



بهینه‌سازی توربین بادی ۳۰ کیلوواتی توسط الگوریتم ژنتیک با کاربرد خانواده‌ی ایرفویل سری S

سیمین سیفی خداشهری^۱، فرشاد ترابی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران sseyfi@mail.kntu.ac.ir
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران ftorabi@kntu.ac.ir

چکیده

در این مقاله طراحی پره‌ی یک توربین ۳۰ کیلوواتی برای یک منطقه‌ی مشخص به منظور دریافت بیشترین انرژی ممکنه در طول سال مورد توجه قرار گرفته است. برای انجام محاسبات آیرودینامیکی از روش ممنوم المان پره در محیط برنامه‌نویسی سی پلاس پلاس استفاده شده و مدل طراحی شده توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. به منظور انجام فرایند طراحی، ابتدا توسط مدل، شعاع بهینه در پروفایل ایرفویل اولیه به دست آمده و سپس توان تولیدی در شعاع اولیه، بیشینه شده است. همچنین انرژی تولیدی سالانه با فرض کردن سرعت شروع، سرعت طراحی و سرعت خاموشی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی، بیشینه شده است. در نهایت، سه پروفایل دیگر از خانواده‌ی ایرفویل NREL روی پره اعمال شده و نتایج حاصل با پروفایل اولیه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل طراحی شده با استفاده از خانواده‌های مختلف ایرفویل‌های NREL مدل توربین پایه را بهبود می‌بخشد و توان تولیدی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کد آیرودینامیکی، روش ممنوم المان پره، الگوریتم ژنتیک، خانواده‌ی ایرفویل

۱- مقدمه

امروزه، یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی، آلودگی مربوط به سوخت‌های فسیلی است. از این رو انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد به عنوان یک انرژی پاک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توربین بادی، تبدیلی است که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و از اجزای مختلفی تشکیل شده است. مهمترین بخش یک توربین بادی، پره است که در طراحی بسیار حائز اهمیت است. معمولاً در طول پره چندین ایرفویل به کار می‌رود تا بازدهی آیرودینامیکی آن افزایش یابد. به طور معمول، هدف طراحی بیشینه کردن بازدهی آیرودینامیکی در سرعت باد طراحی است. بهینه‌سازی آیرودینامیکی شامل انتخاب یک خانواده‌ی ایرفویل و جایگشت آنها و توزیع وتر و پیچش در طول پره است [۱].

روشهای مختلفی برای تحلیل توربین بادی توسعه یافته مثل روش ممنوم المان پره، روش‌های گردابه [۲]، دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD [۳] و روشهای آزمایشگاهی. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، تئوری ممنوم المان پره است که برای محاسبه‌ی توان توربین به کار می‌رود. این روش اولین بار توسط گلاورت به کار برده شد [۴]. در تمامی این روش‌ها سعی بر آن است که نیروهای آیرودینامیکی وارده بر پره‌های توربین که به خاطر وزش باد اعمال می‌شود، محاسبه شده و در نهایت طراحی مناسبی برای پره‌های توربین انجام شود. معمولاً ترکیب این روش‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای فاز طراحی، یکی از اهداف مهم به شمار می‌رود. لذا روش‌هایی که دارای سرعت بالا و دقت مناسب هستند، در این زمینه از اولویت برخوردارند.



همایش سراسری فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵ سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان

در سال ۱۹۹۸، فولسانگ [۵]، به بهینه‌سازی اقتصادی توربین‌های بادی مقیاس بزرگ که در تمام طول پره از ایرفویل‌های ناکا استفاده کرده‌اند پرداخت. در این کار، تابع هدف-با توجه به این‌که هزینه‌ی تولید انرژی برای توربین بادی داخل دریا بالاتر است- هزینه بود و متغیرهای مورد بررسی نیز شامل سرعت دورانی، قطر روتور و ارتفاع برج بودند. وی دو نوع چیدمان مختلف برای توربین‌های بادی در نظر گرفت و نتایج مربوط به هزینه را برای هر کدام، در دریا و خشکی مقایسه کرد. نتایج نشان داد که هزینه‌ی مربوط به تولید انرژی برای هر کدام از چیدمان‌های در نظر گرفته در دریا نسبت به خشکی ۱۲ درصد افزایش داشته است. در سال ۲۰۱۳، لیوو همکارانش [6] روی بهینه‌سازی خطی وتر و پیچش یک توربین با زاویه‌ی نصب ثابت و سرعت دورانی ثابت کار کردند. آن‌ها تابع هدف خود را ماکزیمم کردن انرژی تولیدی سالانه قرار دادند در حالی که مقدار توان خروجی ماکزیمم توربین را در یک حد نهایی ثابت فرض کرده بودند. در این کار از روش ممنوم المان پره برای تحلیل استفاده شده در حالی که عدد رینولدز مربوط به ایرفویل موجود در پره، ثابت فرض شد. پس از بهینه کردن پره‌ی مورد نظر، مشاهده شد که توزیع وتر و پیچش هر دو به صورت کاملاً خطی و کاهشی بودند. در سال ۲۰۱۳، ژو و شن [7] به طراحی ایرفویل و پره‌ی توربین‌های بادی بزرگ پرداختند. در این کار از ترکیب نرم‌افزار xfoil و روش ممنوم المان پره استفاده شد و برای یک قطر مشخص از روتور و نسبت سرعت نوک معین، ایرفویل‌های بهینه جهت دستیابی به بیشترین ضریب عملکرد و کمترین مقدار صلبیت جهت کم کردن هزینه طراحی شدند. در سال ۲۰۱۴، مجتبی طهانی و همکارانش [8]، به ترکیب روش ممنوم المان پره و الگوریتم ژنتیک در طراحی و بهینه‌سازی پره‌ی توربین پرداختند. آن‌ها کار خود را با هدف ماکزیمم کردن توان خروجی با فرض ثابت بودن قطر روتور و نیز سرعت باد طراحی، انجام دادند و به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی برای وتر یک توزیع خطی و برای پیچش یک رابطه‌ی نمایی در نظر گرفتند. پس از بهینه‌سازی مشخص شد که میزان توان تولیدی ۱۰ درصد افزایش داشته است.

