



بهینه سازی ایرفویل E387 به کار رفته در پره توربین بادی محور افقی به منظور افزایش نسبت ضریب برآ به پسا

حسین سیفی^{۱*}، محسن سیفی داوری^۲

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

۲- کارشناس، مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور مرکز اردبیل، اردبیل

*چابهار، ۹۹۷۱۷۵۶۴۹۹، hsefidavary@gmail.com

چکیده

از راه های افزایش توان تولیدی توربین بادی، استفاده از ایرفویل های با نسبت ضریب برآ به پسا بالا در پره های توربین بادی می باشد. در ایرفویل ها مقدار ضریب برآ و پسا علاوه بر وابستگی به زاویه حمله و سرعت جریان باد عبوری از طرف ایرفویل به هندسه و شکل ایرفویل نیز بستگی دارد. در این تحقیق پس از معرفی مفاهیم مهم در توربین های بادی، ایرفویل E387 انتخاب و با تغییر و بهبود هندسه ایرفویل مورد نظر، ایرفویل جدیدی طراحی شد. در ایرفویل طراحی شده، نسبت ضریب برآ به پسا به مقدار ۱۴/۲۱ درصد در مقایسه با مقدار همین نسبت در ایرفویل اولیه افزایش پیدا کرده است و بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برای ایرفویل اولیه در زاویه ۲/۵ درجه برابر ۱۲۴ و برای ایرفویل جدید طراحی شده این مقدار در زاویه ۴ درجه برابر با ۱۴۲ بوده و در انجام محاسبات و طراحی صورت گرفته در این تحقیق از نرم افزار Q-Blade که با استفاده از مدل های مومنتم و الگوریتم صحیح، شبیه سازی را انجام و پارامترهای مورد نیاز طراحی را با مدل CMDMS تغییر می دهد که برای این کار از یک مدل مومنتم دو مرحله ای برای شبیه سازی آیرودینامیک توربین بادی استفاده می کند، استفاده شده است.

کلیدواژگان: توان، ایرفویل E387، توربین بادی، نسبت ضریب برآ به ضریب پسا، Q-Blade

Optimization of E387 Airfoil Used in Wind Turbine Blades for Maximizing its Lift to Drag Coefficients Ratio

Hossein Seifi^{1*}, Mohsen Seify Davari²

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

2- Civil Engineering, University of Payam Nur, Ardabil, Iran

* P.O.B. 9971756499 Chabahar, Iran, hsefidavary@gmail.com

Received: 11 May 2019 Accepted: 8 September 2019

Abstract

One way to increase wind turbine production capacity is to use airfoils with a high coefficient of friction coefficient in wind turbine blades. In airfoils, the coefficient of up and down coefficient depends on the geometry and shape of the airfoil as well as the dependence on the angle of attack and the velocity of wind flow passing through the airfoil. In this study, after introducing important concepts in wind turbines, the E387 airfoil was selected and a new airfoil was designed by modifying and improving the desired airfoil geometry. In the designed airfoil, the ratio of the coefficient of the coefficient to the coefficient of increase was 14.21% compared to the value of the coefficient of initial coefficient, and the highest coefficient of coefficient of coefficient of coefficient for the initial coefficient was 124 and 2.5 °. Designed for the new Airfoil, this value is 142 degrees at 4 °, and in the computation and design of the Q-Blade software, which performs simulations using the momentum and correct algorithm models. Modifies the design parameters with the CMDMS model, which uses a two-stage momentum model for aerodynamic simulation of the torque. Inflation uses, used.

Keywords: power, E387 airfoil, cl/cd, Q-Blade, Wind turbine.



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 دارا است [۲]. چرا که انرژی بادی فراوان، تجدید پذیر، 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 می‌باشد [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]. فولگسنگ و تامسن، بنینی و توفالو و همچنین هو و راثو در مورد بهینه سازی ویژگی توربین‌های بادی نظیر وتر، توپی، تعداد پرها و سرعت روتور تحقیق نموده‌اند [۵، ۶، ۷].

