و برای NACA0012 در نسبت سرعت نوک 3.8، (شکل 10). در این عدد رینولدز، مقادیر حداکثر ضریب توان برای NACA23015، NACA23018 و NACA63215 به ترتیب 0.34 در نسبت سرعت نوک 3.4، 0.34 در نسبت سرعت نوک 3.6 و 0.33 در نسبت سرعت نوک 3.6 به دست می‌آیند. پروفایل SeligS1046، حداکثر ضریب توان برابر 0.38 را در نسبت سرعت نوک 3.4 نشان داده است، در حالی که نزدیک‌ترین پروفایل SeligS1048، حداکثر ضریب توان برابر 0.36 را در نسبت سرعت نوک 3.8 نشان داده است (شکل 12). به طور مشابه، در شکل‌های 13، 14 و 15 تغییرات ضریب توان را در عدد رینولدز 140000 به ترتیب برای پروفایل‌های ناکا سری 4 و 5 و سلیگ نشان می‌دهد. در عدد رینولدز 140000، حداکثر ضریب توان برابر 0.40 در نسبت سرعت نوک 3.8 برای ایرفویل NACA0015 شده است. NACA0018 و NACA0012 مقدار مشابهی 0.39 در نسبت سرعت نوک 3.8 نشان داده‌اند، (شکل 13). در این عدد رینولدز، مقادیر حداکثر ضریب توان برای ایرفویل‌های



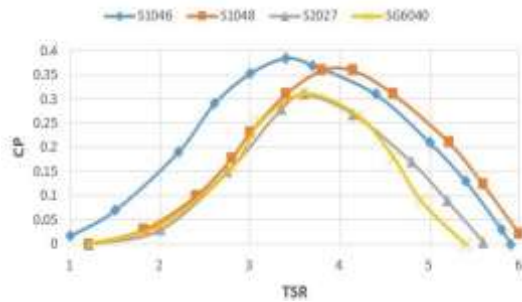
شکل 6 مطالعه اعتبارسنجی داده‌های Q-Blade

4- بحث و نتایج

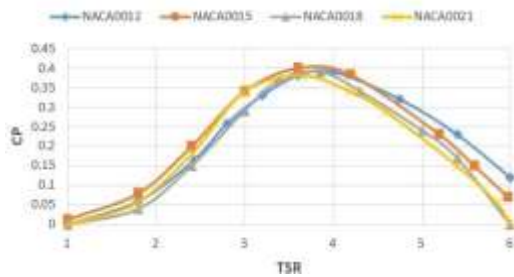
در پژوهش حاضر، برای یک توربین بادی محور عمودی داریوس سه پره، چندین ایرفویل از پروفایل‌های ناکا 4 و 5 رقمی و سلیگ با اعداد آکورد رینولدز 60000، 100000 و 140000 برای به دست آوردن یک مناسب آزمایش شده است. ویژگی‌های لیفت و درگ همه مدل‌های آزمایش شده تحت هر وتر عدد رینولدز با ابزار آیرودینامیک ایکس‌فویل به دست آمده و برای یک چرخه چرخشی کامل برون‌یابی شده است. علاوه بر این، پارامترهای طراحی مانند نسبت ابعاد و نسبت استحکام در اعداد آکورد رینولدز فوق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