در سال ۲۰۱۴، جیمز و همکارانش [9] روی بهینه‌سازی یک توربین افق‌محور کار کردند. در این کار ابتدا از داده‌های آزمایشگاهی یک نمونه‌ی توربین واقعی ۱۵۰ کیلوواتی استفاده شد. سپس برای بهینه‌سازی که توسط الگوریتم ژنتیک در متلب انجام شد، یک ایرفویل موجود در توربین اولیه با سه ایرفویل جایگزین شد. تابع هدف، بیشینه کردن انرژی تولیدی در یک سال و کمینه کردن جرم پره است. بهینه‌سازی آیرودینامیک با روش ممنوم المان پره انجام شد که در آن از یک کد مرجع آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر استفاده شد. بهینه‌سازی مربوط به بخش ساختاری که در آن هدف کمینه کردن جرم پره بود، بر اساس تئوری میله‌ی اویلر-برنولی انجام شد. متغیرهای طراحی نیز شامل توزیع پیچش، وتر و ضخامت نسبی می‌شوند. پس از بهینه‌سازی مشاهده شد که توزیع پیچش در نزدیکی نوک پره به صورت تقریباً خطی بوده و با توجه به اینکه در این کار مینیمم کردن جرم پره هم منظور شده، نمودار مربوط به پیچش، وتر و ضخامت نسبی در پایین نمودار مربوط به نمونه‌ی توربین اولیه قرار می‌گیرد. همچنین جرم مواد به کار رفته در پره نیز پس از بهینه‌سازی ۱۵ درصد کاهش یافت.

یکی از اهدافی که در تحقیق‌های پیشین کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، نقش انتخاب خانواده‌های مختلف ایرفویل برای طراحی پره‌ی توربین است. در مستندات خانواده‌های ایرفویل که توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر NREL ارائه شده، برای یک سری از توان‌های مشخص، چندین خانواده‌ی پره ارائه شده‌است لذا طراح از بین آنها حق انتخاب دارد. در این مقاله، برای بهبود عملکرد یک توربین بادی ۳۰ کیلوواتی، طراحی آیرودینامیکی پره توسط روش ممنوم المان پره انجام شده است. پروفایل اولیه از خانواده‌ی ایرفویل شامل S821-S819-S820 است. ابتدا شعاعی که به ازای آن توان نامی ۳۰ کیلووات توسط مدل طراحی شده به دست می‌آید، محاسبه و با شعاع اولیه مقایسه خواهد شد. در ادامه، توان تولیدی و انرژی تولیدی سالانه به عنوان توابع هدف در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که انتخاب خانواده‌ی ایرفویل نقش مهمی در عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ایفا می‌کند، برای توربین مورد نظر چندین خانواده از ایرفویل بررسی و نتایج آن روی توان تولیدی با یکدیگر مقایسه خواهند شد.



همایش سراسری فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵

۲- تئوری

۱-۲- محاسبات آماری باد منطقه

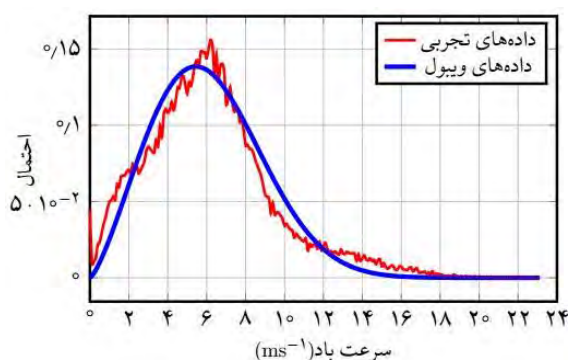
شهر مورد مطالعه، بردخون در جنوب ایران است که در فواصل زمانی مشخص سرعت باد در طی یک سال در آن اندازه گیری شده است. برای نشان دادن توزیع سرعت باد، تابع احتمال ویبول در نظر گرفته شده است. این تابع، از جمله توابعی است که داده های تجربی باد را به خوبی تقریب می زند. تابع ویبول از رابطه ی ۱ به دست می آید که در آن k و c به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس نام دارند که از روابط تجربی مختلفی قابل محاسبه اند [۱۰].

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

پارامتر شکل و مقیاس تابع ویبول برای انجام محاسبات انرژی سالیانه در هر منطقه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و باید بر اساس اطلاعات هواشناسی به دست بیاید. اطلاعات باد این منطقه در سایت سازمان انرژی های نو ایران (سانا) موجود بوده که در بازه ی زمانی سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ موجود است. در شکل ۱ توزیع احتمال حاصل از داده های موجود ترسیم شده و بر اساس آن پارامترهای تابع احتمال ویبول محاسبه شده است. این پارامترها به طور خلاصه در جدول ۱ آمده و همچنین شکل ۱ مقایسه ی پراکندگی داده های تجربی باد با برازش حاصل از تابع ویبول را نشان می دهد. بازه ی زمانی سه ساله برای داده های هواشناسی موجب می شود که نتایج موجود از اعتبار خوبی برخوردار باشد.

جدول ۱: داده های آماری باد بردخون

پارامتر	مقدار	واحد
ارتفاع (متر)	۴۰	متر
پارامتر مقیاس (c)	۶/۹۱	-
پارامتر شکل (k)	۲/۱۵۸	-
سرعت میانگین	۶/۱۷۴۱۵	متر بر ثانیه



شکل ۱: نمودار مقایسه ی پراکندگی داده های تجربی باد با برازش حاصل از تابع ویبول

با توجه به جدول ۱ مقدار سرعت نامی منطقه تقریباً دو برابر سرعت میانگین در نظر گرفته می شود [۱۱]. بنابراین در این منطقه سرعت نامی در حدود ۱۲ متر بر ثانیه خواهد بود. همچنین برای انجام محاسبات و صحت سنجی نتایج، به عنوان یک نمونه ی عملی، توربین مدل FUHRLANDER FL30 LM 6.1 برای تحلیل و طراحی انتخاب می شود. این توربین، برای تولید توان ۳۰ کیلووات طراحی شده و اطلاعات آیرودینامیکی و عملیاتی آن موجود است. این اطلاعات به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است.



