سال سوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۵، ص ص ۶۵- ۷۳
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۰۴
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۰

طراحی و تحلیل عملکرد توربین کوچک باد با ایرفویل ترکیبی

شهریار کوراوند [۱*]، بهنام معتکف ایمانی [۲]، علی ماشاءاله کرمانی [1]

۱-استادیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران
۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
* تهران، کد پستی: ۳۳۹۱۶۵۳۷۵۵، ایمیل: skouravand@ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله هدف طراحی و تحلیل توربین کوچک باد می باشد. برای این منظور منطقه مروست در استان یزد به عنوان پایلوت طراحی در نظر گرفته شده است. توربین بادی از چندین جزء تشکیل شده است که از مهمترین مسائل، طراحی مناسب ایرفویل پره می باشد. در این کار سعی بر آن بوده است تا با تلفیق ایرفویل روتورهای دارای گشتاور تولیدی بالا و خود شروع کننده در سرعت های باد پایین با ایرفویل روتورهای دارای کارایی بالاتر، تولید انرژی بوسیله توربین های بادی را تا حد زیادی در سرعت های باد کمتر امکان پذیر نمود. طرح ایرفویل روتور توربین تلفیقی از ایرفویل روتورهای ساونیوس و داریوس می باشد که اولی دارای گشتاور تولیدی بالا و خود شروع کننده در سرعت های باد پایین است و دومی دارای کارایی بالا می باشد که ایرفویل حاصل به شکل J می باشد. روتور طراحی شده با استفاده از نرم افزار مورد تحلیل قرار می گیرد و سپس پارامترهای مختلف موثر بر عملکرد این روتور مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

کلیدواژگان: توربین، انرژی باد، ایرفویل، داریوس

Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil

Shahriar Kouravand[1*], Behnam Moetakef Imani[2], Ali Mashaallah Kermani[1]

1-Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
2-Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.C. 3391653755 Tehran, Iran, skouravand@ut.ac.ir
Received: 23 January 2017 Accepted: 28 February 2017

Abstract

The purpose of this article is design and analysis of small wind turbine. To this aim, the Marvast region in Yazd province is selected as the design pilot region. Wind turbine is consisting of some components and the proper airfoil design is one of most significant issues. In this work two types of airfoils are combined that one airfoil has the proper starting torque and the other one has the high efficiency. The output airfoil is a J-shape airfoil that is the combination of Savonius and Darrieus airfoils. Design is analyzed using the software and the effect of parameters is investigated.

Keywords: Turbine, Wind Energy, Airfoil, Darrieus

۱- مقدمه

یکی از پاک‌ترین نوع روشهای تولید برق استفاده از توربین های بادی می‌باشد. نگرانی های مرتبط با اثرات زیست محیطی سوخت های فسیلی موجب گسترش توربین های بادی در یک طیف گسترده ای از تولید نیرو شده است. توربین های بادی عمدتا به دو دسته توربین های محور افقی (HAWT) و محور عمودی (VAWT) تقسیم می شوند[2-1] . از مزایای توربین های محور عمودی نسبت به نمونه ی افقی آن حساسیت کمتر آنها به جهت و آشفتگی باد می باشد همچنین هزینه تعمیر و نگهداری این توربین ها نسبت به توربین های محور افقی به دلیل فاصله کمتر جعبه دنده از زمین بسیار کمتر است. اما در توربین های محور افقی به دلیل بلندی برج امکان دسترسی به باد های شدید و قوی زیاد می شود و همچنین اکثر آن ها قابلیت شروع خودکار را نیز دارا هستند. باتوجه به تمام این خصوصیات عموما از توربین های محور عمودی در سرعت های پایین و از توربین های محور افقی در سرعت های بالا باد استفاده می شود. توربین باد یک ماشین تبدیل انرژی جنبشی موجود در باد به انرژی مکانیکی می باشد. انرژی مکانیکی به طور مستقیم به الکتریسیسته تبدیل می شود. میزان توان P که می تواند توسط توربین بادی به دست آید از رابطه ۱ محاسبه می شود[2-1]:

$$P = \frac{1}{2}\rho A C_P U^3 \qquad (۱)$$

که در اینجا ρ چگالی هوا و A سطح جاروب شده توربین و C_P بازده آیرودینامیکی (که ضریب توان نامیده می شود) و U سرعت جریان آزاد باد می باشد. برای ارزیابی منابع باد پتانسیل تولید توان بادی سایت داده های هواشناسی با روشهای آماری عمل آوری می شود. این روش از داده های جداگانه در بازه های سرعت باد یا طبقات که اتفاق می افتد استفاده می کند. یک مجموعه N تایی از مشاهدات سرعت باد فرض می شود. داده ها به N_B طبقه سرعت با عرض w_j تقسیم می شوند که نقطه وسط m_j و تعداد رخداد در هر طبقه f_j می باشد:

$$N = \sum_{j=1}^{N_B} f_j \qquad (۲)$$

با این تکنیک میانگین سرعت باد با استفاده از رابطه ۳ بدست می آید:

$$\overline{U} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \qquad (۳)$$

خروجی توان میانگین ماشین برای هر طبقه سرعت باد $P_w(m_j)$ تعریف می شود بوسیله منحنی توان ماشین که بعدا در پروسه طراحی ارائه می شود. این بعدا برای محاسبه توان تولیدی میانگین $\overline{P_w}$ استفاده می شود.

$$\overline{P_w} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N_B} P_w(m_j) f_j \qquad (۴)$$

بر پایه $P_w(m_j)$ انرژی تولیدی تخمینی از رابطه ۵ محاسبه می شود

$$E_w = \sum_{j=1}^{N_B} P_w(m_j) f_j \Delta t \qquad (۵)$$

در این مقاله، مطالعه طراحی و تحلیل عملکرد توربینهای کوچک باد جهت تولید برق مناسب شرایط اقلیمی منطقه مروست استان یزد به عنوان پایلوت طراحی انجام می شود.. به دلیل محدوده توان و هزینه تولید پایینتر و استفاده راحت تر توسط مصرف کننده نوع توربین عمودی انتخاب می شود. طرح توربینی که که در اینجا ارائه می شود یک روتور با ایرفویل هیبریدی است. این ایرفویل ترکیبی از ایرفویل روتورهای با گشتاور تولیدی بالا و خود شروع کننده در سرعت‌های باد پایین نظیر ساونیوس، با ایرفویل روتورهای دارای کارایی بالاتر نظیر داریوس می باشد. عدم حساسیت توربین پیشنهادی به جهت وزش باد از دیگر ویژگیهای بارز توربین پیشنهادی می باشد.

