

بهینه‌سازی چند هدفه عملکرد توربین بادی محور افقی اندازه کوچک بر اساس الگوریتم ژنتیک چیدمان غیر غالب II

سعید کریمیان علی ابادی*

استادیار، گروه هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

فرید احمدپور

کارشناسی ارشد هوافضا، گروه هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

هدف اصلی این پژوهش بازطراحی و بهینه‌سازی یک پره از روتور توربین بادی کوچک در طیف سرعت باد با معیارهای توام زمان راه اندازی و توان می‌باشد. ابتدا مدل‌سازی آیرودینامیکی روتور و توربین باد با استفاده از نظریه اندازه حرکت المان پره، ارائه شده و بر این مبنا گشتاور، توان، پیشران و همچنین زمان راه اندازی توربین محاسبه می‌گردد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج شبیه سازی با داده‌های توربین NREL فاز VI مقایسه شده که انطباق خوبی را نشان می‌دهد. با انتخاب الگوریتم ژنتیک با چیدمان غیر غالب II (چندهدفه)، بهینه‌سازی پره روتور توربین بادی انجام گرفته است. توان خروجی و زمان راه اندازی از حالت سکون توربین باد اهداف بهینه‌سازی می‌باشند، همچنین توزیع زاویه پیشش و توزیع وتر برای هر مقطع از پره توربین نیز متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی هستند. علاوه بر محدوده تغییر پارامترهای طراحی، سرعت بیشینه نوک پره نیز به عنوان قید در این مسئله تعریف شده است. با تحقق بهینه‌سازی چند هدفه و بر مبنای نمودار پارتو که مقادیر توابع هدف بر حسب یکدیگر را نشان می‌دهد می‌توان دریافت عموماً با افزایش ضریب توان، مدت زمان راه اندازی توربین افزایش می‌یابد. در نهایت روی نمودار پارتو سه نقطه بهینه انتخاب شده که توزیع وتر و زاویه پیشش برای هر یک از این انتخاب‌ها محاسبه شده است. نتایج بهینه‌سازی توابع هدف نشان می‌دهد که با تغییرات اندکی در پیشش مقاطع و اندازه وتر، می‌توان به ارتقای ضریب توان به میزان حدود ۹ درصد و بهبود زمان راه اندازی به میزان حدود ۱۰ درصد در شرایط نقطه مصالحه دست یافت.

واژه‌های کلیدی: توربین باد محور افقی، روش اندازه حرکت المان پره، بهینه‌سازی تکاملی، الگوریتم ژنتیک با چیدمان غیر غالب، زمان راه اندازی، ضریب توان.

Multi objective optimization of performance of small size horizontal axis wind turbine based on NSGA-II

S. Karimian Aliabadi
F. Ahmadpour

Mechanical engineering faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Mechanical engineering faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

The main aim of this research is to redesign and optimize blade of a small wind turbine rotor in a wind speed range in terms of starting time and power criteria. First, the aerodynamic modeling of the rotor and the wind turbine has been presented based on the blade element momentum theory, and based on this, the torque, power, thrust and the turbine starting time are calculated. To validate the model, the results are compared with NREL phase VI turbine data which shows a good corresponding. In order to optimization of the wind turbine blade rotor, the optimization algorithm of NSGA-II (multi-objective) has been selected. In this algorithm the output power of the rotor and the starting time are considered as the objective functions. In addition, the twist angle and chord length for each section of the turbine blade are assumed as the optimization design variables. The variation ranges of design variables as well as the maximum tip speed are defined as constraints in this problem. Pareto diagram of multi-objective optimization is derived in terms of the values of the objective functions; From the Pareto diagram, it can be found that by increasing the power coefficient, the starting time increases. Finally, three optimum points are selected on the Pareto diagram and for each of them the chord length and the twist angle are calculated. The results of the optimization show that with slight changes in sections' twist and the chord length, enhancement of the power coefficient by approximately 9% and reduction of the starting time about 10% in the compromise point is achievable.

Keywords: horizontal axis wind turbine, blade element momentum method, evolutionary optimization, NSGA, starting time, power coefficient.

داشته است [۱]. در اصطلاح فنی توربین کوچک دارای ناحیه جاروب کمتر از ۲۰۰ مترمربع و توان خروجی پایین تر از حدود ۵۰ کیلووات است. بر خلاف توربین‌های بادی بزرگ که در مناطق بادخیز استفاده می‌شوند، توربین‌های بادی کوچک برای انواع برنامه‌های کاربردی از جمله داخل و یا خارج از شبکه مسکونی، برج‌های مخابراتی، سکوهای دریایی، مدارس روستایی، کلینیک‌ها و نیز اهدافی که نیاز به انرژی دارد اما هیچ شبکه برقی موجود نیست و یا شبکه ای پایدار در اختیار نداریم، به کار می‌روند. بنابراین راه‌اندازی و شروع به کار توربین‌های بادی کوچک در سرعت‌های پایین باد اهمیت ویژه‌ای دارد. این موضوع

۱- مقدمه

یکی از منابع انرژی تجدید پذیر، انرژی باد است که به دلیل وفور آن در بیشتر نقاط زمین نقش مهمی را در تولید انرژی ایفا می‌کند که با استفاده توربین‌های بادی پیشرفته، می‌توان آنرا تولید و از آن بهره برداری کرد. با بکارگیری توربین‌های بادی در صنعت تولید برق، همواره موضوع بهبود ساختار و هندسه توربین و بهینه‌سازی آیرودینامیکی و توان خروجی توربین از مسایل چالشی به شمار می‌آیند. امروزه در دنیا، انرژی باد سریع ترین رشد را در بین منابع انرژی دارد، در دهه گذشته، این انرژی به طور میانگین نرخ رشد ۳۰ درصدی در هر سال را

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: karimian@modares.ac.ir

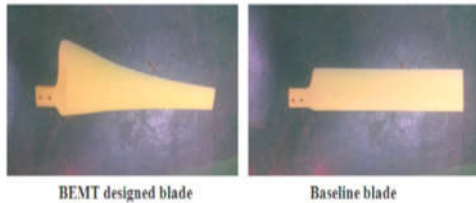
نحوه طراحی پره توربین را تحت شعاع قرار داده و باعث می‌گردد که طراحان علاوه بر هدف ایده‌آل توان خروجی توربین، زمان راه‌اندازی از حالت سکون را نیز در فرآیند طراحی در نظر بگیرند. هدف این پژوهش بررسی تکنولوژی انرژی بادی و طراحی و بهینه‌سازی یک پره توربین بادی کوچک در سرعت پایین باد می‌باشد.