همایش سراسری فنآوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

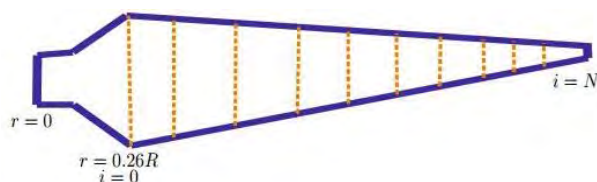
سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵

جدول ۲: اطلاعات توربین مورد بررسی [۱۲]

مدل توربین	تعداد پره ها	قطر روتور (m)	ارتفاع توپی (m)	توان نامی (kW)	سرعت نامی (ms ⁻¹)	سرعت خاموشی (ms ⁻¹)	سرعت شروع (ms ⁻¹)
FUHLANDER FL30 LM 6.1	۳	۱۲/۸	۱۸-۲۷	۳۰	۱۲	۳	۲۵

۲-۲- مدل پره

در این مقاله، یک مدل بر اساس روش ممنتوم المان پره طراحی شده است. شکل ۲ نمای برش خورده‌ای از شکل دو بعدی پره به همراه مقاطع اصلی آن را نشان می‌دهد که در این به کار می‌رود.



شکل ۲: المان‌بندی دو بعدی پره در تئوری ممنتوم المان پره

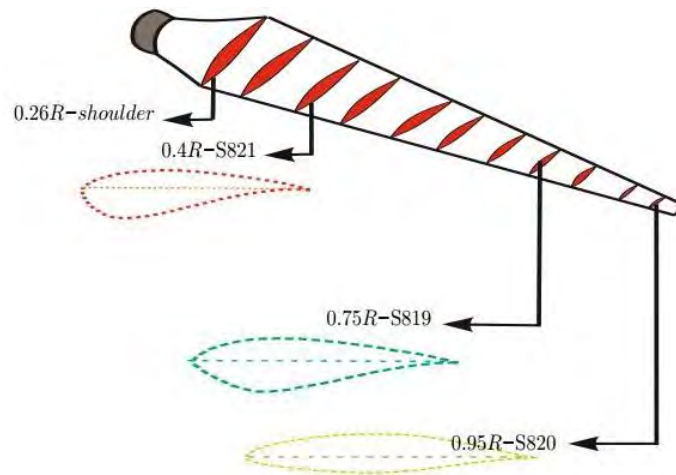
در طول پره، خانواده‌ی اولیه‌ی پیشنهادی متشکل از S821، S819 و S820 است که به ترتیب در مقاطع ریشه، میانه و نوک قرار می‌گیرند [۱۳]. شکل ۳ شماتیک پره‌ی مدل شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ نمودارهای ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل‌های اصلی را نشان می‌دهد که از برآزش نقاط تجربی به دست آمده است [۱۴].

پره در این کار به صد المان تقسیم می‌شود. نخستین المان از مرکز چرخش است که اولین مقطع بخش استوانه‌ای متصل به توپی خواهد بود و آخرین مقطع درست در نوک پره قرار دارد. در فاصله‌ی ۴۰ درصدی از مرکز، ایرفویل S821، در فاصله‌ی ۰/۷۵ درصدی از مرکز ایرفویل S819 و در فاصله‌ی ۰/۹۵ از مرکز ایرفویل S820 قرار می‌گیرد. در نتیجه پره در حالت کلی به شش بخش تقسیم می‌شود. بخش اول قسمت استوانه‌ای است که ۰/۱۳ از کل شعاع را در بر می‌گیرد. بخش دوم واسط بخش استوانه‌ای با اولین مقطع نصب ایرفویل که ۰/۱۳ از کل شعاع، بخش سوم از محل بیشترین وتر یا همان شانه تا ۰/۴۰ شعاع، بخش چهارم المان‌های بین ریشه تا وسط یا ۰/۴۰ تا ۰/۷۵ شعاع، بخش پنجم فاصله‌ی ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ شعاع و آخرین بخش از ۰/۹۵ تا درست نوک پره تعریف می‌شود. در نتیجه اولین المان که در ناحیه‌ی کاری پره برای تولید توان قرار می‌گیرد مقطع ۰/۲۶R خواهد بود [55] که در کد با $i=0$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فاصله‌ی هر المان تا المان بعدی به اندازه‌ی $0.1R$ است. برای بخش‌های میانی مقاطع اصلی با توجه به ایرفویل‌های آغازین و انتهایی بخش، میان‌بایی خطی به کار می‌رود. در نتیجه برای این بخش‌ها معادلات برآ و پسا بر حسب شعاع و زاویه‌ی حمله خواهد بود. برای هر مقطع، مراحل روش ممنتوم المان پره با دقت 10^{-6} انجام شده است. در نهایت پارامترهای مختلفی مانند توان، انرژی، گشتاور روی شفت اصلی و ضریب ظرفیت به عنوان خروجی کد در شعاع‌ها و سرعت‌های طراحی مختلف مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