۲- مواد و روشها

اولین قدم برای طراحی یک توربین بادی انتخاب شرایط بادی از قبیل سرعت و سمت باد می باشد. برای بدست آوردن عدد نهایی از بین داده های خام ایستگاه مورد نظر تحلیل داده ها با استفاده از معادلات و شیوه های معمول می باشد. در این پژوهش ایستگاه مروست در استان یزد به عنوان پایلوت طراحی مورد مطالعه قرار می گیرد. در این پژوهش اطلاعات هواشناسی در دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ اخذ شده اند و پارامتر های مورد نیاز از آن استخراج گردید. به منظور ترسیم گراف ها و محاسبات آماری از نرم افزار MATLAB و Excel استفاده گردیده است. برای محاسبه پارامتر های مورد نیاز از تابع توزیع احتمال ویبول استفاده شده است سپس صحت برازش منحنی تابع احتمال ویبول بر داده های احتمال واقعی باد توسط آزمون کی دو مورد بررسی قرار گرفته اند.تابع ویبول به صورت زیر تعریف می شود[2-1]

$$P(V) = \frac{k}{c}\left[\frac{V}{c}\right]^{k-1} \exp\left(\left[\frac{V}{c}\right]^{k}\right) \qquad (۶)$$

در این رابطه V سرعت باد K یک فراسنج بی بعد به نام " فاکتور شکل " و C فراسنجی موسوم به فاکتور مقیاس است که با واحد متر بر ثانیه محاسبه می شود. برای محاسبه ی فراسنج های شکل و مقیاس تابع ویبول روش های زیادی ارائه گردیده است . یکی از رایج ترین این روش ها ، روش" برازش حداقل مربعات" است که به کمک تابع احتمال تجمعی بدست می آید . بدین منظور لازم است با استفاده از معادله رگرسیون، رابطه ی خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن ها را بدست آورد. بدین منظور لازم است ابتدا فراوانی داده های اخذ شده از هواشناسی کل کشور را بدست اورده شود. سپس V_iرا که میانه طبقات سرعت باد و P(V) که احتمال فراوانی تجمعی هر طبقه سرعت است بدست آورده و در انتها با استفاده از این مقادیر و روابط زیر مقادیر X و Y محاسبه می شود .

$$X = Ln\, Vi \qquad (۷)$$

$$Y = Ln\,(-Ln\,(1 - P(V)) \qquad (۸)$$

با استفاده از مقادیر بدست آمده ، رابطه ی خطی بین مقادیر سرعت باد و احتمال وقوع آن ها به شکل رابطه ۹ مشخص شود :

$$Y = AX + B \qquad (۹)$$

مقادیر A و B با استفاده از رسم نمودار بالا در Excel قابل محاسبه است که در آن A ضریب زاویه و B عرض نقطه ی تقاطع خط با محور Y ها خواهد بود . رابطه A و B در این معادله با فراسنج های C و K تابع ویبول به صورت رابطه ۱۰ است :

$$C = \exp\left(\frac{-B}{A}\right) \quad , \quad K = A \qquad (۱۰)$$

جدول محاسبه ی مقادیر یاد شده به شکل جدول ۱است. پس از محاسبه ی مقادیر X_i و Y_i ، می توان خط Y=AX+B را که در واقع خطی است با نزدیک ترین فاصله نسبت به نقاط X_i و Y_i، به منظور تعیین مقادیر A و B مرتبط با فراسنج های شکل و مقیاس تابع ویبول ترسیم کرد در شکل زیر این خط ترسیم گردیده است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود مقادیر A و B به ترتیب برابر ۱،۶۵۷ و۲،۰۹۱- می باشد. پس از محاسبه ی این مقادیر مقادیر K و C محاسبه شده و با جایگذاری در معادله مربوط مقدار P_W در جدول نگاشته شده است .این مقادیر به صورت زیر است:

. K =1.657 و C=3.532194

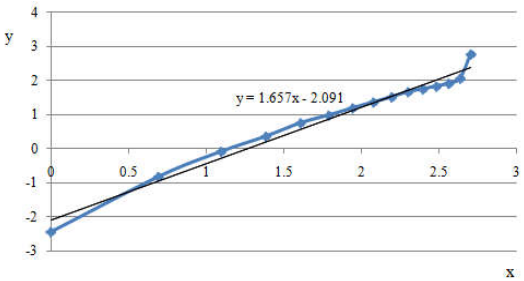
جدول ۱ اندازه گیری های اماری سرعت باد در ایستگاه همدیدی مروست در دوره آماری 2010-2015

ردیف	دسته های سرعت[M/S]V	سرعت میانه دسته های سرعت Vi [M/S]	فراوانی fi	احتمال (بر مبنای ۱) P(VI)	احتمال تجمعی (بر مبنای ۱) P(V)	احتمال بر حسب مدل ویبول (بر مبنای ۱) Pw
1	۱,۵-۰,۵	1	907	0.083594	0.083594	0.180946
2	۲,۵-۱,۵	2	2954	0.272258	0.355853	0.218654
3	۳,۵-۲,۵	3	2679	0.246912	0.602765	0.196494
4	۴,۵-۳,۵	4	1737	0.160092	0.762857	0.148963
5	۵,۵-۴,۵	5	1286	0.118525	0.881382	0.099538
6	۶,۵-۵,۵	6	537	0.049493	0.930876	0.059919
7	۷,۵-۶,۵	7	351	0.03235	0.963226	0.032921
8	۸,۵-۷,۵	8	185	0.017051	0.980276	0.016653
9	۹,۵-۸,۵	9	101	0.009309	0.989585	0.007805
10	۱۰,۵-۹,۵	10	60	0.00553	0.995115	0.003406
11	۱۱,۵-۱۰,۵	11	19	0.001751	0.996866	0.001389
12	۱۲,۵-۱۱,۵	12	13	0.001198	0.998065	0.000531
13	۱۳,۵-۱۲,۵	13	9	0.000829	0.998894	0.000191
14	۱۴,۵-۱۳,۵	14	8	0.000737	0.999631	6.46E-05
15	۱۵,۵-۱۴,۵	15	4	0.000369	1	2.06E-05

احتمال تجربی مقادیر سرعت باد ، با تابع توزیع ویبول جایگزین گردیدند. صحت این جایگزینی را می توان با آزمون های مختلفی ارزیابی کرد. آزمون خی دو که مجذور خی نیز نامیده می شود، یکی از آزمون های نیکویی برازش است که با آن می توان صحت جایگزینی احتمال تجربی داده ها با توزیع داده شده را سنجید. آماره ازمون در تست کی دو به صورت زیر تعریف می شود

$$x^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)}{E_i} \quad (11)$$

که در آن ، O_i فراوانی مشاهده شده ، و E_i فراوانی مورد انتظار است .