در اواسط سال ۱۹۸۰ آزمایشگاه انرژی طبیعی تجدید پذیر شروع به تولید و گسترش خانواده‌های مختلفی از ایرفویل‌ها و بکارگیری آن‌ها در پره‌های توربین‌های بادی کرد. این ایرفویل‌ها در جریان هوا با محدوده عدد رینولدز 5×10^6 ، بهترین انتخاب برای توربین‌های بادی کوچک محسوب می‌شدند. پیشرفت و بهبود عملکرد آیرودینامیکی این توربین‌های کوچک عمدتاً توسط سه شیوه نظریه اندازه حرکت المان پره، الگوریتم ژنتیک و بهره‌گیری از نرم‌افزار XFOIL انجام گرفته است [۲]. سلیگ و همکاران در سال ۱۹۹۶ با ترکیب الگوریتم ژنتیک با یک روش طراحی معکوس به عنوان یک روش بهینه‌سازی برای تنظیم زاویه اتصال توربین‌های بادی محور افقی ارائه دادند، هدف آن‌ها به حداکثر رساندن تولید انرژی سالیانه بود [۳]. سلیگ در سال ۲۰۰۰، طراحی و بهینه‌سازی هندسه پره توربین بادی را با هدف بیشینه کردن ضریب توان در سرعت طراحی توربین باد و کمینه کردن جرم پره انجام داد. در این مقاله با در نظر گرفتن اثرات نوبز و کم کردن آن و با استفاده از یک الگوریتم تکاملی چند هدفی بهینه‌سازی را انجام داد [۴]. ژیونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک مدل بهینه شده برای روتور توربین باد محور افقی برای یافتن بیشینه توان خروجی در توزیع سرعت خاص باد را ارائه دادند. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی پره توربین بادی ۱/۳ مگاوات را انجام دادند [۵]. همچنین در سال ۲۰۱۳ از گه پلات بهینه‌سازی شکل آیرودینامیکی پره‌های توربین باد محور افقی نوردتک یک مگاواتی را برای بیشینه کردن تولید توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نظریه اندازه حرکت المان پره و همچنین در نظر گرفتن یک سرعت مشخص برای باد و سرعت و قطر روتور و تعداد پره‌های مشخص برای روتور انجام داد. توزیع بهینه وتر و زاویه پیش‌ایرفویل‌های سازنده پره‌ها در نتیجه هندسه بهینه برای پره‌های توربین و افزایش تولید توان سالیانه به اندازه ۱۰ درصد از نتایج این پژوهش بود [۶].

در سال ۲۰۱۳ ریو واز و پینیرو واز در راستای بهینه‌سازی توزیع طول وتر در پره و زاویه پیش‌ایرفویل برای یک توربین محور افقی با در نظر گرفتن اثرات گردابه و با استفاده از گردابه رانکین تحقیقاتی را به انجام رساندند. نتیجه این تحقیق، افزایش طول وتر پره‌ها و کاهش زاویه پیش‌ایرفویل نسبت به مدل‌های قبلی است. مهمترین مزیت این مدل، در نظر گرفتن اثرات چرخش دنباله‌های در نزدیکی پره‌هاست که در مقایسه با مدل گلووات کارایی بهتری دارد و شرایط بتز به درستی برقرار می‌شود [۷]. باوانیش و همکاران در سال ۲۰۱۳ با در نظر گرفتن نسبت ضریب برآ به پسا و زاویه حمله و نسبت سرعت نوک پره با استفاده از روش اندازه حرکت المان پره و استفاده الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفی برای توربین‌های بادی محور افقی، تولید انرژی سالیانه و هزینه انرژی سالیانه با محدودیت بدست آوردن یک توان مشخص بهینه کردند و به هندسه روتور و مشخصات ایرفویل بهینه رسیدند [۸].

آدام چهوری و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بیشینه کردن تولید

انرژی در دوره معین زمانی (از مرتبه یک سال) و طیف سرعت باد (نه فقط یک سرعت خاص) با مروری بر تکنیک‌ها و استراتژی‌های بهینه‌سازی پرداختند. بدین منظور، به مقایسه الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی چند هدفی (ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات) پرداختند و نتایج کد با حل CFD را مقایسه کردند. در این پژوهش هزینه انرژی کمینه گشت، تولید برق به حداکثر رسید و جرم پره کاهش یافت و مدل مناسبی در بهینه‌سازی عملکرد توربین باد را ارائه گشت [۹]. در سال ۲۰۱۶ لی و همکارانش عملکرد آیرودینامیکی دو نوع توربین بادی محور افقی را مورد بررسی قرار دادند. یکی توربین عادی طراحی شده بر پایه نظریه اندازه حرکت المان پره و دیگری توربین بادی بدون زاویه پیش‌ایرفویل و با طول وتر ثابت در طول پره (شکل ۱). هدف این پژوهش دستیابی به نتایج مطابق با داده‌های تجربی، با استفاده از حل عددی است. برای مدل سازی جریان هوای اطراف توربین، حل عددی در سرعت‌های مختلف باد انجام شده است. نتایج تجربی و حل عددی هر دو بیان می‌کنند که ضریب توان توربین طراحی شده بر پایه نظریه اندازه حرکت المان پره، درصد ۵۰ بیشتر است [۱۰].



شکل ۱- نمایش پره اولیه و پره ساخته شده بر اساس BEMT [۱۰]

اولین مطالعه روی رفتار زمان راه‌اندازی توربین بادی محور افقی اندازه کوچک توسط ابرت و وود در سال ۱۹۹۷ انجام شد که در آن شروع زمان راه‌اندازی یک توربین بادی ۵ کیلووات به دو دوره یا بازه زمانی اصلی تقسیم شد:

در بازه زمانی یا دوره اول، روتور به آرامی شتاب می‌گیرد و به همین دلیل است که زاویه حمله پره در عمده مقاطع بزرگ است و عملاً روتور در شرایط دور از راندمان مطلوب کار می‌کند. در دوره دوم، همچنانکه سرعت دورانی Ω روتور افزایش می‌یابد، نسبت برآ به پسای آن نیز زیاد می‌شود و به سمت بیشینه مقدار خودش می‌رود. سپس روتور به سرعت برای رسیدن به سرعت دورانی Ω شتاب می‌گیرد. به طور معمول زمان اندازه‌گیری شده برای دوره دوم در مقایسه با دوره اول کوچک است و می‌توان آنرا نادیده گرفت. بنابراین زمان شروع را به عنوان یک فرآیند شبه پایا در نظر گرفتند [۱۱]. وود و همپسی در سال ۱۹۹۹ بهینه‌سازی محاسباتی یک روتور ۵ کیلووات را با هدف افزایش توان خروجی و کاهش زمان راه‌اندازی انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از یک روش به عنوان "استراتژی کوواریانس ماتریس سازگاری تکامل" توانستند به کاهش قابل توجهی در زمان شروع به کار بدون کاهش چشمگیر بیشینه توان استخراجی برسند [۱۲].

¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

² Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy

توربین‌های کوچک این پارامتر نقش چندان موثری را ایفا نمی‌کند، اما پارامتر حائز اهمیت در این توربین‌ها زمان راه‌اندازی می‌باشد که توسط روابط ریاضی به ممان اینرسی پره مرتبط شده است. در پژوهش‌های پیشین از روش المان پره^۱ برای محاسبه ضریب توان و زمان راه‌اندازی استفاده شده است و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک هدفه و توابع وزن دار، زمان راه‌اندازی و ضریب توان به عنوان یک تابع در نظر گرفته و بهینه شده‌اند. اما در این پژوهش، از نظریه اندازه حرکت المان پره^۲ به منظور محاسبه توان قابل حصول و زمان راه‌اندازی از پره استفاده شده است. همچنین زمان راه‌اندازی و ضریب توان را به عنوان توابع مستقل در نظر گرفته و بهینه‌سازی چند هدفه توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه انجام می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی آیرودینامیک روتور توربین باد

به منظور محاسبه توان قابل حصول از پره و زمان راه‌اندازی توربین بادی کوچک، از نظریه اندازه حرکت المان پره استفاده می‌شود و الگوریتمی جهت انجام محاسبات مربوط به نظریه اندازه حرکت المان پره ارائه می‌گردد. روش اندازه حرکت المان پره ترکیبی از دو تئوری اندازه حرکت و المان پره است. نظریه مومنوم برای پیش‌بینی سرعت جریان و بازده ایده آل و برای تعیین نیروی وارد شونده به روتور که موجب حرکت سیال می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نظریه ارتباطی بین هندسه پره برقرار نمی‌کند، بنابراین نمی‌تواند پارامترهای بهینه پره را انتخاب کند. نظریه المان پره تعیین گر نیروهای روی پره بعنوان نتیجه‌ای از حرکت سیال با عباراتی از هندسه پره است. با ترکیب این دو روش، عملکرد روتور به هندسه روتور مرتبط می‌شود. در روش اندازه حرکت المان پره، نیروی پیشران و گشتاور وارده به هر مقطع، از نظریه اندازه حرکت و نظریه المان پره به دست آمده و باهم برابر قرار داده می‌شوند. فرضیات نظریه اندازه حرکت المان پره، مجموعه‌ای از فرضیات نظریه مومنوم و نظریه المان پره است:

۱. عملکرد پره در شرایط عدم وجود پسای اصطکاک.
 ۲. تعریف مناسب جریان لغزشی جداشده در حین عبور جریان دیسک روتور از دیسک بیرونی
 ۳. برابر بودن فشار استاتیکی در داخل و خارج از ناحیه ی قبل و بعد روتور برای فشار استاتیکی جریان آزاد
 ۴. یکسان فرض شدن نیروی پیشران در سراسر روتور
 ۵. عدم در نظر گرفتن چرخش سیال بوسیله ی دیسک
 ۶. عدم وجود ارتباط بین المان‌های متوالی پره در طول پره
 ۷. نیروی‌های عمل‌کننده روی المان پره تنها ناشی از مشخصه‌های برآ و پسای پروفایل عرضی المان پره هستند.
- فرضیات ۱ تا ۵ مربوط به نظریه مومنوم و فرضیات ۶ و ۷ مرتبط با نظریه المان پره است. زاویه نسبی باد را می‌توان با توجه به مولفه‌های سرعت مماسی و محوری به دست آورد:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \theta_p + \theta_t \quad (1)$$

مابر و همکاران در سال ۲۰۰۱ رفتار شروع به کار یک توربین ۵ کیلووات را به عنوان تابعی از زاویه تنظیم پره اندازه‌گیری کردند. نتیجه این پژوهش کاهش زمان دوره معطلی با افزایش این زاویه است [۱۳]. در سال ۲۰۱۴ کیل طراحی آیرودینامیکی و بهینه‌سازی پره توربین بادی محور افقی کوچک با استفاده از با استفاده از مشخصات ایرفویل NACA 4412 انجام دادند که در آن وتر و زاویه پیش از پره طراحی شده اولیه تعیین می‌شود. بهینه‌سازی با هدف بهبود توان و کاهش زمان راه‌اندازی انجام می‌گیرد و نتایج پژوهش نشان دهنده ۲۴ درصد کاهش وتر پره بهینه‌سازی شده و همچنین کاهش ۴۴ درصد ضخامت می‌باشد. ضریب توان پره بهینه‌سازی شده به طور قابل توجهی تا ۳۰ درصد نسبت به پره نرمال افزایش یافته است [۱۴]. کارتیکیان و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی در زمینه بهینه‌سازی آیرودینامیکی شکل پره‌های یک توربین بادی محور افقی کوچک انجام دادند. از این رو به بهینه‌سازی پروفیل پرها و هندسه ایرفویل‌ها و دستیابی به ضریب توان بالا در Re کمتر از 5×10^5 در توربین بادی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات لبه فرار و ضخامت اثر قابل توجهی بر روی عملکرد نوبز، مشخصه‌های شرایط شروع به کار و نسبت برآ به پسای ایرفویل دارد [۱۵].

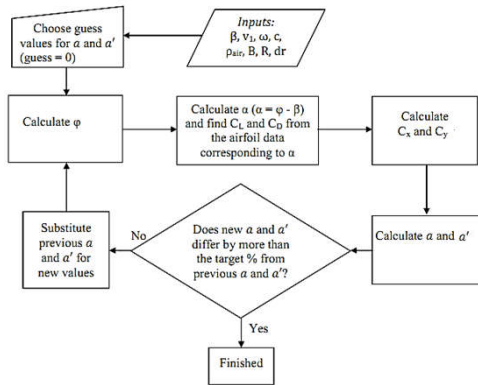
ابوالفضل پور رجبیان و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای روی روش‌های طراحی سازه - سیال و رابطه بین سازه و شروع به کار یک پره توربین باد کوچک با توان خروجی مناسب پرداختند. طراحی و بهینه‌سازی توربین‌های بادی کوچک از نظر آیرودینامیک (کمینه کردن زمان راه‌اندازی و بیشینه کردن توان خروجی) و از نظر سازه‌ای به مقاومت در برابر بارهای آیرودینامیکی و گریز از مرکز و در نظر گرفتن تنش مجاز به عنوان محدودیت از اهداف این مطالعه را انجام دادند. برای انجام این کار از نظریه اندازه حرکت المان پره برای محاسبه تنش در امتداد طول پره و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توان خروجی و عملکرد بالای زمان شروع به کار در حالی که حداکثر تنش مجاز در پره را به عنوان محدودیت در نظر گرفتند، استفاده نمودند. نتایج نشان داد که زمان شروع به کار به طرز محسوسی در ازای کاهش ناچیز توان خروجی، کم می‌شود. همچنین در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر گشتاور آیرودینامیکی کاهش می‌یابد در نتیجه زمان شروع به کار نیز افزایش می‌یابد. پیدا کردن ضخامت پوسته کوچکتر باعث کاهش اینرسی و زمان شروع به کار توربین باد می‌گردد. جرم پره، استحکام ساختاری و ایجاد نوبز نیز به عنوان پارامترهای مهم در طراحی استفاده می‌شوند [۱۶].

توان خروجی پارامتر تعیین کننده و تصمیم گیرنده و عملکرد توربین های بادی می باشد و عمده تلاش ها در این حوزه در باب افزایش توان صورت گرفته است. نکته قابل توجه آن است که بکارگیری زاویه پیش تنها در زمینه مهار توان و جلوگیری از تجاوز آن از حد مجاز صورت گرفته است حال آنکه مطالعه تاثیر آن در افزایش توان خروجی در تمامی نواحی فعالیت توربین خود ایده ای نوین است که در تحقیقات پیشین به آن پرداخته نشده و در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینه توربین بادی به خصوص توربین بادی اندازه کوچک انجام شده است. در توربین‌های بادی بزرگ جرم پرها یک پارامتر موثر در طراحی پرهاست، اما در

¹ Blade Element Theory

² Blade Element Momentum Theory



شکل ۲- فلوجارت فرایند حل تکراری برای حل معادلات نظریه المان اندازه حرکت پره

این عملیات برای N المان در نظر گرفته شده اجرا و پس از آن می‌توان نیروی پیشران (T)، گشتاور (Q) و توان (P) را محاسبه کرد.

$$T = B \sum_{i=1}^N F_{N_i} \quad (21)$$

$$Q = B \sum_{i=1}^N F_{T_i} r_i \quad (22)$$

$$P = \Omega B \sum_{i=1}^N F_{T_i} r_i \quad (23)$$

در نهایت ضریب توان را به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3} \quad (24)$$

۳- محاسبه زمان راه‌اندازی توربین بادی

هدف متمایز توربین‌های بادی کوچک، تولید توان در مدت زمان کوتاه است. مطالعات تجربی از رفتار توربین‌های بادی کوچک نشان می‌دهد که مدت زمان توقف برای راه‌اندازی روتور، با توجه به شتاب کم روتور معمولاً بسیار طولانی‌تر از توربین‌های بادی بزرگ است. این مدت زمان توقف سبب کاهش تولید توان از توربین می‌گردد. در توربین‌های بادی محور افقی بزرگ به دلیل قابلیت تنظیم تاب پره و مباحث استحکام، لازم است نزدیک توییپ به صورت استوانه‌ای باشد، در حالی که در پره توربین‌های بادی محور افقی کوچک، به دلیل نبود سیستم تنظیم تاب پره و نیروهای وارده جزئی به ریشه پره نسبت به توربین‌های بادی محور افقی بزرگ، نیازی به استوانه‌ای ساختن ریشه آن نیست و این بهبود به چرخش کمک می‌کند. در زمان توقف زاویه حمله نسبتاً بزرگ است، همچنین هیچ توانی در حالیکه پره‌ها با گشتاور آیرودینامیکی شتاب می‌گیرند، وجود ندارد.