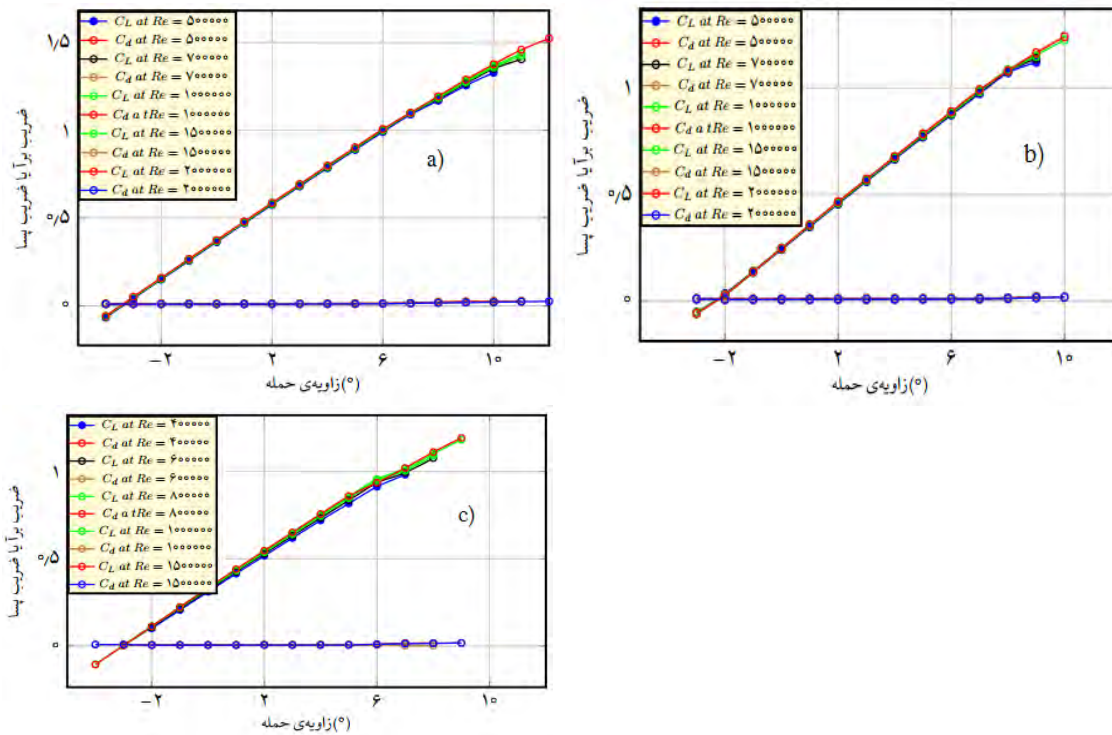


همایش سراسر فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵



شکل ۳: شماتیک مدل پره‌ی مورد بررسی



شکل ۴: نمودارهای ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل‌های مقاطع اصلی: a) S821, b) S819, c) S820



۳- بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی توربین مدل شده، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که یک ابزار قدرتمند در بهینه‌کردن پره‌ی توربین بادی است. در فرایند بهینه‌سازی، باید توابع هدف و متغیرهای طراحی به همراه قیود لازم تعریف شود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳-۱- تابع هدف

از اهداف مهم در طراحی و بهینه‌سازی توربین بادی، بیشینه‌کردن توان خروجی و انرژی تولیدی سالانه در آن است. توان خروجی توربین، از ضرب توان مکانیکی روی شفت کم سرعت (که از تئوری ممنتوم المان پره به دست آمده) در مقدار بازدهی سیستم انتقال قدرت و همچنین راندمان ژنراتور به دست می‌آید. مقدار انرژی تولیدی سالانه نیز از فرمول ۲ قابل محاسبه است [۱۶]:

$$AEP = 8760 P_{e,ave} \quad (2)$$

که در آن AEP مقدار انرژی تولیدی سالیانه^۱، عدد ۸۷۶۰ تعداد ساعات یک سال و $P_{e,ave}$ توان میانگین سالانه است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۶]:

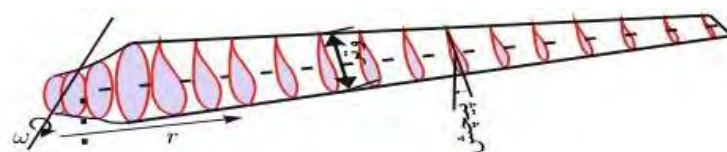
$$P_{e,ave} = P_{eR}(CF) = \eta \frac{\rho}{2} A(u_R)^3 (CF) \quad (3)$$

که در آن، P_{eR} توان نامی بر حسب کیلووات، ρ چگالی باد معادل ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، η حاصل ضرب راندمان جعبه‌دنده و ژنراتور معادل ۰/۷۱، u_R سرعت نامی معادل ۱۲ متر بر ثانیه و CF ضریب ظرفیت است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$CF = \frac{\exp[-(\frac{u_c}{c})^k] - \exp[-(\frac{u_R}{c})^k]}{(\frac{u_R}{c})^k - (\frac{u_c}{c})^k} - \exp[-(\frac{u_F}{c})^k] \quad (4)$$

که در آن u_c ، u_R و u_F به ترتیب سرعت‌های شروع، طراحی و جمع‌آوری هستند.

۳-۲- متغیرهای طراحی



شکل ۵: شماتیک شکل وتر و پیچش در طول پره

ثوابت معادلات وتر و پیچش به عنوان متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی توان در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در بهینه‌سازی انرژی تولیدی سالانه، سرعت‌های طراحی، شروع و جمع‌آوری به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

¹ Annual Energy Production



برای توزیع وتر در طول پره معادلات متفاوتی وجود دارد. در این کار یک معادله‌ی خطی برای وتر فرض شده است. این معادله، در حالت کلی، به صورت زیر خواهد بود؛

$$c = ar + b \quad (5)$$

لازم است که ضرایب a و b در معادله‌ی ۲ تعیین شوند. کافی است مقدار وتر در دو مقطع مشخص باشد. برای هر پره، درست در نوک یعنی در مقطع $100\%R$ ، مقدار وتر صفر خواهد بود. اگر بتوان برای مقدار وتر در شانه ($shoulder$) رابطه‌ای در نظر گرفت، این ثوابت به راحتی قابل محاسبه خواهند بود. شکل ۵ شماتیک توزیع وتر و پیچش را در طول پره در حالت کلی نشان می‌دهد. برای بخش انتقالی که واسط بین قسمت استوانه‌ای و محل اولین ایرفویل است و نیز برای مقطع شانه، در اسناد موجود در آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر، رابطه‌ای جهت محاسبه‌ی وتر ارائه شده است [۱۵] که به صورت معادله‌ی ۶ است.

$$C_{shoulder} = \left[\frac{29 - HD}{21} \right] r + 2.375HD - 39.357 \quad (6)$$

که در آن، HD مقدار قطر تویی و r شعاع هر مقطع است. تمامی مقادیر نیز در این معادله بر حسب واحد اینچ هستند که در نهایت به واحد متر تبدیل خواهند شد.