شکل ۱: نمودار تابع Y = AX + B برای فراسنج های ایستگاه همدیدی مروست

با توجه به مشاهدات و نتایج تست خی دو می توان نتیجه گرفت که داده ها از تابع چگالی احتمال ویبول تبعیت می کنند. از تابع چگالی احتمال ویبول داده های زیادی را به صورتی که بیان می شود می توان تخمین زد. سرعت نامی باد یعنی سرعت بادی که حداکثر انرژی الکتریکی را در خروجی ایجاد می کند با رابطه ۱۲ بدست می آید:

$$v_{maxE} = C\left(1 + \frac{2}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (12)$$

این سرعت برای منطقه مروست به طور متوسط ۷,۶ m/s می باشد. محتمل ترین یرعت باد نیز با رابطه ۱۳ تعیین می گردد.

$$V_{MP} = C\left(\frac{K-1}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (13)$$

این سرعت برای منطقه مروست ۴,۴m/s می باشد. میانگین سرعت باد نیز از رابطه ۱۴ تعیین می گردد:

$$V = C\Gamma\left(\frac{K+1}{K}\right) \quad (14)$$

این سرعت برای مروستm/s ۵,۵ می باشد. بر اساس تابع چگالی احتمال ویبول میانگین چگالی انرژی باد در یک مکان با رابطه ۱۵ تعیین می گردد

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho C^3 \Gamma\left(\frac{K+3}{K}\right) \quad (15)$$

در اینجا تابع معروف گاما با Γ نشان داده شده است. چگالی انرژی باد در مروست بر اساس داده های سالهای ذکر شده ۱۵۶ وات بر متر مربع می باشد. هنگامی که باد شروع به وزیدن می کند بر روی هر پره نیرو های ایرودینامیکی برآ (F_L) و پسا (F_D) ظاهر می شوند . این نیرو ها با استفاده از رابطه های زیر قابل محاسبه هستند[4-5].

$$F_L = 0.5\rho C_L {v_r}^2 C\,\Delta h \quad (16)$$

$$F_D = 0.5\rho C_D {v_r}^2 C\,\Delta h \quad (17)$$

در رابطه ی بالا c_L ضریب برآ و c_D ضریب پسا نام دارد. این ضرایب با استفاده از عدد رینولدز پره و زاویه حمله ایرفویل بدست می آیند. در این رابطه $C\,\Delta h$ المان مساحت پره است. از ترکیب نیرو های برآ و پسا بر روی پره ها ، نیرو های عمودی F_N و مماس F_T شکل می گیرند که برابرند با [2]:

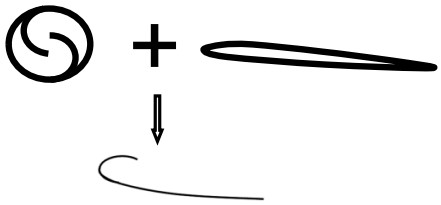
$$F_N = F_L\cos\alpha + F_D\sin\alpha \quad (18)$$

$$F_T = F_L\sin\alpha + F_D\cos\alpha \quad (19)$$

گشتاوری که هر پره در هر لحظه تولید می کند برابر با حاصل ضرب نیروی مماسی در شعاع توربین است ، بنابراین :

$$T = F_T R \qquad (۲۰)$$

برای برطرف کردن مشکل راه اندازی توربین داریوس استفاده از ترکیب داریوس – ساوانیوس یک راه حل است[6-7]. با این ترکیب ساوانیوس به راحتی در سرعت کم به راه افتاده و داریوس را به حرکت در می آورد. ایراد این روش آن است که در سرعت های بالا، سرعت کم ساونیوس باعث کاهش سرعت کل توربین خواهد شد. از طرفی روتور ساونیوس پس از راه اندازی کارایی بالایی ندارد. برای کمتر کردن پیچیدگی بهتر است از یک روتور استفاده شود و در عوض ایرفویل این روتور ترکیبی از ایرفویلهای روتور های داریوس و ساوانیوس همانند شکل ۲ باشد که به این ایرفویل J شکل گویند.



شکل ۲: شماتیک یک ایرفویل هیبریدی J شکل

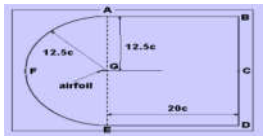
به دلیل اینکه محور توربین داریوس همواره عمود بر جهت باد است زاویه حمله مدام تغییر می کند و گشتاور منفی ایجاد می شود. از آنجا که همیشه یک پره در پایین دست پره دیگر روی محیط دوران در حال حرکت است بنابن وقتی باد به پره بعدی میرسد انرژی آن گرفته شده است. بنابراین به دلیل گشتاور منفی در پایین دست توربین گشتاور کمی تولید میکند. یک روش برای غلبه براین مشکل استفاده از ایرفویل J شکل میباشد که همزمان از هر دو نیروی برا و پسا استفاده می کند. ایرفویل J شکل با برش بخشی از یک سمت ایرفویل ایجاد می شوند.در این حالت می توان علاوه بر کاهش پیچیدگی توربین هزینه تولید آن را نیز کاهش داد. بدین ترتیب از مزیت پروفیلهای ساونیوس برای تحریک و ایجاد گشتاور راه اندازی استفاده می گردد و باعث می شود توربین در ناحیه مرده قرار نگیرد. با شروع حرکت به دلیل مشابهت این نوع ایرفویل با ایرفویلهای داریوس کارایی آن بالا می رود.

این روتور با اصول هردو نیروی لیفت و درگ کار می کند. علاوه بر آیرودینامیک لیفت حاصل از ورقه های جریان روی سطح هموار پره، این طراحی به هوا اجازه می دهد تا درون شکاف پشت ایرفویل هموار پره جا بگیرد. در نتیجه می توان گفت که روتور J با هر دو نیروی لیفت و درگ به طور همزمان کار می کند. می توان مشاهده نمود یک طرف ایرفویل همانند روتور های داریوس کمترین مقاومت هوا را دارد و سمت دیگر همانند روتورهای ساوانیوس دارای یک شکاف می باشد. در هنگام وزیدن باد نزدیکترین ایرفویل به باد ورودی با نیروی برشی باد مواجه شده و با عمل لیفت می چرخد. همزمان شکاف پشت ایرفویل با عمل درگ کمک به چرخیدن روتور می کند. بنابر این ایرفویل هیبریدی که ترکیبی از عملکرد روتورهای داریوس و ساوانیوس است توانایی روتورهای مذکور را همزمان در یک روتور جمع کرده و امکان چرخش روتور در سرعت های باد پایین را فراهم می نماید.

مقاطع J شکل با حذف ایرفویل از محل بیشینه ضخامت ایرفویل اولیه ایجاد می شوند و بیشترین توان خروجی با آن حاصل می گردد. با این کار به جای استفاده از مکانیزمهای گران و بعضا با عدم قطعیت و یا باحذف ترکیب توربین های ساوانیوس مشکل راه اندازی توربین با تقویت گشتاور راه اندازی حل می گردد. بنابر این در این طرح از ایرفویل J شکل استفاده می شود که پس از انتخاب نوع ایرفویل اولیه از محل بیشترین ضخامت برش داده می شود و روی آن تحلیل صورت می پذیرد.

