



بهینه سازی آیرودینامیکی و شبیه سازی عددی پره سری ال.ام 19 توربین باد محور- افقی 550 کیلوواتی

محمد نیکیان^۱ - جمشید صباغیان^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، قزوین، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، قزوین، ایران

Email: m.nikiyan@tiau.ac.ir

چکیده:

در مطالعه حاضر به بهینه‌سازی پره توربین باد و بررسی پدیده واماندگی بر روی پره سری ال.ام 19 توربین باد 550 کیلوواتی جهت افزایش توان پرداخته شده است. ابتدا، با در نظر گرفتن سه مقطع در ریشه، وسط و نوک پره و ثابت فرض نمودن پارامترهای طول پره، تعداد پره، سرعت زاویه‌ای و سرعت باد، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار مطلب، سه ایرفویل بهینه با زاویه‌های حمله بهینه برای سه مقطع انتخاب می‌شود. از آنجا که واماندگی حاصل جدایش جریان بر روی ایرفویل پره می‌باشد و منجر به لرزش و تخریب آن می‌شود؛ با استفاده از نرم‌افزار فلونتت جریان هوا بر روی ایرفویل‌های بهینه سازی شده و پدیده واماندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نوآوری این مقاله در روند بدست آوردن ایرفویل و زاویه حمله بهینه می‌باشد و نیز بهینه‌سازی بر روی نوع خاصی از پره‌های توربین باد انجام می‌گیرد و پدیده واماندگی بر روی پره‌ی بهینه سازی شده بررسی می‌گردد. نتیجه حاصل از بهینه‌سازی سه ایرفویل بهینه برای سه مقطع ریشه، وسط و نوک پره به ترتیب ایرفویل‌های اف.اف.ا-دبلیو3-211، ناکا63418 و ناکا63421 با زاویه‌های حمله 9، 5 و 3 درجه برای هر یک از آنها بود ولی آنچه از نتایج شبیه‌سازی این سه ایرفویل برآمد وجود جدایش در مسیر جریان ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو3-211 بود که منجر به واماندگی شد. به همین دلیل ایرفویل ناکا63418 با زاویه حمله بهینه 5 درجه که نتایج بهینه سازی آن نزدیک‌تر به ایرفویل قبلی بود به عنوان ایرفویل بهینه برای ریشه انتخاب گردید. توان خروجی پره بهینه سازی شده محاسبه و با توان خروجی پره اولیه مقایسه گردید که افزایش 13.5 درصد در توان توربین بدست آمد.

کلید واژگان: بهینه سازی، پره توربین باد، شبیه سازی، واماندگی، ایرفویل

Aerodynamic optimization and numerical simulation of 550 KW horizontal axial wind turbine LM19 series blade

Mohammad Nikian¹, Jamshid Sabaghiyan²

1-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Takestan, Iran

2-MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Takestan, Iran

†Corresponding Author Email: m.nikiyan@tiau.ac.ir

Abstract:

In the present study, the optimization of wind turbine blade and investigation of stall phenomenon on LM19 Series 550-kW wind turbine blade for enhancement of power has been paid. Firstly, with considering the three sections at root, middle and tip of blade and with considering constant for blade length, number of blade, rotating velocity and wind speed by using of MATLAB code, three optimum airfoil and attack angles for three sections were selected. Since stall is the result of flow separation on the airfoil blade and lead to vibration and damage; by using of FLUENT software air flow and stall phenomenon on optimized airfoil were investigated and analyzed. The innovation of this article is in process of getting of optimum airfoil and attack angle. Optimization on special typical wind turbine blade is done and stall on the optimized airfoil is analyzed result of optimization was three optimum airfoil for three sections at root, middle and tip FFA-W3-211 NACA63418 and NACA63421 with attack angels for them 9, 5 and 3 degrees respectively. But result of simulations was existence of stall on FFA-W3-211. Therefore NACA63418 with attack angle 5 degree that results of its optimization was near of former, as optimum airfoil for root section was selected. Output power of optimization blade was calculated and compared with turbine power. That increment of 13.5 percent it was gained

Keywords: Optimization, wind turbine blade, simulation, exhaust, airfoil

انرژی باد ارزانترین، پاک ترین و مناسب ترین شکل انرژی‌های نو می‌باشد. صنعت انرژی باد منافع اقتصادی و اجتماعی مختلفی را به همراه دارد که از جمله مزایای استفاده از این انرژی عدم نیاز توربین بادی به سوخت، تامین بخشی از تقاضای انرژی برق، کمتر بودن نسبی انرژی باد نسبت به انرژی فسیلی در بلند مدت، تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی، قدرت مانور زیاد در بهره برداری، عدم نیاز به آب و نداشتن آلودگی محیط زیست می‌باشد. صنعت توربین باد پیشرفتی خیره‌کننده داشته است که توربین‌های بادی را قابل اعتمادتر، پربازده تر و ارزانتر می‌نماید. پره توربین باد نقش بسیار مهمی در بازده و توان خروجی یک توربین بادی ایفا می‌کند.

جهت بهینه سازی پره نیاز به تئوری و روش طراحی می‌باشد که در مقاله و کتاب [۱] به تشریح تئوری المان پره، تئوری المان مومنتوم پره و روش طراحی پره توربین باد محور افقی پرداخته است و از این منبع جهت بهینه سازی پره توربین در اینجا استفاده می‌شود. در مقاله [۲]، کاتالوگی از نتایج برای یک محدوده وسیعی از ایرفویل‌های توربین باد ارائه کرده است. این نتایج از شبیه سازی عددی معادله نویر-استوکس تراکم ناپذیر دو بعدی با حل گر الیپ سیستم دوبعدی^۱ بدست می‌آید و با نتایج تجربی و همچنین با کد ایکس فویل^۲، که براساس ترکیب روش صفحه‌ای با فرمولاسیون لایه مرزی ویسکوز مقایسه می‌شود. سرانجام دیتابیس از مشخصات ایرفویل که می‌تواند در طراحی توربین بکار رود فراهم می‌شود. از اطلاعات بکار رفته در مقاله [۳] می‌توان کمک گرفت زیرا در آن یک مرور با جزئیات بیشتر و مدرن بر طراحی پره توربین باد محور افقی، شامل بازده ماکزیمم تئوری، نیرو محرکه پیشران، بازده عملی، طراحی و نیروهای پره مورد بررسی قرار گرفته است. اصول طراحی آیرودینامیکی برای پره توربین باد مدرن، شامل انتخاب ایرفویل و زاویه حمله بهینه، تشریح داده شده است.