در نتیجه، برای هر شعاع مشخص از پره، می‌توان رابطه‌ی خطی مربوط به وتر را با پیدا کردن ضرایب a و b موجود در معادله‌ی ۵ به کمک رابطه‌ی ۶ به دست آورد. در حالت کلی، با توجه به روابط بیان شده معادله‌ی وتر به صورت زیر است؛

$$c = \frac{C_{shoulder}}{r_{shoulder} - R} (r - R) \quad (7)$$

که در آن $C_{shoulder}$ مقدار وتر در شانه است که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید و R طول پره است. با یک معادل‌سازی ساده به دست می‌آید؛

$$a = \frac{C_{shoulder}}{r_{shoulder} - R} \quad (8)$$

$$b = -aR \quad (9)$$

برای محاسبه‌ی مقدار اولیه‌ی جهت تعیین توزیع پیچش θ در ابتدا لازم است که از تئوری روتور ایده‌آل استفاده شود [۱۷]. در این تئوری، فرض می‌شود که در بهترین حالت (که ایده‌آل و غیر عملی است) مقدار ضریب القایی مماسی صفر و مقدار ضریب القایی محوری معادل 0.33 باشد [۱۷]. در این صورت، با توجه به مسأله‌ی گفته شده و نیز با توجه به روابط مثلثاتی شکل ۶ برای زاویه‌ی جریان ϕ به دست می‌آید:

$$\tan \phi = \frac{\frac{2}{3}V_0}{r\omega} \quad (10)$$

با توجه به رابطه‌ی نسبت سرعت نوک λ :

$$\lambda = \frac{r\omega}{V_0} \quad (11)$$

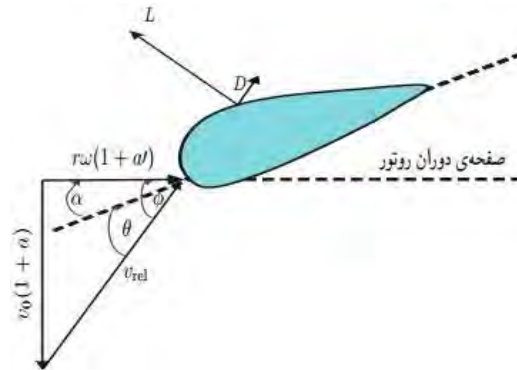
نتیجه می‌شود:

$$\tan \phi = \frac{2}{3\lambda} \quad (12)$$

با توجه به شکل ۶ نیز مشخص است که زاویه‌ی پیچش از تفاضل زاویه‌ی حمله‌ی α از زاویه‌ی جریان حاصل می‌شود یعنی؛



$$\theta = \arctan\left(\frac{2}{3\lambda}\right) - \alpha \quad (13)$$



شکل ۶: نمایش زوایای تشکیل شده روی ایرفویل

برای به دست آوردن مقدار پیچش در هر مقطع، لازم است زاویه‌ی حمله در آن مقطع مشخص باشد که معادل زاویه‌ی حمله‌ای است که در آن، مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا بیشینه شود [۱۸]. اگر رابطه‌ی ۱۳ برای هر مقطع در طول پره به کار رود، از برازش نقاط به دست آمده مشاهده می‌شود که معادله‌ی مربوط به توزیع پیچش در حالت کلی به صورت زیر است:

$$T_i = d \exp(e r_i) \quad (14)$$

که در آن شعاع هر المان و e و d ثوابت معادله هستند.

با توجه به توضیحات و معادلات فوق، در بهینه‌سازی توان، مقدار وتر در شانه و ضرایب e و d موجود در معادله‌ی ۱۴ به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و به ترتیب با نمادهای x_1 و x_2 و x_3 نشان داده می‌شوند.

در بهینه‌سازی مربوط به انرژی نیز، سرعت‌های شروع، طراحی و خاموشی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی برای بیشینه کردن انرژی در نظر گرفته می‌شوند و به ترتیب با نمادهای x_4 و x_5 و x_6 نشان داده می‌شوند.

۴- نتایج

۴-۱- بهینه‌سازی شعاع

مدل طراحی شده در کد آیرودینامیکی، با پروفایل پیشنهادی یعنی خانواده‌ی متشکل از S821-S819-S820 روی توربین اولیه اعمال می‌شود. شعاع توربین اولیه، ۶/۴ متر است. نتایج توان به ازای شعاع‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود در شعاع ۶/۳۷ متر، توان نامی ۳۰ کیلووات حاصل می‌شود. یعنی مدل پیشنهادی با پروفایل نامبرده، ۴۷٪ مقدار شعاع را بهینه می‌کند.

جدول ۳: خروجی اولیه برای تعیین شعاع بهینه

شعاع [m]	۵	۵/۹	۶/۲	۶/۳	۶/۳۷	۶/۴
توان خروجی [kW]	۱۸/۰۳۸۲	۲۵/۴۰۷۴	۲۸/۳۵۳	۲۹/۳۳۳۱	۳۰	۳۰/۳۱۴۱
انرژی [kWh]	۴۰۹۶۱/۷	۵۷۶۹۵	۶۴۳۸۴/۹	۶۶۶۱۰/۶	۶۸۱۲۵	۶۸۸۳۲/۱