شکل ۳: ایرفویل J شکل با برش از محل بیشینه ضخامت

برای بهره گیری بهتر از انرژی باد نیازمند به طراحی بهینه روتور بادی می باشد. جریان اطراف توربین ناپایدار سه بعدی آشفته تراکم ناپذیر می باشد. آیرودینامیک توربین بادی متاثر از شرایط فارفیلد بالا و پایین دست روتور می باشد[9]. به طور همزمان اینها وابسته به شرایط جریان آشفته مقیاس کوچک در اطراف پره ها می باشند. این نیازمند یک دامنه شبیه سازی شده بزرگ با رزولوشن فضایی بسیار کوچک می باشد. یک مزیت بزرگ توربین عمود محور این است که توانایی گرفتن باد از جهت های مختلف را دارد. این مزیت خصوصا در مناطق شهری که بدلیل موانعی همچون ساختمانها و درختان جهت باد غالبی وجود ندارد اهمیت بیشتری دارد. برای انجام مدل سازی ، میدان حل و فارفیلد به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: میدان حل در نظر گرفته شده برای تحلیل عملکرد پره

با توجه به شاخص ها و نماگرهای انرژی- برق یزد معاونت برنامه ریزی استانداری یزد در فصل تابستان ۱۳۹۲ متوسط برق مصرفی توسط مشترکان خانگی ۵۸۱ کیلو وات ساعت بوده است. با توجه به اینکه پیک مصرف برق در سال متعلق به فصل تابستان می باشد این آمار می تواند بیانگر این باشد که یک مصرف کننده خانگی برق به طور متوسط در سال ۲۳۲۴ کیلو وات و به طور متوسط در هر ساعت ۲۶۵ وات برق مصرف می کند. بنابراین طراحی یک توربین بادی که بتواند با توان حداقل ۲۶۵ وات برق تولید کند می تواند جوابگوی مصرف برق در بخش خانگی استان یزد باشد. در این پروژه طراحی یک توربین با توان سالیانه حداقل ۲۳۲۴ کیلو اوات ساعت برای پاسخگویی به حداقل نیازهای خانگی منطقه مروست انجام می شود. که این متناسب با توان خروجی یک توربین با میانگین حداقل ۲۶۵ وات در طول یک سال است. همچنین تخمین هزینه برای ساخت آن انجام خواهد شد.

۳- طراحی و نتایج

استراتژی طراحی توربین بادی گامهای زیر را در بر دارد:۱-جمع آوری داده های هواشناسی و توصیف منبع باد منطقه ۲-تعریف تابع هدف با بیان اهم ضوابط طراحی ۳-لیست کردن پارامترهایی که در فرآیند طراحی مواجه می شوند. این میانگین تعریف سطوح جزییات در تحلیل می باشد. ۴-ثابت نگه داشتن برخی از پارامترها برای ساده سازی و کوتاه کردن مقدار زمان مورد نیاز پروسه طراحی می باشد. ۵-برپایه منبع باد منطقه و داده های اجرایی طراحی اولیه یک طراحی آزمایشی برای برآورده کردن نیازهای توان بدست می آید. ۶-طراحی آزمایشی با استفاده از یک ابزار طراحی برای اطمینان از

اینکه همه قسمتها در تابع هدف به دست آمده اند اصلاح می گردد. برای ساده سازی بیشتر پروسه طراحی این قسمت با فرض ثابت بودن شعاع توربین و طول پره انجام خواهد شد (که به عنوان مرجع طراحی نامگذاری می گردند). بعد از اینکه استواری بهینه روتور بدست آمد تغییر ابعاد مرجع طراحی قابل انجام می گردد بدون اینکه در عملکرد آیرودینامیکی خللی وارد گردد. در هرزمان با ترتیب زیر یک پارامتر بهینه می گردد و سپس ثابت نگه داشته می شود: استواری روتور، ضخامت پروفیل پره و نقطه اتصال. ۸-تغییر ابعاد مرجع طراحی برای رسیدن به نیازهای توان که در تابع هدف تعریف شد. در این پژوهش توابع هدف به صورت زیر می باشد: ۱-خروجی توان برای توزیع سرعت باد در منطقه مروست (ماکزیمم باشد اما به طور میانگین بالاتر از ۲۶۵ وات باشد) ۲--بازده آیرودینامیکی ماکزیمم باشد. ۳--هزینه سیستم کمترین مقدار ممکن باشد. همچنین پارامترهای زیر در حین پروسه طراحی می تواند تغییر کند:۱ -تعداد پره ۲-شعاع توربین ۳-طول پره ۴-طول وتر ایرفویل ۵-نوع ایرفویل پره ۶-نقاط اتصال استرات به پره ۷-طراحی میله های نگه دارنده (استرات) ۸- سرعت چرخش به عنوان تابعی از سرعت باد (رادیان بر ثانیه و دور بر دقیقه). با این پارامترها بسیاری از ویژگی های غیر ابعادی زیر قابل حصول است:۱-استواری- توربین ($\frac{Nc}{R}$) ۲-نسبت سرعت نوک یا همان نسبت بین سرعت نوک پره و سرعت باد (TSR) ۳-نسبت منظری یا نسبت طول پره به وتر (H/c) ۴-نسبت شعاع به وتر (R/c). در اینجا N معرف تعداد پره و c طول وتر و R شعاع توربین و H طول پره می باشد.

تمام پارامترهای طراحی آزاد نیستند. برخی به طور آزادانه می توانند توسط طراح مشخص شوند مانند سرعت دورانی به عنوان تابع سرعت باد (یعنی ماکزیمم سرعت دورانی مجاز). بقیه پارامترها برای کوتاه کردن زمان مورد نیاز ثابت نگه داشته شده اند. پارمترهای ثابت نگه داشته در جدول ۲ آمده است:

جدول ۲: پارامترهای اولیه طراحی

نوع پارامتر	نوع و مقدار
تعداد پره	۳
نسبت سرعت نوک یا TSR	۲،۵
طول پره ها	۲،۸ متر
شعاع پره ها	۱متر
ایرفویل پره ها	J شکل
ایرفویل استرات ها	NACA0025
طول وتر پره	بهینه می شود
ضخامت و نوع ایرفویل	بهینه می شود
نقاط اتصال	بهینه می شود

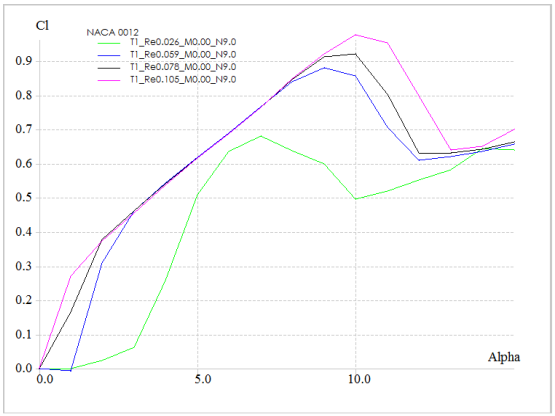
انتخاب توربین یک پره پیچیدگی را کاهش می دهد تغییرات بار مطلوب روی توربین با بیش از سه اما با هزینه بیشتر پره بدست می آید. همچنین با افزایش تعداد پره ها سرعت چرخش توربین کاسته می شود که مناسب منطقه مروست نمی باشد. علاوه بر این استفاده از سه پره باعث کاهش سر وصدت نسبت به تک پره و دو پره می گردد. توربین تک پره نسبت به دوپره ۱۰ درصد کمتر انرژی باد را می گیرد. همچنین دو پره نسبت به سه پره ۵ درصد انرژی کمتری می گیرد. این طراحی آزمایشی روتوری با شعاع ۱ متر و طول ۲،۸ متر پیشنهاد می دهد که برای اخذ انرژی کافی از باد منطقه مروست در نظر گرفته می شود. یک TSR بهینه ۲،۵ انتخاب شده است بدلیل اینکه در طیف وسیعی از طراحی توربین های عمود محور با سرعت باد کم مناسب است. ایرفویلهای بدون خمیدگی در اینجا استفاده شده است بدلیل هزینه پایینتر تولید آنها زیرا ایرفویلهای با خمیدگی نیازمند ساخت دو قالب برای دوطرف بالا و پایین ایرفویل می باشد. ایرفویلهای متقارن ۴ رقمی NACA از شکلهای چند ضلعی تشکیل شده است که برای ساخت راحت تر می باشد. ضمن اینکه بدلایلی که قبلا تشریح شد شکل ایرفویل به صورت J شکل انتخاب گردید. از آنجا که استرات ها تاثیر کمی بر روی راندمان توربین دارند ایرفویل استرات ها از نوع NACA0025 انتخاب شد تا ضمن مقاومت کم آیرودینامیکی بتوانند به استحکام سازه نیز کمک کنند.

