



طراحی و بهینه سازی آیرودینامیکی پره توربین بادی مگاواتی بر پایه تئوری اندازه حرکت المان پره

حمید مرادتبیزی¹، امیر نجات^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، 1439955963، nejat@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 تیر 1394

پذیرش: 28 مرداد 1394

ارائه در سایت: 28 شهریور 1394

کلید واژگان:

طراحی آیرودینامیکی

تئوری اندازه حرکت المان پره

اصلاحات هندسی پره

بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک

حل سه بعدی به روش دینامیک سیالات

محاسباتی

چکیده

در این مقاله روشی کاربردی برای طراحی آیرودینامیکی پره توربین بادی مگاواتی بر پایه تئوری اندازه حرکت المان پره ارائه شده است. روش کار به این صورت است که ابتدا براساس تئوری اندازه حرکت المان پره ایده آل یک طراحی اولیه انجام گرفته و سپس روشی برای اصلاحات هندسی به منظور نزدیک کردن هندسه پره به شکل عملی و کاربردی ارائه شده است. مزیت این روش آن است که طراحی پره بر پایه تعداد متغیرهای ورودی کمتری انجام می گیرد و در عین حال نتایج به دست آمده از آن مطابقت خوبی با توربین مرجع در نظر گرفته شده، یعنی توربین 5 مگاواتی مربوط به مؤسسه ملی انرژی های نو ایالات متحده نشان می دهد. بنابراین استفاده از این روش می تواند برای دست یافتن به یک طراحی اولیه آیرودینامیکی، پایه ای مناسب باشد. در انتهای طراحی اولیه، یک بهینه سازی توسط روش الگوریتم ژنتیک و استفاده از خم بزر به روی منحنی زاویه پیچش و با در نظر گرفتن تولید انرژی سالانه به عنوان تابع هدف انجام شده است. در نهایت با استفاده از این روش یک توربین 2/5 مگاواتی با در نظر گرفتن شرایط منطقه لوتک در نزدیکی زابل در استان سیستان و بلوچستان طراحی شده و به منظور نشان دادن کارایی آن در شرایط واقعی، شبیه سازی و حل سه بعدی آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است و نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش اندازه حرکت المان پره مقایسه شده است که مطابقت قابل قبولی را نشان می دهد.

Aerodynamic design and optimization of a Megawatt wind turbine blade based on Blade Element Momentum theory

Hamid Moradtabrizi, Amir Nejat *

Department of Mechanical Engineering t, University of Tehran, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1439955963, Tehran, Iran, nejat@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 June 2015
Accepted 19 August 2015
Available Online 19 September 2015

Keywords:

Aerodynamic design
Blade Element Momentum (BEM) theory
blade geometric Modification
optimization using Genetic algorithm
3D CFD simulation

ABSTRACT

In this paper, a useful method proposed for aerodynamic design of Megawatt wind turbine blade based on Blade Element Momentum (BEM) theory. In this method first a preliminary design is done based on the ideal BEM and then a method have been offered for geometric modifications to approximate the geometry of the blade to a real and functionally one. The advantage of this method is that needed few design parameters that simplify the design procedure, however its results are in good agreement with 5MW NREL reference wind turbine assumed as validation case and show that with use of this method can achieve a good aerodynamic design. Then the twist angle has been optimized using Genetic algorithm and Bezier curve with annual energy production (AEP) as the goal function. At the end, a 2.5 MW wind turbine has been design based on this method with considering the Lootak site specifications in province of Sistan and Baloochestan. Then 3D model of the blade has been made and CFD simulation applied on that for showing the designed turbine operation in real conditions and comparison with BEM method. The results show that is acceptable compatibility between two analytical methods.

1- مقدمه

سطح زندگی در دنیا مصرف انرژی روز به روز افزایش پیدا می کند و این در حالی است که افزایش مصرف انرژی های فسیلی سبب مشکلات زیست محیطی فراوانی از جمله گرمایش زمین و آلودگی هوا می شود که اثرات جبران ناپذیری را در بر دارد. بنابراین در سال های اخیر توجه ویژه ای به استفاده از دیگر صورت های انرژی به خصوص انرژی های پاک و تجدیدپذیر¹ شده است که انرژی بادی یکی از مهم ترین و در دسترس ترین آن ها است و در

انرژی پایه و اساس توسعه اقتصادی و اجتماعی است و جامعه بشری در ابتدای قرن بیست و یکم با یکی از بزرگترین چالش های دوران یعنی حفظ منابع انرژی روبرو است. زندگی انسان امروزی به شدت به انرژی های فسیلی از جمله نفت و ذغال سنگ وابسته می باشد، در صورتی که بررسی ها نشان می دهند که منابع این نوع از انرژی تا چند دهه دیگر به اتمام خواهد رسید. از طرفی با افزایش روز افزون جمعیت و پیشرفت صنعتی جهانی و بالا رفتن

1- Renewable energy

Please cite this article using:

H. Moradtabrizi, A. Nejat, Aerodynamic design and optimization of a Megawatt wind turbine blade based on Blade Element Momentum theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 279-290, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

زاویه حمله⁷ ایرفویل در هر مقطع از طول پره را شامل می‌شود؛ تا بتواند با در نظر گرفتن شرایط محیطی خاص بیشترین بازدهی انرژی و توان تولیدی را داشته باشد.

در رابطه با طراحی و تحلیل آیرودینامیکی توربین‌های بادی کارهای مختلفی انجام شده است. به‌عنوان نمونه، صداقت و میرحسینی [3] یک توربین بادی 300 کیلوواتی را برای استان سمنان طراحی کرده اند. آن‌ها برای این کار پس از مشخص کردن شرایط آب و هوایی سمنان و در نظر گرفتن یک ایرفویل خاص، با استفاده از تئوری اندازه حرکت المان پره⁸ به صورت ایده‌آل و بدون در نظر گرفتن هیچ‌گونه تصحیحی به منظور نزدیک‌تر کردن نتایج به واقعیت و پوشش نقایص این نظریه، مشخصات آیرودینامیکی یک پره را ارائه کرده‌اند. اما همان‌طور که گفته شد این نتایج عملاً در توربین‌های واقعی غیرقابل استفاده است یا حداقل ممکن است برای توربین‌های کوچک مورد استفاده قرار گیرد، اما برای توربین‌های بزرگ قطعاً این گونه نخواهد بود. بومسوک و همکاران [4] نیز با استفاده از روش اندازه حرکت المان پره به طراحی یک توربین بادی 3 مگاواتی با شرایط آب و هوایی و عملکردی مورد نظرشان پرداخته‌اند. آن‌ها در محاسبات آیرودینامیکی تصحیح نوک پره را اعمال و چندین فرمول را برای محاسبه طول وتر با هم مقایسه کرده‌اند و در آخر تغییرات طول وتر خطی در نظر گرفته شده است. این حالت نیز نمی‌تواند به طور کامل عملیاتی باشد، آن‌ها در ادامه با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی پره طراحی شده را تحلیل کرده‌اند. در مقاله‌ای دیگر بومسوک و همکاران [5] با استفاده از روش اندازه حرکت المان پره و با در نظر گرفتن تصحیحات لازم نرم‌افزاری را طراحی کرده‌اند که برای شرایط آب و هوایی خاص و ایرفویل‌های معلوم، تغییرات طول وتر و زاویه پیچش ایرفویل‌ها در راستای طول پره را با در نظر گرفتن بیشترین ضریب توان در هر مقطع از پره به عنوان تابع هدف، به دست می‌دهد. سپس آن‌ها برای شرایط توربین 5 مگاواتی موسسه انرژی‌های نوی آمریکا⁹ توربینی طراحی و با توربین اصلی مقایسه کرده‌اند که البته تغییرات طول وتر در راستای پره دچار نوسان و پستی و بلندی زیادی شده است که عملاً ساخت چنین پره‌ای را غیرممکن می‌سازد. به‌علاوه چگونگی اعمال تصحیح و تغییر طول وتر و زاویه پیچش توضیح داده نشده است.

در این مقاله روشی به عنوان مبنای طراحی آیرودینامیکی شکل پره یک توربین باد مگاواتی بر پایه تئوری اندازه حرکت المان پره ارائه شده است. طراحی آیرودینامیکی انجام شده می‌تواند پایه و اساسی برای جنبه‌های دیگر طراحی توربین باشد و روش ارائه شده به گونه‌ای است که نتایج حاصل به حالت واقعی و قابل بهره‌برداری به صورت عملی نزدیک بوده و تنها صرفاً از تئوری ایده‌آل استفاده نشده است و در نهایت کم‌ترین نیاز به بهینه‌سازی را دارد. برای مقایسه نتایج روش ارائه شده، توربین 5 مگاواتی مربوط به مؤسسه ملی انرژی‌های نوی ایالات متحده آمریکا به‌عنوان مرجع و نمونه در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی و شرایط کاری این توربین و نیز نتایج عددی آن در مرجع [6] منتشر شده است و در بخش بعد برخی از مشخصات هندسی و آیرودینامیکی آن معرفی شده‌اند.

از آن‌جا که ایران یکی از کشورهایی است که در زمینه انرژی بادی پتانسیل خوبی دارد. در سال‌های اخیر، به‌منظور کاهش وابستگی به نفت توجه ویژه‌ای به این نوع انرژی شده و سعی شده است تا فرآیندهای طراحی و

مقایسه با بسیاری از انواع انرژی‌های نو مانند انرژی خورشیدی و یا زمین گرمایی بسیار ارزان‌تر می‌باشد. از این‌رو بسیاری از کشورها به استفاده از این انرژی روی آورده‌اند؛ به طور مثال کشور دانمارک قرار است تا سال 2025 بیش از 50% برق مصرفی خود را از این طریق تأمین کند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت جهانی استفاده از انرژی باد تا سال 2014 تا میزان 409 گیگاوات افزایش خواهد یافت که رشد سالیانه حدود 20/9% را نشان می‌دهد [1].

بنابراین طراحی توربین‌هایی با ظرفیت بالا که بتوان هر چه بیشتر از باد موجود انرژی جذب کنند در حالی که هزینه کمتری داشته باشند اهمیت ویژه‌ای دارد. این موضوع خود را با بزرگ‌تر شدن توربین‌ها طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد، به‌طوری که در سال‌های اخیر اندازه توربین‌های بادی از توان حدود 50 کیلووات و قطر 10 الی 15 متر به توان حدود 5 مگاوات و قطر حدود 126 متر افزایش پیدا کرده است و روز به روز هم در حال افزایش است. از آن‌جا که توان تولید شده با توان دوم شعاع پره و یا به‌عبارتی مساحت مؤثر روتور رابطه مستقیم دارد، با افزایش قطر روتور سطح مؤثر پوشش داده شده در برابر باد افزایش می‌یابد و در نتیجه توان تولیدی نیز افزایش پیدا می‌کند. البته با افزایش قطر پره‌ها هزینه مواد اولیه و ساخت نیز تقریباً با توان دوم شعاع افزایش پیدا می‌کند؛ اما از طرفی با افزایش ارتفاع، سرعت متوسط باد نیز زیاد می‌شود، بنابراین توربین در معرض باد شدیدتری قرار می‌گیرد و از آن‌جا که توان تولید شده با توان سوم سرعت باد رابطه مستقیم دارد، تأثیر به‌سزایی در افزایش توان تولیدی دارد. با توجه به آنچه که گفته شد به‌طورکلی با بزرگ‌تر شدن توربین هزینه مصرفی به ازای واحد انرژی تولید شده یا به عبارتی هزینه انرژی¹ کاهش پیدا می‌کند که همین موضوع سبب رواج استفاده از توربین‌های مگاواتی شده است [2]. امروزه بیشتر توربین‌های مگاواتی مورد استفاده در خشکی² در حدود 2 الی 3 مگاوات توان دارند و توربین‌های 5 مگاواتی در دریا نصب می‌شوند³، اما از جهت شکل پره و طراحی آیرودینامیکی با هم تفاوتی ندارند.