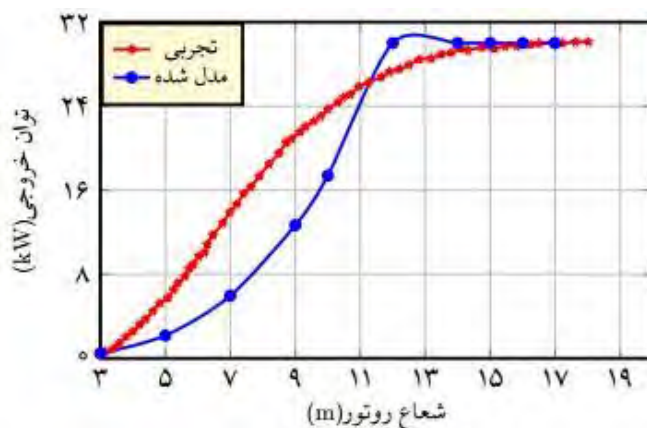


همایش سراسر فناوری و تکنولوژی

در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵

شکل ۷ نیز مقایسه‌ی نمودار توان بر حسب سرعت (power curve) را برای حالت تجربی و حالت بهینه در شعاع ۶/۳۷ نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی، نمودار مربوط به مدل زیر نمودار تجربی قرار می‌گیرد اما در سرعت نامی، دو نمودار بر یکدیگر منطبق خواهند شد.



شکل ۷: مقایسه‌ی power curve توربین مدل شده با نمونه‌ی تجربی

۲-۴- بهینه‌سازی توان

بهینه‌سازی توان، در شعاع اولیه یعنی ۶/۴ متر انجام می‌شود. در این شعاع ثابت، متغیرهای مربوط به توزیع وتر و پیچش، توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شوند. تابع هدف در این کار بیشینه کردن توان خروجی است. جدول ۴ قیود مربوط به متغیرها و مقدار بهینه‌ی آن را نشان می‌دهد.

جدول ۴: قیود و مقادیر بهینه‌ی متغیرها در بررسی توان تولیدی

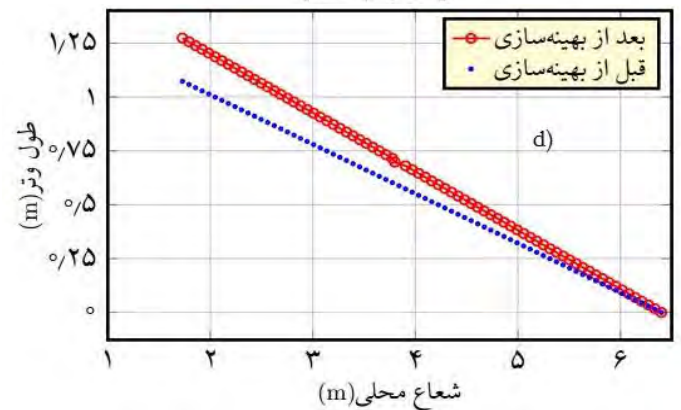
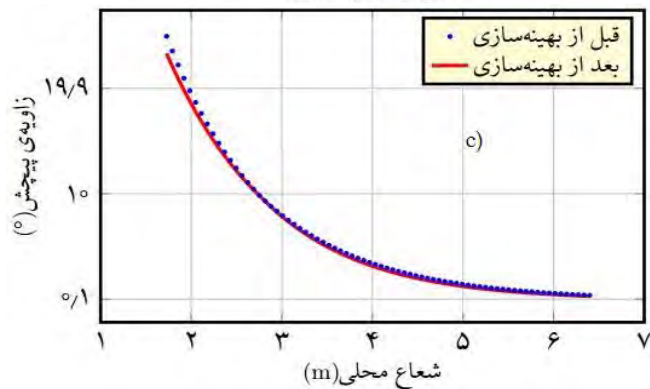
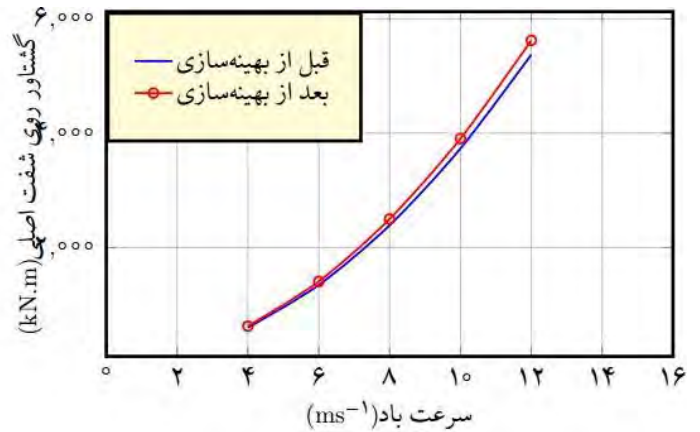
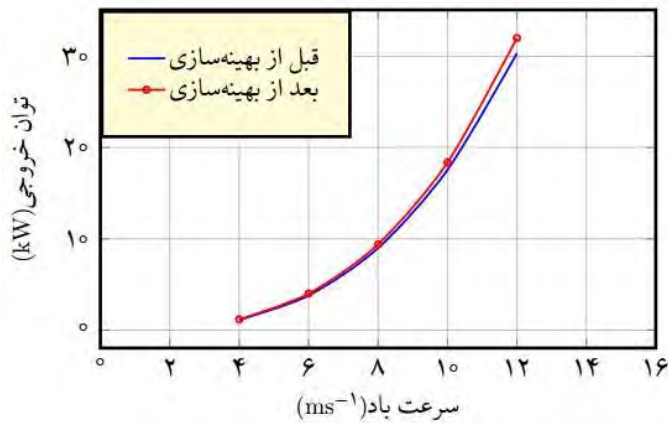
نماد متغیر	حد پایین	حد بالا	مقدار بهینه
x_1	۱	۱/۴	۱/۰۸۷۳۷
x_2	-۱	-۰/۷	-۰/۸۳۷۸۳
x_3	۹۰	۱۳۰	۹۸/۵۹۶

با بکارگیری مقادیر بهینه‌ی فوق در شعاع بهینه، مقدار توان خروجی ۳۲ کیلووات خواهد شد. نمودار شکل ۱۰ مقایسه‌ی توان، گشتاور، توزیع وتر و توزیع پیچش را برای قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقدار توان و گشتاور بعد از بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. همچنین نمودار مربوط به وتر بعد از بهینه کردن در بالای نمودار اولیه قرار می‌گیرد اما در نزدیکی نوک این دو منحنی بسیار به یکدیگر نزدیک می‌شوند. در مورد پیچش نیز، نمودار بعد از بهینه‌سازی در پایین نمودار اولیه قرار خواهد گرفت اما از مقاطع میانی به بعد، دو منحنی بسیار به یکدیگر نزدیک می‌شوند. به دلیل نزدیک بودن نتایج قبل و بعد از بهینه‌سازی، در آخرین مبحث، سه پروفایل دیگر نیز برای تعیین شعاع بهینه بررسی خواهند شد.