ابزار بهینه سازی یک طراحی بهینه را به طور اتوماتیک تحویل نمی دهد بدلیل اینکه یک شکل بهینه کلی وجود ندارد. بنابراین یک تخمین اولیه نیاز است تا بهینه سازی شروع شود و زمان از دست نرود. برخی پارامترهایی که در طراحی توربین های عمودی استفاده می شود برای شروع پروسه طراحی انتخاب می شود. ماکزیمم سرعت نوک روی ۲۰ متر بر ثانیه تنظیم می شود. با توزیع فراوانی رخداد سرعت باد معلوم در منطقه مروست و منحنی نسبتCP به TSR محاسبات برای طراحی آزمایشی انجام می شود. این طراحی آزمایشی روتوری با شعاع ۱ متر و طول ۲،۸ متر پیشنهاد می دهد که برای اخذ انرژی کافی از با منطقه مروست در نظر گرفته می شود. از آنجا که طراحی آزمایشی پاسخگوی همه نیازهای تابع هدف نیست بنابراین نیازمند اصلاح دقیق آن می باشیم. برای انجام این کار در یک فرآیند موثر از ابزار شبیه سازی استفاده می کنیم.

برای انجام روند شبیه سازی طراحی از نرم افزار Qblade v0.9 استفاده می شود. این نرم افزار یک نرم افزار محاسباتی توربین بادی می باشد که ادغام قابلیت XFOIL / XFLR5 به کاربر اجازه می دهد تا به سرعت ایرفویل های مطلوب را طراحی وعملکرد قطبی آنها را محاسبه نموده و به طور مستقیم آنها را در طراحی روتور توربین بادی و شبیه سازی آن در اختیار دهد. QBlade همچنین مشتمل بر قابلیت پس پردازی گسترده برای روتور و شبیه سازی توربین می باشد و بینش عمیقی به تمام متغیرهای تیغه و روتور مربوطه می دهد. این نرم افزار با مدلهای مومنتوم و الگوریتم تصحیح DMS (Double Multiple Streamtube) شبیه سازی را انجام می دهد. تمام پارامترهای طراحی با برنامه مدل CMDMS تغییر می کند. این مدل از یک مدل مومنتوم دو مرحله ای برای شبیه سازی آیرودینامیک توربین عمودی استفاده می کند. جریان هوا به یک قسمت کلی و یک قسمت محلی تفکیک می شود. مدل قسمت محلی جریان هوا از نقشه برداری منسجم برای توصیف ایرفویل همانند یک دایره استفاده می کند. با این روش سریعتر شدن محاسبات با استفاده از تبدیل فوریه امکانپذیر می شود. مدل CMDMS نیاز به یک سری ورودی ضروری برای شبیه سازی آیرودینامیک مناسب توربین دارد. یک ورودی مهم مشخصات نقطه پیش استال لیفت می باشد. در یک زاویه حمله مشخص پره شروع به وارد شدن به ناحیه استال می کند و شیب C_L شروع به کاهش می کند. این نقطه نزدیک همان جایی است که منحنی C_L در مقابل زاویه حمله خطی شدن را تمام می کند. شکل ۵ نقطه پیش استال و منطقه استال برای ایرفویل NACA0012 در TSR های مختلف را نشان می دهد.

برای برخی پروفیلهای متقارن NACA بخاطر اعداد رینولدز کم خلا داده تجربی در ناحیه پیش استال وجود دارد. برای مقایسه حداقل کیفیت مقاطع ایرفویل متفاوت و طرح های توربین، بهتر است از یک ابزار منحصر به فرد استفاده شود که این ابزار باید به زمان پردازش کوتاهی داشته باد به همین دلیل در نرم افزار Qblade از ابزار XFoil Direct Analysis انتخاب شده

است. XFoil کدی برای شبیه سازی ویژگی های آیرودینامیکی مقاطع ایرفویل متفاوت در اعداد رینولدز اختیاری می باشد که از قابلیتهای نرم افزار Qblade می باشد.



شکل ۵: منطقه استال برای ایرفویل NACA0012 در رینولدزهای مختلف

خروجی های این قسمت ضرایب لیفت آیرودینامیکی در مقابل زاویه حمله در ناحیه پیش استال می باشد. با فرضیات زیر عد رینولدز انتخاب شده برای سرعت های متفاوت منطقه مروست انتخاب شده است: ۱-چگالی هوا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر ۱/۲۰۴ می باشد(جداول استاندارد خواص هوا). چگالی هوا متناسب است با فشار و دمای تعریف شده در قانون گاز کامل می باشد. رابطه چگالی هوا و فشار هوا برای نقاط مختلف از رابطه ۲۱ بدست می آید:

$$p = \rho \frac{R}{M} T \qquad (۲۱)$$

در این رابطه pفشار هوا و ρ چگالی هوا و R ثابت گاز و M جرم مولی و T دمای هوا می باشند. ۲-لزجت در شرایط استاندارد برابر 1.789e-5 و ۳-طول موثر ایرفویل برابر 200 mm می باشد.