4-1- انتخاب ایرفویل

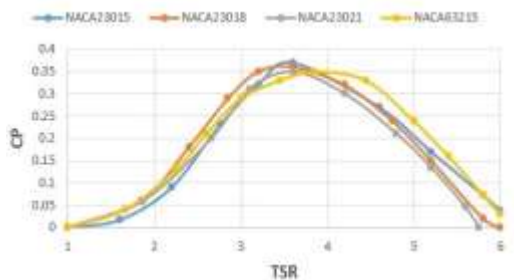
ایرفویل‌های ارائه شده در این پژوهش از یک سری مطالعات بر روی پروفایل‌های مختلف ناکا سری 4، سری 5 و سلیگ انتخاب شده‌اند. 4 ایرفویل برتر در هر دسته در پژوهش حاضر نشان داده شده است. تمام ایرفویل‌های آزمایش شده روی طول وتر 0.09 متر با شعاع توربین 0.8 متر و ارتفاع توربین 0.915 متر تنظیم شده‌اند. برای هر مورد، تجزیه و تحلیل در نسبت سرعت نوک صفر تا 6 با مرحله 0.2 انجام شده است. در عدد رینولدز 60000، برای ایرفویل‌های سری 4، با افزایش ضخامت پروفایل، کاهش در محدوده عملیاتی مشاهده می‌شود (شکل 7) و ضریب عملکرد اوج 0.32 برای NACA0015 در نسبت سرعت نوک 3.8 در میان ایرفویل‌های ناکا سری 4 آزمایش شده، مشاهده می‌شود. NACA0012، NACA0018 و NACA0021 به ترتیب دارای ماکزیمم ضریب توان 0.31 در نسبت سرعت نوک 3.6، 0.29 در نسبت سرعت نوک 3.8 و 0.24 در نسبت سرعت نوک 3.8 نشان داده‌اند. ناکا سری 5 برای توربین بادی محور عمودی چندان جالب به نظر نمی‌رسد. در میان ایرفویل‌های سری 5 ناکا، NACA63215 مقدار ماکزیمم ضریب عملکرد را در مقدار 0.28 و در نسبت سرعت نوک 3.4 نشان می‌دهد، (شکل 8). برای توربین بادی محور عمودی، در عدد رینولدز 60000، ایرفویل S1046 مقدار ماکزیمم ضریب عملکرد را در مقدار 0.33 و در نسبت سرعت نوک 3.4 نشان می‌دهد، در حالی که برای ایرفویل S1048 مقدار ماکزیمم ضریب عملکرد در 0.29 و در نسبت سرعت نوک 3.8 رخ می‌دهد، (شکل 9).



شکل 12 تغییرات ضریب توان پروفایل‌های سلیگ در عدد رینولدز 100000



شکل 13 تغییرات ضریب توان پروفایل‌های ناکا سری 4 در عدد رینولدز 140000

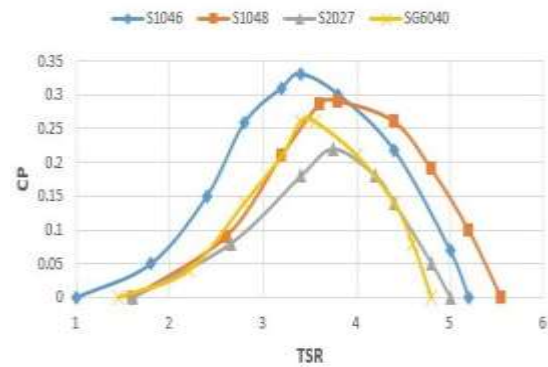


شکل 14 تغییرات ضریب توان برای پروفایل‌های ناکا سری 5 در عدد رینولدز 140000

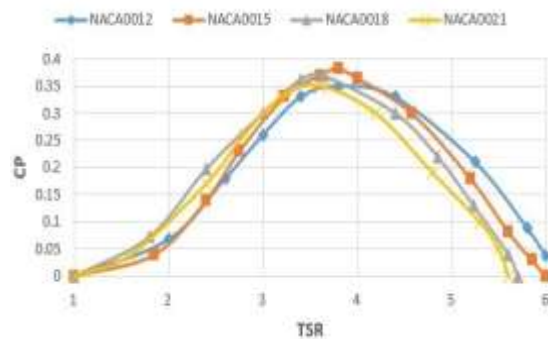
4-2- تجزیه و تحلیل نسبت ابعاد

نسبت ابعاد توربین به عنوان نسبت ارتفاع توربین به قطر توربین تعریف می‌شود [21]. در این مطالعه، طول وتر و ارتفاع توربین به صورت 0.09 متر و 0.915 متر ثابت در نظر گرفته شده است. ارتفاع توربین 0.915 متر، 1.215 متر، 1.575 متر، 1.815 متر و 2.115 متر تغییر کرده است تا به ترتیب نسبت ابعاد 0.61، 0.81، 1.05، 1.21، و 1.41 به دست آید. تمام شبیه‌سازی‌ها برای یک توربین بادی محور عمودی سه پره با استفاده از ایرفویل S1046 در عدد رینولدز 60000، 100000 و 140000 انجام شده است.