همایش سراسری فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵



شکل ۸: مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به بهینه‌سازی توان: (a) توان تولیدی، (b) گشتاور روی شفت اصلی، (c) توزیع توییست، (d) توزیع وتر

۳-۴- بهینه‌سازی انرژی

همان‌طور که گفته شد، در بهینه‌سازی انرژی از بهینه کردن پارامترهای سرعت شروع، جمع‌آوری و طراحی استفاده می‌شود. مقدار انرژی تولیدی سالانه از ضرب تعداد ساعات یک سال در توان میانگین سالانه به دست می‌آید. توان میانگین نیز به صورت حاصل ضرب ضریب ظرفیت در توان نامی به دست می‌آید. جدول ۵ حدود متغیرها و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها و جدول ۶ مقایسه‌ی انرژی بهینه شده با انرژی اولیه در هر شعاع را نشان می‌دهد. نمودار شکل ۹ نیز مقایسه‌ی انرژی تولیدی را قبل و بعد از بهینه‌سازی در سه شعاع نشان می‌دهد.

جدول ۵: قیود و مقادیر بهینه‌ی متغیرها در بررسی انرژی تولیدی

نماد متغیر	حد پایین	حد بالا	مقدار بهینه
x_4	۲/۵	۴/۵	۲/۵۱۴
x_5	۱۲	۱۵	۱۲/۰۲۱۵
x_6	۲۰	۲۷	۲۴/۹۳

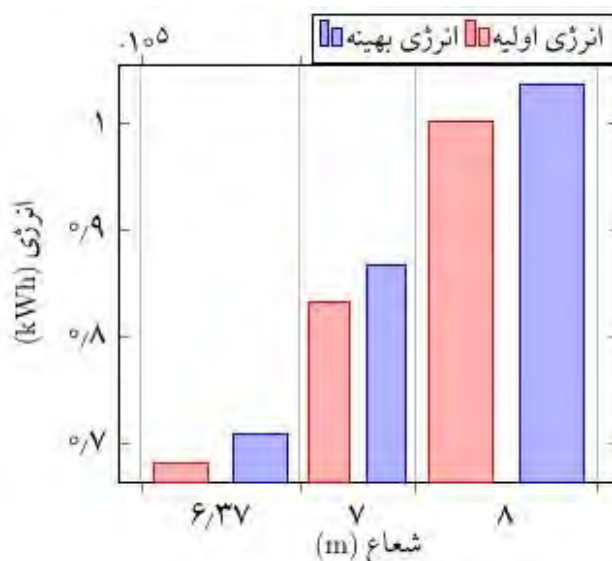


همایش سراسری فناوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵

جدول ۶: مقایسه‌ی انرژی بهینه با مقدار اولیه در شعاع‌های مختلف

شعاع [m]	سرعت اولیه [ms^{-1}]	سرعت بهینه [ms^{-1}]	توان اولیه [kW]	توان بهینه [kW]	انرژی اولیه [kWh]	انرژی بهینه [kWh]	درصد افزایش انرژی
۶/۳۷	۱۲	۱۲/۰۲۱۵	۳۰	۳۰/۱۷۹۸	۶۸۱۲۵	۷۰۹۴۹/۱	٪۳/۹۸
۷	۱۲	۱۲/۰۲۱۵	۳۶/۶۷۹۳	۳۶/۸۷۶۸	۸۳۲۹۲/۵	۸۶۶۹۳	٪۳/۹۲
۸	۱۲	۱۲/۰۲۱۵	۴۴/۱۱۱۵	۴۴/۳۴۹	۱۰۰۱۷۰	۱۰۳۷۰۱	٪۳/۴۰۴



شکل ۹: نمودار ستونی انرژی بهینه شده در مقابل شعاع توربین

۴-۴- مقایسه‌ی چند پروفایل

در این قسمت، برای مقایسه سه پروفایل دیگر نیز برای پره‌ی مدل شده به کار می‌رود و نتایج آن برای توان با یکدیگر مقایسه می‌شوند که شامل S803-S801-S804، S807-S805a-S806a و S808-S805a-S806a هستند. خانواده‌های نامبرده برای شعاع ۵ الی ۱۰ متر که شعاع مورد بررسی است مناسب هستند [۱۳]. جدول ۷ این نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۷: مقایسه‌ی پروفایل‌های مختلف خانواده‌ی ایرفویل

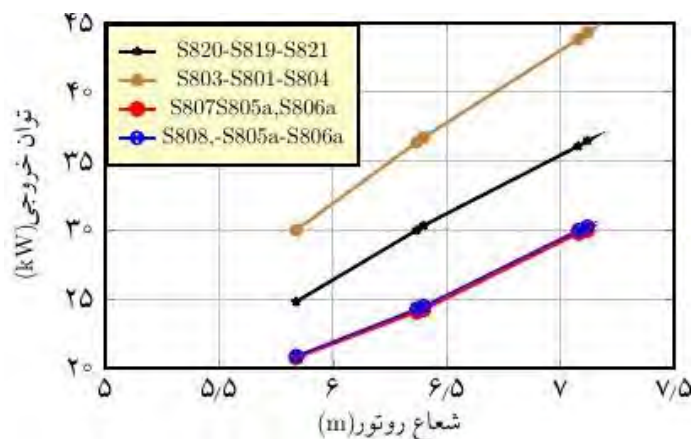
خانواده‌ی ایرفویل ریشه الی نوک	شعاع مبنا [m]	شعاع بهینه [m]	درصد کاهش شعاع
S820-S819-S820	۶/۴	۶/۳۷	٪۰/۴۷
S803-S801-S804	۶/۴	۵/۸۴	٪۸/۷۵
S807-S805a-S806a	۶/۴	۷/۱۲	-٪۱۰/۱۱
S808-S805a-S806a	۶/۴	۷/۰۸	-٪۹/۰۶