سان، لی، گائو، هوانگ و گراسو تحقیقاتی را بر روی ایرفویل با استفاده از برنامه‌های آنالیز ایرفویل‌ها و تئوری المان مومنوم انجام داده‌اند [۸، ۹، ۱۰]. ریبیرو و همکاران در مقاله خود بهینه سازی ایرفویل را به کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام دادند [۱۱].

جوارشکیان و همکاران در در تحقیق خود به بهینه‌سازی مدل پره توربین باد با شبکه‌های عصبی و ژنتیک پرداختند که در برابر استال ویژگی‌های بهتری نسبت به مقطع پره اولیه داشت [۱۲].

یکی از روش‌های بهینه سازی توربین بادی محور افقی، بهینه سازی پره توربین بادی محور افقی می‌باشد که با افزایش نسبت ضریب برآ به پسا می‌توان عملکرد تیغه روتور را بهینه سازی و در نهایت توان تولیدی توربین بادی را افزایش داد.

در این مقاله ابتدا مفاهیم مرتبط با توربین بادی معرفی و سپس با بررسی ایرفویل E387 در ساخت پره توربین بادی محور افقی، هندسه جدیدی از ایرفویل ذکر شده ارائه می‌شود که عملکرد بهتری نسبت به ایرفویل اولیه دارد و تمامی محاسبات انجام شده در رابطه با ایرفویل‌ها با نرم افزار Q-Blade صورت گرفته و جهت بررسی صحت داده‌های بدست آمده از نرم افزار مورد استفاده، یک نمونه ایرفویل که مشخصات آزمایشگاهی آن در دسترس بوده است، در نرم افزار ذکر شده شبیه سازی و نتایج بدست آمده توسط نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

۲- معرفی مفاهیم مرتبط با توربین بادی محور افقی

۲-۱- توربین باد و تولید توان

توربین بادی وسیله‌ای است که از آن جهت بهره برداری از انرژی باد استفاده می‌گردد. جریان باد با عبور از میان پره‌های توربین بادی محور افقی بخشی از انرژی جنبشی خود را به انرژی روتور توربین تبدیل می‌کند و این انرژی تولید شده جهت چرخش ژنراتور و تولید برق و یا به طور مستقیم جهت تامین نیروی لازم به منظور پمپاژ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به منظور محاسبه توان توربین، انرژی قابل استحصال در واحد زمان از باد، مطابق فرمول زیر می‌توان استفاده کرد [۱۳].

$$p = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی هوای محیط، V سرعت باد در هنگام برخورد با توربین باد و A مساحت جارو شده توسط توربین در هنگام چرخش می‌باشد که جهت افزایش توان توربین باد می‌توان قطر توربین را افزایش داد. باد با عبور از اطراف تیغه‌های توربین باد، دو ناحیه کم فشار و پرفشار در اطراف تیغه ایجاد می‌کند. هوا در قسمت پرفشار با اعمال نیرو به تیغه، تیغه را به سمت ناحیه کم فشار هوا حرکت می‌دهد. نیرویی که به تیغه وارد می‌گردد و باعث حرکت تیغه در جهت عمود بر جریان باد می‌شود، با نام نیروی برآ یا لیفت شناخته می‌شود. نیروی برآ در ایرفویل به طول L به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۳].

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho AV^2 L \quad (2)$$

که در آن C_L ضریب برآ نام دارد.

به دلیل وجود گرادیان فشار در عقب و جلو تیغه و همچنین به دلیل به وجود آمدن در نزدیکی سطح دیواره تیغه، نیروی دیگری با نام نیروی درگ به وجود می‌آید که موازی و در جهت مخالف جریان هوا می‌باشد. این نیرو به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۳].