وقتی می‌گوییم راه‌اندازی کامل شده که نسبت سرعت نوک پره در یک مدت زمان مشخص، تغییری نکند. هنگامی که توربین توان بهینه را از سرعت دورانی ثابت تولید می‌کند، گشتاوری که از نیروهای اصطکاکی در ژنراتور و پیشران می‌باشد، در مقابل گشتاورهای آیرودینامیکی و الکتروپدینامیکی ناچیز هستند. همچنین لختی پره به ثابت بودن سرعت مربوط نیست. با این حال هر دو عامل به طور قابل توجهی بر زمان راه‌اندازی تأثیر می‌گذارند. بنابراین بهبود در عملکرد زمان راه‌اندازی، به احتمال زیاد منجر به تغییر پره طراحی می‌گردد که صرفاً براساس ملاحظات پیشینه کردن توان است. در واقع بهترین پره‌ها

$$\theta = \theta + \alpha \quad (2)$$

نیروهای برآ و پسا به صورت دیفرانسیلی برای المان پره که اندازه dr (در راستای دهانه بال) دارد، به صورت زیر در می‌آید:

$$dL = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_L c dr \quad (3)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 C_D c dr \quad (4)$$

$$C_N = C_L \cos(\phi) + C_D \sin(\phi) \quad (5)$$

$$C_T = C_L \sin(\phi) - C_D \cos(\phi) \quad (6)$$

$$dF_N = dL \cos(\phi) + dD \sin(\phi) \quad (7)$$

$$dF_T = dL \sin(\phi) - dD \cos(\phi) \quad (8)$$

نیروی پیشران و گشتاور دیفرانسیلی برای حلقه‌ای به ضخامت dr که در شعاع r از مرکز قرار دارد، برابر است با:

$$dT = B dF_N \quad (10)$$

$$dQ = B dF_T r \quad (11)$$

لازم به ذکر است، در معادلات فوق؛ C_L ضریب برآ، C_D ضریب پسا، C طول وتر و B تعداد پره‌های توربین باد است. با استفاده از معادلات (۹) تا (۱۱) و همچنین با تعریف استحکام (صلبیت) محلی (σ') روابط (۱۰) و (۱۱) را به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (12)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho U_{rel}^2 (C_N) r dr \quad (13)$$

$$dQ = \sigma' \pi \rho U_{rel}^2 (C_T) r dr \quad (14)$$

با در نظر گرفتن ضریب تصحیح پرائتل^۲ و ضریب تصحیح دنباله آشفته (گلوآرت) روابط زیر را بدست می‌آید:

$$F_{tip} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{R-r}{r \sin(\phi)} \right) \right] \quad (15)$$

ضریب افت پرائتل که با F نشان داده می‌شود، بیانگر کاهش نیروها در طول دهانه پره است. این ضریب به روش اندازه حرکت اعمال می‌شود تا فرض تعداد پره نامتناهی را اصلاح کند. در این پژوهش ضریب هدررفت نوک^۳ را در نظر گرفته می‌شود. این ضریب مقداری بین صفر و یک دارد و به مقادیر نیروی پیشران و گشتاور بدست آمده از نظریه اندازه حرکت، اعمال می‌گردد.

$$dT = 4\pi r \rho U^2 a(1-a) F dr \quad (16)$$

$$dQ = 4\pi r^3 \rho U \Omega a^3 (1-a) F dr \quad (17)$$

برای ضریب تصحیح دنباله آشفته اگر ضریب القای محوری کمتر از ۰/۲ باشد؛ یعنی ضریب پیشران بزرگتر از ۰/۹۶ است، در نتیجه:

$$C_T > 0.96: a > 0.4 \rightarrow a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F)} + 12F(3F - 4)}{36F - 50} \quad (18)$$

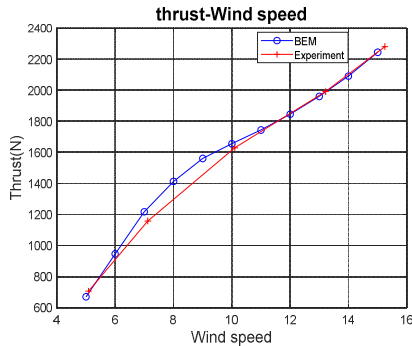
دو معادله نهایی برای a و a' در روش اندازه حرکت المان پره به صورت زیر بدست می‌آید:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2(\phi)}{\sigma' C_N} + 1} \quad (19)$$

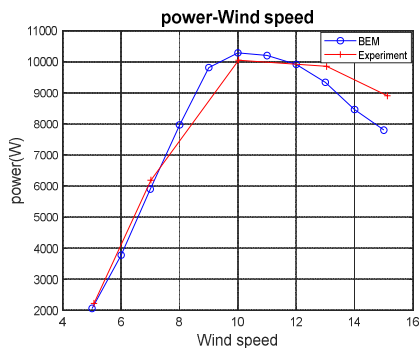
$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma' C_T} - 1} \quad (20)$$

الگوریتم کلی محاسبه‌ی a و a' برای یک المان حلقوی منفرد توسط شکل ۲ نشان داده شده است:

1 Local Solidity
2 Prandtl's correction factor
3 Tip loss factor



شکل ۳- نمودار پیشران بر حسب سرعت باد



شکل ۴- نمودار توان بر حسب سرعت باد

در شکل‌های فوق، نمودارهای توان و پیشران بر حسب سرعت باد نشان داده شده است، با مقایسه با مقاله مرجع، مشاهده می‌گردد که در نمودار پیشران بر حسب سرعت باد، در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه کاملاً با مرجع مطابقت دارد و با افزایش سرعت باد، پیشران بیشتری نسبت به پژوهش تجربی بدست می‌آید و در نهایت با در سرعت‌های بین ۱۱ تا ۱۵ متر بر ثانیه دوباره پژوهش تجربی را به خوبی دنبال می‌کند. در نمودار توان بر حسب سرعت باد مطابق نمودار پیشران در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه کاملاً با مطابق مرجع است اما با افزایش سرعت باد توان اندکی از پژوهش تجربی فاصله می‌گیرد و در سرعت ۱۲ متر بر ثانیه دو نمودار بر هم منطبق می‌شوند، سپس با افزایش سرعت باد دوباره دو نمودار از هم فاصله می‌گیرند. حال این سوال پیش می‌آید که در سرعت‌های بالاتر از ۱۵ متر بر ثانیه چه اتفاقی می‌افتد؟ با توجه به اشکال ۵ و ۶ نمودار توان در سرعت‌های بالای ۱۵ متر بر ثانیه فاصله زیادی از پژوهش تجربی می‌گیرد و در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه به توان حدودی ۱۴۰۰۰ وات می‌رسد. این امر به دلیل در نظر نگرفتن اثرات چرخش دنباله و برخی دیگر از ضرایب تصحیح در سرعت‌های بالا، رخ می‌دهد که در این پژوهش به دلیل محدوده سرعت عملکردی مشخص توربین باد کوچک (۱۵-۵ متر بر ثانیه) تأکیدی بر در نظر گرفتن اثرات چرخش دنباله نیست. نمودار پیشران نیز به همین صورت در سرعت‌های بالاتر از نمودار مرجع فاصله می‌گیرد.