در مقاله [۴] از روش بهینه‌سازی آیرودینامیکی ازدحام ذرات برای توربین‌های بادی استفاده شده است. زاویه پیچش، وتر و سه نوع ایرفویل مورد استفاده برای تمام بخش‌های پره‌های توربین بهینه‌سازی شده است. نتایج نشان از حدود ۴ درصد افزایش توان برای توربین می‌باشد.

بخش دوم و هدف دوم مقاله بررسی واماندگی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که از مقاله [۵] می‌توان استفاده کرد چراکه در آن عملکرد آیرودینامیکی توربین باد را در سرعت‌های مختلف وزش باد مورد بررسی قرار گرفته و نیز به بررسی عددی واماندگی دینامیکی حول ایرفویل‌ها پرداخته شده است. در مقاله [۶] بهینه سازی توزیع وتر و زاویه پیچش پره توربین باد محوری-افقی به منظور ماکزیمم کردن تولید انرژی سالانه^۳ انجام گرفته است و نتایج حاکی از افزایش ۸.۵۱ درصد در نرخ تولید انرژی سالانه می‌باشد. در مقاله [۷] تاثیر اندازه توربین روی ویژگی‌های آیرودینامیکی پره روتور به کمک شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است و نتایج نشان داد که گشتاور با توان سوم تغییرات قطر روتور و نیروهای آیرودینامیکی و تراست با توان دوم تغییرات قطر روتور افزایش می‌یابد. کاستلی تاثیر تعداد پره را روی عملکرد توربین بادی عمود محور با پره مستقیم بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که بازدهی این نوع توربین با سه پره نسبت به انواع چهار یا پنج پره بالاتر است [۸]. جهت دستیابی به مفاهیم توربین باد، استفاده از کتاب توربین‌های باد نوشته [۹] می‌باشد که به مفاهیم اساسی انرژی باد، آیرودینامیک پره، نیروها و تنش‌ها و ارتعاشات توربین باد، توان خروجی و انرژی، سیستم الکتریکی و کنترلی، تاثیرات محیط و هزینه توربین باد پرداخته است. برای بهینه سازی و طراحی آیرودینامیکی توربین باد می‌توان از روش بکار رفته در مقاله [۱۰] استفاده نمود زیرا در این مقاله که به طراحی آیرودینامیکی پره توربین باد پرداخته است و پارامترهای آیرودینامیکی (ضرایب برا و پسا) حاصل از معادلات تئوری المان مومنتوم را با نتایج شبیه سازی^۴ مورد مقایسه قرار داده است. همچنین جدایش جریان در ریشه پره مشاهده شده است. جهت شبیه سازی پره توربین باد نیز می‌توان از مقاله [۱۱] که به بررسی مشخصه‌های آیرودینامیکی پره توربین باد محور-افقی و نیز به شبیه سازی دوبعدی بر ایرفویل اس ۸۰۹ پره به کمک نرم افزار فلونت جهت یافتن مناسب ترین مدل محاسباتی پرداخته‌اند. و همچنین از روشی که در مقاله [۱۲] جهت آنالیز عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل اس ۴۱۴ توربین باد به کمک فلونت شبیه سازی شده است، می‌توان کمک گرفت. بررسی نتایج عددی در حالت دوبعدی و نیز سه بعدی نشان داد که مدل توربولانسی اسپالارت-آلماراس برای پیش بینی عملکرد آیرودینامیکی موثر و مفید می‌باشد. در گزارش دیگر

³ -AEP

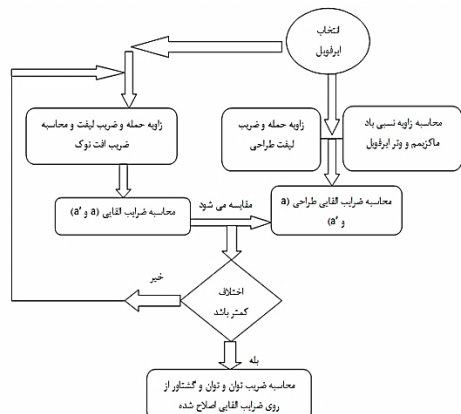
⁴ -CFD

¹ -EllipSys2D

² -XFOIL

توربین حاضر متعلق به واحد ۱ رودبار واقع در سایت نیروگاه منجیل می‌باشد که مشخصات آن که از سایت نیروگاه منجیل برگرفته شده است، در جدول ۱ آمده است. همچنین نسبت سرعت نوک پره و نوع ایرفویل‌های بکار رفته در این نوع توربین به کمک مرجع [۲] قابل استخراج است. نسبت سرعت نوک پره (λ) برابر ۷ و نوع ایرفویل بکاررفته در روتور از سری ناکا **۶۳۴ و اف.اف.۱- دلبیو ۳ می‌باشد. با استفاده از آنالیز المان مومنتوم هر عضوی که در هر نسلی تولید می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ضریب توان موثر آن تعیین شود. هنگامی که یک ضریب توان موثر بیشتری دارد،