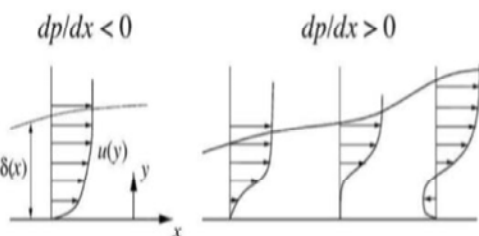
$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho AV^2 L \quad (3)$$

که در آن C_D ضریب پسا نام دارد.

در فرمول ۲ و ۳، ضریب برآ و ضریب پسا از مشخصه‌های ایرفویل هستند و با هندسه ایرفویل در ارتباط می‌باشند. به طور کلی ایرفویل‌ها به گونه‌ای طراحی می‌گردند که در آن‌ها نسبت ضریب برآ به ضریب پسا، به حداکثر مقدار ممکن افزایش یابد.

۲-۲- جدایش جریان در ایرفویل

در نزدیکی سطح ایرفویل به دلیل وجود شرط عدم لغزش، بین هوا و سطح ایرفویل ایجاد می‌شود. گرادیان فشار در داخل لایه مرزی بر روی ایرفویل از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورتی که گرادیان فشار در طول ایرفویل از ابتدا تا انتهای ایرفویل منفی باشد، جدایش جریان ایجاد نخواهد شد. اما چنانچه گرادیان فشار در طول ایرفویل منفی نباشد، تغییر جهت سرعت هوا در نزدیکی دیواره ایرفویل رخ دهد، نیروی برآ به شدت کاهش یافته و ایرفویل دچار استال خواهد شد [۱۳].



شکل ۱. گرادیان فشار

۲-۳- ضریب نیروی برآ

ضریب نیروی برآ تعیین کننده مقدار نیروی برآ می‌باشد که به یک ایرفویل وارد می‌گردد. علاوه بر هندسه ایرفویل، زاویه حمله و عدد رینولدز جریان بر مقدار ضریب برآ، تاثیرگذار می‌باشند. به طور کلی جریان‌های آشفته بر روی

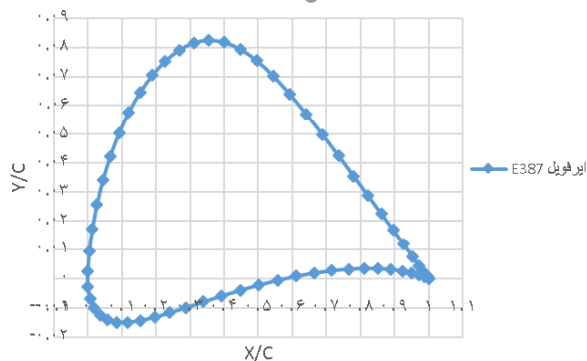


تفکیک می‌شود. مدل قسمت محلی جریان هوا از نقشه برداری منسجم برای توصیف ایرفویل همانند یک دایره استفاده می‌کند. با این روش سریعتر شدن محاسبات با استفاده از تبدیل فوریه امکان پذیر می‌شود. برای برخی پروفیل های متقارن NACA بخاطر اعداد رینولدز کم خلا داده تجربی در ناحیه پیش استال وجود دارد.

برای مقایسه حداقل کیفیت مقاطع ایرفویل متفاوت و طرح‌های توربین، بهتر است از یک ابزار منحصر به فرد استفاده شود که این ابزار باید به زمان پردازش کوتاهی داشته باشد به همین دلیل در نرم افزار Q-blade از ابزار X-Foil Direct Analysis انتخاب شد.