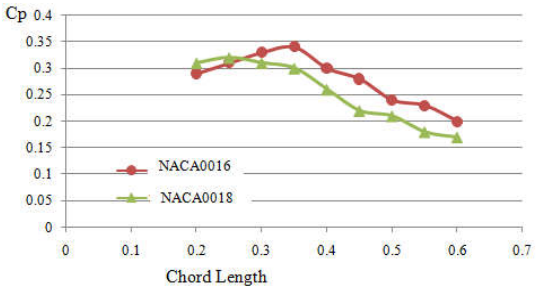
در ابتدای طراحی برخی پارامترها برای ساده سازی ثابت فرض شد. این اندازه توربین به عنوان مرجع و صفر طراحی در نظر گرفته شد. در ابتدای طراحی برای شروع طول پره ۲،۸ متر و شعاع پره ۱ متر در نظر گرفته شد. مرجع طراحی برای تغییرات استواری و ضخامت ایرفویل و نقطه اتصال در درجه مذکور آزمایش شد. هنگام انتخاب توربین با بهترین عملکرد نه تنها Cp در TSR بهینه نتیجه گرفته می شود کدام طراحی بهترین عملکرد را دارد. در بیشتر مراحل طراحی ضرایب لیفت و درگ همانند نیروهای مماسی و عمودی وارد بر مقاطع برای جلوگیری از مسایل ناخواسته مورد مطالعه قرار می گیرد که این کار با توجه به تابع هدف انجام خواهد شد. پس از انتخاب بهترین طرح برای برآورده کردن نیازهای میانگین توان خروجی با توجه به مساحت جاروب شده مقیاس ابعاد کوچک می شود. در مرحله پایانی برای اطمینان از اینکه تغییر مقیاس آسیبی به عملکرد آیرودینامیکی وارد نکرده است فرآیند طراحی در ساده ترین راه دوباره انجام می شود.

استواری نسبت مساحت پره ها به مساحت جاروب شده کل می باشد. این پارامتر تاثیر زیادی در عملکرد توربین دارد. این پارامتر برای توربین های عمود محور به صورت زیر بدست می آید:

$$\sigma = \frac{NC}{R} \qquad (۲۲)$$

توربین های با استواری بالا برای کاربردهای با گشتاور بالا استفاده می شود در این توربین ها پره ها آرام می چرخند. این توربین ها گشتاور شروع به حرکت بالایی در نسبت سرعت نوک پایین دارند. اما در کاربردهای با سرعت باد زیاد گشتاور بالا مطلوب نیست. وقتی استواری بالا باشد نمودار تغییرات Cp به TSR پهنای کمتری خواهد داشت اما پیک نمودار تیزتر خواهد بود. این بدین معناست که این نمودار دارای حساسیت به بالایی است یعنی با تغییر کوچک TSR تغییر بسیار زیاد خواهد بود.

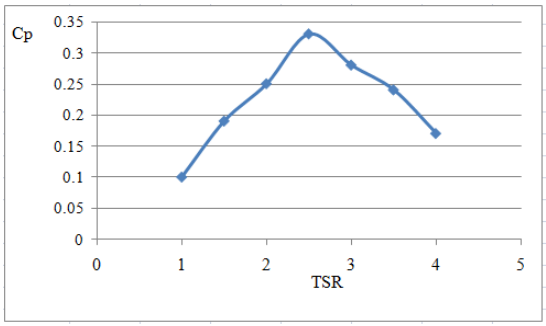
تعداد پره توربین ۳ در نظر گرفته می شود از اینرو برای تحلیل استواری بهینه طول وتر برای دو ایرفویل متفاوت تغییر می کند. بقیه پارامترها در مرجع طراحی ثابت نگه داشته می شوند. TSR نیز ثابت و برابر ۳ در نظر گرفته می شود.استواری کمتر طیف گسترده تری از میانگین TSR تولید می کند. استواری بالاتر باعث می شود سازه تنش بالاتری تحمل کند و رسیدن به حداکثر کارایی آیرودینامیکی در TSR پایین تر ممکن شود. با تغییر طول وتر از ۰،۲ متر تا ۰،۶ متر استواری بین ۰،۶ تا ۱،۸ خواهد بود. با نتایج حاصل از روش CMDMS برای استواری مقدار ۱،۰۶۸ بیشترین Cp را در TSR برابر ۲،۵ می دهد. بنابراین برای استواری مقدار ۱،۰۶۸ انتخاب می شود که طول وتر ۰،۳۵۶ متر را تایید می کند. این استواری در هر دو روش DMSV و مدل CMDMS نزدیک به هم بدست آمد. در شکل ۶ مقدار طول وترهای مختلف برای دو ایرفویل NACA0016 و NACA0018 مقایسه شده اند.



شکل ۶: مقایسه طول وتر در دو ایرفویل NACA0016 و NACA0018

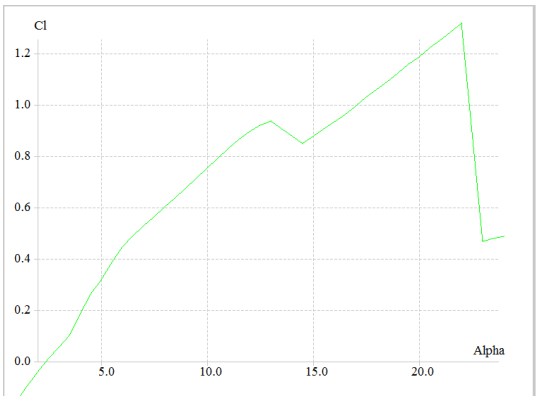
ایرفویل انتخاب شده به صورت J شکل می باشد. بنابراین باید نوعی از ایرفویل انتخاب کنیم که با برش زدن آن بتوان به شکل J مورد نظر دست یافت. ایرفویل J شکل برای ایجاد نیروی درگ و ایجاد گشتاور راه انداز مناسب می باشد اما هنگامی که توربین به راه افتاد هدف افزایش نیروی لیفت و کاهش نیروی درگ و راندمان آیرودینامیکی بالاتر می باشد. بنابر این باید نسبت نیروی لیفت به درگ افزایش پیدا کند. بنابراین باید ایرفویلی انتخاب شود که قبل از تبدیل به J بهترین عملکرد آیرودینامیکی را داشته باشد. بر طبق مطلب بخش قبل بیشترین راندمان آیرودینامیکی در TSR حدود ۲،۵ بدست می آید. حال باید نوعی از ایرفویل انتخاب کرد که در TSR کم بهترین عملکرد را داشته باشد. در تحلیل حداکثر ضخامت ایرفویل پره این ضخامت بین ۱۲ تا ۲۵ درصد طول وتر تغییر می کند و TSR برای هر ایرفویل از ۱ تا ۴ تغییر می کند که طول وتر روی ۰،۳۵۶ متر تنظیم شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که NACA0016 عملکرد خوبی در TSR کم دارد و TSR بهینه کمتری دارد. نتایج شبیه سازی نشان دهنده این است که NACA0016 تناسب بهتری بین عملکرد آیرودینامیکی و استحکام سازه ای دارد. بنابراین ایرفویل متقارن NACA0016 به عنوان مرجع طراحی انتخاب می شود. شکل ۷ نمودار Cp

در مقابل نسبت سرعت نوک را برای این ایرفویل نشان می دهد. سپس با برش زدن ایرفویل به شکل J مورد نظر می رسیم.