جدول (۱) مشخصات توربین باد واحد ۱ رودبار برای نسل بعدی نگه داشته می‌شود. پارامترهای مختلفی که در آنالیز المان مومنتوم مشارکت دارند و می‌توانند در فرآیند بهینه‌سازی وارد شوند عبارتند از قطر توربین، تعداد پره، طول وتر، پیچش پره، زاویه نسبی باد، زاویه حمله و نوع ایرفویل‌ها. در این تحقیق نوع ایرفویل‌ها و زاویه حمله به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. جهت یافتن ایرفویل و زاویه حمله بهینه از الگوریتم شکل ۱ استفاده می‌شود که بدین صورت است که ابتدا یک ایرفویل به عنوان حدس اولیه انتخاب می‌شود و ضرایب القایی محوری و زاویه‌ای محاسبه می‌شود و سپس برای لحاظ نمودن افت نوک پره به کمک روابطی که در الگوریتم آمده است برای زاویه‌های حمله مختلف ضرایب القایی جدیدی حاصل می‌شود که ضرایب القایی جدید با ضرایب القایی طراحی مقایسه می‌شوند هر کدام اختلاف کمتری داشته باشند به عنوان زاویه حمله بهینه در نظر گرفته می‌شود. همچنین به کمک این ضرایب می‌توان ضریبی که در ضریب توان موثر می‌باشد را محاسبه کرد. ایرفویل‌های دیگر را نیز جداگانه طبق این الگوریتم طراحی نموده و ضریب توان موثر بدست می‌آید و سپس با مقادیر ایرفویل‌های دیگر مقایسه می‌شود هر کدام که مقدار بیشتری داشته باشد ایرفویل بهینه می‌باشد. شکل (۱) الگوریتم حل بهینه‌سازی پره توربین باد



که توسط محمد ساعد و همکاران انجام شده است، به شبیه‌سازی آیرودینامیکی دو بعدی پروفایل‌های پره توربین باد با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته‌اند که در آن عملکرد ایرفویل‌های مختلف پره در چندین سرعت باد بررسی شده است و ایرفویل بهینه برای پره در هر سرعت باد براساس ماکزیمم نسبت پرواز (نسبت برا به پسا) و در نتیجه ماکزیمم توان، بدست آمد. علاوه بر آن بهینه زاویه حمله برای هر پروفیل پره محاسبه شد [۱۳].

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی مقطع پره توربین باد از لحاظ آیرودینامیکی و بررسی جریان و نیز پدیده استال بر روی مقطع پره سری ال.ام ۱۹ توربین باد ۵۵۰ می‌باشد. پره توربین باد ترکیبی از چند ایرفویل می‌باشد؛ نوع ایرفویل بکار رفته در این توربین از سری ناکا **۶۳۴ و اف.اف.۱- دلبیو ۳ می‌باشد. ابتدا در بخش اول، اطلاعات این نوع ایرفویل-ها جمع‌آوری و سپس با در نظر گرفتن سه مقطع در ریشه، وسط و نوک پره با استفاده از کدنویسی در نرم افزار مطلب^۵، سه ایرفویل بهینه با زوایای حمله بهینه برای سه مقطع انتخاب می‌شود. سپس توان خروجی پره‌ی بهینه‌سازی شده محاسبه و با توان خروجی پره اولیه مقایسه می‌شود. هدف از بهینه‌سازی یافتن ایرفویل و زاویه حمله بهینه برای سه ارتفاع نوک، وسط و ریشه پره جهت حصول میزان توان بیشتر می‌باشد. در این بهینه‌سازی طول پره، سرعت زاویه‌ای، تعداد پره و سرعت باد ثابت فرض می‌شود و نوع ایرفویل و زاویه حمله متغیرهای هدف و معیار بهینه‌سازی بیشترین ضریب توان و در نتیجه بیشترین توان می‌باشد. از آنجا که واماندگی حاصل جدایش جریان بر روی ایرفویل پره می‌باشد و منجر به لرزش و تخریب آن می‌شود؛ در بخش بعد، بررسی پدیده واماندگی بر روی ایرفویل‌های بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. در بررسی واماندگی نیز از نوع حلگر اسپالارت آماراس و به صورت دوبعدی توسط نرم افزار فلونت نت انجام می‌شود که ایرفویل‌های بهینه‌سازی شده با زاویه حمله بهینه در آن شبیه‌سازی می‌شود و جریان حول ایرفویل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورت وجود جدایش جریان، خطر واماندگی وجود دارد که بایستی در انتخاب آن ایرفویل تجدید نظر شود. نوآوری این مقاله در روند بدست آوردن زاویه حمله و ایرفویل بهینه می‌باشد و اینکه بهینه‌سازی بر روی نوع خاصی از پره‌های توربین باد انجام می‌گیرد و پدیده واماندگی بر روی پره بهینه‌سازی شده به کمک نرم‌افزار فلونت نت شبیه‌سازی انجام می‌گردد.

۲- بهینه‌سازی:

⁵ -Matlab

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4f \sin^2(\varphi_{i,opt})}{\sigma_i C_{Ldesign,i} \cos(\varphi_{i,opt})}} \quad (10)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4f \cos(\varphi_{i,opt})}{\sigma_i C_{Ldesign,i}} - 1} \quad (11)$$

حال ضرایب القایی بدست آمده برای هر زاویه حمله را با ضرایب القایی محوری و زاویه ای طراحی مقایسه و آن زاویه حمله ای که ضرایب القایی آن اختلاف کمتری با طراحی دارد به عنوان زاویه حمله بهینه خواهد بود.

با در نظر گرفتن رابطه ۱۲ که رابطه ضریب توان با احتساب ضریب افت نوک می باشد و نیز از آنجایی که در این حلقه متغیرهای نسبت سرعت نوک و نسبت سرعت نوک محلی برای یک ایرفویل ثابت می باشد؛ بنابراین کفایت رابطه ۱۳ که به ضریب توان موثر شناخته شده است برای هر ایرفویل محاسبه شود. لازم به ذکر است متغیرهای این رابطه مربوط به زاویه حمله بهینه می باشد و برای هر ایرفویل ضریب توان موثر محاسبه می گردد.