یک توربین بادی، مجموعه‌ای پیچیده شامل بخش‌های متعددی است که در حین پیچیدگی ارتباط باید با هماهنگی کامل با یکدیگر کار کنند. به علاوه توربین باید برای هر منطقه آب و هوایی و محیطی و به عبارتی شرایط یک سایت خاص سازگار شود. این موارد طراحی یک توربین بادی را به یک فرآیند پیچیده تبدیل می‌کند که در آن باید میان عوامل زیادی تعادل برقرار شده و تصمیم‌های زیادی گرفته شود تا به کارایی و بهره‌وری اقتصادی رسید. فرآیند طراحی یک توربین بادی یک فرآیند چند جانبه بوده و بخش‌های مختلفی از مهندسی از جمله آیرودینامیک، مقاومت مصالح، علم مواد، برق، کنترل و ساخت و تولید را در بر می‌گیرد. اما به یقین می‌توان ادعا کرد که آیرودینامیک نقطه آغازین فرآیند طراحی بوده و اساسی‌ترین نقش را در آن دارد، چرا که از یک سو در تعیین انرژی تولیدی سالیانه⁴ نقش مستقیم دارد و از سویی دیگر نیروهای آیرودینامیکی وارده بر پره، بر روی نتایج سازه‌ای و اقتصادی تأثیرگذار است. طراحی آیرودینامیکی یک توربین بادی عبارت است از به دست آوردن یک هندسه مناسب از جمله قطر، تعداد پره و مهم‌تر از همه شکل پره که نوع ایرفویل‌ها، ضخامت، طول وتر⁵ و زاویه قرارگیری آن‌ها نسبت به صفحه چرخش روتور که زاویه پیچش⁶ نامیده شده و یا به عبارتی

1- Cost Of Energy (COE)
2- Onshore
3- Offshore
4- Annual Energy Production (AEP)
5- Chord length
6- Twist angle

7- Angle of attack

8- Blade Element Momentum (BEM)

9- National Renewable Energy Laboratory (NREL)

3- طراحی آیرودینامیکی

روش‌های طراحی نظری و به عبارتی ایده‌آل متعددی که بر پایه تئوری اندازه حرکت المان پره هستند در مراجع مختلفی در دسترس است [7-9]. لازم به ذکر است که روش اندازه حرکت المان کلاسیک در مراجع ذکر شده در دسترس بوده و به همین دلیل از توضیحات بیشتر در رابطه با آن خودداری شده است. همان‌طور که در مقدمه گفته شد و به چند نمونه از کارهای انجام شده در رابطه با طراحی آیرودینامیکی پره توربین اشاره شد، در بیشتر کارها تنها به طراحی ایده‌آل اکتفا شده [3] و بیشتر مربوط به توربین‌های کوچک هستند. در برخی که مربوط به توربین‌های مگاواتی می‌شوند، تصحیحاتی انجام شده است [4, 10, 5] که البته معمولاً در یک مرحله انجام شده و ناهمگونی‌هایی در هندسه وجود دارد. اما روشی که در این مقاله از آن استفاده شده است، با آنچه که معمولاً از آن استفاده می‌شود کمی متفاوت است. شکل 2 نمایی از روند کلی طراحی مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد که در ادامه هر بخش از آن توضیح داده شده است.

3-1- طراحی ایده آل

نیروهای آیرودینامیکی وارد بر یک مقطع از پره در شکل 3 نشان داده شده است. با صرف‌نظر از نیروی پسا، رابطه بین ضریب القایی محوری⁷، a ، با ضریب القایی مماسی⁸، a' ، و نسبت سرعت محلی⁹، λ_r ، از هم مستقل شده و به‌صورت روابط (1) و (2) در خواهد آمد.

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (1)$$

$$\lambda_r = (4a-1) \sqrt{\frac{1-a}{1-3a}} \quad (2)$$

نسبت سرعت محلی برای یک المان از پره در شعاع r ، با توجه به سرعت باد و سرعت گردش روتور به صورت رابطه (3) تعریف می‌شود:

$$\lambda_r = \frac{r\omega}{V_\infty} \quad (3)$$

بورتون در مرجع [7] نشان داده است که تأثیر نادیده گرفتن نیروی پسا در فاز طراحی بسیار ناچیز است. البته این خطا به دلیل ماهیت حل تکرار شونده روش طراحی ارائه شده و همچنین وارد شدن نیروی پسا در محاسبه نتایج آیرودینامیکی و چک کردن شرایط همگرایی تقریباً از بین خواهد رفت. با مشخص شدن ضرایب القایی، زاویه پیچش ایده آل، θ ، با توجه به شکل 3 توسط روابط (4) و (5) قابل محاسبه است.

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)}{(1+a')\lambda_r} \right] \quad (4)$$

$$\theta = \phi - \alpha_{ideal} \quad (5)$$

که در این‌جا، ϕ ، زاویه جریان، یعنی زاویه بردار سرعت نسبی باد و صفحه روتور است. زاویه حمله ایده‌آل، α_{ideal} ، نیز زاویه‌ای است که در آن ایرفویل بیشترین بازدهی آیرودینامیکی را دارد. به عبارتی در این زاویه نسبت ضریب نیروی برآ به نسبت ضریب نیروی پسا بیشینه خواهد بود.

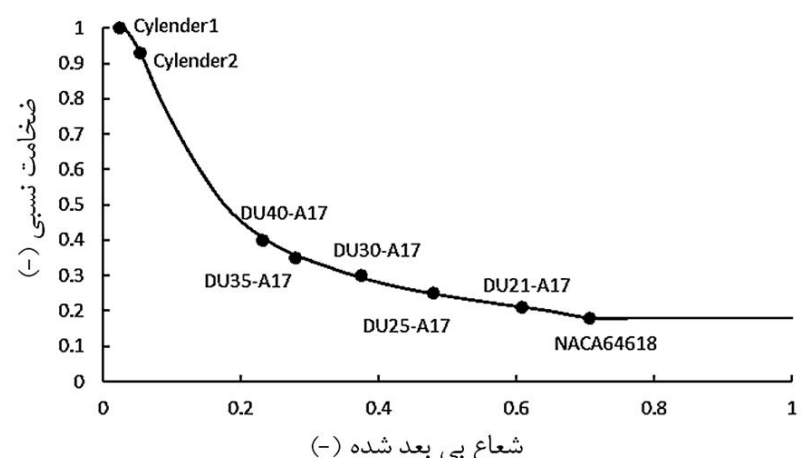
بنابر آنچه گفته شد اکنون روشی در دست است که زاویه پیچش هر المان از پره را براساس فاصله از مرکز روتور محاسبه می‌کند. تنها چیزی که باقی‌مانده است یافتن طول وتر هر المان در راستای طول پره است. با استفاده از تئوری دیسک عملگر¹⁰ نیروی عمود بر صفحه روتور که بر اثر افت فشار در این صفحه ایجاد می‌شود برای یه المان حلقه‌ای به ضخامت dr توسط رابطه (6) به دست می‌آید.

ساخت توربین، به‌خصوص توربین‌های مگاواتی بومی‌سازی شود. عنوان این مقاله نیز در همین راستا انتخاب شده است. بنابراین پس از شرح روش و مقایسه نتایج به دست آمده از آن با توربین مرجع 5 مگاواتی، یک توربین 2/5 مگاواتی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی لوئک در استان سیستان و بلوچستان طراحی شده است. در نهایت به منظور نشان دادن کارایی توربین طراحی شده در شرایط واقعی، شبیه‌سازی و حل سه‌بعدی آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی¹ انجام شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش اندازه حرکت المان پره مقایسه شده است.

2- مرجع طراحی، مشخصات توربین 5 مگاواتی

همان‌طور که گفته شد، در این مقاله طراحی آیرودینامیکی براساس توربین بادی 5 مگاواتی مرجع [6] مربوط به مؤسسه ملی انرژی‌های نو ایالات متحده آمریکا انجام گرفته است. این توربین دارای روتوری با قطر 126 متر و هاب² 3 متر بوده و به عبارتی طول پره 61/5 متر است. در این توربین از ایرفویل‌های دانشگاه دلف³ در قسمت اصلی پره و از ایرفویل ناکا⁴ در بخش نزدیک به نوک استفاده شده است. به علاوه قسمت متصل به هاب به شکل دایره است و به تدریج به شکل ایرفویل در می‌آید. شکل 1 تغییرات ضخامت نسبی در راستای طول پره و همچنین محل قرارگیری انواع ایرفویل‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. ضخامت نسبی به صورت، ضخامت ایرفویل در هر مقطع، t ، تقسیم بر طول وتر در همان مقطع، L_c ، تعریف می‌شود. شعاع نسبی نیز شعاع آن مقطع، r ، تقسیم بر شعاع پره، R ، می‌باشد. البته لازم به ذکر است که تنها اطلاعات نقاط رسم شده در مرجع مربوطه آمده است و بقیه نقاط نمودار با استفاده از آن‌ها رسم شده است. همچنین مشخصات آیرودینامیکی ایرفویل‌ها شامل ضریب برآ⁵ و ضریب پسا⁶ برای زوایای حمله مختلف که برای تحلیل آیرودینامیکی پره مورد نیاز است نیز در مرجع [6] در دسترس است. به‌علاوه سرعت باد نقطه کار توربین که در آن بیشترین توان را تولید می‌کند 11/4 متر بر ثانیه و سرعت دورانی چرخش روتور در این حالت 12/1 دور در دقیقه است.

در طراحی انجام شده در بخش بعد، ایرفویل‌ها و نیز جایگاه هر کدام به همان صورتی که در توربین مرجع 5 مگاواتی استفاده و در شکل 1 نشان داده شده است به کار رفته است. به علاوه شعاع توربین و ضخامت نسبی ایرفویل‌ها نیز تغییر داده نشده است و تنها طول وتر و زاویه پیچش به عنوان متغیر در طول پره در نظر گرفته شده‌اند.



شکل 1 تغییرات ضخامت نسبی ایرفویل در راستای طول پره و محل قرارگیری ایرفویل‌های مختلف از مرکز روتور در توربین مرجع 5 مگاواتی و توربین طراحی شده

- 1- Computational Fluid Dynamics (CFD)
- 2- Hub
- 3- Delft University (DU)
- 4- NACA
- 5- Lift coefficient (C_l)
- 6- Drag coefficient (C_d)

7- Axial induction factor
8- Tangential induction factor
9- Local speed ratio
10- Actuator disk theory

که در آن σ ، سختی یا جامدیت روتور¹ است و به عنوان نسبت بخشی از المان حلقوی که توسط پره ها اشغال شده است تعریف می شود؛ رابطه (8).

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (8)$$

و C_a ضریب نیروی محوری است که در رابطه (9) آمده است.

$$C_a = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (9)$$

در این جا B تعداد پره های توربین است، به علاوه C_l و C_d نیز به ترتیب ضریب برآ و پسا هستند.

با فرض حالت کاری پایا²، هر دو نیروی محاسبه شده توسط روابط (6) و (7) باید با هم مساوی باشند. با صرف نظر کردن از نیروی پسا، این دو معادله با هم ترکیب شده و عبارتی برای سختی روتور به صورتی که در رابطه (10) دیده می شود به دست می آید.

$$\sigma = \frac{4a \sin\phi}{(1-a)C_l} \frac{\sin\phi}{\cos\phi} \quad (10)$$

با جایگزینی $\tan\phi$ از رابطه (4) و با توجه به تعریف سختی روتور، طول وتر ایده آل به صورت رابطه (11) به دست می آید.

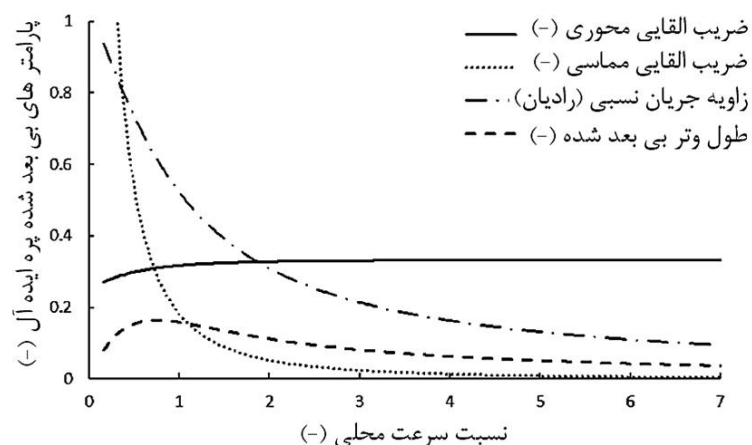
$$L_c = \frac{8\pi a V_\infty \sin\phi}{(1+a')B\omega C_l} \quad (11)$$

بنابراین اکنون هندسه ایده آل به طور کامل با استفاده از روابط (1) تا (5) و نیز رابطه (11) قابل محاسبه است. نمونه ای از یک هندسه ایده آل برحسب نسبت سرعت محلی در شکل 4 نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که طول وتر بی بعد شده از تقسیم طول وتر بر شعاع پره به دست می آید.