برای تولید توان، هیچگاه زمان شروع سریعتری ندارند. بدیهی است که از یک پره ثابت نمی‌توان توانی استخراج کرد؛ بنابراین نمی‌توان از a و a' صرف‌نظر کرد. اما از انرژی جنبشی چرخشی پره‌ای که شتاب دارد، می‌توان حداقل انرژی را استخراج کرد. با این حال فرض بر این است که توان خروجی نداریم و گشتاور آیرودینامیکی تنها برای سرعت دادن به روتور عمل می‌کند.

$$\frac{dQ}{dr} = \frac{1}{2} \rho B U^2 \left(\sqrt{1 + \lambda_r^2} \right) cr \sin(\theta_p) [\cos(\theta_p) - \lambda_r \sin(\theta_p)] \quad (25)$$

بعد از محاسبات و ساده سازی اولیه، θ_p بر حسب α و ϕ نوشته می‌شود. تمام طول‌ها توسط شعاع نوک (R) و سرعت‌ها توسط (U) نرمالیزه می‌شوند.

$$Q = \rho B U^2 R^3 \int_{r_h}^1 \left(\sqrt{1 + \lambda_r^2} \right) cr \sin(\theta_p) [\cos(\theta_p) - \lambda_r \sin(\theta_p)] dr \quad (26)$$

به آسانی نشان داده می‌شود که هنگامی که $\lambda = 0$ است، یعنی پره ثابت است، Q دارای بیشینه محلی است. این امر به دلیل عدم تأثیر پسا به روی Q ، هنگامی که λ و Ω برابر صفر است رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، Q شتاب روتور را از حالت سکون (عدم کار) کاهش می‌دهد و پسا شروع به کاهش دادن گشتاور می‌کند. انتگرال معادله (۲۶) به سادگی از طریق اندازه حرکت المان پره مورد بررسی و حل قرار می‌گیرد. یکی از مهمترین نتایج این فرض؛ عدم وجود توان استخراجی در طول دوره راه‌اندازی است که گشتاور Q فقط برای سرعت بخشیدن پرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R(Q - Q_r)}{JU} \quad (27)$$

که در آن J اینرسی مومنتوم و پیچشی کل و Q_r گشتاور مقاومتی است. برای اکثر توربین‌های بادی کوچک J غالب، اینرسی مومنتوم و پیچشی بخش روتور می‌باشد. وقتی $Q_r = 0$ است؛ زمان راه‌اندازی مستقل از تعداد پرها است. معادله (۲۷) با استفاده از روش‌های استاندارد برای حل معادله دیفرانسیل معمولی (ODE) حل می‌گردد. در این پژوهش از حل رانگ کوتای مرتبه ۴ استاندارد از λ_0 تا λ برای تعیین زمان راه‌اندازی T_s استفاده شده است.

۴- اعتبار سنجی مدل آیرودینامیک

با استفاده از روش اندازه حرکت المان پره و با استفاده از نرم افزار MATLAB، کد این روش نوشته شده و توان و پیشران محاسبه شده و با مقاله یلموله^۱ [۱۷] مقایسه شده است:

مقدار ناچیزی باشد. بنابراین هنگامی که سرعت نوک پره و یا همان سرعت دورانی پره به مقدار تقریباً ثابتی برسد، توربین شروع به کار می‌کند. بدین ترتیب بر اساس نمودار فوق زمان راه اندازی حدود ۷۷ ثانیه بدست می‌آید که در این زمان سرعت نوک پره تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد و این مقدار تقریباً برابر ۱۳ است که معادل ۰/۹۹ مقدار نهایی سرعت نوک است.

۵- نتایج و بحث

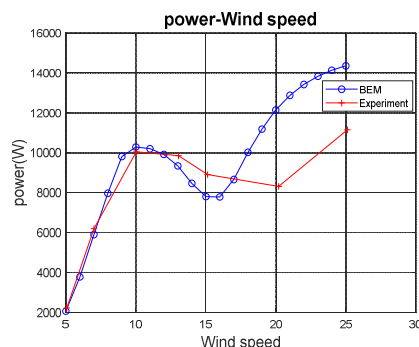
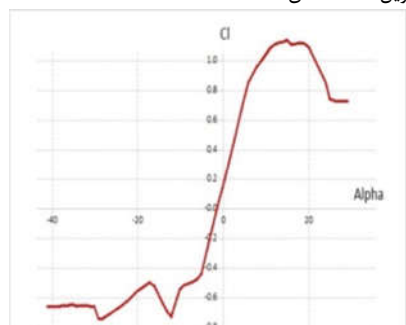
۵-۱- معرفی توربین مبنا

در این پژوهش از توربین NREL Phase VI به عنوان توربین مبنا استفاده شده است که در آن توزیع وتر و زاویه پیچش بر حسب شعاع پره داده شده است (پیوست ۱). جدول ۱ مشخصات توربین NREL Phase VI را نشان می‌دهد.

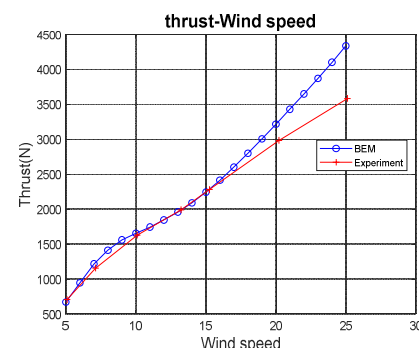
جدول ۱- مشخصات توربین NREL Phase VI

اندازه / مقدار	پارامترهای توربین مبنا
۳	تعداد پره
۱۰/۰۵۸	قطر پره (m)
۷۱/۶۳	سرعت چرخشی (RPM)
۱۲/۱۹۲	ارتفاع هاب (m)
۵	سرعت باد راه اندازی توربین (m/s)
۲۵	سرعت باد توقف توربین (m/s)
۶, ۴, ۳, ۲, ۰	زاویه تاب پره (تنظیم به طور دستی توسط اپراتور)
NREL S809	نوع ایرفویل

با توجه به اطلاعات موجود در توربین مبنا، از مختصات پروفیل ایرفویل S809 برای محاسبه ضرایب برآ و پسا بر حسب زاویه حمله استفاده می‌گردد [۱۸]. برای این کار ابتدا مختصات پروفیل را به نرم افزار QBlade داده و سپس ضرایب برآ و پسا از زاویه حمله ۱۸۰- تا ۱۸۰ درجه را محاسبه می‌گردد. در شکل ۸ نتایج نرم افزار QBlade برای ایرفویل S809 نشان داده شده است.

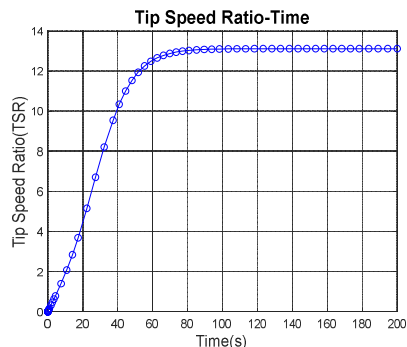


شکل ۵- نمودار توان بر حسب سرعت باد در محدوده سرعت بالاتر



شکل ۶- نمودار پیشران بر حسب سرعت باد در محدوده سرعت بالاتر

در مورد زمان راه‌اندازی پژوهشی در مورد این نوع توربین خاص صورت نگرفته است، اما با توجه به اینکه زمان راه‌اندازی بر اساس مدل آیرودینامیکی و روش اندازه حرکت المان پره و با استفاده از یک معادله مرتبه اول ساده محاسبه می‌گردد و چون روش BEM اعتبار سنجی گردیده است؛ لذا می‌توان انتظار داشت صحت پاسخ این معادله متناسب و متنظر با صحت کد محاسبات آیرودینامیکی یعنی BEM می‌باشد. به عبارت دیگر اعتبار محاسبه زمان راه‌اندازی وابسته به صحت مدل آیرودینامیک می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود به خوبی تأمین شده است. زمان راه‌اندازی عبارت از زمانی است که روتور از حالت سکون شتاب گرفته و به نسبت سرعت نوک پره برسد. این زمان باید در تعداد پره مادامی که اثرات صلیبیت نیروی برآ و پسا در المان پره را تغییر نمی‌دهد، خطی باشد (شکل ۷).