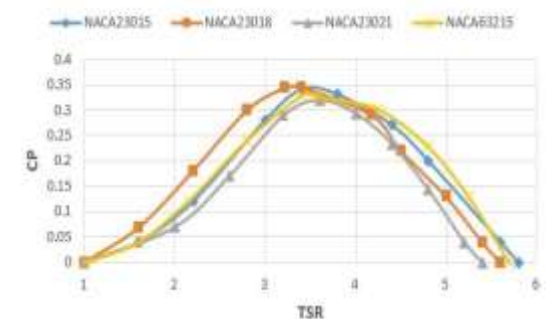
ناکا سری 5 مانند NACA23015، NACA23018، NACA23021 و NACA63215 به ترتیب 0.37، 0.36، 0.35 و 0.36 به دست می‌آید، (شکل 14).



شکل 9 تغییرات ضریب توان پروفایل‌های سلیگ در عدد رینولدز 60000



شکل 10 تغییرات ضریب توان ناکا سری 4 در عدد رینولدز 100000

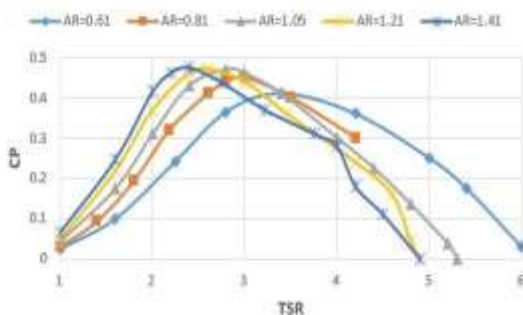


شکل 11 تغییرات ضریب توان ناکا سری 5 در عدد رینولدز 100000

در بین پروفایل‌های سلیگ، در عدد رینولدز 140000، حداکثر ضریب توان برابر 0.41 در نسبت سرعت نوک 3.6 برای S1046 در مقایسه با حداکثر ضریب توان برابر 0.39 در نسبت سرعت نوک 3.8 برای S1048 مشاهده می‌شود، (شکل 15). از این تحلیل مقایسه‌ای در اعداد مختلف رینولدز، ایرفویل S1046 برای پروژه مورد نظر مناسب است.

شکل 17 تاثیرات نسبت ابعاد در عدد رینولدز 100000 برای توربین بادی محور عمودی سه پره برای ایرفویل S1046

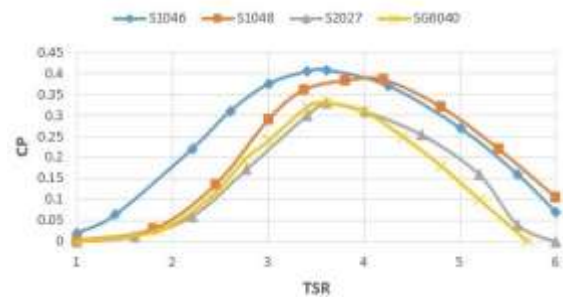
با افزایش بیش‌تر عدد رینولدز در عدد رینولدز 140000 (شکل 18)، عملکرد توربین بادی حتی بهتر می‌شود. با نسبت ابعاد 1.21، حداکثر ضریب توان برابر 0.48 در نسبت سرعت نوک 2.6 به دست می‌آید، در مقابل، مقادیر حداکثر ضریب توان به دست آمده با نسبت ابعاد 0.61، 0.81، 1.05، 1.21، 1.41 به ترتیب برابر با 0.45 در نسبت سرعت نوک 3، 0.47 در نسبت سرعت نوک 2.4 و 0.48 در نسبت سرعت نوک 2.4 می‌باشد. اگر چه، تغییر عملکرد توربین با توجه به تغییر در نسبت ابعاد در اعداد وتر رینولدز مختلف قابل توجه است، با این حال، مشاهده شده که طراحی با نسبت ابعاد 1 در اعداد وتر رینولدز پایین‌تر و همچنین بالاتر مناسب‌تر است. بنابراین، نسبت ابعاد 1 برای ادامه تجزیه و تحلیل انتخاب شد.