همایش سراسر فنآوری و تکنولوژی در مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک

سالن همایش های دانشگاه فرهنگیان استان گلستان ۱۷ آذر ماه ۱۳۹۵

همان طور که از جدول ۷ مشاهده می شود، بهترین جواب پروفایل متشکل از S804-S801-S803 است که موجب کاهش ۸.۷۵٪ در شعاع می شود. نمودار شکل ۱۰ نیز این نتایج را تأیید می کند. همان طور که از نمودار مشخص است، نتایج مربوط به دو خانواده S807-S805a-S806a و S808-S805a-S806a بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و در هر شعاعی مقدار توان با بکارگیری پروفایل متشکل از خانواده S803-S801-S804 بهترین پاسخ را در مقایسه با سایر پروفایل ها ارائه می کند. اگر این پروفایل برای توربین پایه به کار برده شود، در شعاع پایه یعنی ۶/۴ متر، مقدار توان خروجی ۳۶/۷ کیلووات خواهد شد که در مقایسه با مقدار توان توربین پایه در پروفایل مبنای توربین، ۲۲٪ افزایش خواهد داشت.



شکل ۱۰: مقایسه‌ی تأثیر خانواده‌های مختلف ایرفویل NREL بر توان تولیدی

۵- جمع بندی

در این مقاله، توسط کد آیرودینامیکی و بر اساس روش ممنتوم المان پره، یک مدل برای طراحی توربین بادی ایجاد شد. برای یک منطقه با سرعت نامی مشخص، مدل ایجاد شده روی توربین FUHRLANDER FL30 LM 6.1 اعمال شد. ابتدا پروفایل اولیه متشکل از ایرفویل‌های S820-S819-S820 برای این توربین در نظر گرفته شد. نتایج بهینه‌سازی برای شعاع در این توربین نشان داد که پروفایل اولیه ۰/۴۷٪ موجب کاهش شعاع شعاع می شود و بهینه‌سازی توان نیز در شعاع اولیه یعنی ۶/۴ متر، مقدار توان را کمتر از ۲ کیلووات افزایش می دهد. در نتیجه، سه پروفایل دیگر نیز برای مقایسه انتخاب شدند و مشاهده شد که پروفایل متشکل از ایرفویل‌های S803-S801-S804 بهترین تأثیر را برای توربین مورد بررسی خواهد داشت و همچنین با کاهش شعاع به مقدار ۸/۷۵٪ نسبت به ۶/۴ متر که شعاع مبنای است، مقدار توان نامی ۳۰ کیلووات را ایجاد می کند. همچنین با این پروفایل، مقدار توان در شعاع پایه، ۲۲٪ بهبود می یابد. در مورد بهینه‌سازی انرژی نیز مشاهده شد که با انتخاب پارامترهای بهینه‌ی سرعت طراحی، شروع و جمع‌آوری، در هر شعاع، مقدار انرژی تولیدی سالانه افزایش خواهد یافت.

مراجع

[1] Burton, Tony, et al. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2001.

[2] Abedi, Hamidreza. "Aerodynamic loads on rotor blades." (2011).



- [3] Tahani, Mojtaba, Hamid Hosseinzadegan, and Mohsen Moradi. "Comparative Numerical Study of Turbulence Models for Analysis a Commercial HAWT Performance." *American Journal of Renewable and Sustainable Energy* 1.1 (2015): 9-15.
- [4] Glauert, Hermann. *The elements of aerofoil and airscrew theory*. Cambridge University Press, 1983.
- [5] Fuglsang, Peter, and Kenneth Thomsen. Cost optimization of wind turbines for large-scale offshore wind farms. 1998.
- [6] Liu, Xiongwei, Lin Wang, and Xinzi Tang. "Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades." *Renewable Energy* 57 (2013): 111-119.
- [7] Zhu, Wei Jun, Wen Zhong Shen, and Jens Nørkær Sørensen. "Integrated airfoil and blade design method for large wind turbines." *Renewable Energy* 70 (2014): 172-183.
- [8] Tahani, Mojtaba, et al. "Aerodynamic optimal design of wind turbine blades using genetic algorithm." *Energy Equipment and Systems* 2.2 (2014): 185-193.
- [9] Jain, Pankaj, et al. "Optimization of the wind power generation unit using genetic algorithm." *International Journal of Engineering Science and Technology* 4.11 (2012): 4592-4597.
- [10] Johnson, G. L. "Wind energy systems, electronic edition, Manhattan, KS." (2006).
- [11] AHMED, ABD ELMONEM S. "Comparison of Wind Turbine Energy Calculation Methods.
- [12] M. Bencherif ·B. N. Brahmi ·A. Chikhaoui. Optimum Selection of Wind Turbines. *Science Journal of Energy Engineering*.Vol. ۰2 No. ۰4,2014 pp. ۰36-44 doi: 10,11648/j.sjee.20140204,12
- [13] Tangler, J. L., and D. M. Somers. "NREL Airfoil Families for HAWTs." (1995).
- [14] <http://wind.nrel.gov/airfoils/Coefficients/>
- [15] Giguere, P., and M. S. Selig. "Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor." *NREL/SR 500* (1999): 26173.
- [16] Johnson, G. L. "Wind energy systems, electronic edition, Manhattan, KS." (2006).
- [17] Manwell, James F., Jon G. McGowan, and Anthony L. Rogers. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [18] Hansen, Martin OL. *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge, 2015.