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda f \lambda_i^3 a' (1-a) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \varphi \right] d\lambda_i \quad (12)$$

$$CF_P = fa'(1-a) \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \tan(\varphi) \right) \quad (13)$$

این روند حل برای سه ارتفاع ریشه، وسط و نوک پره انجام می شود و برای هر بخش یک ایرفویل و زاویه حمله بهینه بدست می آید. ریشه ی پره در ۲۰٪ ابتدای پره در نظر گرفته می شود (۴.۱ متر). بخش دوم پره وسط آن است که ناحیه ای میان ریشه و نوک است (۱۰.۲۵ متر). مقطع انتخابی از وسط پره در ۵۰٪ از شعاع پره قرار می گیرد. ناحیه سوم پره، نوک است که در ۵٪ پایانی پره قرار دارد (۱۹.۴۷۵ متر). سپس ضریب توان کل از رابطه ۱۲ و نیز توان از رابطه ۱۴ محاسبه می شود و با ضریب توان و توان خروجی توربین مقایسه می شود.

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho U_\infty^3 A \quad (14)$$

ایرفویل هایی که مورد بررسی قرار می گیرند از جمله ایرفویل هایی هستند که در توربین باد بکار می روند [۱۲] و همانطور که گفته شد در این نوع توربین باد از ایرفویل های سری ناکا ***۶۳۴ و اف.اف.۱- دلبلیو۳ بکار می رود. در جدول ۲ لیست ایرفویل های مورد بررسی آورده شده است.

۱-۲- نتیجه بهینه سازی:

ضرایب تاثیر توان برای هر ایرفویل در سه ارتفاع ریشه،

توان اسمی توربین (کیلووات)	قطر روتور	تعداد پره	نوع روتور
۵۵۰	۴۱	۳	ال.ام.۱۹

در این بهینه سازی ابتدا زاویه بهینه نسبی باد به کمک رابطه ۱ بدست می آید.

$$\phi_{i,opt} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_i} \right) \quad (1)$$

که در آن λ_i از رابطه ۲ بدست می آید.

$$\lambda_i = \lambda \frac{r_i}{R} \quad (2)$$

طول وتر پره در هر مقطع انتخابی با توجه به رابطه ۳ محاسبه می شود که توسط ویلسون و لیسامان بدست آمده است [۱۴]. توزیع زاویه گام در هر مقطع انتخابی با توجه به رابطه ۴ بدست می آید.

$$c_i = \frac{8\pi r_i (1 - \cos \varphi_{i,opt})}{BC_{Ldesign}} \quad (3)$$

$$(\theta_p)_i = \varphi_{i,opt} - (\alpha_{Ldesign})_i \quad (4)$$

در نهایت دو پارامتر ضریب القای محوری و زاویه ای طراحی به ترتیب با توجه به دو رابطه ۵ و ۶ بدست می آیند.

$$a_{design} = \frac{1}{1 + \frac{4 \sin^2(\varphi_{i,opt})}{\sigma_i C_{Ldesign} \cos(\varphi_{i,opt})}} \quad (5)$$

$$a_{design} = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (6)$$

که

$$\sigma_i = \frac{Bc_i}{2\pi r_i} \quad (7)$$

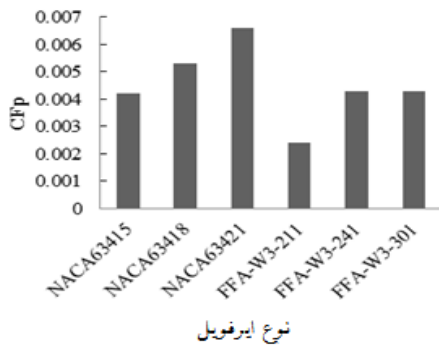
روابط ۱ الی ۶ طرح اولیه ی پره را ارائه می دهند. در این طرح اثر افت نوک در نظر گرفته نشده است. بنابراین جهت اصلاح طرح نهایی روابط ۸ الی ۱۱ طی می شود. این روابط برای زاویه های حمله مختلف در حلقه تکرار قرار می گیرد و ضرایب القایی جدیدی محاسبه و با ضرایب القایی طراحی که برای هر ارتفاع مقداری ثابت می باشد مقایسه می شود هر کدام که اختلاف کمتری از ضرایب القایی طراحی داشته باشد زاویه حمله بهینه می باشد.

اثر افت نوک پره با توجه به رابطه ۹ محاسبه می شود.

$$\varphi_i = (\theta_p)_i + \alpha_i \quad (8)$$

$$f = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left(-\frac{\frac{B}{2} \left(1 - \frac{r_i}{R} \right)}{\frac{r_i}{R} \sin(\varphi_i)} \right) \right) \quad (9)$$

مقدار ضریب نیروی القایی محوری و ضریب نیروی القایی القایی به ترتیب از رابطه ۱۰ و ۱۱ بدست می آید.



شکل (۴) نمودار ضریب توان موثر برحسب نوع ایرفویل برای مقطع سوم

نوع ایرفویل	ردیف
ناکا ۶۳۴۱۵	۱
ناکا ۶۳۴۱۸	۲
ناکا ۶۳۴۲۱	۳
اف.ا.ف. ۱-۳-۲۱۱	۴
اف.ا.ف. ۱-۳-۲۴۱	۵

جدول (۲) ایرفویل‌های بکار رفته در فرایند بهینه‌سازی

مقطع سوم	مقطع دوم	مقطع اول	
۱۹.۴۷۵	۱۰.۲۵	۴.۱	شعاع مقطع (متر)
۰.۶۲۰۸	۱.۵۵۱۳	۲.۴۱۲۴	طول وتر (متر)
۴۰۸۰۰۰	۱۰۲۰۰۰۰	۱۵۸۶۰۰۰	عدد رینولدز
ناکا ۶۳۴۲۱	ناکا ۶۳۴۱۸	اف.ا.ف. ۱-۳-۲۱۱	ایرفویل بهینه
۳	۵	۹	زاویه حمله بهینه

جدول (۳) مشخصات ایرفویل‌های بهینه سازی شده

۳- شبیه سازی:

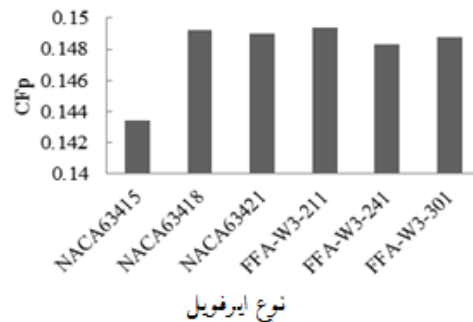
در این بخش به مدلسازی و شبیه‌سازی دو بعدی ایرفویل-های بهینه شده پرداخته می‌شود. پیش از انجام شبیه سازی عددی ابتدا ایرفویل‌ها در نرم افزار گمبیت مدلسازی می‌شوند. طول دامنه محاسباتی برای اینکه جریان هوا کاملا در این دامنه توزیع شود، ۳۲.۵ برابر طول وتر و عرض آن ۲۵ برابر وتر در نظر گرفته شده است (شکل ۵). شبکه بندی از نوع مربعی و نیز شامل ۸۰۰۰۰ سلول چهار وجهی می‌باشد. در اطراف سطح ایرفویل بدلیل وجود گرادیان فشار در لایه مرزی، شبکه بندی ریزتر می‌باشد و مقدار y^+ برابر ۰.۴۳ می‌باشد ولی چون گرادیان فشار در نواحی دورتر به سمت صفر میل

وسط و نوک پره که نتایج حاکی از کدنویسی در مطلب می باشد در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ آمده است.

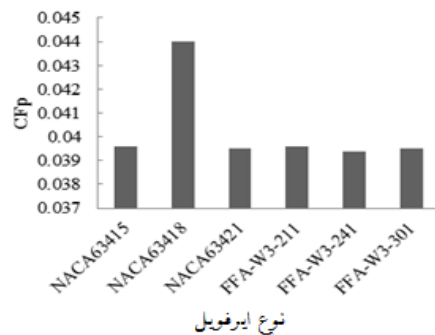
ایرفویل بهینه، ایرفویلی می‌باشد که بیشترین ضریب تاثیر توان را داشته باشد. بنابراین ایرفویل بهینه در ریشه پره اف.ا.ف. ۱-۳-۲۱۱ و زاویه حمله بهینه آن ۹ درجه، در وسط پره ناکا ۶۳۴۱۸ و زاویه حمله بهینه ۵ درجه و در نوک پره ناکا ۶۳۴۲۱ و زاویه حمله بهینه آن برابر ۳ درجه می‌باشد. در جدول ۳ مشخصات ایرفویل بهینه شده آمده است.

از رابطه ۱۵ برای محاسبه ضریب توان استفاده می‌شود. که بدست می‌آید. ضریب توان برای توربین مورد بررسی نیز از رابطه توان (رابطه ۱۴) برابر ۰.۶۸۰۱۴ بدست می‌آید. بدین ترتیب ضریب توان بهینه سازی شده ۱۳.۵ درصد افزایش می‌یابد و توان نیز ۱۳.۵ درصد افزایش می‌یابد و به ۶۲۴ کیلو وات می‌رسد.

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \left(\int_0^{1.4} C_{Fp,root} \lambda_r^3 d\lambda_r + \int_{1.4}^{3.5} C_{Fp,mid} \lambda_r^3 d\lambda_r + \int_{3.5}^{6.65} C_{Fp,tip} \lambda_r^3 d\lambda_r \right) \quad (15)$$



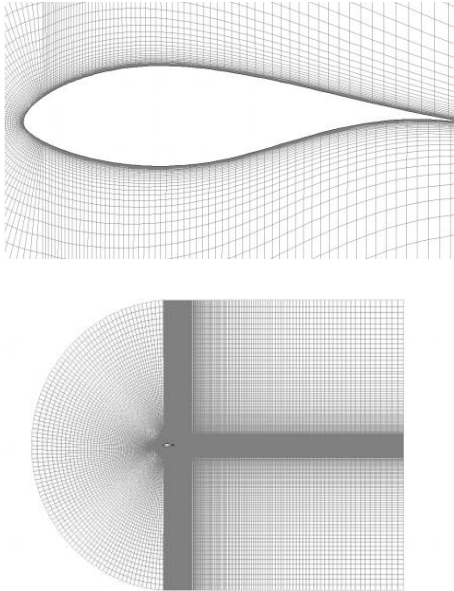
شکل (۲) نمودار ضریب توان موثر برحسب نوع ایرفویل برای مقطع اول



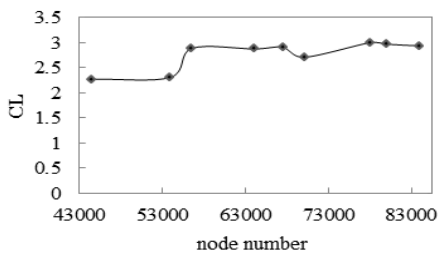
شکل (۳) نمودار ضریب توان موثر برحسب نوع ایرفویل برای مقطع دوم

توجه به افزایش تعدادشان پس از ۷۸۰۰۰ عدد تغییر محسوسی در

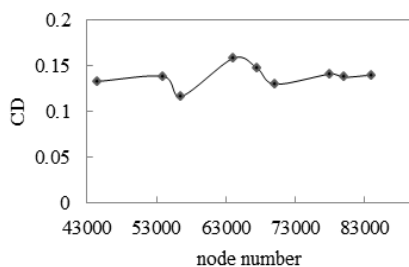
نتایج ایجاد نمی کند. بنابراین با توجه به بررسی صورت گرفته، شبکه‌ای با ۸۰۰۰۰ گره انتخاب می گردد.