شکل ۷- نمودار سرعت نوک پره بر حسب زمان

تعریف دیگر عبارت از زمانی است که روتور از حالت سکون شتاب گرفته و تغییرات نسبت سرعت نوک پره در یک بازه زمانی مشخص

ضریب توان و زمان راه‌اندازی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$F_1(x) = t_{start} = \int \frac{R(Q - Q_r)}{JU} d\lambda \quad (28)$$

$$F_2(x) = C_p = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 U^3}{\dots} \quad (29)$$

حال با در نظر گرفتن قطر پره، تعداد پره و نوع ایرفویل به عنوان پارامترهای تنظیم الگوریتم بهینه ساز و توزیع وتر و زاویه پیچش به عنوان متغیرهای طراحی، بهینه سازی انجام می‌گیرد. در این پژوهش دو هدف که با یکدیگر در تضاد هستند، همزمان با یکدیگر انتخاب می‌شوند و بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با چیدمان غیر غالب (NSGA-II) انجام می‌گیرد. پارامترهای تنظیم الگوریتم و مقادیر کمینه و بیشینه متغیرهای طراحی در جدول ۲ معرفی شده‌اند. فضای جستجو در این الگوریتم یک فضای پیوسته در محدوده متغیرهای طراحی می‌باشد.

محاسبه کرده و در نتیجه ضرایب گشتاور و پیشران و نیروهای معادل آن‌ها را بدست می‌آید. سپس با استفاده از این نیروهای بدست آمده توان و ضریب توان را محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از اطلاعات توربین باد مبنا، توربین را بر اساس زمان راه‌اندازی نیز می‌توان طراحی کرد.

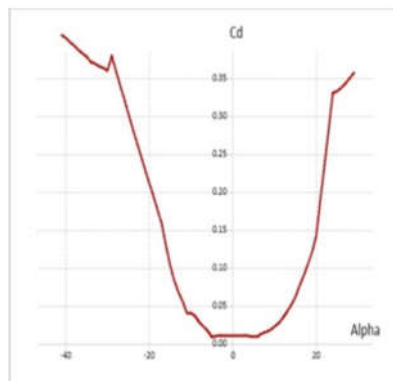
۲-۵- الگوریتم ژنتیک چندهدفه با چیدمان غیر غالب II

در این نوع الگوریتم‌ها به دلیل وجود چند نوع تابع هدف، نمی‌توان تنها یک راه حل یافت که در عین واحد، راه حل بهینه برای تمام توابع هدف باشد. بنابراین مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها وجود دارد که کاربر متناسب با نیازش می‌تواند یک راه‌حل را انتخاب کند. این راه‌حل‌ها در طول یک منحنی که به پارتو معروف است پراکنده می‌شوند. لذا الگوریتم‌های فراوانی برای ارائه‌ی پراکندگی و فراوانی راه‌حل‌ها وجود آمده‌اند که بدون هیچ‌گونه اطلاعات اضافی نمی‌توان گفت کدام راه‌حل نسبت به بقیه ارجحیت دارد. الگوریتم NSGA-II توسط آقای دب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ ارائه گردید که نسخه‌ی ارتقا یافته NSGA می‌باشد که در سال ۱۹۹۵ منتشر کردند [۱۸]. این الگوریتم با معرفی دو عملگر چیدمان غیر غالب سریع و مقایسه‌گر جمعیت به چیدمان راه‌حل‌های غیر غالب و حفظ تنوع و پراکندگی ما بین راه‌حل‌ها می‌پردازد.

جدول ۲- پارامترهای تنظیم الگوریتم NSGA-II

تعداد تکرار	۵۰۰	کمینه زاویه پیچش	۲
تعداد جمعیت	۱۰۰	بیشینه زاویه پیچش	۲۵
تعداد المان‌های پره	۱۵	تعداد پره	۲
کمینه وتر	۰/۱	سرعت شروع به کار	۵
بیشینه وتر	-۰/۲	Q_p	۰

چگالی پره مطابق پژوهش پترسن برابر 550 kg/m^3 و به طور یکنواخت در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. پس از اجرای کد در نرم افزار MATLAB جبهه پارتویی به دست می‌آید که به در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار همانطور که انتظار می‌رود برای رسیدن به توان بیشتر، زمان راه‌اندازی کاهش می‌یابد و برعکس برای راه‌اندازی سریعتر، توان کم می‌شود. حال ۳ نقطه روی جبهه پارتو انتخاب می‌گردد سپس پارامترهای متناظر با آن‌ها استخراج شده و توابع هزینه



شکل ۸- ضرایب برآ و پسا از نرم افزار QBlade برای ایرفویل S809

کار و توان مناسب نیاز به بهینه‌سازی به شدت حس می‌شود. در نتیجه محاسبه کرده و در نتیجه ضرایب گشتاور و پیشران و نیروهای معادل آن‌ها را بدست می‌آید. سپس با استفاده از این نیروهای بدست آمده توان و ضریب توان را محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از اطلاعات توربین باد مبنا، توربین را بر اساس زمان راه‌اندازی نیز می‌توان طراحی کرد.

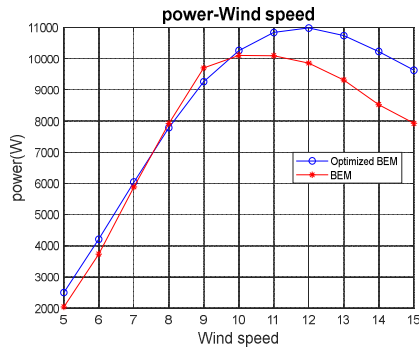
۲-۵- الگوریتم ژنتیک چندهدفه با چیدمان غیر غالب II

در این نوع الگوریتم‌ها به دلیل وجود چند نوع تابع هدف، نمی‌توان تنها یک راه حل یافت که در عین واحد، راه حل بهینه برای تمام توابع هدف باشد. بنابراین مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها وجود دارد که کاربر متناسب با نیازش می‌تواند یک راه‌حل را انتخاب کند. این راه‌حل‌ها در طول یک منحنی که به پارتو معروف است پراکنده می‌شوند. لذا الگوریتم‌های فراوانی برای ارائه‌ی پراکندگی و فراوانی راه‌حل‌ها وجود آمده‌اند که بدون هیچ‌گونه اطلاعات اضافی نمی‌توان گفت کدام راه‌حل نسبت به بقیه ارجحیت دارد. الگوریتم NSGA-II توسط آقای دب و همکارانش در سال ۲۰۰۲ ارائه گردید که نسخه‌ی ارتقا یافته NSGA می‌باشد که در سال ۱۹۹۵ منتشر کردند [۱۸]. این الگوریتم با معرفی دو عملگر چیدمان غیر غالب سریع و مقایسه‌گر جمعیت به چیدمان راه‌حل‌های غیر غالب و حفظ تنوع و پراکندگی ما بین راه‌حل‌ها می‌پردازد.