شکل 18 تاثیرات نسبت ابعاد در عدد رینولدز 140000 برای توربین بادی محور عمودی سه پره برای ایرفویل S1046

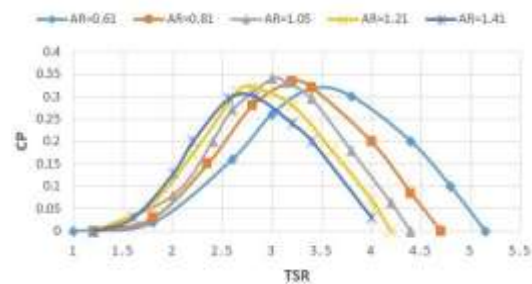
3-4- تجزیه و تحلیل نسبت استحکام

این یکی از مهم‌ترین پارامترها برای طراحی توربین بادی محور عمودی است. برای انتخاب طرح بهتر برای پروژ، طول وتر به صورت 0.055 متر، 0.09 متر، 0.12 متر، 0.155 متر، 0.19 متر و 0.22 متر تغییر کرده است. با ارتفاع توربین در 0.915 متر ثابت نگه داشته شده است و نسبت ابعاد 1 برای تمام طرح‌های تست استحکام حفظ می‌شود. تغییر در طول وتر به ترتیب منجر به طرح‌هایی با نسبت استحکام 0.11، 0.18، 0.24، 0.31، 0.38 و 0.44 می‌شود. تمامی طرح‌ها با پروفایل S1046 تست شده‌اند. شکل 21 و 22 تغییرات ضرایب توان را در عدد رینولدز 60000، 100000 و 140000 نشان می‌دهد. مشاهده شده است که با نسبت استحکام 0.17، توربین بادی محور عمودی عملکرد بهتری را در مقایسه با سایر طرح‌های آزمایش شده نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، عملکرد توربین نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با نسبت ابعاد 0.18 حداکثر ضریب توان برابر 0.40 در نسبت سرعت نوک 3.6، 0.47 در نسبت سرعت نوک 3.4، 0.49 در نسبت سرعت نوک 3.4 به ترتیب در اعداد رینولدز 60000، 100000 و 140000 به دست می‌آید. بنابراین، پس از یک سری شبیه‌سازی با اعداد وتر رینولدز مختلف، یک توربین بادی محور عمودی طراحی شده با ایرفویل S1046، در نسبت ابعاد 1 و نسبت استحکام 0.17 برای آزمایش‌های تونل باد مناسب‌تر است.



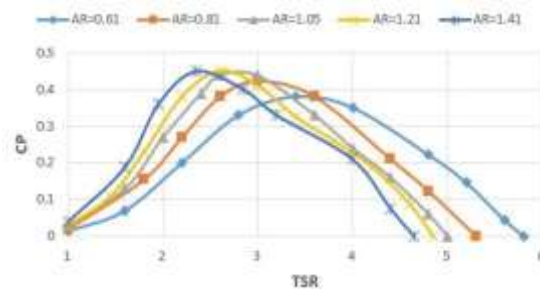
شکل 15 تغییرات ضریب توان پروفایل‌های سلیگ در عدد رینولدز 140000

مشاهده شد که در تعداد رینولدز کم (شکل 16)، در نسبت ابعادهای کوچک‌تر (>1) دارای حداکثر ضریب توان بالاتری نسبت به نسبت ابعادهای بالاتر (<1) هستند. در عدد رینولدز 60000، حداکثر ضریب توان برابر 0.34 با نسبت ابعاد 0.81 در نسبت سرعت نوک 3.2 به دست آمده است، در حالی که، حداکثر ضریب توان برابر 0.32 در نسبت سرعت نوک 3.6، حداکثر ضریب توان برابر 0.33 در نسبت سرعت نوک 3، حداکثر ضریب توان برابر 0.32 در نسبت سرعت نوک 2.8 و حداکثر ضریب توان برابر 0.30 در نسبت سرعت نوک 2.8 به ترتیب برای نسبت ابعادهای 0.61، 1.05، 1.21 و 1.41 به دست می‌آید.