شکل (۶) شبکه بندی اطراف ایرفویل



شکل (۷) نمودار ضریب برا براساس تعداد گره‌ها مربوط به ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱



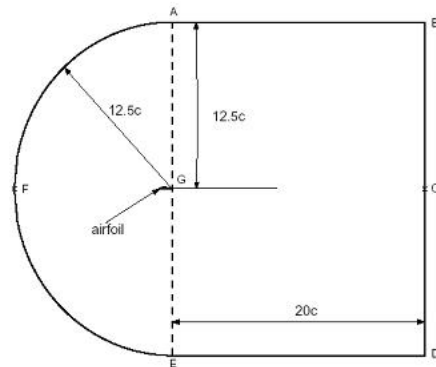
شکل (۸) نمودار ضریب پسا براساس تعداد گره‌ها مربوط به ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱

۲-۳- نتایج شبیه سازی:

با توجه به نتایج شبیه سازی ایرفویل‌ها در هر مقطع چنین نتیجه می شود که در مقطع اول ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱ بدلیل وجود واماندگی در جریان حول آن مناسب نمی باشد

می کند بنابراین شبکه بندی در این نواحی درشت تر در نظر گرفته شده

است (شکل ۶). از شرط مرزی پشر-فار-فیلد^۶ استفاده شده- است زیرا دامنه حل به اندازه کافی بزرگ می باشد. عدد ماخ ۰.۲۹ در نظر گرفته شده زیرا عدد ماخ از نسبت سرعت باد به سرعت صوت بدست می آید که در اینجا به ترتیب برابر ۱۰ و ۳۴۴.۸ متر بر ثانیه می باشد. همچنین زاویه حمله برای این ایرفویل ۹ درجه می باشد.



شکل (۵) دامنه محاسباتی توسط شبکه بندی سازمان یافته

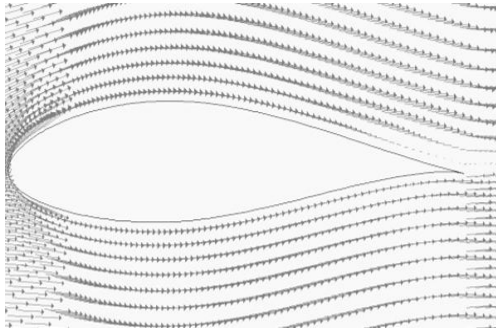
دما ۳۰۰ کلوین و نیز فشار ۱۰۱۳۲۵ پاسکال در نظر گرفته شده است. ایرفویل با شرط دیواره ثابت و بدون تنش لغزشی در نظر گرفته شده است. شبیه سازی دو بعدی می باشد و به کمک نرم افزار فلوئنت انجام می شود. مدل توربولانسی، مدل اسپالارت-آلماراس^۷ بکار گرفته شده است؛ زیرا این مدل به طور خاص برای کاربردهای هوا فضا طراحی شده است و نیز نتایج خوبی برای لایه مرزی با گردایان معکوس و جدایش ارائه می دهد. همچنین بررسی های که لی جون و سانگ ونلانگ نشان داده است که این مدل توربولانسی برای پیش بینی عملکرد آیرودینامیکی موثر و مفید می باشد [۱۲].

۱-۳- استقلال شبکه:

در هر تحلیل و بررسی عددی، تبدیل کردن فضای محاسباتی به فضایی مستقل از شبکه یک مورد الزامی است. در بررسی استقلال از شبکه، شبکه هایی با تعداد گره های متفاوت برای هر ایرفویل بهینه سازی شده مورد آزمایش قرار می گیرد و ضرایب برا و پسا بررسی می گردد. پس از شبیه سازی ایرفویل برای تعداد گره های مختلف، مقادیر ضریب برا و پسا از نمودار برا و پسا استخراج می شود و تعداد گره قابل قبول در محدوده ای می باشد که مقادیر ضرایب برا و پسا هردو ثابت باشند. شکل های ۷ و ۸ نشان می دهد که تغییرات تعداد گره با

^۶ -Pressure-far-field

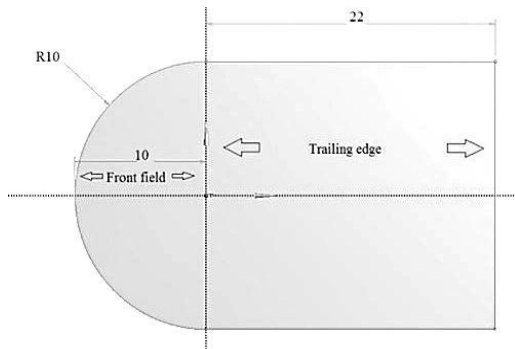
^۷ -Spalart-Allmaras



شکل (۱۲) بردار سرعت بر روی ایرفویل ناکا ۶۳۴۲۱ با زاویه حمله ۳ درجه برای مقطع سوم

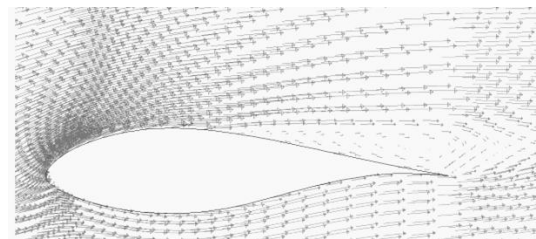
۳-۳- اعتبارسنجی:

در شبیه‌سازی دوبعدی روی پره توربین باد جهت یافتن زاویه حمله بهینه که توسط محمد ساعد و همکاران [۱۳] انجام گرفته است از شبکه بندی نوع C استفاده شده است ولی از نوع مش مثلثی می‌باشد و از شرط مرزی دیواره ساکن برای ایرفویل در نظر گرفته شده است (شکل ۱۳ الف). دامی هو [۱۵] نیز جهت بررسی استال از این نوع شبکه بندی استفاده کرده است و از شرط مرزی دیواره ساکن و فار فیلد کمک گرفته است (شکل ۱۳ ب). در اینجا نیز جهت شبیه‌سازی ایرفویل‌ها از این نوع شبکه بندی (نوع C و مربعی) و نیز از شرط مرزی دیواره ساکن و فار فیلد بکار گرفته شده است. (شکل ۱۳ ج). در بررسی استال نیز می‌توان از بردارهای سرعت جهت نمایش مسیر حرکت و نقطه جدایش استفاده کرد همان‌گونه که در بررسی استال توسط دامی هو و همکاران در شکل ۱۴ الف ملاحظه می‌شود بردار سرعت از مسیر خود منحرف شده و تولید گردابه در ادامه مسیر می‌کند در اینجا نیز استال دستخوش وجود جدایش جریان بر روی ایرفویل بوده و منجر به پیدایش یک گردابه در ادامه مسیر شده است (شکل ۱۴ ب).