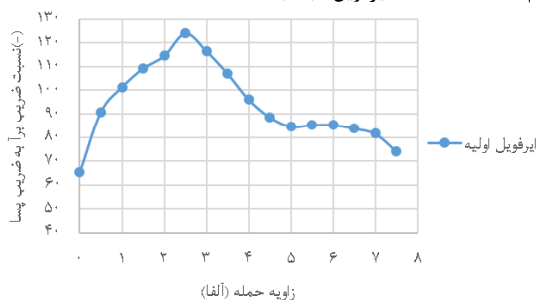
۴- بهبود هندسه ایرفویل در توربین بادی محور افقی

هدف از بهینه سازی هندسه ایرفویل در توربین باد محور افقی، افزایش مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا به کار رفته در پره توربین بادی محور افقی می‌باشد. با بررسی ایرفویل E387 در زاویه حمله صفر تا هشت درجه و ماکزیمم نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در عدد رینولدز 10^6 مشخص شد.



شکل ۳ ایرفویل E387

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا مربوط به زاویه حمله ۲/۵ درجه بوده و مقدار آن برابر با ۱۲۴ می‌باشد. لازم به ذکر است که بهینه سازی هندسه ایرفویل E387 به گونه‌ای انجام شده که ضخامت ایرفویل ثابت بماند.



شکل ۴ تغییرات نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برحسب زاویه حمله

ضریب برآ برای ایرفویل مورد بررسی (شکل ۵) در زاویه حمله ۷/۵ درجه بیشترین مقدار خود را دارد و این مقدار برابر با ۱/۱۸ می‌باشد. در شکل ۶ تغییرات ضریب پسا ایرفویل E387 نشان داده شده است. بیشترین مقدار ضریب پسا در بازه حمله مورد بررسی شده به زاویه حمله ۱۵ درجه بوده که مقدار ضریب پسا در این زاویه برابر ۰/۲۶ می‌باشد.

ایرفویل دیرتر دچار جدایش جریان و در نتیجه بروز استال در ایرفویل می‌شوند. لذا عدد رینولدز تا هنگامی که حالت جریان از آرام به آشفتگی تغییر کند، حائز اهمیت می‌باشد. در ایرفویل‌ها، با افزایش زاویه حمله از صفر درجه، مقدار ضریب برآ به طور پیوسته تا زمانی که زاویه حمله به حالت بحرانی رسیده و جدایش جریان رخ دهد، افزایش می‌یابد و در این حالت ایرفویل دچار استال خواهد شد [۱۳].

۳- مدل سازی و طراحی آیرودینامیکی ایرفویل

در این بخش به مدل سازی ایرفویل E387 با استفاده از معادلات بی‌زیر و طراحی آیرودینامیکی ایرفویل با استفاده از نرم افزار Q-Blade اشاره می‌شود.

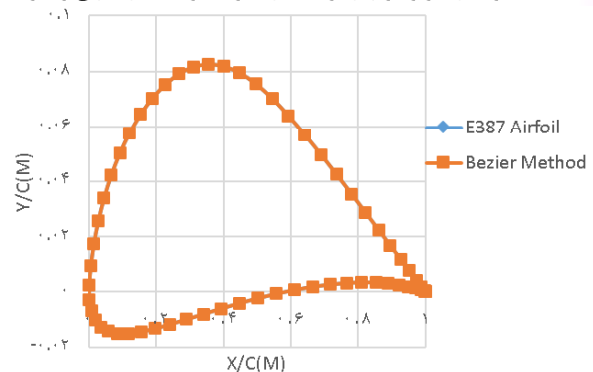
۱-۲- مدل سازی ایرفویل

برای مدل سازی ایرفویل از معادلات بی‌زیر استفاده شد که با داشتن نقاط ابتدایی، انتهایی و یک نقطه به عنوان نقطه کنترلی می‌توان ایرفویل مورد نظر را از پانل‌های درجه دوم مدل سازی نمود. در این حل برای رسیدن به بهترین نقطه کنترلی ذکر شده از روش کمترین مربعات استفاده شد که معادلات بی‌زیر به صورت فرمول ۱ بیان می‌گردد:

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)t P_1 + t^2 P_2 \quad (1)$$

که t پارامتر بی‌زیر بوده که بین صفر تا یک قرار دارد و P_0 نقطه کنترلی و P_1 و P_2 نقاط ابتدایی و انتهایی می‌باشد. در روش پانل مرتبه بالا، مدل سازی نیروی لیفت و ایرفویل با یک تکین انجام و جریان پتانسیلی بوده تا حجم محاسبات کاهش یابد.