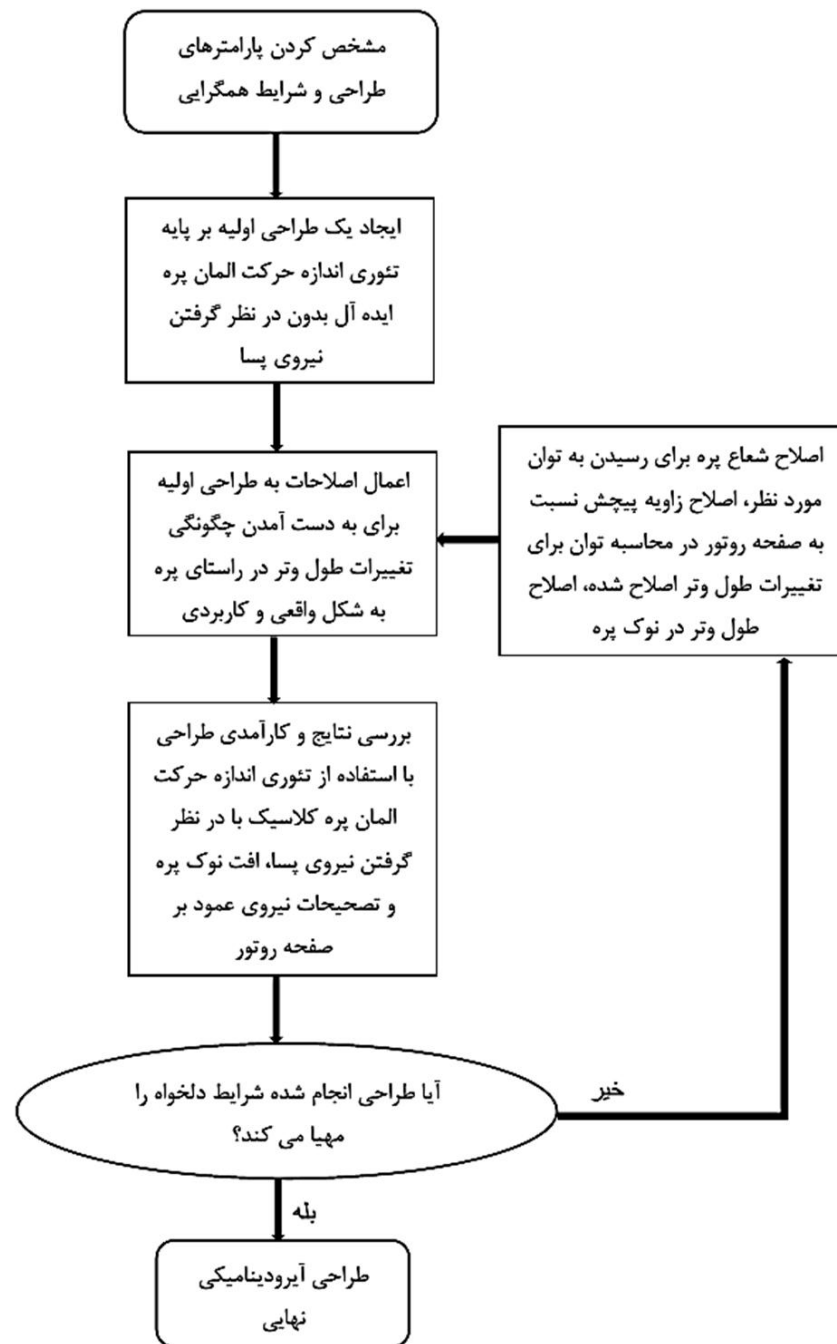
3-2- اصلاح طول وتر قسمت اصلی پره

از شکل 4 می توان مشاهده کرد که طول وتر ایده آل در نزدیکی ریشه³ پره بسیار بزرگ می شود. دلیل این امر آن است که سرعت نسبی باد در این ناحیه بسیار کم است. از آن جا که در طراحی ایده آل نیروهای مماسی وارد بر پره در تمام المان ها به طور مساوی پخش می شود، بنابراین برای جبران کمی سرعت، سطح روبروی باد و در نتیجه طول وتر افزایش یافته است.

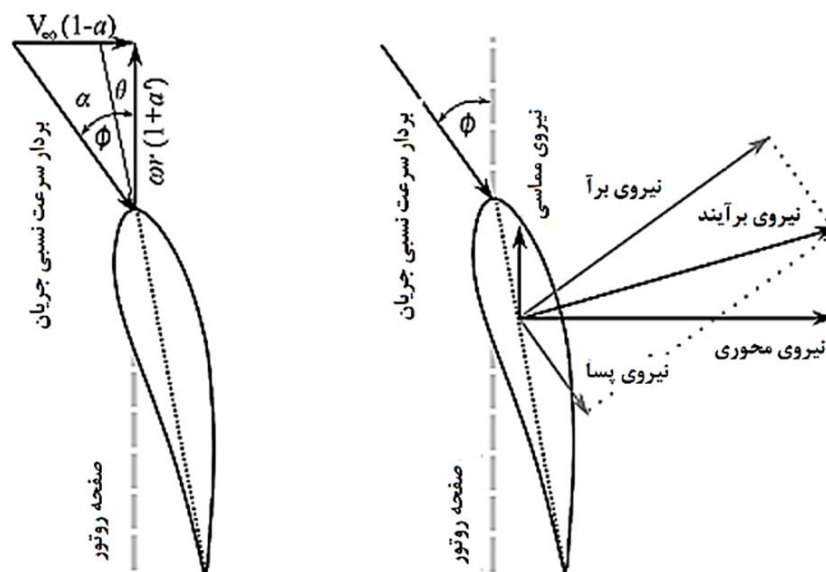
برای داشتن یک پره واقعی و کاربردی یک توربین بادی مگاواتی مدرن، طول وتر باید کاهش یابد. در این مقاله روشی ساده و قابل کنترل برای رسیدن به این مقصود ارائه شده است که در ادامه شرح داده می شود. در این روش پره به سه بخش اصلی تقسیم می شود و همان طور که در شکل 5 نشان داده شده است با چهار نقطه r_{1-4} از هم جدا شده اند. r_1 نقطه اتصال پره به هاب است و r_4 نوک پره را مشخص می کند. r_2 نقطه ای است که طول وتر در آن بیشینه بوده و قسمت اصلی پره از این نقطه آغاز می شود و r_3 نقطه ای از طراحی است که طول وتر بهینه و به عبارتی برابر با طول وتر ایده آل در آن نقطه است. طول l_2 که در شکل 5 مشخص شده است، از امتداد خط رسم شده



شکل 4 پارامترهای یک پره ایده آل



شکل 2 روند کلی طراحی مورد استفاده در این مقاله



شکل 3 نیروهای وارد شده به یک مقطع از پره به همراه سرعت های نسبی باد

$$dT = 4\pi\rho V_\infty^2 a(1-a)rdr \quad (6)$$

به همین ترتیب با استفاده از تئوری اندازه حرکت المان پره کلاسیک، مؤلفه محوری نیروهای آیرودینامیکی وارد بر روتور برای المانی حلقوی مانند قبل به صورت رابطه (7) قابل محاسبه است.

$$dF_a = \sigma\pi\rho \frac{V_\infty^2(1-a)^2}{\sin^2\phi} C_a dr \quad (7)$$

1- Rotor solidity
2- Steady state
3- Root

میزان کاهش معمولاً از مدلی که به نام "ضریب تصحیح پرنتل"² مشهور است استفاده می‌شود که در رابطه (12) آمده است [11].

$$F = \frac{4}{\pi^2} \left(\cos^{-1} \left[e^{-\frac{2}{Z} \frac{R_{tip}-r}{r \sin \theta}} \right] \cos^{-1} \left[e^{-\frac{2}{Z} \frac{r-R_{hub}}{r \sin \theta}} \right] \right) \quad (12)$$

با اعمال ضریب تصحیح پرنتل، ضریب نیروی محوری جدید با توجه به ضریب القایی محوری که همان مقدار ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود، به شکل رابطه (13) قابل محاسبه است.

$$C_{a,new} = \frac{4F \sin^2 \theta}{\sigma \left(\frac{1}{a_{ideal}} - 1 \right)} \quad (13)$$

به دلیل آن که تغییرات در میزان ضریب نیروی پسا بسیار کمتر از ضریب نیروی برآ در ناحیه خطی است، ضریب نیروی جدید که مربوط به اعمال ضریب تصحیح پرنتل است را می‌توان با توجه به رابطه (9) به صورت رابطه (14) تخمین زد.

$$C_{l,new} = \frac{C_{a,new} - C_d \sin \theta}{\cos \theta} \quad (14)$$

با در نظر گرفتن شیب تغییرات خطی برای $\partial C_l / \partial \alpha$ ، تغییرات در زاویه حمله به صورت رابطه (15) خواهد بود.

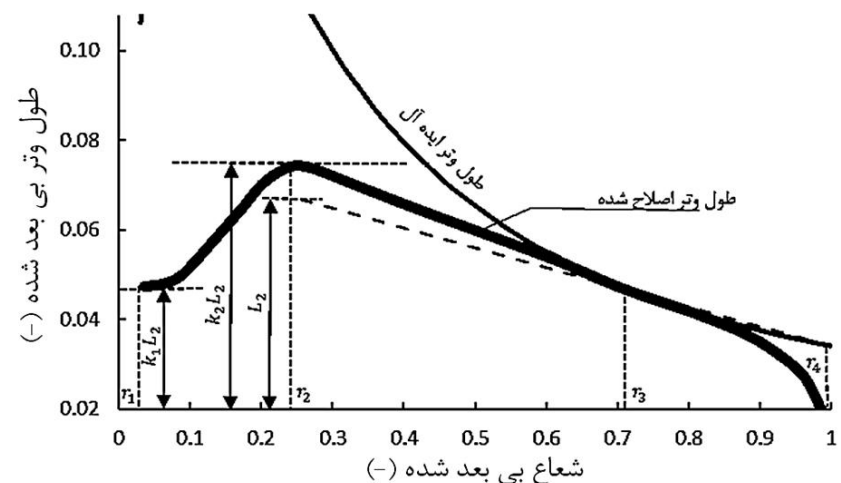
$$\Delta \alpha = \frac{\Delta C_l}{\partial C_l / \partial \alpha} = \frac{C_{l,new} - C_l}{\partial C_l / \partial \alpha} \quad (15)$$

و تصحیح زاویه پیچش به صورت $\theta_{new} = \theta - (\alpha_{ideal} + \Delta \alpha)$ ، با توجه به رابطه (5) به دست می‌آید. لازم به ذکر است که این تصحیحات برای قسمت اصلی پره صورت گرفته و در یک فرآیند تکراری برای طراحی پره عمل می‌کند.

3-4- اصلاح ریشه و نوک پره

بخش‌های ریشه و نوک پره برای طراحی نیاز به توجه ویژه‌ای دارند. قسمت ریشه پره که به هاب متصل است به دلیل مسائل سازه‌ای و فنی معمولاً شکلی استوانه‌ای دارد. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، قطر این استوانه به اندازه نسبتی از طول وتر بیشینه تعیین می‌شود و البته بستگی به بخش‌های دیگر توربین به خصوص تجهیزات هاب دارد. قسمت‌های دیگر ریشه را می‌توان از میان‌یابی بین دو نقطه r_1 و r_2 و براساس تغییرات ضخامت در راستای طول پره، شکل 1، و نیز شرایط مماسی در دو نقطه تعیین کرد به صورتی که در دو انتها شیب نمودار طول وتر صفر خواهد بود.