شکل ۲: نمودار CP در مقابل نسبت سرعت نوک را برای ایرفویل NACA0016

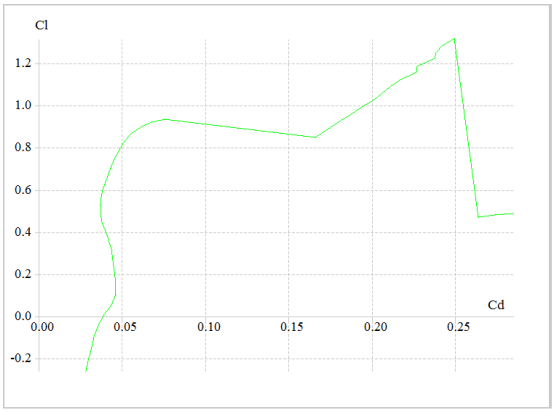
منحنی تغییرات ضریب برآ به زاویه حمله (Cl-alpha) برای ایرفویل J شکل در شکل ۸ زیر مشاهده می شود. پارامتر های ضریب برآی ماکزیمم و زاویه واماندگی این نمودار که حایز اهمیت است. زاویه واماندگی هم که از مشخصه های مهم ایرفویل است حدود ۱۳ درجه می باشد. بزرگ بودن این زاویه باعث می شود جریان دیرتر از روی ایرفویل جدا شود و پدیده واماندگی دیرتر اتفاق می افتد.



شکل ۳: منحنی تغییرات ضریب برآ به زاویه حمله (Cl-alpha) برای ایرفویل J شکل

شکل ۹ نیز منحنی تغییرات ضریب پسا به ضریب برآ (Cd-Cl) را نشان می دهد. این منحنی مهترین منحنی یک ایرفویل می باشد. در این منحنی کمترین مقدار Cd را Cdmin و Cl متناظر آن را Cli (ضریب برآی ایده آل)می نامند. پارامتر ضریب برآی طراحی (Cld- Design Lift Coefficeint) که در آن نسبت L/D ماکزیمم است در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

نقطه اتصال جایی است که پره به استرات وصل می شود و بر حسب درصد فاصله از لبه حمله تعیین می شود. در تحلیل نقطه بهینه اتصال پارامترهای ذکر شده بین صفر تا ۵۰ درصد طول وتر از لبه حمله متغیر می باشد. TSR در عدد 2.5 ثابت نگه داشته می شود. طول وتر ایرفویل پره روی ۰،۳۵۶ متر تنظیم گردیده و ایرفویل از نوع NACA0016 می باشد.



شکل ۴:منحنی تغییرات ضریب پسا به ضریب برآ (Cd-Cl) برای ایرفویل J شکل

بقیه پارامترها در مرجع طراحی ثابت در نظر گرفته شده اند. نقطه اتصال نقطه ای است که پره ها به روتور فیکس شده اند و بر حسب درصدی از طول وتر از لبه حمله بیان می شود. با تغییر این نقطه عملکرد آیرودینامیکی تحت تاثیر قرار می گیرد. تاثیرات تغییر در محل اتصال در ۱۰-۲۰-۲۵-۳۰-۴۰ و ۵۰ درصد طول وتر شبیه سازی می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد اثر تغییر محل اتصال بر عملکرد آیرودینامیکی زیاد نبوده است. نیروهای عمودی و مماسی که از پره ها به روتور انتقال می یابد تفاوت بسیار کمی بین نقاط اتصال مختلف نشان می دهند. بنابراین نقطه اتصال ۲۵ درصد طول وتر از لبه حمله در نظر گرفته می شود. این شکل نرمالی بین طراحی ها محسوب می شود و بخاطر تفاوت بسیار کوچک در C_p دلیلی بر تغییر این محل وجود ندارد.

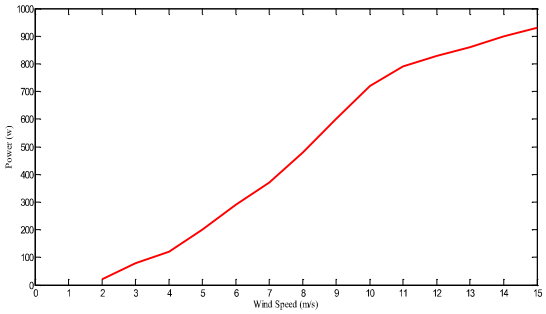
جدول ۳: مقایسه Cp برای محل های اتصال مختلف

محل اتصال	0.1c	0.2c	0.3c	0.4c	0.5c
Cp	0.339	0.342	0.337	0.335	0.331

براساس تحلیل های انجام شده فوق طرح کلی انجام شده مطابق جدول ۴ خواهد بود که بر این اساس مدلسازی هندسی انجام شده است. جنس ورق ایرفویل و مواد اولیه بر اساس آلومینیوم طراحی شده است. ورق دور پره با دستگاه برش بریده می شود و سپس به ریب ها با پرچ متصل می شود. ماشینکاری ریب ها و شفت اصلی باید توسط فرز CNC انجام شود. اتصال نقاطی که در نقشه به صورت پیچ و مهره نیستند به صورت پرچ کاری می باشد تا هزینه تولید کاهش یابد. منحنی توان در شکل ۱۰ آمده است. با توجه به داده های هواشناسی و اینکه از سال ۲۰۱۰ به بعد به ندرت سرعت باد بالای ۱۵ متر بر ثانیه ثبت شده است (جدول ۱) بنابراین در خروجی Qblade ماکزیمم سرعت باد در این نمودار ۱۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه در سرعت های بالای ۲۵ متر بر ثانیه به دلیل آنچه که آسیب به سیستم توربین خوانده می شود توربین ازکار می افتد و اصطلاحا به این سرعت نام سرعت shot down سیستم اطلاق می گردد. با توجه به فراوانی بسیار کم داده های بین سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت ۲۵ متر بر ثانیه می توان گفت که در سرعت های بالای ۱۵ متر برثانیه سیستم توانی را تولید نمی کند.

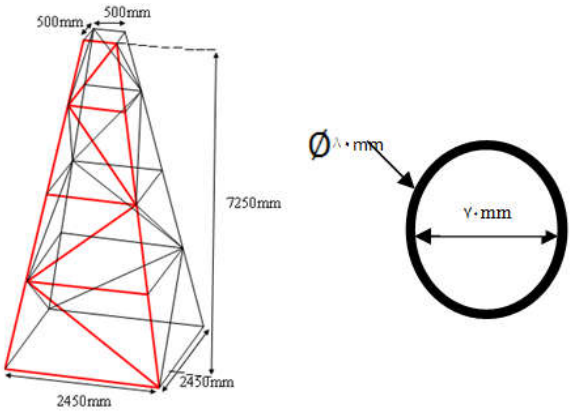
جدول ۴: پارامترهای طراحی نهایی

مشخصه	نوع و مقدار
تعداد پره	۳
نسبت سرعت نوک یا TSR	۲,۵
طول پره ها	۲,۸ متر
شعاع پره ها	۱متر
ایرفویل پره ها	J شکل از برش NACA0016
ایرفویل استرات ها	NACA0025
طول وتر پره	۰,۳۵۶ متر
Cp	۰,۳۴