برای اطمینان از صحت مدل سازی بی‌زیر ایرفویل، نتایج آن را با ایرفویل E387 بدست آمده از نرم افزار Q-Blade مقایسه کرده (شکل ۲) که نتایج بدست آمده از مدل بی‌زیر ایرفویل برای مدل سازی شرایط قابل قبولی را دارد.

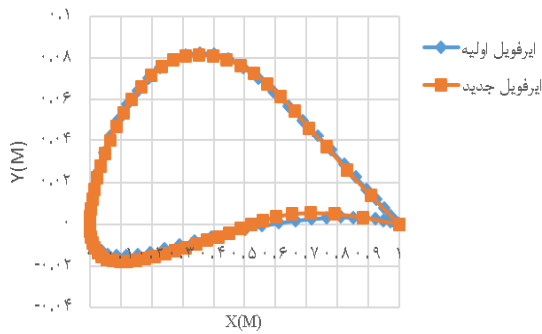


شکل ۲ مقایسه مدل بی‌زیر با ایرفویل E387

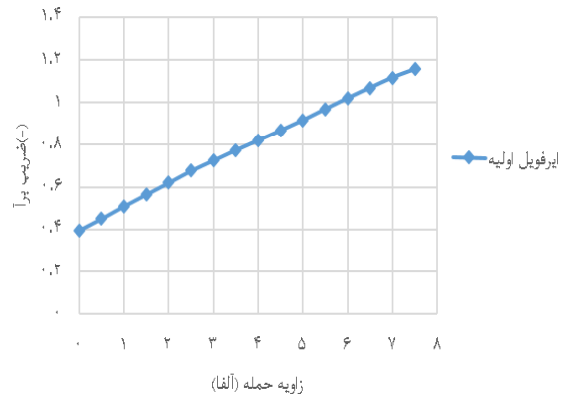
۲-۲- طراحی آیرودینامیکی با استفاده از نرم افزار Q-blade

برای انجام روند شبیه سازی و انتخاب ایرفویل از نرم افزار Q-blade v0.9 استفاده شد. نرم افزار ذکر شده نرم افزاری است که برای محاسبات توربین‌های بادی استفاده می‌شود که با استفاده از سرعت می‌توان ایرفویل مناسب را طراحی و عملکرد قطعی آن را در زوایای ۳۶۰ درجه بررسی کرد و در طراحی روتورهای توربین بادی و شبیه‌سازی آن‌ها مورد استفاده قرار داد. این نرم افزار با استفاده از مدل‌های مونتیم و الگوریتم صحیح، شبیه سازی را انجام و پارامترهای مورد نیاز طراحی با مدل CMDMS تغییر می‌پذیرد که از یک مدل مونتیم دو مرحله‌ای برای شبیه سازی آیرودینامیک توربین بادی محور عمودی استفاده می‌کند. جریان هوا به یک قسمت کلی و یک قسمت محلی