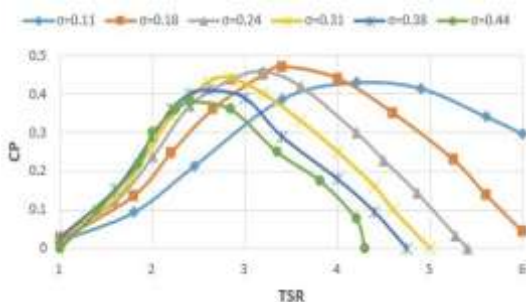
شکل 16 تاثیرات نسبت ابعاد در عدد رینولدز 60000 برای توربین بادی محور عمودی سه پره برای ایرفویل S1046

با افزایش عدد رینولدز به 100000 (شکل 17)، عملکرد با نسبت ابعادهای بالاتر افزایش یافته است. حداکثر ضریب توان برابر 0.45 در نسبت سرعت نوک 2.6 با نسبت ابعاد 1.21 در مقایسه با 0.44 در نسبت سرعت نوک 2.8، 0.44 در نسبت سرعت نوک 2.4، 0.43 در نسبت سرعت نوک 3 و 0.39 در نسبت سرعت نوک 3.4 به ترتیب در نسبت ابعاد 0.61، 0.81، 1.05، 1.21 و 1.41 بدست می‌آید.

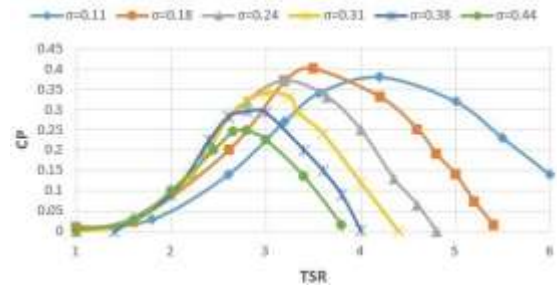
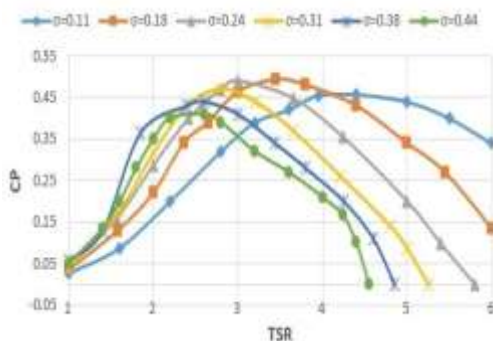


این مقاله تحلیلی را برای طراحی یک توربین بادی محور عمودی سه پره برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی آن از نظر ضریب توان ارائه می‌کند. رویکرد لوله جریان چندگانه دوگانه با در نظر گرفتن تصحیح تلفات نوک، یک روش موثر پیش‌بینی عملکرد دقت مرتبه پایین‌تر برای تجزیه و تحلیل طیف گسترده‌ای از طراحی‌های توربین به شیوه‌ای مقایسه‌ای با هزینه محاسباتی قابل‌توجهی کم‌تر است. این مطالعه پروفایل SeligS1046 را برای آزمایش‌های تونل باد در اعداد وتر هدف رینولدز در محدوده 60000، 100000 (شکل 21) و 140000 (شکل 22) مناسب نشان داد. نسبت ابعاد در اعداد مختلف رینولدز، نسبت تصویر 1.0 در اعداد رینولدز کم‌تر و همچنین بالاتر در محدوده خوبی از نسبت سرعت نوک سازگارتر است. نسبت استحکام 0.17 برای افزایش عملکرد توربین در محدوده آزمایش شده مناسب است. در ادامه این تحلیل، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تونل باد با اعداد وتر رینولدز مختلف در محدوده 60000 تا 140000 انجام خواهد شد.