۳-۵- نتایج بهینه‌سازی

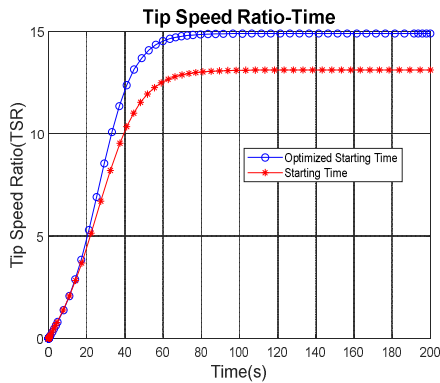
برای رسیدن به یک توان بهتر، نیاز به تجزیه و تحلیل آیرودینامیکی پره احساس می‌شود، همچنین راه‌اندازی و شروع به کار توربین‌های بادی کوچک در سرعت‌های پایین باد که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این موضوع طراحی پره توربین بادی کوچک را تحت شعاع قرار داده و باعث می‌شود علاوه بر رسیدن به بیشینه توان خروجی توربین، زمان راه‌اندازی از حالت سکون نیز در نظر گرفته شود. همانطور که در بخش ۲ و ۳ توضیح داده شد، با استفاده از روش اندازه حرکت المان پره توان و زمان راه‌اندازی توربین باد را محاسبه می‌کنیم. طبق معادله اینرسی هرچه وتر کوچکتر باشد، زمان شتابگیری پایین می‌آید، از طرفی بیشترین ضریب توان در تناسب مشخصی از وتر رخ می‌دهد. بنابراین برای بدست آوردن زمان شروع به کار و توان مناسب نیاز به بهینه‌سازی به شدت حس می‌شود. در نتیجه

میزان افزایش می‌یابد و در سرعت ۱۲ متر بر ثانیه به حدود ۱۱ هزار وات می‌رسد.

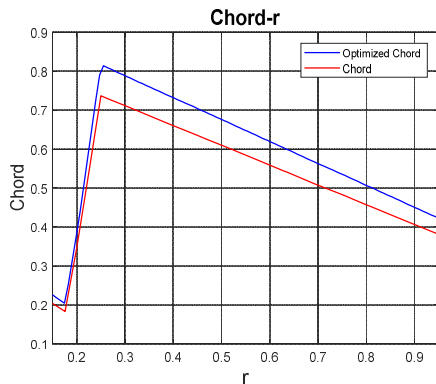


شکل ۱۱- نمودار توان بر حسب سرعت باد و مقایسه مقادیر بهینه با روش اندازه حرکت المان پره برای نقطه مصالحه

مطابق رابطه $\lambda = R\Omega / U$ نسبت سرعت نوک پره با افزایش سرعت باد، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت سرعت مقدار ضریب توان کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزایش سرعت باد ضریب توان به میزان بیشتری افزایش می‌یابد، که این امر در عملکرد توربین تاثیر مثبت و قابل توجهی دارد.

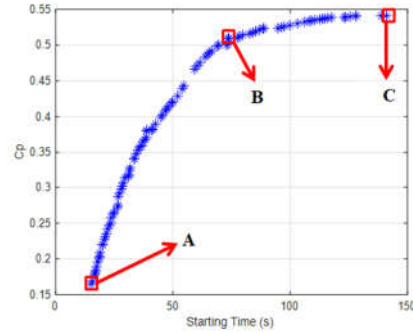


شکل ۱۲- نمودار نسبت سرعت نوک پره بر حسب زمان راه‌اندازی و مقایسه آن با مقادیر بهینه زمان برای نقطه مصالحه



شکل ۱۳- نمودار توزیع وتر بهینه شده برای نقطه مصالحه

آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند که در جدول ۳ ارائه شده است. از این نقطه، ۲ نقطه، نقاط ابتدایی و انتهایی پارتو می‌باشند. نقطه‌ی ابتدا تمرکز بر کمینه کردن تابع هزینه اول و نقطه انتها تمرکز بر بیشینه کردن تابع هزینه دوم دارد و نقطه دیگر بین این دو مقدار می‌باشد. این نقطه بنا به صلاح دید طراح و بسته به نیاز او برای رسیدن به توان بیشتر و یا زمان کمتر انتخاب می‌شود.

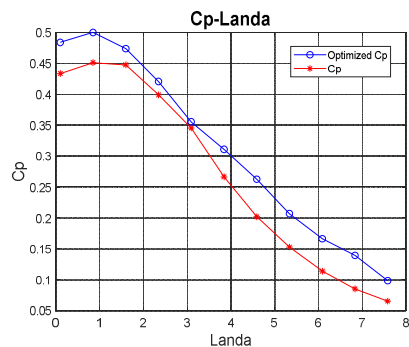


شکل ۹- جبهه پارتو با استفاده از الگوریتم NSGA II

جدول ۳- پارامترهای استخراج شده نقاط ابتدا، انتها و وسط با استفاده از الگوریتم NSGA-II

نقطه مصالحه (وسط)	نقطه انتها	نقطه ابتدا
مقدار تابع هزینه $(t_{start}) F_1$	۱۴۱/۱۰۰۲	۱۴/۹۷۲۲
مقدار تابع هزینه $(C_p) F_2$	۰/۵۴۱۰	۰/۱۱۶۵۱
توان بیشینه	۱۱۸۷۹	۶۴۶۱

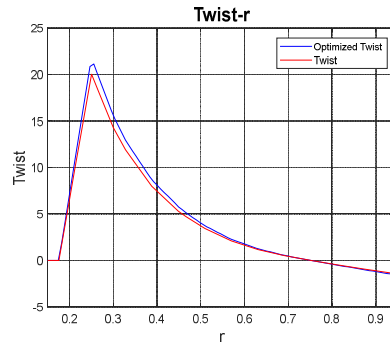
۴-۵- نتایج بهینه‌سازی برای نقطه مصالحه



شکل ۱۰- نمودار ضریب توان و مقایسه مقادیر بهینه با مقادیر اندازه حرکت المان پره برای نقطه مصالحه

در نقطه مصالحه مطابق شکل ۱۰ و با اعمال بهینه‌سازی چند هدفه و احتساب ضریب توان و زمان راه‌اندازی به عنوان توابع هدف بیشینه ضریب توان به میزان حداکثر ۰/۰۵ یعنی حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است و مطابق شکل ۱۱ توان حاصله تقریباً به همین

پارتو می‌باشند. نقطه‌ی ابتدا تمرکز بر کمینه کردن تابع هدف اول یعنی زمان راه‌اندازی و نقطه انتها تمرکز بر بیشینه کردن تابع هدف دوم یعنی ضریب توان دارد. معمولاً نقطه دیگری که بین این دو مقدار می‌باشد، انتخاب می‌گردد که به آن نقطه مصالحه می‌گویند. در نهایت پارامترهای متناظر با نقطه مصالحه استخراج شد و توابع هزینه‌ی آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. در نقطه مصالحه ضریب توان 0.5 و زمان شروع به کار حدود 70 ثانیه بدست می‌آید که این دستاورد متناظر با افزایش ضریب توان به میزان حدود 9 درصد و کاهش زمان راه‌اندازی به میزان حدود 10 درصد می‌باشد. این فعالیت زمینه مناسبی برای بهینه سازی هندسی پره های توربین بادی کلاس کوچک و متوسط با اهداف عملکردی می باشد.



شکل ۱۴- نمودار توزیع پیچش بهینه شده برای نقطه مصالحه

در شکل ۱۲ منحنی نسبت سرعت نوک پره بر حسب زمان راه‌اندازی رسم شده است. در این پژوهش از تعریف دوم زمان راه‌اندازی به عنوان شرط توقف استفاده شده است در واقع افزایش میزان λ بنا به تعریف زمان راه‌اندازی است، در این نمودار افزایش λ در نقطه مصالحه (که موجب افزایش سرعت دورانی توربین می‌گردد) اما این نکته لازم به ذکر است که سرعت دورانی توربین نمی‌تواند از سرعت دورانی توربین مینا بیشتر باشد که این موضوع نیز یکی از قیود مساله است. در نتیجه نسبت سرعت نوک پره نمی‌تواند از مقدار مشخصی بیشتر باشد. در این نسبت سرعت نوک پره، زمان راه‌اندازی به میزان حدود 10 درصد بهبود یافته است.