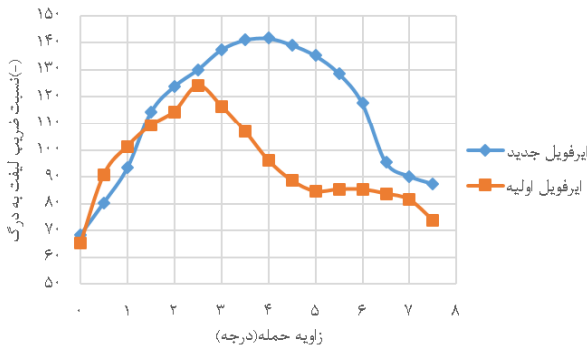




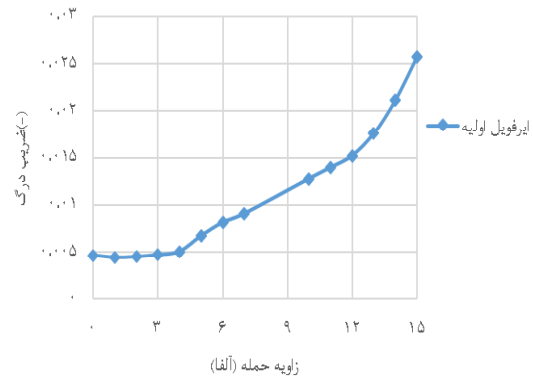
شکل ۸ مقایسه تغییرات هندسی در ایرفویل اولیه با ایرفویل جدید



شکل ۵ تغییرات ضریب برآ بر حسب زاویه حمله

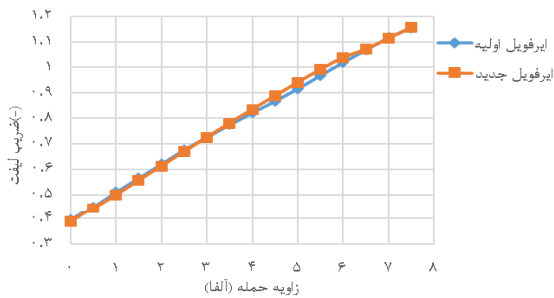


شکل ۹ مقایسه تغییرات نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در ایرفویل اولیه با ایرفویل جدید با تغییرات زاویه حمله



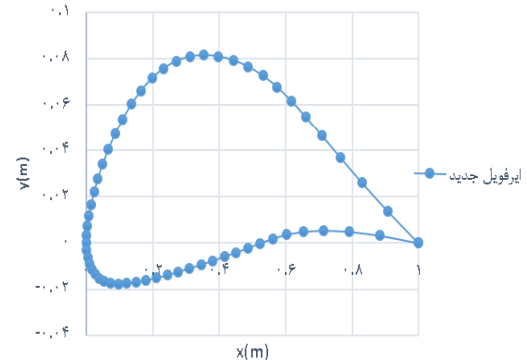
شکل ۶ تغییرات ضریب پسا بر حسب زاویه حمله

به طور کلی ضریب برآ در ایرفویل جدید برابر با ایرفویل اولیه می‌باشد (شکل ۱۰). حداکثر مقدار ضریب برآ برای ایرفویل جدید برابر با ۱/۱۵ می‌باشد که در زاویه حمله ۷/۵ درجه رخ داده است. ضریب پسا در ایرفویل جدید، از زاویه حمله هفت تا ۱۵ درجه، برابر با ضریب پسا در ایرفویل اولیه می‌باشد.



شکل ۱۰ مقایسه تغییرات ضریب برآ در ایرفویل اولیه با ایرفویل جدید با تغییرات زاویه حمله

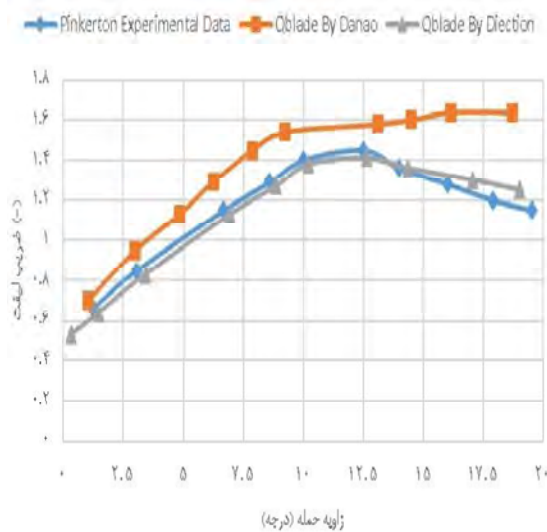
با انجام تغییرات در هندسه ایرفویل E387 به منظور کاهش سرعت جریان هوا در نزدیکی سطح ایرفویل و افزایش فشار استاتیک در این ناحیه، هندسه جدیدی (شکل ۷) بدست آمد.