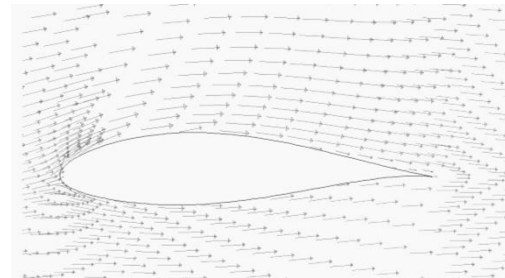


شکل (۱۳-الف) دامنه محاسباتی جهت شبیه‌سازی دوبعدی (محمد ساعد و همکاران) [۱۳]

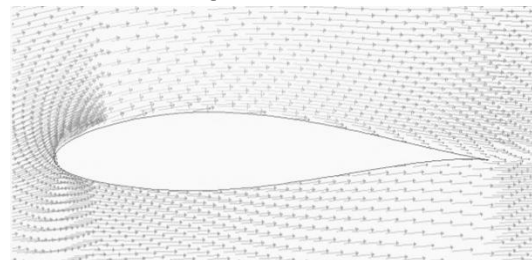
(شکل ۹). بنابراین ایرفویل ناکا ۶۳۴۱۸ که پس از آن دارای ضریب توان بالاتری می‌باشد از شکل ۳ با زاویه حمله بهینه ۵ درجه برای این مقطع انتخاب می‌شود تا از نظر وجود واماندگی مورد بررسی گردد که بررسی‌ها حاکی از عدم وجود جدایش جریان در این ایرفویل می‌باشد (شکل ۱۰) بنابراین ایرفویل ناکا ۶۳۴۱۸ برای این مقطع قابل قبول خواهد بود. برای مقطع دوم نیز ایرفویل ناکا ۶۳۴۱۸ از نظر بررسی جریان مورد قبول می‌باشد و جدایش در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۱) بنابراین این ایرفویل برای مقطع دوم قابل قبول خواهد بود. در بررسی جریان حول ایرفویل بهینه مربوط به مقطع سوم، نتایج حاکی از عدم وجود جدایش می‌باشد (شکل ۱۲) و برای مقطع سوم مناسب می‌باشد.



شکل (۹) بردار سرعت در روی ایرفویل اف اف ا-۱ دبل یو ۳-۲۱۱ با زاویه حمله ۹ درجه برای مقطع اول



شکل (۱۰) بردار سرعت در روی ایرفویل ناکا ۶۳۴۱۸ با زاویه حمله ۵ درجه برای مقطع اول



شکل (۱۱) بردار سرعت بر روی ایرفویل ناکا ۶۳۴۱۸ در مقطع دوم با زاویه حمله ۵ درجه برای مقطع دوم

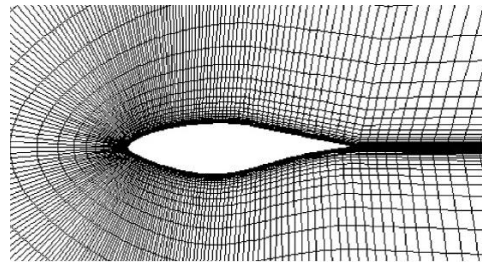
پس از شبیه سازی ایرفویل‌ها در هر مقطع چنین نتیجه شد که در مقطع اول، ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱ بدلیل وجود واماندگی به عنوان ایرفویل بهینه مناسب نمی‌باشد. بنابراین ایرفویل ناکا۶۳۴۱۸ برای این مقطع انتخاب شد تا از نظر وجود واماندگی مورد بررسی گردد که بررسی‌ها حاکی از عدم وجود جدایش جریان در این ایرفویل بود. برای مقطع دوم نیز ایرفویل ناکا۶۳۴۱۸ از نظر بررسی جریان مورد قبول بود و جدایش در آن مشاهده نشد. در بررسی جریان حول ایرفویل بهینه مربوط به مقطع سوم، نتایج حاکی از عدم وجود جدایش بود و بنابراین برای مقطع سوم مناسب می‌باشد. بنابراین ایرفویل‌های ناکا ۶۳۴۱۸، ناکا ۶۳۴۱۸ و ناکا ۶۳۴۲۱ با زوایای حمله ۵، ۳ و ۵ درجه به ترتیب برای مقطع‌های اول، دوم و سوم انتخاب گردید.

در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، ضریب توان توربین برابر ۰.۶۸۰۴ بدست آمد که بدین ترتیب ضریب توان بهینه‌سازی شده ۱۳.۵ درصد افزایش یافت و در نتیجه توان نیز ۱۳.۵ درصد افزایش و به ۶۲۴ کیلووات رسید.

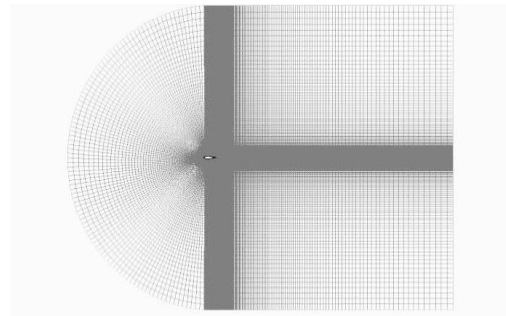
در بررسی استقلال از شبکه، شبکه‌هایی با تعداد گره‌های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. بطوری که تغییرات تعداد شبکه بندی با توجه به افزایش تعدادشان تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی‌کند.