طراحی نوک پره را می‌توان ترکیبی از آیرودینامیک، آیروآکوستیک³ و مسائل سازه‌ای که به‌منظور کنترل جابجایی نوک پره⁴ در نظر گرفته می‌شود دانست. به طور کلی برای رسیدن به یک طراحی خوب و بهینه نوک پره به محاسبات و ملاحظات بسیار بیشتر از تئوری اندازه حرکت المان پره نیاز است؛ اما در این مقاله نوک پره بر این اساس طراحی و اصلاح می‌شود که یک توزیع نیروی واقعی و مناسب بر روی پره اعمال شود. با مشاهده شکل 6 دیده می‌شود که در نزدیکی نوک پره مقدار ضریب القایی محوری به شدت زیاد شده و حاصل آن این است که نیروی محوری یا به عبارتی عمود بر صفحه روتور میزان گشتاور خمشی زیادی به پره وارد می‌کند و باعث جابجایی و تغییر شکل زیاد پره در این جهت می‌شود. این موضوع علاوه بر این که به سازه توربین آسیب وارد می‌کند، سبب کاهش راندمان و کارآمدی آیرودینامیکی توربین نیز می‌شود. برای کاهش ضریب القایی محوری، می‌توان یکی از دو متغیر θ یا L_c را کاهش داد. این بار زاویه پیچش ثابت نگه داشته شده و از طول وتر کاسته می‌شود. این کار با توجه به رابطه (13) و بازنویسی



شکل 5 نمایی کلی از روش اصلاحی برای طول وتر در این مقاله به منظور واقعی و کاربردی کردن هندسه پره توربین

بین دو نقطه از نمودار طول وتر ایده‌آل در نقاط r_3 و r_4 در نقطه‌ای به دست می‌آید که طول وتر بیشینه در آن نقطه در نظر گرفته شده است. بنابراین بیشینه طول وتر در نقطه r_2 به صورت $L_{c,max} = k_2 l_2$ خواهد بود که در آن k_2 یک ضریب دلخواه است و در واقع به عنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شود. طول وتر اصلاح شده نیز به صورتی است که از نقطه r_3 به بعد همان مسیر حالت ایده‌آل را دنبال می‌کند. این نقطه نیز یکی دیگر از متغیرهای طراحی است و باید انتخاب شود. اصلاح قسمتی از پره که بین نقاط r_2 و r_3 قرار دارد هم با استفاده از میان‌یابی و با توجه به شرایط مماسی در دو انتهای آن تعیین می‌شود؛ به صورتی که در نقطه r_2 باید شیب نمودار صفر و در نقطه r_3 باید برابر با شیب این نقطه در نمودار ایده‌آل باشد. در رابطه با طراحی قسمت نوک و ریشه پره در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

3-3- اصلاح زاویه پیچش قسمت اصلی پره

از شکل 5 مشاهده می‌شود که طول وتر اصلاح شده در قسمت داخلی پره به طور قابل توجهی نسبت به حالت ایده‌آل کاهش پیدا کرده است. این تغییر به آن معناست که اگر زوایای حمله در هر مقطع در همان مقدار ایده‌آل قبلی باقی بمانند، از گشتاور و توان تولیدی نیز به میزان چشم‌گیری کاسته خواهد شد. پس برای جبران کاهش سطحی که در برابر باد قرار می‌گیرد نیاز است که زاویه پیچش و در نتیجه زاویه حمله در هر سطح مقطع نیز تصحیح شده تا بتوان بیشترین بازدهی را از توربین طراحی شده به دست آورد. به همین منظور زاویه پیچش باید طوری تغییر یابد که زاویه حمله افزایش پیدا کند و در نتیجه نیروی برآ نیز افزایش یافته و در اثر آن انرژی دریافتی توربین بیشتر شود. به عبارتی دیگر ضریب القایی محوری به مقدار ایده‌آل آن که در شکل 4 نشان داده شده است نزدیک می‌شود.

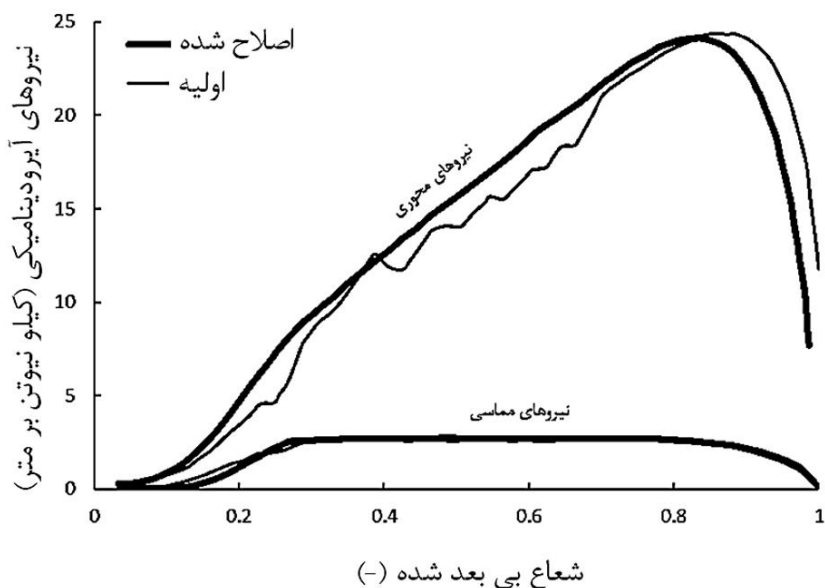
با افزایش زاویه حمله، ضریب نیروی پسا نیز افزایش می‌یابد اما در نزدیکی زاویه حمله ایده‌آل میزان افزایش در ضریب نیروی برآ به مراتب بیشتر از ضریب نیروی پسا خواهد بود. البته این نکته بسیار مهم است که افزایش در زاویه حمله نباید فراتر از ناحیه خطی نمودار ضریب برآ برحسب زاویه حمله رود و وارد ناحیه غیرخطی یا استال¹ شود. به علاوه باید به این نکته نیز توجه کرد که حل ایده‌آل براساس تئوری دیسک عملگر بوده و این تئوری تأثیر تعداد محدود پره‌ها را در نظر نمی‌گیرد بلکه با فرض بی‌شمار بودن پره‌ها بنا شده است. بنابراین مقدار نیروی برآی واقعی بسیار کمتر از حالت ایده‌آل است چرا که سطح مؤثر روتور کم می‌شود. برای محاسبه این

2- Prandtl's correction factor

3- Aero-acoustics

4- Tip deflection

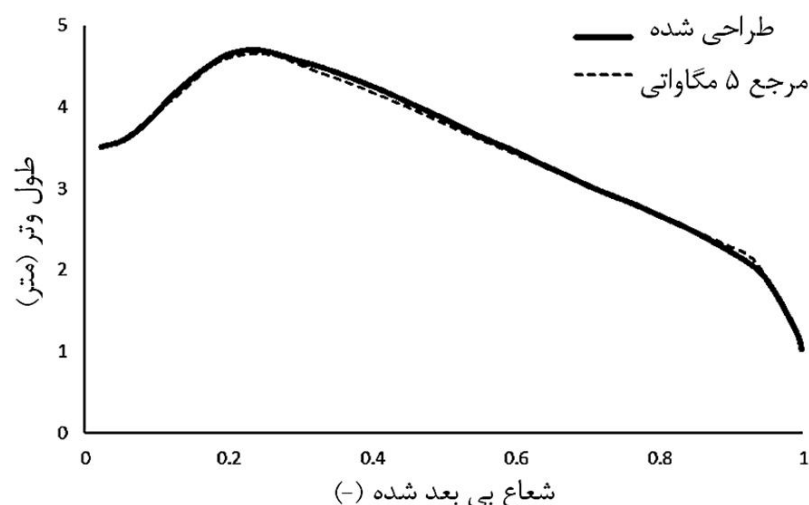
1- stall



شکل 7 مقایسه نیروهای آیرودینامیکی محوری و مماسی در راستای طول پره قبل و بعد از اصلاحات بخش های 3-3 و 4-3

جدول 1 مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای تعریف شده برای اصلاح طول وتر

متغیر طراحی	مقدار در نظر گرفته شده
r_2	0/24
r_3	0/73
k_1	0/70
k_2	1/08



شکل 8 مقایسه میان تغییرات طول وتر برای توربین طراحی شده و توربین مرجع 5 مگاواتی

تضمینی برای بهینه بودن تغییرات زاویه پیمایش در طول پره وجود ندارد، به همین دلیل در انتهای طراحی باید برای زاویه پیمایش یک بهینه سازی انجام پذیرد. تابع هدف های گوناگونی را می توان در نظر گرفت، اما همان طور که گفته شد معمولاً طراحی ها برای رسیدن به بیشترین انرژی دریافتی سالیانه صورت می پذیرد. برای این منظور به اطلاعات آماری آب و هوایی منطقه ای که توربین در آن نصب می شود نیاز است. شرایط آب و هوایی توربین طراحی شده، همان شرایط آب و هوایی توربین مرجع در نظر گرفته شده است [12]. تولید انرژی سالیانه از رابطه (18) محاسبه می شود.

$$AEP = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{2} (P(V_{i+1}) + P(V_i)) \cdot f(V_i < V_o < V_{i+1}) \cdot 8760 \quad (18)$$

که در این رابطه f ، تابع احتمال چگالی¹ است که در این جا از تابع تغییرات باد ویبول² استفاده شده است و در رابطه (19) آمده است. به علاوه P نشان دهنده توان تولیدی توربین در سرعت باد مورد نظر است.

آن به شکل رابطه (16) انجام می پذیرد.

$$\sigma_{new} = \frac{4F \sin^2 \phi}{C_a \left(\frac{1}{a_{ideal}} - 1 \right)} \quad (16)$$

و از تعریف سختی روتور و با توجه به رابطه (8) طول وتر جدید از رابطه (17) به دست می آید.

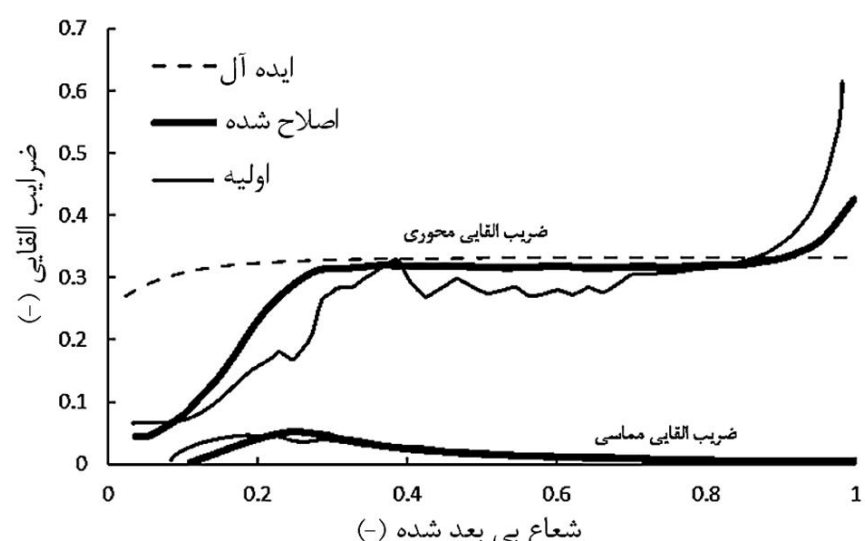
$$L_{cnew} = \frac{2\pi r \sigma_{new}}{Z} \quad (17)$$

به دلیل آن که توان تولیدی روتور به شکل نوک پره حساس است، این اصلاح باید در یک فرایند تکراری حل اعمال شود. لازم به ذکر است که این اصلاح تنها از نقطه ای که ضریب القایی محوری از مقدار ایده آل آن فراتر می رود اعمال شده و در عوض اصلاح زاویه پیمایش نباید برای این بخش صورت بگیرد. شکل 6 ضرایب القایی محوری و مماسی و شکل 7 نیروهای آیرودینامیکی محوری و مماسی را که بر هر المان طول پره وارد می شود را قبل و پس از طی مراحل که در بخش 3-3 و 4-3 شرح داده شد، در راستای طول پره نشان می دهند.