شکل ۱۰:منحنی توان برای توربین با ایرفویل J شکل

برای نگهداری سازه توربین بادی نیازمند طراحی یک برج می باشد. ارتفاع برج باید اندازه ای باشد که بتواند مقدار بهینه انرژی کسب شده باد که در ارتفاع ۱۰ متری به پره ها برخورد کند را دریافت نماید. بنابراین با فرض اینکه توربین طراحی شده برای استفاده در پشت بام منازل و یا ساختمانهای یک طبقه منطقه مروست نصب می شود می توان ارتفاع پشت بام را جزء ارتفاع برج به حساب آورد و برج طراحی شده ارتفاع ۷,۲۵ متری داشته باشد. ازطرفی برای حمل و نقل بهتر و انتقال نیروی حاصل از وزن سازه و نیروهای دینامیکی در حین کار توربین و حف تعادل برج از یک برج خرپایی استفاده می شود. این نوع خرپایی باعث می شود جابجایی برج به مینیمم مقدار خود برسد. سازه های خرپای زیادی به کمک نرم افزار شبیه سازی شد که در نهایت خرپایی که اجزاء آن از لوله های فولادی نازک و قطر زیاد تشکیل می گردد با در نظرگرفتن وزن کل کم و شکل هندسی مناسب به عنوان بهترین طرح انتخاب گردید. همه اجزاء خرپا از لوله های فولادی می باشد. بهتر است این لوله فولادی از نوع S355MLH باشد که حد الاستیک آن ۳۵۵مگا پاسکال حد نهایی ۴۵۰ مگا پاسکال و چگالی آن ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. همچنین حد خستگی این فولاد برابر ۱۵۷ مگا پاسکال می باشد. هندسه این اجزاء دارای سطح مقطع به شکل ۱۱ می باشد. اجزاء خرپا توسط پیچ و مهره در محل نصب به هم متصل می گردند. این نوع اتصال باعث راحتی و کاهش حجم سازه در حمل و نقل به محل نصب می گردد.



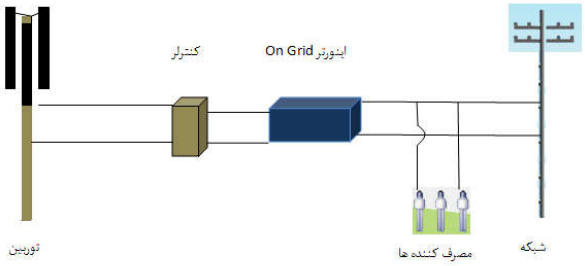
شکل ۵: برج توربین و مقطع لوله فولادی آن

چنانچه مکان نصب قابل تغییر نباشد اتصال جوشکاری هم می تواند برای اتصال اجزاء استفاده شود.چرخش روتور توسط باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. ژنراتور مورد اسفاده در این کار در بالای برج ثابت می شود. در اینجا توربین به طور مستقیم و بدون استفاده از گیربکس به روتور ژنراتور وصل می گردد. که این کار علاوه بر کاهش هزینه تمام شده توربین باعث حذف مسایل مربوط به تعمیرات گیربکس می شود. ارتباط دوران ژنراتور و تعداد قطب ها به صورت زیر است:

تعداد جفت قطب ها / فرکانس شهر = دوران بر ثانیه (۲۳)

هنگامیکه تعداد قطب ها دو برابر می شود سرعت دورانی شفت باید نصف شود. ژنراتور مورد استفاده باید تعداد قطبهای زیادی برای دستیابی به القاء و راندمان کافی داشته باشد البته در حدی نباشد که باعث افزایش وزن ژنراتور شود. چون افزایش نسبت انتقال حرکت نداریم ژنراتور سرعت چرخشی نسبتا آرامی خواهد داشت.

یک ژنراتور سنکرون با استفاده از مغناطیس دایمی تک فاز برای این توربین مناسب می باشد. سرعت باد برای شروع به توان دادن این ژنراتور باید پایین و در حدود m/s ۱,۵ باشد. چون توربین مذکور در مناطق با سرعت باد نسبتا پایین کار می کند بنابر این ژنراتور با توان نامی حداکثر ۱ کیلو وات برای این توربین مناسب می باشد. مطابق دیاگرام شکل ۱۲ برای اتصال سیستم به شبکه می توان با یک اینورتر جریان کنترل شده ای با اعوجاج بسیار کم به شبکه تزریق کرد.



شکل ۱۲: اتصال توربین بادی به شبکه برق

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با عنایت به خصوصیات و اطلاعات هواشناسی منطقه مروست و ضرورت ساخت توربین مناسب جهت تولید انرژی در مقیای خانگی، طراحی و تحلیل عملکرد یک توربین کوچک باد انجام و مورد ارزیابی قرارگرفت. ابتدا مطالعات اولیه و بررسی نیازهای باد منطقه انجام گردید. سپس به بررسی انواع توربین و طراحی اولیه آن پرداخته شد. با بررسی استانداردها و مشخصات فنی، اجزای مورد نیاز سیستم به منظور انتخاب بهینه اجزا سیستم بدست آمد. در ادامه طراحی انجام شده و همچنین برج توربین و ژنراتور و نوع اتصال به شبکه معرفی گردید. بدیهی است پس از ساخت نمونه آزمایشگاهی و برطرف کردن نواقص امکان تولید این توربین به عنوان دستگاهی برای تولید انرژی خانگی میسر خواهد بود.

۵- تقدیر وتشکر

این پژوهش با حمایت شرکت توزیع برق استان یزد انجام گردیده که از ایشان کمال تشکر و قدردانی به عمل می آید.

۶-منابع

[1] E. Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies Application economics, Springer, Berlin, 2006

[2] A.R. Jha, Wind Turbine Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011

[۳] ک. امیدوار ، م. دهقان طرزجانی ، پتانسیل سنجی و برآورد مشخص های نیروی باد برای تولید انرژی در ایستگاه های همدیدی استان یزد، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی،دوره ۲۷ شماره ۲، ۱۳۹۱، ص ۱۴۹-۱۶۸.

[4] R.templin, aerodynamic performance teory for the NRC vertical axis wind turbine , national aeronautical establishment laboratory technical report LTR-LA-160, Canada , 1974

[5] J. strickland the darrieus turbine , a performance prediction model using multiple stream tubes , technical report SAND75-041, Sandia National Laboratories ; Albuquerque , 1975.

[6] O. Hammond, Design of an alternative hybrid vertical axis wind turbine, B.S. Major Qualifying Report, Worcester Polytechnic Institute, 2014

[7] J. Kumbernuss, Ch. Jian, J. Wang, H.X. Yang, W.N. Fu, A novel magnetic levitated bearing system for Vertical Axis Wind Turbines (VAWT), Applied Energy, Vol. 90(1), 2012, Pp. 148–153.

[۸] ح. ع . خجسته، طراحی، ساخت و تست یک نمونه کوچک توربین باد محور عمودی از نوع داریوس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۹۲

[۹] ع . کیانی فر، س . جوادی، مطالعه جریان اطراف روتور ساونیوس به کمک حل عددی و ازمایش در تونل باد، نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی، دوره ۱۸ شماره۱، ۱۳۸۵، ص ۳۷-۴۹.