۵- فهرست نمادها:

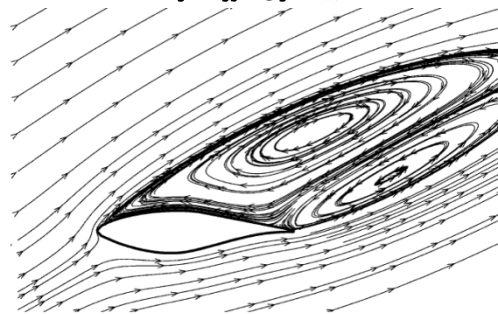
مساحت پره (m^2)	A
ضریب القایی محوری	a
ضریب القایی زاویه ای	a'
تعداد پره	B
ضریب پسا	C_D
ضریب برا	C_L
ضریب برا طراحی	$C_{Ldesign}$
ضریب توان	C_P
ضریب توان موثر	C_{FP}
ضریب افت نوک	f
توان (Kw)	P
شعاع پره (m)	R
شعاع محلی (m)	r
سرعت باد (ms^{-1})	U_{∞}
علائم یونانی	α
زاویه حمله	α
زاویه حمله طراحی	α_{design}



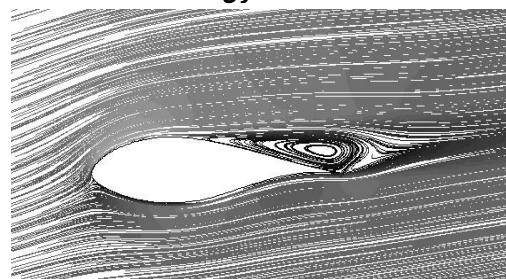
شکل (۱۳-ب) شبکه بندی اطراف ایرفویل اس-۸۰۹ از نوع C و مربعی (دامی هو). [۱۵]



شکل (۱۳-ج) شبکه بندی اطراف ایرفویل اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱ در شبیه سازی صورت گرفته



شکل (۱۴-الف) وجود استال بر روی ایرفویل اس-۸۰۹ (دامی هو و همکاران) [۱۵]



شکل (۱۴-ب) وجود استال بر روی ایرفویل اف.اف.ا.دبلیو ۲۱۱-۳

۴- نتیجه گیری:

ایرفویل‌های بهینه که دارای بیشترین ضریب توان را داشتند مشخص شدند که ایرفویل بهینه در ریشه پره اف.اف.ا-دبلیو۳-۲۱۱ و زاویه حمله بهینه آن ۹ درجه، در وسط پره ناکا ۶۳۴۱۸ و زاویه حمله بهینه ۵ درجه و در نوک پره ناکا ۶۳۴۲۱ و زاویه حمله بهینه آن برابر ۳ درجه بدست آمد.

11. R. Belamadi, R. Mdouki, A. Ilinca and A. Djemili, "CFD Study of a Horizontal Axis Wind Turbine NREL Phase II", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 18, No.4, pp.683 – 700, 20-15.

12. L. Jun and S. Wenlong, "Numerical Simulation on Wind Turbine Airfoil Aerodynamics Performance", *international journal of control and automation*, Vo.19, No.12, pp 275-276, 2016.

13. A. Sayed Mohamed, A. Kandil Hamdy, A. Shaltot, "Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method", *Elsevier, Energy Conversion and Management*, 541-550, 2012.

14. R.E. Wilson, P.B Lissaman, "Applied aerodynamics of wind power machines", *Oregon State University*, 1974.

15. D. Hu, O. Hua, Zh. Du, "A study on stall-delay for horizontal axis wind turbine", *Elsevier*, Vol.31, No.6, pp. 821-836, 2006.

✓	عنوان مقاله
✓	اسامی و عنوان نویسندگان
✓	آدرس نویسندگان (شماره تلفن و نمابر)
✓	چکیده فارسی
✓	مقدمه
✓	بدنه اصلی مقاله
✓	نتیجه گیری
✓	سپاسگزاری (در صورت نیاز)
✓	فهرست نمادها
✓	مراجع
✓	چکیده انگلیسی

زاویه نسبی باد	φ
نسبت سرعت نوک	λ
زاویه گام پره	θ_p
چگالی (kgm^{-3})	ρ
شمارنده هر مقطع	i
بهینه	opt
	۶- مراجع:

1. K. Emrah, "Aerodynamics of Wind Turbines", *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, ISBN: 978-953-307-508-2, pp.1-18, 2011.

2.F. Bertagnolio, N. S_rensen, J. Johansen, and P. Fuglsang, "Wind Turbine Airfoil Catalogue", *Aeroelastic Design Wind Energy Department*, Ris_ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001.

3. Schubel, J. Peter, and Crossley, J. Richard, "Wind turbine blade design", *Energies*, Vol.5, No.9, pp.3425-3449, 2012.

4. A. Nejat, H.R. Kaviani, "Aerodynamic Optimization of a Megawatt Class Horizontal Axis Wind Turbine Blade with Particle Swarm Optimization Algorithm", *Modares Mechanical Engineering*, Vol.16, No.11, pp.1-11, 2016.

5. W. Shengyi, B. Ingham, M. Derek, Lin, M. Pourkashanian, and Z. Tao, "Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils", *Computers & Fluids*, Vol.39, No. 9, pp.1529-1541, 2011.

6. A. Hassanzadeh, A. Hassanzadeh Hassanaabad, and A. Dadvand, "Aerodynamic shape optimization and analysis of small wind turbine blades employing the Viterna approach for post-stall region", *Alexandria Engineering Journal*, Vol.55, No.3, pp.2034-2043, 2016.

7. M.H. Giahi, and A. Jafarian Dehkordi, "Investigating the influence of dimensional scaling on aerodynamic characteristics of wind turbine using CFD simulation", *Renewable Energy*, Vol. 97, pp.162-168, 2016.

8. M.R. Castelli, "Effect of Blade Number on a Straight- Bladed Vertical-Axis Darreius Wind Turbine", *World Academy of Science*, Vol.61, 2012.

9. E. Hau, "Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics", *Springer*, Germany, pp.669-675, 2006.

10. Ch.J. Bai, P.W. Chen, W.Ch. Wang, "Aerodynamic Design And Analysis of a 10 kW Horizontal-axis Wind Turbine For Tainan Taiwan", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Vol.18, No.4, pp.1151-1166, 2016.