4- نتایج طراحی و بهینه سازی

با استفاده از فرآیند طراحی ارائه شده در بخش قبل، اکنون یک روش ساده برای طراحی آیرودینامیکی واقعی و کاربردی پره توربین بادی در دست است. در این جا پارامترهای طراحی طول وتر که در ذیل شکل 5 ذکر شد، طوری انتخاب شدند که نمودار طول وتر در راستای طول پره برای توربین طراحی شده با نمودار طول وتر توربین مرجع 5 مگاواتی ذکر شده در بخش 2 بیشترین مطابقت را داشته باشد. جدول 1، تغییرات طول وتر در راستای طول پره برای هر دو توربین مرجع و طراحی شده در شکل 8 رسم شده است که به خوبی توانایی روش استفاده شده برای تولید هندسه پره را نشان می دهد به طوری که با یک توربین واقعی ساخته شده قابل مقایسه است. معمولاً تغییرات طول وتر در راستای طول پره نتیجه محاسبات دقیق بهینه سازی و ایجاد تعادل میان تولید انرژی سالیانه و نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سازه پره است؛ به همین دلیل در این جا از توربین مرجع مؤسسه ملی انرژی های نو ایالات متحده آمریکا استفاده شده تا مبنایی خوب برای مقایسه خواص سازه ای پره نیز باشد. به علاوه از شکل 8 مشاهده می شود که طراحی انجام شده برای نوک پره نیز به خوبی روند توربین مرجع را دنبال می کند.

شکل های 6 و 7 نشان می دهند که روش اصلاح زاویه پیمایش باعث شده است تا نمودار تغییرات ضرایب القایی بهبود یابد و به تبع آن ها نیروهای آیرودینامیکی به صورت یکنواخت و مناسب تری در طول پره وارد شوند. این روش طراحی ضریب توان مناسب و بالایی را برای توربین به دست می دهد اما



شکل 6 مقایسه ضرایب القایی محوری و مماسی در راستای طول پره قبل و بعد از اصلاحات بخش های 3-3 و 4-3

1- Probability density function
2- Weibull wind distribution

شده است که تئوری آن در مرجع [14] در دسترس است. نتایج نشان می-دهند که بهینه سازی زاویه پیچش تأثیر بسیار کمی داشته به نحوی که تقریباً تغییری در انرژی تولیدی سالیانه ایجاد نشده است. البته این موضوع برای یک توربین با شیوه کنترل "سرعت متغیر-زاویه چرخش متغیر"⁹ جای تعجب ندارد، چرا که در این روش کنترل، در سرعت های باد کمتر از سرعت طراحی¹⁰، سرعت دوران و زاویه چرخش توربین طوری تغییر می یابد که نسبت سرعت نوک پره و در نتیجه بازدهی توربین ثابت باقی بماند.

برای توربین های با سرعت ثابت¹¹ این موضوع صدق نمی کند و برای توربین هایی که دارای شیوه کنترلی استال¹² هستند، زاویه پیچش باید طوری اصلاح شود که میزان کاهش نیرو یا میرایی آیرودینامیکی¹³ را که توسط تغییر زاویه حمله ایرفویل و افزایش نیروی پسای فشاری صورت می گیرد، افزایش دهد. تفاوت اصلی و اساسی میان طراحی اولیه و بهینه شده را می-توان در فرآیند ساخت آن ها دانست. به دلیل آن که تغییر زاویه پیچش در توربین بهینه شده نسبت به طراحی اولیه یکنواخت تر و نرم¹⁴ تر است، مسلماً ساختن آن ساده تر و دقیق تر خواهد بود. اما با تغییر دوباره زاویه پیچش اولیه، از یکنواختی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره که در شکل 7 برای توربین اولیه نمایش داده شد، کاسته می شود. بنابراین همان طور که قبلاً گفته شد طراحی توربین فرآیندی چند بعدی است و برای طراحی نهایی یک توربین، باید شرایط سازه ای و اقتصادی و ساخت و تولیدی، هم زمان با هم در نظر گرفته شود. اما به هر ترتیب آیرودینامیکی انجام شده پایه و اساس طراحی بوده و این در حالی است که نتایج حاصل شده به شرایط کاربردی و عملی بسیار نزدیک است.

5- طراحی آیرودینامیکی توربین بادی 2/5 مگاواتی در سیستان

ایران به دلیل مجاورت با دریا و همچنین وجود رشته کوه های البرز و زاگرس، کشوری بادخیز محسوب می گردد و نواحی بسیاری از ایران مناسب نصب و احداث نیروگاه بادی هستند. نقشه بادی ایران در مرجع [15] آمده است. منطقه لوتک در نزدیکی زابل در استان سیستان و بلوچستان یکی از مناطقی است که پتانسیل خوبی برای این مقصود در آن وجود دارد. به همین منظور در این مقاله، این منطقه برای طراحی توربین بادی 2/5 مگاواتی انتخاب شده است. اطلاعات آماری باد منطقه در مرجع [16] در ارتفاع های 10، 20 و 40 متر مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفته است. اما از آن جا که اندازه توربین های مگاواتی بسیار بزرگ هستند و ارتفاع دکل آن ها تقریباً برابر با قطر روتور است به اطلاعات مربوط به ارتفاعات بیشتر و در حدود 80 متری نیاز است. به منظور بسط نتایج از نرم افزار آی.ای.سی ویند¹⁵ استفاده شده است. با داشتن اطلاعات بادی یک منطقه، با استفاده از این نرم افزار می توان پروفیل باد در آن جا را تخمین زده و سرعت باد را در ارتفاع های متفاوت محاسبه کرد. در این جا سرعت باد طراحی 13 متر بر ثانیه و ضریب شکل و فاکتور مقیاس مربوط به توزیع باد ویبول به ترتیب 1/55 و 8/084 به دست آمده است.

5-1- طراحی مشخصات اولیه توربین

پس از مشخص شدن شرایط سایت مورد نظر، نوبت به مشخص کردن مشخصات توربین است. با توجه به مسائل مختلف همچون مسائل سازه ای و

$$f = \exp\left(-\left(\frac{V_i}{A}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{i+1}}{A}\right)^k\right) \quad (19)$$

k و A به ترتیب ضریب شکل¹ و فاکتور مقیاس² نام دارند که از اطلاعات آماری آب و هوایی منطقه به دست می آیند. در این جا مقادیر به ترتیب 2/19 و 8/29 هستند.

به منظور رسیدن به یک نمودار ملایم و یکنواخت، یک خم بزیر³ مرتبه چهارم بر روی نمودار تغییرات زاویه پیچش در راستای طول پره برای توربین طراحی شده اولیه فیت⁴ شده و برای بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی بزیر به صورت رابطه (20) تعریف می شود [13].

$$B(\psi) = \sum_{i=0}^n P_i b_i(\psi) \quad (20)$$

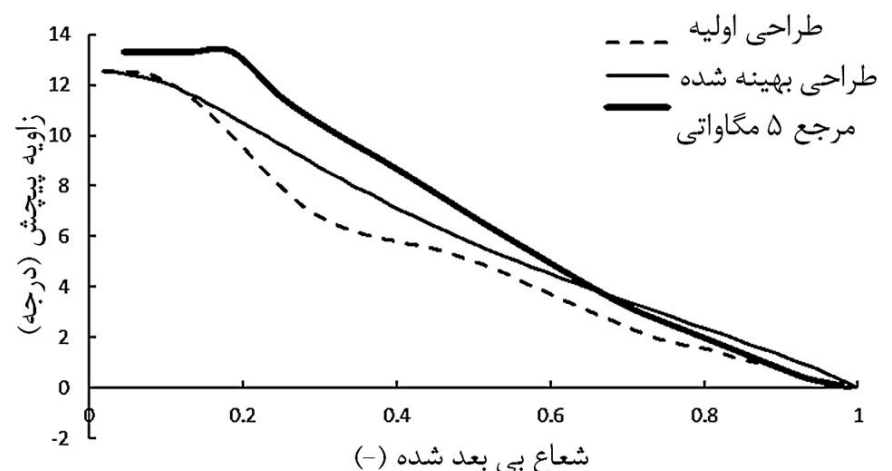
و در آن P_i نقاط کنترل بزیر و b_i چند جمله ای برن اشتاین⁵ است که به صورت رابطه (21) تعریف می شود.

$$b(\psi) = \sum_{j=0}^n K_{j,n} (1 - \psi)^{n-j} \psi^j \quad (21)$$

که در آن $K_{j,n}$ طبق رابطه (22) به دست می آید:

$$K_{j,n} \equiv \binom{n}{j} \equiv \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (22)$$

با ثابت نگه داشتن نقاط ابتدایی و انتهایی نمودار و با اعمال شرط شیب صفر در ریشه پره، تعداد متغیرها از 5 متغیر، به 2 متغیر کاهش می یابد و نمودار زاویه پیچش بهینه از تغییر نقاط کنترل بزیر باقی مانده به دست می آید. نتایج حاصل از بهینه سازی انجام شده در شکل 9 نشان داده شده است و مقایسه ای بین آن و نمودار طراحی شده اولیه و نیز توربین مرجع صورت گرفته است. همچنین ضریب توان بیشینه و انرژی تولید سالیانه و نسبت سرعت نوک پره بهینه برای هر سه توربین در جدول 2 با هم مقایسه شده اند. لازم به ذکر است که از الگوریتم ژنتیک⁶ به عنوان روش بهینه سازی استفاده



شکل 9 مقایسه میان تغییرات زاویه پیچش برای توربین طراحی شده اولیه و بهینه شده و توربین مرجع 5 مگاواتی

جدول 2 مقایسه نتایج و عملکرد توربین طراحی شده اولیه و بهینه شده با توربین

توربین	مرجع 5 مگاواتی		
	ضریب توان تولیدی ⁷	انرژی تولیدی سالیانه	نسبت سرعت نوک ⁸ بهینه (-)
طراحی شده اولیه	0/473	22/75	7/71
بهینه شده	0/473	22/76	7/68
مرجع 5 مگاواتی	0/482	22/79	7/55

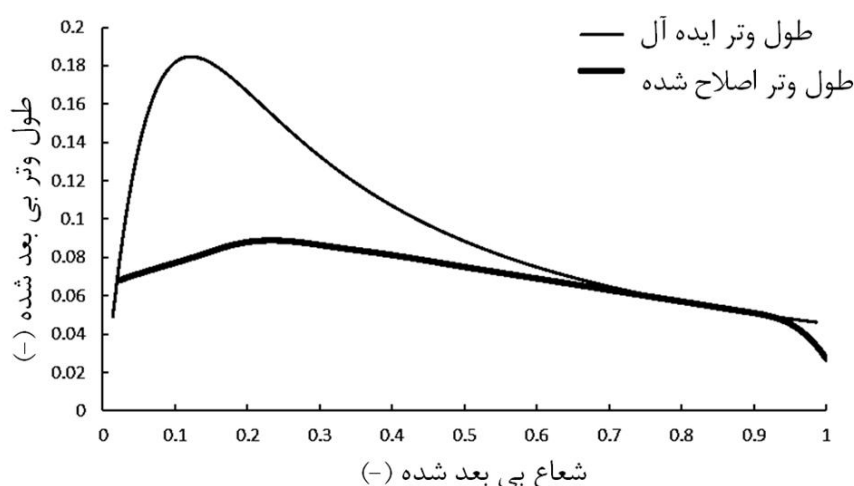
- 1- Shape Factor
- 2- Scale Factor
- 3- Bezier curve
- 4- curve fitting
- 5- Bernstein polynomial
- 6- Genetic Algorithm (GA)
- 7- Power Coefficient (C_p)
- 8- Tip Speed Ratio (TSR)

- 9- Pitch regulation variable speed (PRVS) controlled turbine
- 10- Rated wind speed
- 11- Fixed speed turbine
- 12- Stall controlled turbine
- 13- Aerodynamic damping
- 14- smooth
- 15- IECwind

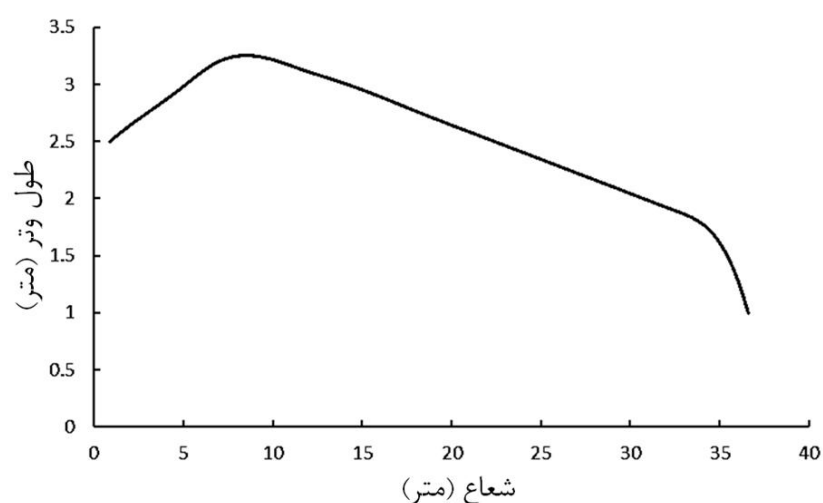
داشت. البته سرعت دورانی بیشینه آن نیز 17/86 دور بر دقیقه خواهد بود. پس با استفاده از روش ارائه شده در بالا می‌توان برای یک سرعت باد طراحی، یک هندسه مناسب برای هر توان موردنیاز را استخراج کرد. اما با تغییر شرایط و تغییر نسبت سرعت نوک طراحی هندسه عوض خواهد شد، به طور مثال شکل 10 نمودار تغییرات طول وتر در حالت ایده‌آل و اصلاح شده را برای منطقه لوتک و سرعت باد طراحی 13 متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک 6/154 نشان می‌دهد و چنانچه انتظار می‌رفت با کاهش نسبت سرعت نوک طول وتر بی بعد شده در هر مقطع افزایش می‌یابد. شکل 11 نیز تغییرات طول وتر را در حالت بی‌بعد نشده نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر متغیرهای طراحی همان مقادیر جدول 1 در نظر گرفته شده‌اند. شکل 12 نیز نمودار تغییرات زاویه پیچش را در طول پره طراحی شده نشان می‌دهد. این نتایج بر طبق آنچه در بخش 3 توضیح داده شد به دست آمده است.