آزمایش‌های تونل باد با تجسم جریان و شبیه‌سازی‌های پیچیده دینامیک سیالات محاسباتی از طراحی توسعه یافته توربین بادی محور عمودی دنبال می‌شود. کنترل گام فعال پره‌های توربین بادی محور عمودی از طریق مکانیزم^۲ کنترل نیز در این پروژه بررسی خواهد شد. شایان ذکر است که هنگام طراحی یک نمونه اولیه بزرگ، نسبت تصویرهای بالا به دلیل بازوهای کوتاه‌تر، پایداری ساختاری بیشتری را برای خروجی معین به ارمغان می‌آورد. همچنین فضای مورد نیاز را به حداقل می‌رساند. بنابراین، جدا از نسبت تصویر 1، نسبت ابعادهای بالاتر نیز در آزمایش‌های تونل باد با کوتاه کردن طول بازوی توربین در نظر گرفته می‌شوند.



شکل 21 تاثیرات نسبت استحکام در عدد رینولدز 100000 برای توربین بادی محور عمودی



شکل 19 تاثیرات نسبت استحکام در عدد رینولدز 60000 برای توربین بادی محور عمودی

4-4- پره متخلخل

آلومینیوم^۱ و آلیاژهای آن به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شود. این آلیاژها به دلیل دانسیته پایین، هدایت حرارتی بالا و خواص الکترومغناطیس، در صنایع فضایی، قطعات هواپیما و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارند [14]. ورق آلومینیومی نوع خاصی از ورق می‌باشد که از آلیاژ سری یک، با ویژگی‌های فلز آلومینیوم تولید و در دسته‌های ورق فلزی سبک قرار می‌گیرد. برای ساخت پره متخلخل از ورق آلومینیوم امباس، شکل 20 که به صورت خلل و فرج به ضخامت 3 میلی‌متر استفاده می‌گردد و پره‌ها دارای پیچش نبوده و از نوع راست پره می‌باشند.



شکل 20 ورق متخلخل

برای ساخت پره‌ها از ایرفویل S1046 که نسبت به سایر ایرفویل‌های بررسی شده از لحاظ آیرودینامیکی شرایط مناسب و ایده‌آلی داشت، استفاده گردید. و با پرچ و پیچ خودرو اتصال یافته و با استفاده از ساعت اندیکاتور، لقی و فرورفتگی پره‌های متخلخل کنترل شده تا برآمدگی و فرورفتگی در پره‌ها ایجاد نگردد و کنترل پره‌ها دقیق بوده تا خطایی در محاسبات و ساخت صورت نگیرد. در مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های متخلخل دوران بیشتری نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم دارد [2]. همچنین در مطالعه‌های دیگر توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های متخلخل نیاز به توان [3] و گشتاور راه‌اندازی [20] کم‌تری نسبت به توربین بادی محور مستقیم در شرایط برابر برای خود راه‌اندازی دارد.