شکل ۷ ایرفویل جدید

در شکل ۸ هندسه ایرفویل پس از تغییر و همچنین ایرفویل اولیه به نمایش در آمده است. در ایرفویل جدید، بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا مربوط به زاویه حمله ۴ درجه بوده و مقدار آن برابر با ۱۴۲ می‌باشد. مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در ایرفویل جدید نسبت به ایرفویل اولیه به میزان ۱۴/۲۱ با افزایش همراه بوده است (شکل ۹).





شکل ۱۲ اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

۶- نتیجه گیری

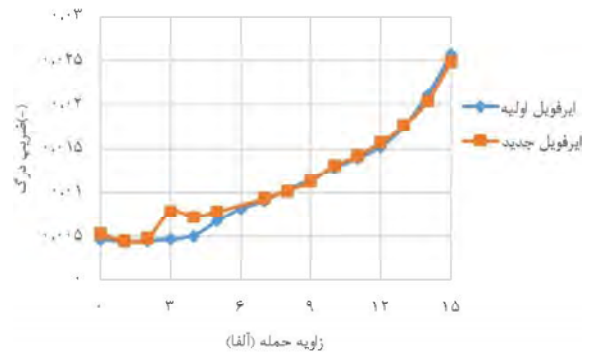
در این مقاله ابتدا به معرفی مفاهیم مورد استفاده در توربین‌های محور افقی پرداخته شده است. سپس با توجه به این که از جمله راه کارهای افزایش توان تولیدی در توربین‌های بادی محور افقی، استفاده از ایرفویل بهبود یافته در ساخت پره توربین بادی می‌باشد، ایرفویل E387 انتخاب و سپس با تغییر هندسه ایرفویل، مقدار ماکزیمم نسبت ضریب برآ به ضریب پسا به میزان ۱۴/۲۱ درصد افزایش پیدا کرده است. تمام محاسبات انجام شده در این تحقیق در نرم افزار Q-Blade صورت گرفته و به منظور بررسی صحت داده‌های نرم‌افزار با مقادیر داده‌های آزمایشگاهی که با استفاده از نرم افزار Get Data تهیه شده، مقایسه و اختلاف این مقادیر ۶/۳ درصد محاسبه شده که قابل قبول می‌باشد.

۷- فهرست علائم

P	توان
A	مساحت جاروب شده
v	سرعت
ρ	چگالی
C_L	ضریب برآ
C_D	ضریب پسا
t	پارامتر بیزیر
F_L	نیروی برآ
F_D	نیروی پسا
P	نقطه ابتدایی
P_1	نقطه انتهایی

۸- مراجع

[1] R. Firdaus, T. Kiwata, T. kano, K. Nagao, Numerical and experimental studies of a small vertical axis wind turbine with variable – pitch straight blades, *Journal of Fluid Science and Technology*, 10(1), JFST0001- JFST0001, 2015.
 [2] M. zamani, S. Nazari, S. A. Moshizi, M. J. Maghrebi, Three dimensional Simulation of J-shaped Darrieus vertical Axis wind turbine, *Renewable Energy*, 116, Part1, 1243-1255, 2016.