5-3- بهینه سازی زاویه پیچش توربین طراحی شده

طبق آنچه در بخش 4 ذکر شد، در این بخش یک خم بزر مرتبه 6 از نمودار تغییرات زاویه پیچش توربین طراحی شده گذرانده شده و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن تابع هدف تولید انرژی سالیانه انجام شده است. شکل 13 نمودار تغییرات زاویه پیچش بهینه شده را نشان می‌دهد که همانند توربین 5 مگاواتی نمودار نسبتاً صاف تر و یکنواخت‌تری را خواهیم داشت. همچنین 0/3% در مقدار انرژی تولید سالیانه بهبود حاصل شده است. لازم به ذکر است که برای این بهینه‌سازی از خم بزر مرتبه 6 استفاده شده و دو انتهای آن ثابت نگه داشته شده و در واقع مسأله با چهار متغیر حل شده است. در نهایت شکل 14 نمودار توان تولیدی برحسب سرعت باد ورودی را نمایش می‌دهد.



شکل 10 تغییرات طول وتر بی‌بعد شده در حالت ایده‌آل و اصلاح شده برای منطقه لوتک با استفاده از ایرفویل‌های استفاده شده در توربین مرجع 5 مگاواتی و سرعت باد طراحی 13 متر بر ثانیه



شکل 11 تغییرات طول وتر در راستای طول پره توربین 2/5 مگاواتی طراحی شده

نویز¹، توربین‌های مدرن امروزی دارای سه پره هستند که در این‌جا نیز توربین با سه پره در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که بنا بر آنچه گفته شد، روش کنترل "سرعت متغیر-زاویه چرخش متغیر" مدنظر قرار گرفته است. به علاوه از همان ایرفویل‌های توربین مرجع 5 مگاواتی و با همان ترتیب و محل قرارگیری نسبت به شعاع پره استفاده شده است؛ چنانچه در شکل 1 نشان داده شد. این موضوع در رابطه با تغییرات ضخامت نسبی در طول پره نیز صحت دارد. اندازه روتور نیز با استفاده از رابطه (23) محاسبه می‌شود که در آن D قطر روتور، P_{rated} توان نامی یا توان طراحی توربین، V_{rated} سرعت باد طراحی، ρ چگالی هوا، η بازده مکانیکی توربین و $C_{p,rated}$ ضریب توان نامی یا ضریب توانی است که در نقطه طراحی مدنظر قرار می‌گیرد.

$$D = \sqrt{\frac{8 P_{rated}}{\rho \eta V_{rated}^3 C_{p,rated} \pi}} \quad (23)$$

با در نظر گرفتن سرعت باد طراحی 13 متر بر ثانیه، چگالی هوای 1/2 کیلوگرم بر متر مکعب و توان نامی 2/5 مگاوات و ضریب توان 0/4795 که برای توربین‌های مدرن امروزی عددی معمولی است. با توجه به رابطه (23) قطر روتور 73/2 متر و به عبارتی روتوری با شعاع 36/6 متر به دست می‌آید. البته این عدد با در نظر گرفتن بازده مکانیکی 94% به دست آمده و در واقع 6% انرژی اتلافی توسط عناصر مکانیکی توربین در نظر گرفته شده است. به علاوه قطر هاب 1/2 متر در نظر گرفته شده است. از طرفی در توربین‌های بزرگی که امروزه طراحی می‌شوند، بیشینه سرعت نوک پره باید حدود 75 الی 80 متر بر ثانیه باشد در این حالت بیشینه صدای تولید شده ناشی از چرخش توربین‌ها از حد مجاز تجاوز نمی‌کند. در این پروژه بیشینه سرعت نوک پره 80 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین بیشترین سرعت دورانی مجاز برای توربین طراحی شده 20/87478 دور بر دقیقه خواهد بود.

5-2- طراحی شکل هندسی پره

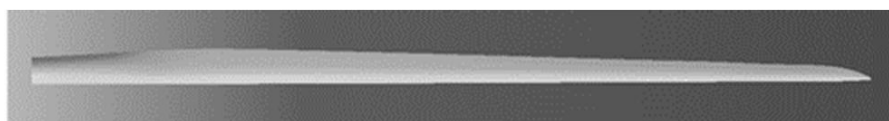
با توجه به آنچه که در بخش 3 گفته شد، روشی در دست است که می‌توان از آن برای ساخت هندسه اولیه یک توربین بادی مگاواتی استفاده کرد و چنانچه در بخش 4 دیده شد، نتایج قابل قبولی به دست آورد. همان‌طور که مشاهده شد پایه و اساس هندسه به دست آمده، طول وتر در حالت ایده‌آل و به خصوص قسمت نزدیک به نوک آن است. از رابطه (11) می‌توان دید که با فرض ثابت بودن نسبت سرعت نوک محلی پره، صرف‌نظر از شعاع پره و در واقع برای شعاع بی‌بعد شده، برای ضرایب القایی و زاویه جریان پروفیل یکسانی به دست می‌آید. به علاوه با ثابت نگه داشتن ایرفویل‌ها نسبت به شعاع بی‌بعد شده، پروفیل زاویه حمله ایده‌آل و به تبع آن زاویه پیچش پره نیز ثابت خواهد ماند. روابط (1) تا (4)، که در نتیجه آن تغییرات طول وتر نیز با توجه به رابطه (11) ثابت باقی خواهد ماند. پس می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که ایرفویل‌ها تغییر نکنند، در حل ایده‌آل تنها تغییر نسبت سرعت نوک پره باعث تغییر آن می‌شود. به عبارتی در این حالت با توجه به این‌که محدودیت سرعت نوک پره وجود دارد که معمولاً برای توربین‌های مگاواتی 80 متر بر ثانیه خواهد بود، در یک شرایط آب و هوایی خاص و سرعت باد طراحی یکسان حل ایده‌آل بی‌بعد شده برای هر توربینی با هر شعاع و توانی یکسان خواهد بود. و چون شیب نقطه r_3 نیز تغییر نمی‌کند، بنابراین با در نظر گرفتن سرعت باد طراحی 11/4 متر بر ثانیه و توان خروجی 2/5 مگاوات، توربین با همین هندسه ولی با قطر روتور 89 متر به جای 126 متر خواهیم

شد، اندازه توربین‌ها نیز روز به روز بزرگ‌تر شده و به تبع آن حجم محاسباتی نیز افزایش می‌یابد و این خود یکی از چال‌های طراحی توربین‌های بادی مگاواتی در کنار چالش‌هایی همچون مسائل سازه‌ای و ساخت مواد مقاوم و سبک و ... به شمار می‌رود [18]. به همین دلیل حتی امروزه استفاده از روش‌هایی همچون اندازه حرکت المان پره در بسیاری از طراحی‌ها و تحلیل‌ها استفاده می‌شود، از طرفی از آن‌جا که امکان سنجش آزمایشگاهی توربین‌های مگاواتی عملاً وجود ندارد و یا بسیار مشکل است شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر جریان سه‌بعدی گذرنده از آن‌ها برای سنجش عملکرد آن‌ها در شرایط کاری و مقایسه و صحت‌سنجی روش‌های سریع‌تر و ساده‌تر بسیار حائز اهمیت است. بنابراین در این بخش مدل سه‌بعدی توربین طراحی شده ساخته شده و نتایج به دست آمده از حل به روش دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج روش اندازه حرکت المان پره مقایسه شده است.

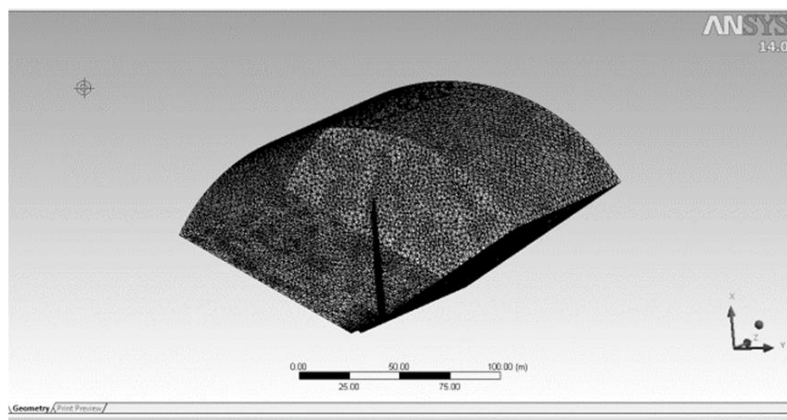
6-1- مدل سازی هندسه و شبکه بندی² میدان حل

مشخص است که برای یک تحلیل آیرودینامیکی مناسب ابتدا به مدل‌سازی هر چه دقیق‌تر هندسه مورد نظر نیاز است. مشخصات هندسی ایروفویل‌ها از مرجع [19] به دست آمده و با توجه به شکل‌های 11 و 13 هندسه پره توربین در نرم‌افزار کتیا³ تولید و نمایی از آن در شکل 15 نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که محور پیچش طبق آنچه در مرجع [6] آمده است در هر مقطع به اندازه یک چهارم طول وتر از نقطه مرکز آیرودینامیکی ایرفویل مربوطه به سمت دم ایرفویل⁴ فاصله دارد. همچنین در این مطالعه به منظور کاهش هزینه محاسباتی تنها یک پره در نظر گرفته شده و سپس نتایج به دست آمده برای سه پره تعمیم داده شده است. شکل 16 نمایی از دامنه حل در نظر گرفته شده و شبکه‌بندی ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار آنسیس آی.سی.ای.ام⁵ در اطراف پره را نشان می‌دهد که در سمت ورودی و خروجی جریان و سمت شعاعی به ترتیب به اندازه شعاع پره، 3 برابر شعاع و 2 برابر شعاع در نظر گرفته شده است.