5- نتیجه‌گیری

- [19] P. Giguere, M. S. Selig, Low Reynolds number airfoils for small horizontal axis wind turbines, *Wind Engineering*, Vol. 21, pp. 367-380, 1997.
- [20] H. Seifi, S. Kouravand, M. S. Davary, S. Mohammadzadeh, Experimental study of self-starting torque required to operate darriues the vertical axis wind turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 9, No. 2, pp. 9-19, 2022.
- [21] H. Seifi, S. Kouravand, M. Seifi Davari, S. Mohammadzadeh, Numerical and Experimental study of the effect of increasing aspect ratio of self-starting force to vertical axis wind turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-14, 2023.
- [22] P. Bachant, M. Wosnik, Effects of Reynolds Number on the Energy Conversion and Near-Wake Dynamics of a High Solidity Vertical-Axis Cross-Flow Turbine, *Energies*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-18, 2016.
- [23] M. A. Dabachi, A. Rahmouni, Q. Bouksour, Design and aerodynamic performance of new floating H-darriues vertical Axis wind turbines, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 30, pp. 899-904, 2020.
- [24] H. Seifi, M. Seify Davari, Optimization of E387 Airfoil Used in Wind Turbine Blades for Maximizing its Lift to Drag Coefficients Ratio, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 96-101, 2020.
- [25] H. Seifi, S. Kouravand, M. Seifi Davary, Numerical and experimental study of NACA airfoil in low Reynolds numbers for use of Darriues vertical axis micro-wind turbine. *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 149-163, 2023.
- [26] H. Seifi Davari, S. Kouravand, M. Seify Davari, Z. Kamalnejad, Numerical investigation and aerodynamic simulation of Darriues H-rotor wind turbine at low Reynolds numbers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 45, No. 3, pp. 6813-6833, 2023.
- [27] A. Bianchini, D. Marten, A. Tonini, F. Balduzzi, C. N. Nayeri, G. Ferrara, C. O. Paschereit, Implementation of the virtual camber transformation into the open source software Q-Blade: validation and assessment, *Energy Procedia*, Vol. 148, pp. 210-217, 2018.
- شکل 22 تاثیرات نسبت استحکام در عدد رینولدز 140000 برای توربین بادی محور عمودی
- 6- مراجع
- [1] J. Chen, L. Chen, H. Xu, H. Yang, C. Ye, D. Liu, Performance Improvement of a Vertical Axis Wind Turbine by Comprehensive Assessment of an Airfoil Family, *Energy*, Vol. 114, pp. 318-331, 2016.
- [2] H. Seifi Davary, S. Kouravand, I. Khatami, Experimental Study of Porous Blade Effect on the Rotation of Darriues Vertical Axis Wind Turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 181-191, 2020.
- [3] H. Seifi Davari, S. Kouravand, Improving the Performance Self-Starting of the Vertical Axis Wind Turbine Using Porous Blade, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp.1199-1209, 2020.
- [4] M. Islam, D. S. K. Ting, A. Fartaj, Aerodynamic Models for Darriues-type Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 4, pp. 1087-1109, 2008.
- [5] G. J. M. Darriues, Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current, *US Patent No.* 1835081, 1931.
- [6] M. M. A. Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil and Z. Hussain, Vertical Axis Wind Turbine – A Review of Various Configurations and Design Techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp.1926-1939, 2012.
- [7] D. Marten, J. Wendler, G. Pechlivanoglou, C. N. Nayeri, C. O. Paschereit, Development and Application of a Simulation Tool for Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013*, June 3-7, San Antonio, Texas, USA, 2013.
- [8] I. Paraschivoiu, Double-Multiple Stream Tube Model for Studying Vertical-Axis Wind Turbines, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, pp. 370-377, 1988.
- [9] H. Beri, Y. Yao, Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine, *Energy and Power Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 262-270, 2011.
- [10] A. M. Biadgo, A. Simonovic, D. Komarov, S. Stupar, Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine, *FME Transactions*, Vol. 41, pp. 49-58, 2013.
- [11] K. Wang, M. O. L. Hansen, T. Moan, Model Improvements for Evaluating the Effect of Tower Tilting on the Aerodynamics of a Vertical Axis Wind Turbine, *Wind Energy*, Vol. 18, pp. 91-110, 2015.
- [12] S. Kouravand, B. M. Imani, A. M. Kermani, Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 65-73, 2016.
- [13] R. Shahbazi, S. Kouravand, R. Hassan-Beygi, Analysis of wind turbine usage in greenhouses: wind resource assessment, distributed generation of electricity and environmental protection, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-21, 2019.
- [14] H. Seifi, M. Seifi Davari, Hydrofoil of Darriues H-Rotor Vertical Axis Water Micro Turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 113-124, 2021.
- [15] H. Seifi, M. Seify Davari, Aerodynamic Analysis and Numerical Simulation of Naca0012 Airfoils Wind Turbine Using Vortex Plates Numerical Method, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 20-27, 2020.
- [16] M. Shahmari, P. Zarafshan, S. Kouravand, M. Khashehchi, Design and analysis of a combined savonius-darriues wind turbine for irrigation application, *Journal of Renewable Energy and Environment*, Vol. 7, No. 3, pp. 80-86, 2020.
- [17] J. Elizondo, J. Martinez, O. Probst, Experimental study of a small wind turbine for low-wind and medium-wind regimes, *International Journal of Energy Research*, Vol. 33, pp. 309-326, 2009.
- [18] P. Giguere, M. S. Selig, New airfoils for small horizontal axis wind turbines, *Wind Engineering*, Vol. 120, No. 111, 1998.