منحنی‌های توزیع وتر و زاویه پیچش پره که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است، نشان می‌دهد که، تغییرات طول وتر حول مقدار مینا افزایش و با فاصله تقریباً یکسان واقع شده است. این امر به دلیل تعریف محدوده تغییرات مجاز پارامتر وتر در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. توزیع زاویه پیچش مشابه توزیع وتر است و زاویه پیچش نسبت به مقدار مینا، مقدار اندکی افزایش یافته است. این دو نمودار بیان می‌کنند که توزیع پیچش و وتر در توربین طراحی شده مطابق توربین NREL Phase VI است با این تفاوت که اندکی نسبت به توربین مینا افزایش یافته‌اند که این امر با توجه به افزایش توان و کاهش زمان راه‌اندازی قابل توجیه است.

۷- نمادها

نمادهای انگلیسی

ضریب القای محوری	a
ضریب القای مماسی (زاویه ای)	a'
ضریب پیشران	C_N
ضریب گشتاور	C_T
ضریب پسا	C_d
ضریب برآ	C_l
ضریب توان	C_p
گشتاور	T

نمادهای یونانی

زاویه حمله	α
زاویه پیچش (زاویه بین خط وتر و صفحه چرخش)	θ_p
نسبت سرعت نوک پره	λ
نسبت سرعت نوک محلی هر المان	λ_r
زاویه جریان بین U_∞ و صفحه چرخش	ϕ
ضریب صلبیت محلی	σ

۸- مراجع

- [1] Berg D., Johnson S. J. and Van Dam C. P. C., Active Load Control Techniques for Wind Turbines, Sandia Natl. Lab., no. July, 2008.
- [2] Soland T. H. S. T., Bachelor Thesis in Aeronautical Engineering Investigation of Different Airfoils on Outer Sections of Large Rotor Blades, 2012.
- [3] Selig M. S., Application of a Genetic Algorithm to Wind Turbine Design, vol. 118, no. March, pp. 22-28, 1996.
- [4] P. Giguère and M. S. Selig, Blade Geometry Optimization for the Design of Wind Turbine Rotors, Aiaa, No. 2000, p. 45, 2000.
- [5] Liu X., Chen Y. and Ye Z., Optimization model for rotor blades of horizontal axis wind turbines, Front. Mech. Eng. China, Vol. 2, No. 4, pp. 483-488, 2007.
- [6] Polat O. and Tuncer I. H., Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a parallel genetic algorithm, Procedia Eng., Vol. 61, pp. 28-31, 2013.
- [7] D. A. Tavares Dias do Rio Vaz, J. R. P. Vaz, A. L. A. Mesquita, J. T. Pinho, and A. C. Pinho Brasil Junior, Optimum aerodynamic design for wind turbine blade with a

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با روش اندازه حرکت المان پره توان و زمان راه‌اندازی یک توربین بادی محور افقی سازه کوچک بدست آمد و نتایج با داده های توربین مینا یعنی NREL Phase VI مقایسه شد. برای این منظور از یک کد مدلسازی ایرودینامیک در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. پس از تایید مدل و اعتبارسنجی به بهینه‌سازی پره توربین بادی پرداخته شد. تابع هدف در این فرآیند عبارت از ضریب توان و زمان راه‌اندازی بود و ابزار یا شیوه بهینه سازی الگوریتم ژنتیک با چیدمان غیرغالب II انتخاب گردید. بعلاوه توزیع وتر و زاویه پیچش به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شدند و البته قیدهایی از جمله ابعاد توربین در این پروسه لحاظ شد. با بهینه‌سازی چند هدفه، یک مجموعه جواب بدست می‌آید که بنا به تصمیم طراح، هر یک از نقاط این جبهه پارتو را می‌توان انتخاب کرد. در این پژوهش، ۳ نقطه روی جبهه پارتو انتخاب شده که از این ۳ نقطه ۲ نقطه، ابتدا و انتهای

۲/۳۴۳	-۰/۶۲۷	۴/۷۱۵
۲/۵۶۲	-۰/۶۰۵	۳/۴۲۵
۲/۸۶۷	-۰/۵۷۴	۲/۰۸۳
۳/۱۷۲	-۰/۵۴۳	۱/۱۵
۳/۱۸۵	-۰/۵۴۲	۱/۱۱۵
۳/۴۷۶	-۰/۵۱۲	-۰/۴۹۴
۳/۷۸۱	-۰/۴۸۲	-۰/۰۱۵
۴/۰۲۳	-۰/۴۵۷	-۰/۳۸۱
۴/۰۸۶	-۰/۴۵۱	-۰/۴۷۵
۴/۳۹۱	-۰/۴۲	-۰/۹۲
۴/۶۹۶	-۰/۳۸۹	-۱/۳۵۲
۴/۷۸	-۰/۳۸۱	-۱/۴۶۹
۵/۰۲۹	-۰/۳۵۵	-۱/۸۱۵

Rankine vortex wake, *Renew. Energy*, Vol. 55, pp. 296–304, 2013.

[8] Bavanish B. and Thyagarajan K., Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 26, pp. 169–182, 2013.

[9] Chehoury A., Younes R., Ilinca A. and Perron J., Review of performance optimization techniques applied to wind turbines, *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 361–388, 2015.

[10] Lee M.-H., Shiah Y. C. and Bai, C.-J. Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 149, pp. 17–29, 2016.

[11] Ebert P. R. and Wood D. H., Observations of the starting behaviour of a small horizontal- axis wind turbine, ~ *Pergamon Renew. Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 245–257, 1997.

[12] Hampsey M. and Wood D.H., Designing small wind turbines for optimal starting and power extraction, *Wind Eng.*, Vol. 23, pp. 15–21, 1999.

[13] Mayerb D. H. W. C., Bechlya M.E., Hampsey M., the Starting Behaviour of a Small Horizontal- Axis Wind Turbine, *Renew. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 411–417, 2001.

[14] Kale S. A. and Varma R. N., Aerodynamic Design of a Horizontal Axis Micro Wind Turbine Blade Using NACA 4412 Profile, Vol. 4, No. 1, pp. 3–6, 2014.

[15] Karthikeyan N., Kalidasa Murugavel K., Arun Kumar S., and Rajakumar S., Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 42, pp. 801–822, 2015.

[16] Pourrajabian A., Nazmi Afshar P. A., Ahmadi zadeh M., and Wood D., Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade, *Renew. Energy*, Vol. 87, pp. 837–848, 2016.

[17] Yelmule M. M. and Vsj E. A., CFD predictions of NREL Phase VI Rotor Experiments in NASA / AMES Wind tunnel, Vol. 3, No. 2, 2013.

[18] Hand M. M. et al., Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns, No. December, 2001.

[19] Peterson P. and C. P.D., Timber for High Efficiency Small Wind Turbine Blades, *Wind Eng.*, Vol. 28, No. 1, pp. 87–96, 2004.

پیوست ۱- جداول توزیع وتر و زاویه پیش و ضرایب برآ و پسا
جدول پیوست ۱- توزیع وتر و زاویه پیش بر اساس شعاع برای

توربین NREL Phase IV

شعاع (m)	وتر (m)	زاویه پیش (°)
۰/۵۰۸	۰/۲۱۸	۰
۰/۶۶۰۴	۰/۲۱۸	۰
۰/۸۸۳۵	۰/۱۸۳	۰
۱/۰۰۸۵	۰/۳۴۹	۶/۷
۱/۰۶۷۵	۰/۴۴۱	۹/۹
۱/۱۳۳۵	۰/۵۴۴	۱۳/۴
۱/۲۵۷۵	۰/۷۳۷	۲۰/۰۴
۱/۳۴۳	۰/۷۲۸	۱۸/۰۷۴
۱/۵۱	۰/۷۱۱	۱۴/۲۹۲
۱/۶۴۸	۰/۶۹۷	۱۱/۹۰۹
۱/۹۵۲	۰/۶۶۶	۷/۹۷۹
۲/۲۵۷	۰/۶۳۶	۵/۳۰۸