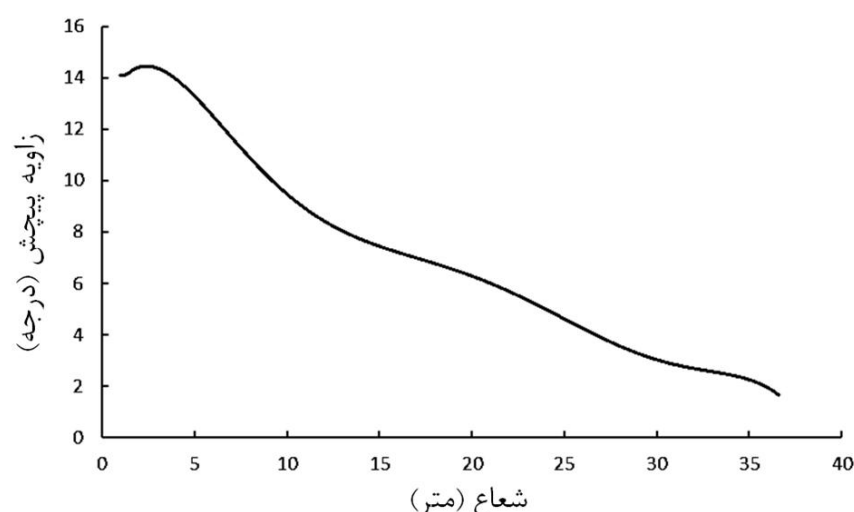
شرایط مرزی⁶ مورد استفاده بر روی پره شرط مرزی دیواره و با شرط عدم لغزش می‌باشد به علاوه در جریان بالادست توربین شرط مرزی سرعت ورودی و در خروجی‌ها که قسمت پشت و بالای توربین هستند شرط مرزی



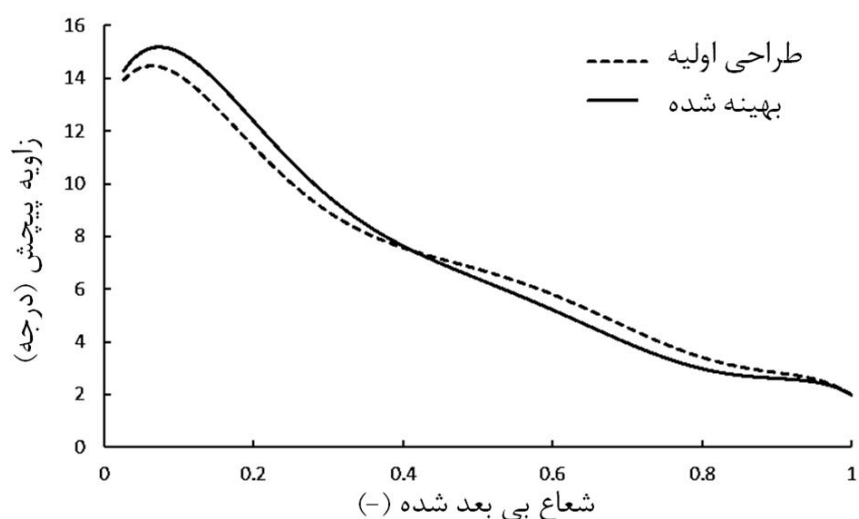
شکل 15 نمایی از هندسه پره طراحی شده در نرم‌افزار کتیا



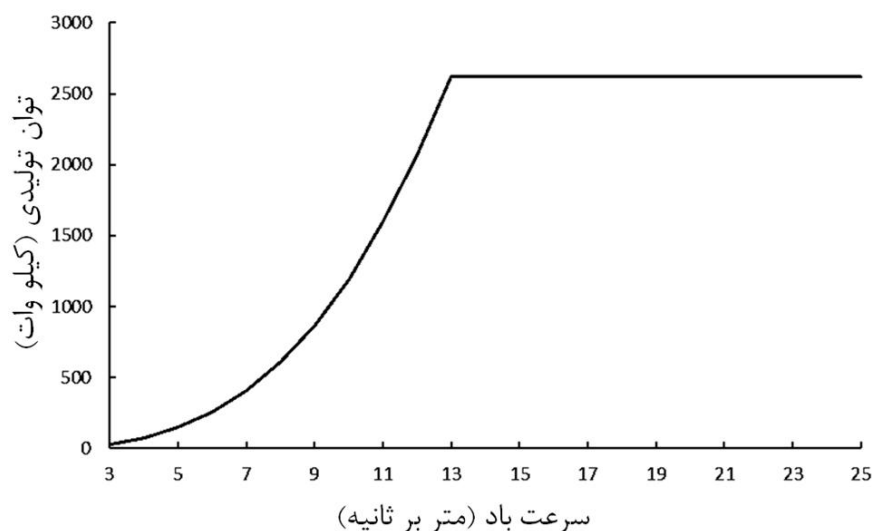
شکل 16 نمایی از دامنه حل و شبکه‌بندی آن به همراه شرایط مرزی



شکل 12 تغییرات زاویه پیچش در راستای طول پره توربین 2/5 مگاواتی طراحی شده



شکل 13 تغییرات زاویه پیچش بهینه شده در مقایسه با زاویه اولیه طراحی شده

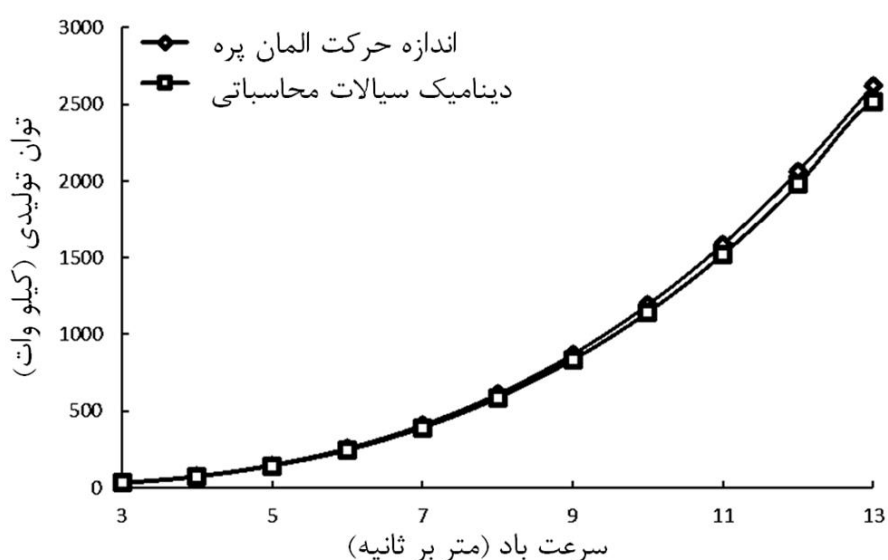


شکل 14 نمودار توان تولیدی بر حسب سرعت باد ورودی برای توربین طراحی شده 2/5 مگاواتی لوتک

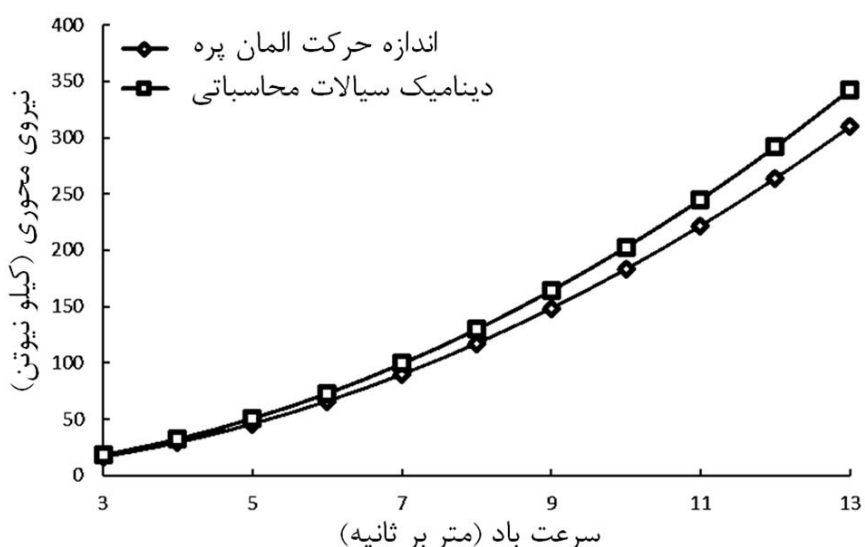
6- شبیه‌سازی سه بعدی توربین طراحی شده

ابزارها و روش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیال گذرنده از اطراف پره‌های توربین بادی به وجود آمده و توسعه یافته است. از روش‌هایی مانند اندازه حرکت المان پره که هزینه محاسباتی نسبتاً کمی دارد تا روش‌های بسیار پیچیده‌تر مانند حل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی که بسیار دقیق بوده اما هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارد. اگرچه پیشرفت قدرت کامپیوترها در سال‌های اخیر بسیار سریع بوده است، استفاده از روش‌های پیشرفته برای پیش‌بینی رفتار سیال برای استفاده در فرایند طراحی و بهینه‌سازی، حتی در این زمان همچنان بسیار وقت‌گیر است. بنابراین به نظر می‌رسد که استفاده از این روش‌ها باید به‌عنوان ابزاری برای تحلیل پره طراحی شده استفاده شود به جای این‌که به عنوان قسمتی از فرایند تکراری¹ طراحی مورد استفاده قرار گیرد [17]. به خصوص این‌که همان‌طور که گفته

گسسته سازی معادلات حاکم با استفاده از روش مرتبه بالا¹⁰ انجام گرفته است و شرط همگرایی رسیدن باقیمانده¹¹ حل همه متغیرها به 0/00001 بوده است. شکل های 19 و 20 به ترتیب نمودار تغییرات توان تولیدی و نیروی محوری را برحسب تغییرات سرعت باد در نسبت سرعت نوک طراحی یعنی 6/15 نشان می دهند. از مشاهده این شکل ها می توان دید که تا رسیدن به سرعت باد طراحی هر دو روش روند یکسانی را طی می کنند. میانگین اختلاف دو روش برای توان حدود 5% و برای نیروی محوری حدود 10% است. شکل 21 نیز تغییرات ضریب توان را برحسب نسبت سرعت نوک پره نمایش می دهد. به طور کلی علت اختلاف نتایج دو روش اثرات سه بعدی و آشفتگی جریان است که روش دینامیک سیالات محاسباتی بسیار دقیق تر این اثرات را محاسبه کرده و مدنظر قرار می دهد. علت اختلاف در نسبت سرعت نوک های پایین را می توان به پدیده تأخیر استال¹² مرتبط دانست. در روش اندازه حرکت المان پره جریان در راستای طول پره صفر در نظر گرفته می شود و به عبارتی جریان دو بعدی فرض شده در حالی که بر اثر ایجاد نیروهای سانتریفیوژ¹³ ناشی از چرخش پره، در واقع جریان در جهت طول پره وجود دارد. در نسبت سرعت های بالا نیز با افزایش عدد رینولدز جریان، آشفتگی جریان و تأثیرات لایه مرزی افزایش می یابد. با این حال مشاهده می شود که علاوه بر این که هر دو روش از روند یکسانی پیروی می کنند، نقطه پیک نمودار که در واقع همان نقطه طراحی است نیز یکسان پیش بینی می شود.



شکل 19 مقایسه توان تولیدی پیش بینی شده برای توربین 2/5 مگاواتی طراحی شده توسط روش های اندازه حرکت المان پره و دینامیک سیالات محاسباتی



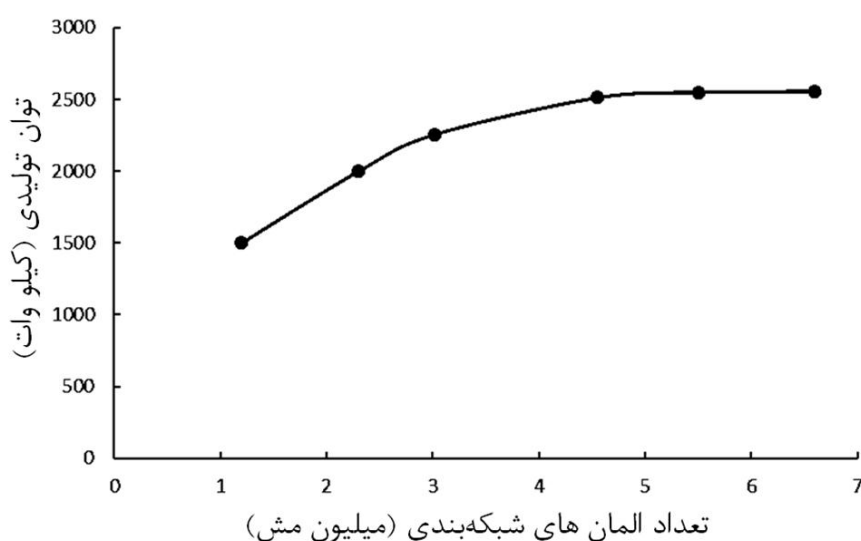
شکل 20 مقایسه نیروی محوری پیش بینی شده برای توربین 2/5 مگاواتی طراحی شده توسط روش های اندازه حرکت المان پره و دینامیک سیالات محاسباتی

فشار نسبی صفر قرار داده شده است. همچنین بر روی دو سطحی که با زاویه 120 درجه قرار گرفته اند به دلیل وجود دو پره دیگر شرط مرزی پرئودیک اعمال شده است. تعداد المان های شبکه بندی ایجاد شده حدود 4/5 میلیون المان می باشد. این تعداد پس از انجام حل های مختلف و با توجه به شکل 17 که نمودار استقلال از شبکه بندی را نمایش می دهد به دست آمده است. نمایی از شبکه بندی بر روی پره و شبکه بندی لایه مرزی در یک مقطع از آن نیز در شکل 18 نشان داده شده است.