شکل ۱۱ مقایسه تغییرات ضریب پسا در ایرفویل اولیه با ایرفویل جدید با تغییرات زاویه حمله

۵- بررسی صحت داده‌ها

ضریب نیروی برآ تعیین کننده مقدار نیروی برآ می‌باشد که به یک ایرفویل وارد می‌گردد. علاوه بر هندسه ایرفویل، زاویه حمله و عدد رینولدز جریان بر مقدار ضریب برآ، تاثیرگذار می‌باشند. به طور کلی جریان‌های آشفتگی بر روی ایرفویل دیرتر دچار جدایش جریان و در نتیجه بروز استال در ایرفویل می‌شوند. لذا عدد رینولدز تا هنگامی که حالت جریان از آرام به آشفتگی تغییر کند، حائز اهمیت می‌باشد. در ایرفویل‌ها، با افزایش زاویه حمله از صفر درجه، مقدار ضریب برآ به طور پیوسته تا زمانی که زاویه حمله به حالت بحرانی رسیده و جدایش جریان رخ دهد، افزایش می‌یابد و در این حالت ایرفویل دچار استال خواهد شد.

برای صحت کار انجام شده در مرحله اول، نتایج به دست آمده را با داده‌های عملی بدست آمده توسط پینکرتون [۱۴] و تحلیل دانائو [۱۵] برای ایرفویل NACA4412 در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰۰ و زوایای صفر تا ۲۰ درجه مقایسه و اعتبارسنجی شد که 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 دانائو، نتایج را پیش‌بینی و با نزدیک شدن به مرحله واماندگی در زاویه حمله بالا، به‌خاطر جدایی جریان، نتایج دارای اختلاف در نزدیکی‌های زاویه واماندگی می‌باشد و مقدار ماکزیمم ضریب برآی پیش‌بینی شده در تحقیق حاضر خیلی نزدیک‌تر نسبت به مدل حل شده دانائو برای مدل تجربی می‌باشد و خطای نتایج Q-Blade برابر ۵٫۹ درصد می‌باشد. که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



- [3] K. Hoe Wonga, W. Tong Chonga, N. Liana Sukiman, S. Chew poh, Y. Shiah, C. Tsan Wang, Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (73), 904- 921, 2017.
- [4] D.E. Berg, Structural Design of the Sandia 34-Meter vertical-axis Wind Turbine, *Report SAND84-1287*, 1985.
- [5] P. Fuglsang & K. Thomsen, "Cost Optimization of Wind Turbines for Large Scale Offshore Wind Farms", Tech. Rep. Risø-R-1000(EN), *Risø National Laboratory*, Roskilde, 1998.
- [6] E. Benini & A. Toffolo, "Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade Element Theory and Evolutionary Computation", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 124, pp. 357-363, 2002.
- [7] Y. Hu & S. Rao, "Robust Design of Horizontal Axis Wind Turbines Using Taguchi Method", *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, pp. 1-15, 2011.
- [8] H. Sun & S. Lee, Response surface approach to aerodynamic optimization design of helicopter rotor blade, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 64, pp. 125-142, 2005.
- [9] J. Li, L. R. Li, Y. Gao & J. Huang, Aerodynamic optimization of wind turbine airfoils using response surface techniques, Proceedings of the IMECHE, *Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 224, 2010.
- [10] F. Grasso, Usage of Numerical Optimization in Wind Turbine Airfoil Design", *AIAA*, no. 2010-4404, 2010.
- [11] A. Ribeiro, A. Awruch, H. Gomes, "An airfoil optimization technique for wind turbines", *Applied Mathematical Modeling*, 36, 4898-4907, 2012.
- [12] M. Djavareshkian, A. Latifi Bidarouni, "An optimization of wind turbine airfoil possessing good stall characteristics by Genetic Algorithm utilizing CFD & Neural Network", *International journal of renewable energy research*, Vol3, No4, October, 2013.
- [13] O. Martin, L. Hansel, Aerodynamic of wind turbines 2nd Ed, 2008
- [14] RM, Pinkerton, The Variation with Reynolds Number of Pressure Distribution over an Airfoil Section, *Technical Report No. 613*, NASA, Cranfield, UK, 1938.
- [15] L. Danao, A. Abuan, R. Howel, Design Analysis of a Horizontal Axis Tidal Turbine, 2016.