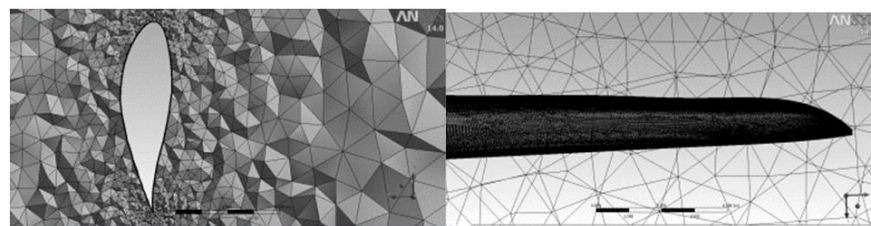
6-2- نتایج حل عددی

برای حل میدان سیال اطراف پره و به دست آوردن حل آیرودینامیکی از نرم افزار آنسیس سی.اف.ایکس¹ استفاده شده است. در این پروژه برای شبیه سازی جریان سیال از روش حجم کنترل² و معادلات رنژ³ بهره برده شده که برای جریان های درهم یا آشفته⁴، روشی مناسب برای کاهش هزینه محاسباتی به جای حل مستقیم معادلات نویر-استوکس⁵ و در عین حال دارای دقت قابل قبول است. همچنین از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی⁶ بهره برده شده است. این مدل در لایه مرزی از مدل آشفتگی کی.امگا⁷ و در خارج لایه مرزی از مدل کی.ایپسیلون⁸ استفاده می کند و مزایای هر دو روش را همزمان داراست. این مدل دقت بسیار خوبی در پیش بینی جدایش در گرادین های شدید دارد. به علاوه لازم به ذکر است که جریان هوا به صورت تراکم ناپذیر و در دما و فشار استاندارد بوده و حل به صورت پایا می باشد. همچنین در مدل سازی چرخش پره از روش تک مرجع چرخان⁹ بهره برده شده است.

نتایج حاصل از حل به روش دینامیک سیالات محاسباتی در شکل های 19 تا 21 آمده است. همچنین در این شکل ها نتایج حل به روش اندازه حرکت المان پره نیز برای مقایسه آورده شده است. لازم به ذکر است که



شکل 17 نمودار استقلال از شبکه بندی حل انجام شده



شکل 18 نمایی از شبکه بندی بر روی پره و شبکه بندی لایه مرزی

- 1- Ansys CFX v14.0
- 2- Control volume
- 3- Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)
- 4- Turbulence
- 5- Navier-stokes equations
- 6- Shear Stress Transport (SST)
- 7- k- ω
- 8- k- ϵ
- 9- Single (moving) Reference Frame (SRF)

- 10- High Resolution
- 11- Residual
- 12- Stall delay
- 13- Centrifugal forces

8- فهرست علائم

a	عدد ضریب القایی محوری
A	عدد فاکتور مقیاس در توزیع باد ویبول
AEP	تولید انرژی سالانه ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)
a'	عدد ضریب القایی مماسی
B	خم بزیر
b _i	چند جمله ای پرن اشتاین
C _a	عدد ضریب نیروی محوری وارد بر رتور
C _d	عدد ضریب نیروی پسای ایرفویل
C _l	عدد ضریب نیروی برای ایرفویل
C _p	عدد ضریب توان تولیدی
D	قطر روتور (m)
f	عدد تابع احتمال چگالی
F	عدد ضریب تصحیح پرنتل
k	عدد ضریب شکل در توزیع باد ویبول
L _c	طول وتر (m)
P	توان تولیدی توربین ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$)
P _i	نقاط کنترل بزیر
r	فاصله المان از مرکز روتور یا شعاع المان (m)
R	شعاع روتور (m)
t	ضخامت ایرفویل (m)
T	نیروی محوری وارد بر روتور (kg m s^{-2})
TSR	عدد نسبت سرعت نوک پره
V _∞	سرعت باد ورودی (m s^{-1})
Z	عدد تعداد پره های توربین

علائم یونانی

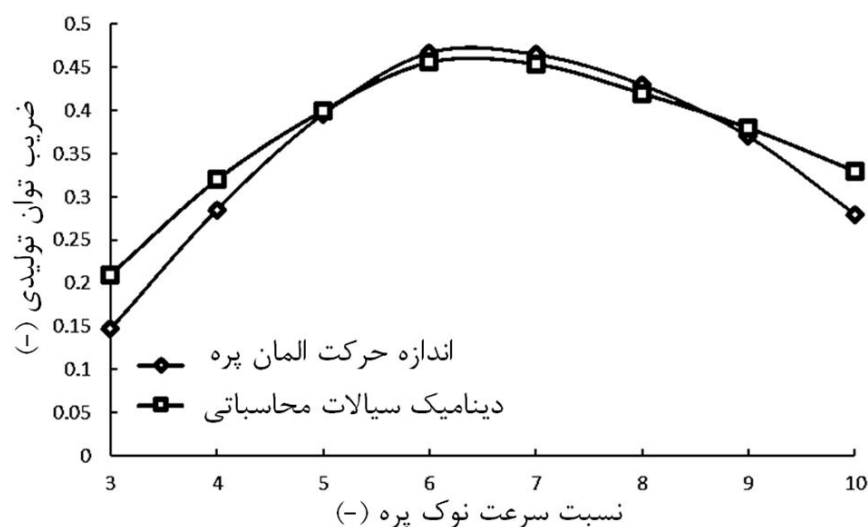
α	زاویه حمله (rad)
η	عدد بازده مکانیکی توربین
θ	زاویه پیچش وتر ایرفویل نسبت به صفحه روتور (rad)
π	عدد پی
ρ	چگالی هوا (kg m^{-3})
λ	عدد نسبت سرعت
σ	عدد سختی یا جامدیت روتور
$\emptyset$	زاویه جریان (rad)
ψ	عدد متغیر خم بزیر
ω	سرعت دورانی روتور (rad s^{-1})

زیرنویس‌ها

a	محوری
ideal	ایده‌آل
max	بیشینه
r	محلی
rated	طراحی

9- مراجع

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). *Global wind 2009 report*; 2009.
- [2] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, 2010.
- [3] A. Sedaghat, M. Mirhossini, *Aerodynamic design of a 300 kW horizontal axis wind turbine for province of Semnan*. Energy Conversion and



شکل 21 مقایسه نمودارهای ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک برای توربین 2/5 مگاواتی طراحی شده پیش‌بینی شده توسط روش‌های اندازه حرکت المان پره و دینامیک سیالات محاسباتی

بنابراین با توجه به آنچه در مقدمه بخش 6 گفته شد، با توجه به هزینه محاسباتی بالای روش دینامیک سیالات محاسباتی، به خوبی و با اطمینان می‌توان از روش اندازه حرکت المان پره استفاده کرد و استفاده از آن در طراحی و بهینه‌سازی نیز قابل قبول و مناسب است.

7- نتیجه گیری

در این مقاله روشی کاربردی برای طراحی آیرودینامیکی پره توربین بادی مگاواتی بر پایه تئوری اندازه حرکت المان پره ارائه شد. در این روش چگونگی اعمال تصحیحات بر روی نمودار تغییرات طول وتر و زاویه پیچش در طول پره به منظور نزدیک کردن هندسه آن به شکل عملی و کاربردی در بخش‌های گوناگون پره به طور جداگانه شرح داده شد. مزیت این روش آن است که طراحی پره بر پایه تعداد متغیرهای ورودی بسیار محدودی انجام می‌گیرد و در عین حال نتایج به دست آمده از آن مطابقت خوبی با توربین مرجع 5 مگاواتی که یک توربین واقعی و ساخته شده است نشان می‌دهد. بنابراین استفاده از این روش می‌تواند برای دست یافتن به یک طراحی اولیه آیرودینامیکی، پایه‌ای مناسب باشد به علاوه این‌که با توجه به انطباق خوب آن با یک توربین واقعی می‌توان گفت تا حد خوبی مسائل سازه‌ای نیز در آن در نظر گرفته می‌شود که برای توربین‌های بزرگ اهمیت دارد. در انتهای طراحی اولیه، یک بهینه‌سازی توسط روش الگوریتم ژنتیک و استفاده از خم بزیر به روی منحنی زاویه پیچش و با در نظر گرفتن تولید انرژی سالانه به عنوان تابع هدف انجام شد که این کار باعث نرم‌تر و یکنواخت‌تر شدن تغییرات زاویه پیچش در طول پره گردید که به فرآیند ساخت و تولید آن نیز کمک می‌کند. در نهایت با استفاده از این روش یک توربین 2/5 مگاواتی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی منطقه لوتک در نزدیکی زابل در استان سیستان و بلوچستان طراحی شد که مشخصات کلی و شکل هندسی متعارف و قابل قبولی دارد. در آخر به منظور نشان دادن کارایی توربین طراحی شده در شرایط واقعی، شبیه سازی و حل سه‌بعدی آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. سپس نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش اندازه حرکت المان پره مقایسه شد که از هر دو روش روند کلی و نقاط پیک یکسانی به دست آمد. با توجه به هزینه محاسباتی بالای روش دینامیک سیالات محاسباتی، اختلاف حدود 5 درصد در توان تولیدی و اختلاف حدود 10 درصد در نیروی محوری وارد بر روتور نشان می‌دهد که استفاده از روش اندازه حرکت المان پره در طراحی و بهینه‌سازی قابل قبول و مناسب است.

- [12] A. Beeken, T. Neumann, and A. Westerhellweg, *Five years of operation of the first offshore wind research platform in the german bight FINO1*, Tech rep, DEWIGmbH, 2008.
- [13] *Bezier curve*. Accessed 25 March 2015; [http://www.en.wikipedia.org/Bezier curve](http://www.en.wikipedia.org/Bezier%20curve).
- [14] *Genetic algorithm*. Accessed 1 April 2015; [http://www.en.wikipedia.org/Genetic algorithm](http://www.en.wikipedia.org/Genetic%20algorithm).
- [15] G. Najafi and B. Ghobadian, *LLK1694-wind energy resources and development in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. 15(6): p. 2719-2728.
- [16] A. Razavieh, A. Sedaghat, R. Ayodele, A. Mostafaeipour, *Worldwide energy status and the characteristics of wind energy in Iran, case study: the province of Sistan and Baluchestan*. International Journal of Energy, 2014.
- [17] P. Brøndsted, P. L. Rogier, Nijssen, *Advances in wind turbine blade design and materials*. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 47, 2013.
- [18] J. Hoyland, *Challenges for large wind turbine blades*, PHD Thesis, NTNU, 2009.
- [19] N. Timmer, *DOWEC blade airfoil data, (excel document)*. Delft University of Technology, 2009.
- Management, 2012.
- [4] K. Bumsuk, K. Woojune, S. Bae, J. Park, M. Kim, *Aerodynamic design and performance analysis of multi-MW class wind turbine blade*, Mechanical Science and Technology, Seoul, Korea, 2011.
- [5] K. Bumsuk, K. Woojune, L. Sanglae, S. Bae, Y. Lee. *Development and verification of a performance based optimal design software for wind turbine blades*, Renewable Energy, 2012.
- [6] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, Tech. rep, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [7] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi. *Wind Energy Handbook*, WILEY, UK, 2001.
- [8] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory design and application*. John Wiley & Sons Inc; 2010.
- [9] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Second Edition, Earthscan Publications, 2008.
- [10] L. Dong, M. Liao, Y. Li, X. Song, K. Xu, *Study on Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Generator System*, International Conference on Energy and Environment Technology, 2009.
- [11] Moriarty and Hansen, *AeroDyn theory manual*. Tech. rep, National Renewable Energy Laboratory, 2005.